

ISSN : 1979-8415

Jurnal Teknologi

TECHNOSCIENTIA

vol. 2 No. 1 Agustus 2008



DAFTAR ISI

Ant-Wum: Algoritma Berbasis Ant Colony Optimization untuk <i>Web Usage Mining</i> <i>Abdurrahman, Bambang Riyanto T., Rila Mandala, Rajesri Govindaraju</i>	001 - 012
Peningkatan Efektivitas Penyajian <i>Search Result</i> dari Sistem Temu Kembali Informasi Menggunakan Clustering Dokumen <i>Amir Hamzah</i>	013 - 020
Peramalan Kapasitas Baterai Pada Kendaraan Listrik Dengan Metoda Coulometri <i>Bambang Sri Kaloko</i>	021 - 029
Analisis Perlakuan Panas <i>Normalising</i> pada Pengelasan Argon terhadap Sifat Mekanik Hasil Lasan Baja Karbon Rendah <i>Basuki Widodo</i>	030 - 041
Penyelesaian Arus Peralihan Rangkaian Seri R-L dengan Tegangan Arus Searah Berbasis Matlab <i>Dwi Setyowati</i>	042 - 049
Dekomposisi Tugas-Tugas <i>Software-Defined Radio</i> (SDR) <i>Eko Marpanaji</i>	050 - 060
Perilaku Korosi pada Sambungan Plat Pembentuk Bodi Mobil <i>Ellyawan S. Arbintarso</i>	061 - 069
Analisis Pengendalian Kualitas dan Efektivitas Dengan Integrasi Konsep Failure Mode & Effect Analysis dan Fault Tree Analysis serta Overall Equipment Effectiveness <i>Joko Susetyo</i>	070 - 077
Analisis Resistansi Pentanahan Sebagai Upaya Untuk Antisipasi Sambaran Petir Di Daerah Perbukitan Wilayah Bantul <i>Muhammad Suyanto; Sri Mulyaningsih</i>	078 - 087
Pengaruh Hasil-Hasil Ujian di Sekolah Terhadap Hasil Ujian Nasional di SMU Negeri 1 Limboto Kabupaten Gorontalo <i>Noeryanti</i>	088 - 098
Pengaruh Temperatur Temper terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-1,52al-1,44c <i>Ratna Kartikasari</i>	099 - 106
Pemecahan Senyawa Kompleks dalam Kaolin dan Pengambilan Alumina dengan Metode Kalsinasi dan Elutriasi <i>Sukamta, Arif Budiman, Sutijan, Akhmad Bening W, Segar Budiharto</i>	107 - 116

Pengaruh <i>Sandwich Laminated Coco Mat</i> dan <i>Chopped Strand Mat</i> terhadap Kekuatan Material Komposit <i>Tarkono</i>	117 - 126
Modal Testing and Finite Element Model Updating of Two Nominally Identical Concrete Building Floors <i>Taufik R. Widjaja</i>	127 - 137
Perubahan Laju Korosi Akibat Tegangan Alam dengan Metode C-Ring <i>Toto Rusianto</i>	138 - 146

ANT-WUM: ALGORITMA BERBASIS ANT COLONY OPTIMIZATION UNTUK WEB USAGE MINING

¹Abdurrahman, ²Bambang Riyanto T., ³Rila Mandala, ⁴Rajesri Govindaraju
^{1,2,3}Sekolah Teknik Elektro & Informatika-ITB, ⁴Fakultas Teknologi Industri-ITB

Masuk: 15 April 2009, revisi masuk : 20 Juli 2009, diterima: 24 Juli 2009

ABSTRACT

This paper is continuity research from our previous work in Ant-Miner implementation for web user classification. In our previous work, we implemented Ant-Miner algorithm for web user classification same with Ant-Miner for classification task in data mining domain. In this paper, we propose modification of heuristic function of Ant-Miner based on web usage mining (WUM) problem, that we name Ant-WUM. The heuristic function ACO is based on local problem domain. Information theory is common heuristic function used in classification task, such as implemented in C4.5 algorithm and ant-miner algorithm. Ant-WUM uses heuristic function based on closeness principle that implemented in clustering problem in WUM. We propose to use data from web access log, profile user, and transaction data to provide some attributes as term candidate of classification rule by Ant-WUM algorithm. We compared Ant-WUM algorithm with Ant-Miner algorithm. The result indicates that Ant-WUM has competitive result in term of accuracy rate, amount of rules, and computation time.

Keywords: *Ant-Miner, Ant-WUM, heuristic function, web usage mining.*

INTISARI

Paper ini merupakan kelanjutan riset sebelumnya dalam pemanfaatan algoritma *Ant-Miner* untuk melakukan klasifikasi pengguna *web*. Riset sebelumnya pemanfaatan algoritma *Ant-Miner* yang dimanfaatkan dalam domain data mining untuk permasalahan klasifikasi pengguna *web* dalam *web usage mining*. Dalam paper ini diusulkan modifikasi fungsi heuristik dalam algoritma *Ant-Miner* yang disesuaikan dengan permasalahan *web usage mining* (WUM), yang dinamakan algoritma *Ant-WUM*. Fungsi heuristik dalam algoritma ACO tergantung dari domain permasalahan yang akan diselesaikan. Teori informasi merupakan fungsi heuristik yang umum diimplementasikan dalam algoritma untuk fungsi klasifikasi sebagaimana diterapkan dalam algoritma C4.5 dan dalam algoritma *ant-Miner*. Fungsi heuristik *Ant-WUM* adalah modifikasi fungsi heuristik *ant-Miner* dengan menggunakan prinsip kedekatan yang digunakan dalam fungsi klusterisasi WUM dan menggunakan teori informasi untuk menentukan nilai informasi suatu term yang akan menjadi variabel untuk penghitungan jaraknya. Dan dalam paper ini, diusulkan penggunaan gabungan data yang terdiri dari hasil ekstraksi *web access log*, profil pengguna, dan data transaksi. Dalam riset ini telah dilakukan pengujian perbandingan antara algoritma *Ant-Miner* dengan *Ant-WUM*. Dari hasil uji menunjukkan bahwa *Ant-WUM* cukup kompetitif dengan *Ant-Miner* dalam tingkat akurasi, dari jumlah kaidah yang dihasilkan dan aspek waktu komputasi.

Kata Kunci: *Ant-Miner, Ant-WUM, fungsi heuristik, web usage mining.*

PENDAHULUAN

Interaksi pengguna (*user*) *web* menghasilkan data akses *web* yang maha besar dalam periode waktu yang ter-

simpan di file *web access log* di server. Data hasil interaksi ini diharapkan dapat memberikan informasi yang bernilai bagi pengelola *web* dalam rangka memasar-

¹mr.indonesian@gmail.com, ²briyanto@lskk.ee.itb.ac.id, ³рила@informatika.org,
⁴rajesri_g@mail.ti.itb.ac.id

kan keberadaan *web*-nya dan produk ini yang dijualnya. Dalam konteks ini *web usage mining* (WUM) mempunyai peran dalam menemukan pengetahuan (*knowledge discovery*) dari data penggunaan *web* tersebut. Selain data *web access log*, data yang terbentuk dari interaksi pengguna dengan *web* e-commerce adalah data profil pengguna dan data transaksi.

Business intelligence (BI) merupakan salah satu fungsi WUM ini untuk membantu dalam kegiatan pemasaran keberadaan *web* dan produk yang dijualnya (Abraham, 2003). Untuk membantu fungsi BI dalam WUM, maka diusulkan klasifikasi pengguna *web* dalam kategori pengguna potensial, retensi, dan baru dengan memanfaatkan tiga data yaitu *web access log*, profil pengguna, dan data transaksi. Masih sedikit peneliti dalam riset WUM yang memanfaatkan ketiga data tersebut (Jaideep, 2000). Parameter yang digunakan untuk melakukan klasifikasi pengguna *web* ini adalah sebagai berikut (Abdurrahman, 2006):

- *Recency*: berapa waktu lama pengguna berinteraksi dengan *web* sejak terakhir mengakses *web*.
- *Frequency*: berapa kali lama pengguna mengakses *web* dalam satuan waktu.
- *Intencity*: berapa total transaksi pembelian produk melalui *web*.

Klasifikasi pengguna *web* ini diharapkan dapat membantu aktivitas pemasaran *web* dan produknya dalam melakukan aktifitas (Abdurrahman, 2004): Akuisisi pelanggan baru dari para pengguna. Retensi terhadap pelanggan eksisting. Penetrasi terhadap pelanggan eksisting dalam kerangka meningkatkan nilai transaksi penjualan.

Pengembangan algoritma *Ant-Miner* yang dilakukan ini adalah melakukan cara modifikasi fungsi heuristik untuk menghasilkan kaidah klasifikasi pengguna *web* ini, yang diberi nama *Ant-WUM*. Algoritma *Ant-WUM* merupakan metode untuk tugas klasifikasi pengguna *web* dalam *web usage mining*. Algoritma ini merupakan pengembangan dari algoritma *Ant-Miner* yang berbasis pada *Ant Colony Optimization* (ACO) (Parpinelli,

2002). Hingga kini, belum ada peneliti yang memanfaatkan ACO dalam WUM untuk tugas klasifikasi pengguna *web* dan peneliti lain memanfaatkan ACO untuk klusterisasi pengguna *web* dan klasifikasi halaman *web* (Abraham, 2005; Spiliopoulou, 2007; Holden, 2007). Algoritma *Ant-WUM* mempunyai fitur sebagai berikut:

- Ekstraksi kaidah klasifikasi bersumber dari data dengan atribut kategori, sehingga untuk atribut kontinyu akan dilakukan diskritisasi.
- Fungsi heuristik yang digunakan adalah prinsip kedekatan yang diimplementasikan dalam fungsi klusterisasi dalam WUM (Grear, 2006) dan pemanfaatan teori informasi untuk mengukur kualitas suatu informasi (Parpinelli, 2002).

Untuk menguji performansi algoritma *Ant-WUM*, telah dilakukan perbandingan performansi kedua algoritma tersebut mencakup aspek:

- Tingkat akurasi (*accuracy*): kemampuan algoritma dalam menghasilkan kaidah tingkat kesalahan rendah.
- Efisiensi komputasi (*computational efficiency*): waktu yang dibutuhkan algoritma untuk melakukan proses ini pembelajaran model klasifikasi pada data training maupun data uji.
- Kemudahan memahami (*interpretability*): kaidah yang dihasilkan dapat dipahami secara mudah oleh pengguna dan dapat digunakan untuk pengambilan keputusan.

Algoritma *Ant-Miner* merupakan pengembangan dari algoritma *Ant Colony Optimization* (ACO), yang difungsikan untuk tugas klasifikasi dalam *data mining* (Parpinelli, 2002). ACO merupakan sistem berbasis agen yang mensimulasikan perilaku natural sekelompok semut, termasuk di dalamnya mekanisme bekerjasama dan adaptasi. Dalam paper (Dorigo, 1999) penggunaan sistem ini merupakan metaheuristik baru untuk memecahkan masalah optimasi kombinasi yang kokoh dan serbaguna.

Pada dasarnya, disain algoritma ACO terdiri dari spesifikasi sebagai berikut (Bonabeu, 1999):

- Representasi masalah, dimana sekelompok semut akan membangun/

modifikasi solusi melalui pemanfaatan aturan transisi probabilistik (*probabilistic transition rule*) berdasarkan jumlah *pheromone* dan *local problem-dependent heuristic*.

- Sebuah metode untuk membangun solusi yang valid.
- Fungsi heuristik terkait dengan masalah yang didefinisikan (η) yang mengukur kualitas item-item yang dapat ditambahkan dalam pilihan solusi yang sedang dipilih.
- Kaidah updating *pheromone* yang menspesifikasikan modifikasi nilai *pheromone* (τ).
- Kaidah transisi probabilistik yang didasarkan pada nilai fungsi heuristik (η) dan nilai *pheromone* (τ) yang digunakan secara berulang untuk membangun solusi.

Kaidah klasifikasi yang akan dipecahkan oleh *Ant-Miner* dapat dipresentasikan dalam bentuk kaidah sebagai berikut:

IF <term1 AND term2 AND...> THEN <class>

Masing-masing *term* terdiri dari tiga bagian (atribut, operator, nilai), dimana nilai ini adalah nilai yang dimiliki oleh suatu atribut. Bagian operator adalah operator penghubung “=”. *Ant-miner* ini hanya mengakomodasi atribut kategori (*categorical attribute*). Untuk atribut yang bernilai kontinyu didiskritkan pada tahap *preprocessing*.

Deskripsi umum algoritma *Ant-Miner* dapat dideskripsikan dalam *pseudo code* berikut ini (Parpineli, 2002):

```

TrainingSet = {all training cases};
DiscoveredRuleList = [ ]; /* rule list is
initialized with an empty list */
WHILE
  (TrainingSet >Max_uncovered_cases)
t = 1; /* ant index */
j = 1; /* convergence test index */
Initialize all trails with the same amount
of pheromone;
REPEAT
  Antt starts with an empty rule and
  incrementally constructs a classification
  rule Rt; by adding one term at a time to
  the current rule; Prune rule Rt; Update
  the pheromone of all trails by increasing

```

pheromone in the trail followed by Ant_t

(proportional to the quality of R_t) and decreasing *pheromone* in the other trails (simulating *pheromone evaporation*);

IF (R_t is equal to R_t-1) /*update convergence test */

THEN j = j + 1;

ELSE j = 1;

END IF

t = t + 1;

UNTIL (i ≥ No_of_ants) OR (j ≥ No_rules_converg)

Choose the best rule R_{best} among all

rules R_t constructed by all the ants;

Add rule R_{best} to DiscoveredRuleList;

TrainingSet = TrainingSet - {set of cases correctly covered by R_{best}};

END WHILE

Web mining merupakan aplikasi teknik *data mining* untuk mengekstrak pengetahuan (*knowledge*) dari data *web* (Abraham, 2003). Ada dua pendekatan yang digunakan untuk mendefinisikan *web mining*, yaitu pendekatan berbasis proses (*process-centric view*) yang mendefinisikan *web mining* sebagai sekumpulan suatu aktivitas (*sequence of tasks*) Yang kedua adalah pendekatan berbasis data (*data-centric view*) yang mendefinisikan *web mining* sebagai terminologi tipe data *web* yang digunakan untuk proses *data mining*. Dalam paper ini pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kedua.

Web mining dapat dibagi dalam tiga kategori berdasarkan jenis data yang diekstrak, yaitu (Abraham, 2003): *Web content mining* (WCM); merupakan penemuan informasi terhadap content *web*, yang terdiri dari teks, gambar, audio, video, metadata, dan *hyperlinks*.

- *Web structure mining* (WSM); merupakan penemuan model yang berkaitan dengan struktur hubungan *web* yang meliputi *intra-page structure* dan *inter-page structure*.
- *Web Usage Mining* (WUM) ini yang menjadi fokus paper merupakan proses untuk mengaplikasikan teknik *data mining* dalam melakukan penemu-

an pengetahuan berupa pola penggunaan (*usage pattern*) dari *web*.

Adapun fungsi dari WUM adalah sebagai berikut (Pramudiono, 2004):

- *Personalization*; melakukan personalisasi *website* sesuai dengan keinginan user yang didasarkan dari perilaku penggunaan *web*.
- *System improvement*; meningkatkan performansi sebuah *web* sebagai tujuan untuk mendapatkan kepuasan bagi penggunanya. WUM menyediakan fasilitas kunci untuk memahami perilaku trafik *web*, hal ini akan dijadikan sebagai landasan membuat kebijakan *web chaching*, transmisi jaringan, *load balancing*, dan distribusi data.
- *Site modification*; menyediakan umpan balik (*feed back*) dari perilaku akses pengguna terhadap suatu *website* kepada *designer*. Hal ini dimaksudkan untuk membuat *website* yang adaptif dengan pola perubahan struktur *website* yang dinamis berdasarkan pola penggunaan.
- *Busines Intelligence*; menyediakan informasi bagaimana para pelanggan memanfaatkan *website* sebagai informasi yang fundamental bagi e-Commerce. Hal ini dijadikan sebagai proses penemuan pengetahuan (*knowledge discovery process*) sebagai *marketing intelligence* dari data *web*.
- *Usage Characterization*; menyediakan informasi tentang perilaku interaksi user dengan *website ini*, dalam konteks interaksi dengan *web content* dan atributnya serta dengan *web browser*. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan performansi skalabilitas dan kemampuan *load balancing* di *server web*.

PEMBAHASAN

Dalam pembahasan dijelaskan mengenai tahap *preprocessing* sebagai tahap penyiapan data, algoritma Ant-WUM, dan pengujian. WUM terdiri dari proses utama sebagai berikut:

- Proses *preprocessing* meliputi proses konversi penggunaan (*usage*) yang ada dalam *web access log* ke level abstraksi data yang dibutuhkan dalam *pattern discovery*.

- *Pattern discovery* menggambarkan metode algoritma yang dibangun untuk melakukan penemuan pola penggunaan *web*, hal ini dengan menggunakan *Ant-Miner*.

- *Pattern analysis* merupakan tahapan terakhir dalam proses WUM, dimana dalam proses ini dilakukan penyaringan (*filter*) terhadap kaidah-kaidah atau pola yang tidak relevan dari kumpulan data yang ditemukan dalam tahapan *pattern discovery*.

Pada tahap *preprocessing*, telah dilakukan pengembangan suatu metode yang dapat menyiapkan data untuk tugas klasifikasi pengguna *web* dengan menggunakan algoritma *Ant-WUM*. Tahap *preprocessing* ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

Format *web access log* standar seperti dalam format sebagai berikut:

```
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:21
+0700] "GET /xampp/xampp.css
HTTP/1.1" 200 4178
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:21
+0700] "GET /xampp/img/xampp-logo.jpg
HTTP/1.1" 200 19738
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:21
+0700] "GET /xampp/img/blank.gif
HTTP/1.1" 200 43
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:22
+0700] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 200
30894
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:26
+0700] "GET /xampp/lang.php?en
HTTP/1.1" 302 -
127.0.0.1 - - [11/Jan/2009:13:32:26
+0700] "GET /xampp/index.php
HTTP/1.1" 200 604
```

Dilakukan *parsing* dan pemberitahuan data sebagai berikut:

- Halaman URL harus tidak mengandung ekstensi gambar (*.png, *.jpeg, *.gif, dll).
- Status koneksi yang diambil hanya yang berkode 200 (akses ke halaman *web* sukses) dan 301 (melakukan transaksi *login* atau *logout*).

Melakukan ekstraksi data *session* tabel hasil *parsing web access log* untuk mendapatkan atribut jumlah akses, jumlah *login*, dan rata-rata *login* dalam format data kontinyu.

Melakukan diskritisasi data kontinyu menjadi data kategori, sehingga mendukung untuk kebutuhan algoritma *Ant-WUM*. Diskritisasi dilakukan meng-

gunakan aplikasi *data mining* WEKA dengan metode MDL Fayyad dan Irani.

Ekstraksi data dilakukan untuk membuat tabel untuk mendapatkan informasi: Jumlah akses yang dilakukan user dalam periode tertentu (A), yang dihitung dari akumulasi ini penjumlahan waktu akses per halaman dalam kurun waktu tertentu, selama waktu akses per halaman lebih kecil daripada waktu *time out* yang didefinisikan oleh pengguna (lihat Persamaan 1). Durasi akses yang dilakukan pengguna dalam periode tertentu (D), yang dihitung dari penjumlahan sekuensial waktu akses dalam rentang waktu yang didefinisikan oleh user (lihat Persamaan 2). Rata-rata waktu akses pengguna dalam periode tertentu (\bar{D}), yang dihitung dari durasi akses dibagi dengan jumlah waktu akses dalam rentang waktu yang didefinisikan oleh user (lihat Persamaan 3). Jumlah waktu login yang dilakukan pengguna dalam periode tertentu (L), yang dihitung dari sekuensial akses halaman sampai bertemu dengan halaman *LOGIN* dan waktu akses halaman tidak sama dengan waktu *time out* yang didefinisikan oleh user (lihat Persamaan 4). Rata-rata waktu *login* pengguna (\bar{L}), yang dihitung dari total waktu *login* (persamaan (5)) dibagi dengan jumlah pengguna melakukan *login* dalam rentang waktu yang didefinisikan oleh pengguna (lihat Persamaan 6).

Untuk melakukan ekstraksi data di atas menggunakan formula sebagai berikut:

$$A(t) = \sum_{p=1}^{p=n} t_p, t_p < t_{out} \dots\dots\dots (1)$$

$$D = A(t)_1 + A(t)_2 + A(t)_n \dots\dots\dots (2)$$

$$\bar{D} = \frac{D}{\sum A(t)} \dots\dots\dots (3)$$

$$L(t) = \sum_{p=1}^{p=n} t_p, t_p < t_{out}, P_n = "LOGIN" .. (4)$$

$$TotL = L(t)_1 + L(t)_2 + L(t)_n \dots\dots (5)$$

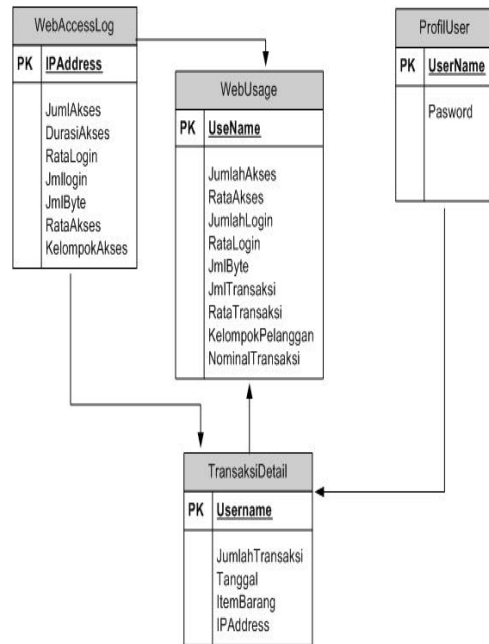
$$\bar{L} = \frac{TotL}{\sum L(t)} \dots\dots\dots (6)$$

dimana

- t_p menunjukkan waktu akses per halaman

- t_{out} menunjukkan waktu *time out* sebagai acuan waktu toleransi masing-masing halaman *web*
- p menunjukkan halaman *web*.

Membangun relasi tabel *webaccesslog* tersebut dengan tabel transaksi dan profil pengguna sebagaimana digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Hubungan Antar Data WUM

Dari Gambar 1 dapat dijelaskan sebagai berikut: Tabel *webaccesslog* akan digunakan sebagai masukan dalam algoritma *Ant-WUM* untuk menghasilkan kaidah klasifikasi pengguna *web* dalam kategori pengguna dengan akses frekuensi tinggi atau rendah. Dalam hal ini atribut yang akan digunakan sebagai kandidat *term* adalah jumlah akses, durasi akses, rata-rata akses, jumlah byte dan atribut kelompok akses sebagai kelas prediktor. Data pengguna yang direpresentasikan dalam *IP address* di tabel ini, merupakan daftar pengguna *web* yang belum melakukan transaksi pembelian dalam *web e-commerce*. Sedangkan *IP address* yang dipakai oleh pengguna *web* yang melakukan transaksi *login* dan atau pembelian akan dimasukkan dalam tabel *webusage*.

Tabel *webusage* sebagai tabel yang dibentuk dari relasi *webaccesslog*,

profil pengguna, dan transaksi akan digunakan sebagai masukan dalam algoritma *Ant-Miner* untuk menghasilkan kaidah klasifikasi pengguna *web* dalam kategori pengguna potensial, retensi maupun baru. Atribut yang akan digunakan sebagai calon *term* dalam kaidah klasifikasi adalah jumlah akses, rata-rata akses, jumlah login, rata-rata login, jumlah *byte*, jumlah transaksi, rata-rata transaksi, nominal transaksi, dan kelompok pelanggan sebagai kelas prediktor.

Data *IP address* pengguna *web* dalam tabel *webusage* merupakan bagian dari data *IP address* dalam tabel *web-accesslog*. Hubungan antara keduanya dapat dijelaskan dalam persamaan 7 sebagai berikut:

$$\sum_{i=1}^n I_a \in \sum_{i=1}^n I_u \dots\dots\dots (7)$$

dimana:

- i menunjukkan urutan data *IP address*
- I_a menunjukkan daftar *IP address* dalam tabel *webusage*
- I_u menunjukkan daftar *IP address* dalam tabel *webaccesslog*.

Algoritma *Ant-WUM* merupakan pengembangan algoritma *Ant-Miner* dari sisi fungsi heuristik. Dalam pembahasan ini akan dijelaskan secara utuh mengenai hal tahapan-tahapan algoritma *Ant-WUM* yang mengadopsi algoritma *Ant-Miner*. Algoritma ini menggunakan pendekatan sekuensial untuk menemukan sejumlah kaidah klasifikasi untuk melingkupi data latih (*training data*). Iterasi pada pengulangan REPEAT-UNTIL pada *pseudo code* algoritma *Ant-Miner* terdiri dari tiga tahapan, yaitu pembuatan kaidah, *rule pruning* (pembuangan kaidah yang tidak sesuai) dan *updating pheromone*.

Pertama, Ant_t , dimulai dengan kaidah kosong, yaitu kaidah yang tidak mempunyai *term* pada *antecedentnya* dan menambahkan satu *term* pada kaidah yang sedang dibangun. Kesamaannya, pilihan sebuah *term* yang akan ditambahkan pada kaidah yang berjalan terkait dengan pilihan penunjukan jalur yang akan dikembangkan. Pilihan *term* yang akan ditambahkan pada kaidah yang berjalan tergantung pada

fungsi heuristik (η) dan nilai *pheromone* (τ). Ant_t akan selalu menambah sebuah *term* pada kaidah yang sedang berjalan dan akan berhenti sampai bertemu dengan kedua kriteria berikut ini:

- Beberapa *term* yang ditambahkan dalam kaidah yang mengakibatkan kaidah tersebut melingkupi kasus lebih kecil daripada nilai *threshold* yang didefinisikan user pada *Min_cases_per_rule* (jumlah minimum dari kasus yang harus dilingkupi per kaidah).
- Semua atribut sudah digunakan oleh agen semut (*ant*), sehingga sudah tidak ada atribut yang akan ditambahkan dalam *antecedent*. Dalam hal ini berlaku aturan bahwa masing-masing atribut hanya digunakan satu kali dalam satu kaidah, hal ini untuk menghindari kaidah yang tidak valid, seperti "IF (Sex=male) AND (Sex=Female..."

Kedua, kaidah R_t ini yang diba-

ngun oleh Ant_t , dilakukan pembabatan (*pruning*) untuk memindahkan *term-term* yang tidak relevan. *Term-term* yang tidak relevan kemungkinan terjadi pada metode variasi stokastik pada prosedur pemilihan *term* dan atau pada fungsi heuristik yang hanya mengijinkan penggunaan satu atribut pada satu *term*.

Ketiga, jumlah *pheromone* pada masing-masing jalur diupdate, penambahan nilai *pheromone* pada jalur diikuti Ant_t (mengikuti kualitas R_t) penurunan nilai *pheromone* pada jalur lain (mensimulasikan penguapan *pheromone*) ini. Kemudian agen semut yang lain mulai membangun kaidah menggunakan jumlah *pheromone* yang baru untuk mengarahkan pencariannya.

Proses ini akan dilakukan secara berulang sampai dengan bertemu dengan salah satu dari kedua kondisi berikut ini: (1). Jumlah kaidah yang dibangun sama dengan atau lebih besar daripada nilai *threshold* pengguna *No_of_ants*. (2) Ant_t eksisting telah membangun sebuah kaidah yang sama dengan kaidah yang telah dibangun *ant No_rules_converg-1*, dimana *No_rules_converg-1* merepresentasikan jumlah kaidah yang

digunakan untuk menguji konvergensi sekumpulan agen semut.

Ketika pengulangan REPEAT-UNTIL selesai, kaidah terbaik di antara kaidah-kaidah yang terbangun oleh semua agen semut akan ditambahkan dalam daftar kaidah penemuan dan sistem akan memulai pengulangan baru dengan WHILE dengan melakukan inisialisasi ulang semua jalur dengan jumlah *pheromone* yang sama.

Tahap pertama ini pengulangan REPEAT-UNTIL dalam algoritma *Ant-Miner* adalah sebuah agen semut eksisting secara iterasi menambahkan sebuah *term* pada kaidah yang sedang dibangun. Jika $term_{ij}$ merupakan sebuah kondisi kaidah dalam bentuk $A_i = V_{ij}$ dimana A_i merupakan atribut ke- i dan V_{ij} merupakan nilai ke- j pada domain A_i . Probabilitas $term_{ij}$ akan dipilih dan ditambahkan dalam kaidah dengan Persamaan 7 sebagai berikut:

$$P_{ij} = \frac{\eta_{ij} \cdot \tau_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^a x_i \cdot \sum_{j=1}^{b_i} (\eta_{ij} \cdot \tau_{ij}(t))} \dots\dots\dots (8)$$

dimana:

- η_{ij} = nilai fungsi heuristik untuk $term_{ij}$ yang dihasilkan oleh persamaan (14). Semakin besar nilai η_{ij} maka semakin relevan untuk klasifikasi $term_{ij}$ semakin besar probabilitasnya untuk dipilih.
- $\tau_{ij}(t)$ = jumlah *pheromone* yang diasosiasikan dengan $term_{ij}$ pada iterasi t berkorespondensi dengan jumlah *pheromone* eksisting yang tersedia pada posisi jalur i, j yang diikuti oleh agen semut eksisting.
- a = jumlah atribut.
- x_i = bernilai 1 jika atribut A_i belum digunakan oleh agen semut eksisting, dan bernilai 0 jika sebaliknya.
- b_i = jumlah nilai dalam domain atribut ke- i .

Masing-masing $term_{ij}$ dapat ditambahkan dalam kaidah eksisting berdasarkan hasil komputasi nilai η_{ij} menggunakan fungsi heuristik untuk melakukan estimasi kualitas *term* ini dan meningkatkan tingkat akurasi prediksi kai-

dah. Fungsi heuristik yang digunakan berbasis teori informasi (Cover, 1991). Nilai η_{ij} untuk $term_{ij}$ mengandung sebuah ukuran entropi (jumlah informasi) yang diasosiasikan dengan *term* tersebut. Nilai entropi untuk masing-masing $term_{ij}$ dalam format $A_i = V_{ij}$ adalah sebagai berikut:

$$H(W|A_i = V_{ij}) = - \sum_{w=1}^k (P(w|A_i = V_{ij}) \cdot \log_2 P(w|A_i = V_{ij})) \quad (9)$$

dimana:

- W adalah kelas atribut (atribut yang domainnya ini terdiri dari sekumpulan kelas yang diprediksi)
- k adalah jumlah kelas
- $P(w|A_i = V_{ij})$ adalah probabilitas empirik untuk observasi kondisi kelas w yang sesuai dengan $A_i = V_{ij}$

Semakin besar untuk peningkatan nilai $H(W|A_i = V_{ij})$ maka semakin seragam dapat didistribusikan ke kelas-kelas semakin kecil peluang agen semut eksisting menambah $term_{ij}$ tersebut ke dalam kaidah yang sedang dibangun. Hal ini memungkinkan untuk dilakukan normalisasi nilai fungsi heuristik untuk memfasilitasi penggunaannya pada Persamaan 1. Untuk mengimplementasikan normalisasi ini, maka perlu dibatasi bahwa nilai $H(W|A_i = V_{ij})$ berkisar pada rentang nilai $0 \leq H(W|A_i = V_{ij}) \leq \log_2 k$, dimana k adalah jumlah kelas. Normalisasi fungsi heuristik dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\eta_{ij} = \frac{\log_2 k - H(W|A_i = V_{ij})}{\sum_{i=1}^a x_i \cdot \sum_{j=1}^{b_i} (\log_2 k - H(W|A_i = V_{ij}))} \dots\dots\dots (10)$$

dimana:

- a, x_i dan b_i mengandung arti yang sama dengan persamaan (1).
- Jika nilai V_{ij} pada atribut A_i tidak ada dalam data training $H(W|A_i = V_{ij})$ adalah berisi nilai maksimum yaitu $\log_2 k$ dengan demikian mempunyai peluang kecil untuk diprediksi dan jika semua kasus mempunyai kelas yang sama maka $H(W|A_i = V_{ij})$ diberi nilai 0 dan tentunya $term_{ij}$ tersebut mempunyai peluang yang besar untuk diprediksi masuk dalam kaidah.

Dari Persamaan 9 dan 10 di atas dapat dijelaskan dengan ilustrasi penerapan persamaan tersebut dalam contoh data latih PLAY, sebagai berikut:

Tabel 1. Tabel Play Untuk Penghitungan Heuristik Informasi

Out look	Temp	Humi- dity	Windy	Play
Sunny	85	85	False	Don't Play
Sunny	80	90	True	Don't Play
Over- cast	83	78	False	Play
Rain	70	96	False	Play
Rain	60	80	False	Play
Over- cast	64	65	True	Play
Sunny	72	95	False	Don't Play
Sunny	69	70	False	Play
Rain	75	70	True	Play
Sunny	75	70	True	Play
Over- cast	72	90	True	Play
Over- cast	81	75	False	Play
Rain	71	80	True	Don't Play

Untuk menghitung nilai informasi term "outlook= sunny" untuk kelas PLAY berdasarkan persamaan (9) dan (10), adalah sebagai berikut:

- $P(\text{Play}|\text{outlook}=\text{sunny}) = 2/14 = 0.143$,
 - $P(\text{Don't Play}|\text{outlook}=\text{sunny}) = 3/14 = 0.214$
 - $H(W, \text{outlook}=\text{sunny}) = -0.143 \cdot \log(0.143) - 0.214 \cdot \log(0.214) = 0.877$
- $$\eta = \log_2 k - H(W, \text{outlook} = \text{sunny}) = 1 - 0.8777 = 0.123$$

Fungsi heuristik dalam algoritma Ant-WUM ini didasarkan pada fungsi kedekatan (*closeness principal*) yang digunakan oleh (Grear, 2006) untuk melakukan klustering profil pengguna web dalam WUM. Fungsi ini adalah untuk mengukur jarak antara waktu yang digunakan oleh pengguna eksisting dalam mengakses halaman web dengan waktu akses yang telah ada dalam kelompok kluster. Adapun persamaan yang digunakan adalah:

$$\text{Distance}(t1, t2) = 1 - \cos(t2 - t1) \quad (11)$$

Dimana, $t1$ menunjukkan jumlah waktu yang digunakan oleh pengguna web eksisting dalam mengakses sekumpulan halaman web, dan $t2$ merupakan jumlah waktu dalam masing-masing kluster.

Waktu akses web adalah akumulasi waktu akses masing-masing halaman web yang bersifat sekuensial sebagaimana dalam Persamaan 1 Penggunaan fungsi heuristik ini untuk menyelesaikan permasalahan klasifikasi pengguna web dalam WUM, dikarenakan beberapa atribut data WUM sebagaimana dijelaskan dalam bagian *preprocessing* adalah sama dengan yang digunakan oleh (Grear, 2006) yaitu waktu *session* masing-masing halaman yang diakses oleh pengguna web. Perbedaannya adalah dalam penyiapan data untuk fungsi klasifikasi pengguna web dilakukan akumulasi jumlah waktu untuk masing-masing pengguna yang bersifat unik, sedangkan dalam (Grear, 2006) waktu *session* digunakan untuk masing-masing pengguna web dalam satu siklus akses web, tanpa memperhatikan eksistensi pengguna web, jadi satu pengguna web mempunyai beberapa total waktu *session* yang berbeda.

Implementasi Persamaan 11 untuk fungsi heuristik dalam algoritma Ant-WUM dapat diformulasikan dalam persamaan sebagai berikut:

$$D(H1, H2) = 1 - \cos(H2 - H1) \dots (12)$$

- dimana:
- D merupakan jarak nilai heuristik $H1$ ke $H2$
 - $H1$ merupakan nilai heuristik $term_{ij}$ dalam format $A_i = V_{ij}$, sebagaimana Persamaan 9.
 - $H2$ merupakan suatu nilai heuristik $term_{nrtj}$ dalam format $A_i = V_{nrtj}$.

Nilai heuristik $H2$ ini diperoleh dari nilai informasi *term* yang berbeda dengan $term_{ij}$ pada kelas yang sama. Adapun persamaan untuk menghitung $H2$ adalah:

$$H2(W|A = V_{Nij}) = - \sum_{w=1}^k (P(w|A = V_{Nij}) \cdot \log P(w|A = V_{Nij})) \dots (13)$$

- dimana:
- W , k dan P adalah sama dengan deskripsi Persamaan 9
 - V_{Nij} merupakan nilai atribut selain V_{ij} untuk kelas yang sama

Hasil penghitungan menunjukkan perbandingan jarak yang dilakukan normalisasi dengan Persamaan 14 sebagai berikut:

$$\eta_{ij} = \frac{\log_2 k - H(W|A_i = V_j)}{\sum_{i=1}^a x_i \cdot \sum_{j=1}^b (\log_2 k - H(W|A_i = V_j))} / (1 - \cos(H2 - H1)) \quad \dots (14)$$

Variabel pada normalisasi mempunyai arti yang sama pada Persamaan 10 dan 12. Hasil normalisasi ini yang menjadi nilai input dalam Persamaan 8.

Ilustrasi fungsi heuristik prinsip kedekatan algoritma *Ant-WUM* ini dapat dijelaskan contoh berikut. Untuk menghitung nilai jarak informasi term "outlook=sunny" untuk kelas PLAY berdasarkan prinsip kedekatan adalah sebagai berikut:

- $P(\text{Play}|\text{outlook}=\text{sunny})=2/14= 0.143$,
- $P(\text{Don't Play}|\text{outlook}=\text{sunny}) = 3/14 = 0.214$
- $H1(W,\text{outlook}=\text{sunny})=0.143.\log(0.143)+0.214.\log(0.214)=0.877$
- $P(\text{Play}|\text{outlook}=\text{NOTsunny})=7/14=0.5$
- $P(\text{Don't Play}|\text{outlook}=\text{NOTsunny}) = 1/14= 0.071$
- $H2(W,\text{outlook}=\text{NOTsunny})=-0.5.\log(0.5)-0.071.\log(0.071)=0.232$
- $D(H1,H2) = 1 - \cos(0.232 - 0.877)=0.200$
- $\eta = \frac{\log_2 k - H(W,\text{outlook} = \text{sunny})}{\sum_{i=1}^a x_i \cdot \sum_{j=1}^b (\log_2 k - H(W|A_i = V_j))} / (1 - \cos(H2, H1)) = \frac{0.123}{0.200} = 0.615$

Proses selanjutnya adalah *rule pruning*. Tujuan utama dari *rule pruning* adalah menghilangkan *term-term* yang tidak relevan yang akan dimasukkan dalam kaidah. Fungsi dari *rule pruning* adalah untuk meningkatkan kemampuan prediksi kaidah dan tingkat kemudahan kaidah sehingga mudah dipahami oleh pengguna. Prosedur *rule pruning* dieksekusi ketika agen semut eksisting selesai membangun kaidah. Prosedur ini dilakukan secara berulang sampai mendapatkan kualitas suatu kaidah yang didasarkan pada Persamaan 11.

Setelah melakukan *rule pruning*, maka dilakukan proses *updating pheromone*. Sebagaimana dijelaskan dalam algoritma *Ant-Miner* ini, bahwa semua *term_{ij}* akan diinisialisasi dengan jumlah *pheromone* yang sama sehingga pada saat agen semut pertama melakukan

penemuan, semua jalur mempunyai nilai *pheromone* yang sama. Inisialisasi jumlah *pheromone* yang disimpan dalam masing-masing jalur adalah berbanding proporsional dengan jumlah nilai semua atribut, dan didefinisikan dalam Persamaan 15 berikut ini:

$$\tau_{ij}(t = 0) = \frac{1}{\sum_{i=1}^a b_i} \quad \dots (15)$$

Dimana a adalah jumlah atribut dan b_i adalah jumlah yang dimiliki atribut A_i .

Nilai dalam persamaan ini dinormalisasi untuk digunakan dalam Persamaan 7 yaitu kombinasi antara nilai ini dengan nilai fungsi heuristik. Ketika sebuah agen semut membangun kaidahnya dan kaidah itu di-*pruning*, maka jumlah *pheromone* dalam semua jalur harus diupdate. *Updating pheromone* dilakukan dengan dua hal, yaitu: Pertama, penambahan Jumlah *pheromone* yang diasosiasikan dengan masing-masing *term_{ij}* dalam kaidah yang ditemukan oleh agen semut (setelah proses *pruning*) akan ditambahkan sehingga secara proporsional dapat menambah kualitas kaidah. Kualitas suatu kaidah dinotasikan dengan Q , yang dihitung dengan formula $Q = \text{sensitivity} * \text{specificity}$ (Parpinelli, 2002) yang didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Q = \frac{TP}{TP + FN} \cdot \frac{TN}{FP + TN} \quad (16)$$

dimana:

- TP (*True Positive*) merupakan jumlah kasus yang dilingkupi oleh kaidah yang mempunyai kasus yang telah diprediksi oleh kaidah tersebut
- FP (*False Positive*) merupakan jumlah kasus yang dilingkupi oleh kaidah yang mempunyai kelas yang berbeda dengan yang diprediksi oleh kaidah
- FN (*False Negative*) merupakan jumlah kasus yang tidak dilingkupi oleh kaidah tetapi mempunyai kelas yang diprediksi oleh kaidah
- TN (*True Negative*) merupakan jumlah kelas yang tidak dilingkupi oleh kaidah dan tidak mempunyai kelas yang diprediksi oleh kaidah tersebut

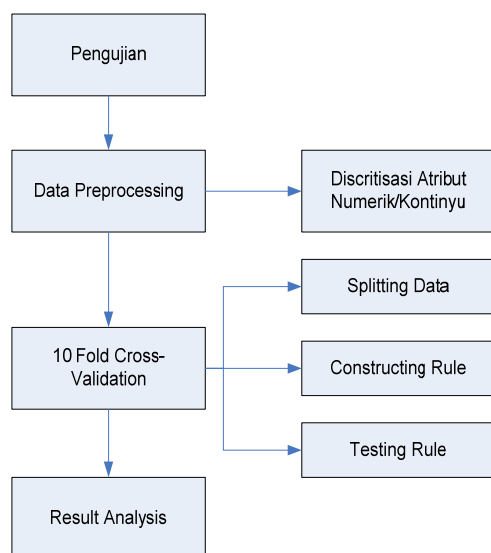
Nilai Q berada dalam rentang nilai $0 \leq Q \leq 1$, dimana semakin besar nilai

Q maka semakin besar kualitas sebuah kaidah. Updating *pheromone* untuk sebuah $term_{ij}$ dilakukan dengan Persamaan 17 sebagai berikut:

$$\tau_{ij}(t+1) = \tau_{ij}(t) + \tau_{ij}(t) \cdot Q, \forall i, j \in R \dots (17)$$

Dimana R merupakan himpunan *term* yang terbentuk dalam kaidah yang dibangun oleh agen semut pada pengulangan t . Pengurangan Jumlah *Pheromone* yang diasosiasikan dengan masing-masing $term_{ij}$ yang tidak ada dalam kaidah dikurangi. Pengurangan jumlah *pheromone* untuk *term* yang tidak dipakai dilakukan dengan melakukan normalisasi nilai masing-masing *pheromone* τ_{ij} dengan melakukan penjumlahan semua $\tau_{ij}, \forall ij$. Pada waktu normalisasi, jumlah *pheromone* *term* yang tidak dipakai dan akan dihitung dengan membagi nilai eksisting ini dengan total penjumlahan *pheromone* semua *term*.

Pengujian ini dilakukan dengan skenario seperti Gambar 2: Sedangkan data yang digunakan dalam pengujian ini adalah *data repository* UCI (University of California at Irvine) yang dapat diakses di <http://www.ics.uci.edu/~mllearn/MLRepository.html>, data *e-commerce*. Setting parameter algoritma *Ant-WUM* dan *Ant-Miner* untuk melakukan pengujian ini adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Skenario Pengujian

Tabel 2. Setting Parameter Algoritma

Folds	10
Number of Ants	5
Min-cases Per Rule	5
Max-uncovered cases	10
Rules of convergence	10
Number of Iterations	100

Tabel 3. Nama Data UCI dan Data WUM Untuk Pengujian

Nama Data	Jumlah Atribut	Jumlah Data
Breast Cancer	10	286
Diabetes	9	768
Lymph	19	148
Breast W	10	699
Hepatitis	20	155
WUM	9	498

Hasil pengujian terhadap data UCI dan WUM dapat digambarkan sebagai berikut: Tabel 4. Tingkat Akurasi yang dihasilkan dari Ant-Miner dan Ant-WUM Pada Data Test UCI & WUM.

Adapun contoh kaidah klasifikasi pengguna *web* yang terbangun adalah sebagai berikut:

```

IF durasiakses = '(120.1-126.8]\' THEN 'Potensial'.
IF jmlakses='(11.3-12.2]\' THEN 'Potensial';
IF jmlakses = '(9.5-10.4]\' THEN 'Potensial';
IF JK = 'F' THEN 'NP'
IF JK = 'M' THEN 'NP'
Default rule: NP
  
```

Pada Tabel 4 menunjukkan bahwa algoritma *Ant-WUM* menghasilkan kaidah dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi pada empat data uji coba,

Tabel 4 Rata-rata Tingkat Akurasi Pengujian Ant- WUM

Nama Data	Average Predictive Accuracy (%)	
	Ant-Miner	Ant-WUM
Breast Cancer	74.15 ± 2.28	76.15 ± 2.72
Diabetes	68.23 ± 1.93	67.98 ± 1.76
Lymph	72.46 ± 5.34	73.69 ± 3
Breast W	91.84 ± 0.88	92.12 ± 1.4
Hepatitis	83.82 ± 2.24	78.48 ± 3.38
WUM-Potensial	88.72 ± 1.32	88.78 ± 1.74

Tabel 5. Rata-rata Jumlah Kaidah Yang Dihasilkan Ant-Miner & Ant-WUM pada Data Test UCI & WUM

Nama Data	Average Number of Rules	
	Ant-Miner	Ant-WUM
Breast Cancer	6.4 ± 0.16	6.3 ± 0.21
Diabetes	9.2 ± 0.25	8.5 ± 0.37
Lymph	5.9 ± 0.31	6.8 ± 0.2
Breast W	12.4 ± 0.31	12.1 ± 0.23
Hepatitis	5.1 ± 0.18	5.6 ± 0.16
WUM-Potensial	6 ± 0	6 ± 0

Tabel 6. Rata-rata Jumlah Term per Kaidah yang Dihasilkan Ant-Miner & Ant-WUM pada Data Test UCI & WUM

Nama Data	Average Number of Terms Per Rule	
	Ant-Miner	Ant-WUM
Breast Cancer	9.2 ± 0.44	9.4 ± 0.56
Diabetes	8.5 ± 0.27	7.8 ± 0.39
Lymph	9.9 ± 0.75	11.8 ± 0.9
Breast W	12.4 ± 0.4	12.2 ± 0.51
Hepatitis	9.1 ± 0.5	9.7 ± 0.4
WUM-Potensial	5 ± 0	5 ± 0

yaitu pada data Breast Cancer, Lymph, Breast-W dan data WUM. Sedangkan pada data Hepatitis dan Diabetes, algoritma *Ant-Miner* menghasilkan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan algoritma Ant-WUM.

Sedangkan pada Tabel 5 dan Tabel 6 menunjukkan bahwa algoritma Ant-WUM menghasilkan kaidah yang lebih sederhana pada data Breast Cancer, Diabetes, dan Breast-W, sedangkan pada data WUM kedua algoritma ini menghasilkan kaidah yang sama dari sisi simplifikasi. Algoritma *Ant-Miner* menghasilkan kaidah yang lebih sederhana pada data Lymph dan Hepatitis.

KESIMPULAN

Dari hasil uji coba menunjukkan, bahwa algoritma *Ant-WUM* yang meng-

gunakan fungsi kedekatan dan pemanfaatan teori informasi untuk menentukan nilai masing-masing heuristik yang dihitung jaraknya, menghasilkan tingkat performansi yang cukup kompetitif dengan algoritma *Ant-Miner*. Fungsi kedekatan sebagai heuristik WUM merupakan metode untuk menyelesaikan masalah klasifikasi pengguna *web* dalam WUM. Heuristik ini juga digunakan dalam fungsi klusterisasi WUM. Yang membedakan keduanya adalah dari sisi variable yang dihitung nilai jaraknya.

Pada algoritma *Ant-WUM* ini, teori informasi masih digunakan untuk mengukur nilai informasi antar dua nilai heuristik. Dengan memadukan pemanfaatan fungsi kedekatan dan teori informasi dalam algoritma Ant-WUM telah menghasilkan kaidah klasifikasi yang mempunyai tingkat akurasi dan tingkat simplifikasi yang lebih tinggi pada enam data uji coba di atas.

Saran, dalam rangka pengembangan riset ini di masa mendatang, diusulkan pengembangan dalam dua hal, yaitu:

- Pemanfaatan Ant-WUM untuk menghasilkan kaidah dari atribut kontinyu secara langsung, sehingga tidak perlu didiskritkan pada tahap *preprocessing*.
- Pemanfaatan fungsi heuristik berbasis prinsip kedekatan dengan menggunakan fungsi selain teori informasi dalam menghitung nilai antar variable (H1 dan H2). Uji coba ini diharapkan dapat menghasilkan kaidah klasifikasi dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, et al, 2006, *Pemodelan Data Webhouse sebagai Tahap Preprocessing Web Usage Mining untuk Business Intelligence*, Konferensi Nasional Sistem Informasi, Universitas Pasundan – Bandung.
- Abdurrahman, 2004, *Pemodelan Customer Churn Management Berbasis CRM Studi Kasus PT. Telekomunikasi Indonesia, Tbk*, Tesis Magister Teknik Informatika, ITB.

- Abraham, A., 2003, *Business Intelligence From Web Usage Mining*, Journal of Information & Knowledge Management, Vol. 2, No. 4, p. 375-390.
- Abraham, A., et al, 2005, *Web Usage Mining Using Artificial Ant Colony Clustering and Linear Genetic Programming*, cs.okstate.edu
- Bonabeu, E., et al, 1999, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, New York, NY, Oxford University Press.
- Cover, T.M., et al, 1991, *Elements of Information Theory*, New York, NY, John Willey & Sons.
- Dorigo, M., et.al, 1999, *The Ant Colony Optimization Meta-heuristik*, new Ideas in Optimization, D.Corn, M. Dorigo and F. Glover Eds. London, McGrawHill, p.11 -32.
- Grear, M., 2006, *User Profiling : Web Usage Mining*, <http://www.ijss.si>.
- Holden, N., et.al, 2007, *Web Page Classification with an Ant Colony Optimization*, kent.ac.uk.
- J.R Quinlan, 1993, *C4.5: Programs for Machine Learning*, San Fransisco, CA : Morgan Kaufmann.
- Jaideep, S., et al, 2000, *Web Usage Mining: Discovery and Applications of Usage Patterns from Web Data*, ACM SIGKDD (Special Interest Group on Knowledge Discovery and Data
- Lopes, 1998, *An Evolution Approach to Simulate Cognitive Learning in Medical Domain in Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Systems: Soft Computing Perspective*, Singapore World Scientific, p. 193-207.
- Parpinelli, R.S, et al, 2002, *Data Mining with an Ant Colony Optimization Algorithm*, IEEE Transaction on Evolutionary Computation, special issue on Ant Colony Algorithm, v.6, p.321-332.
- Pramudiono, I., 2004, *Parallel Platform for Large Scale Web Usage Mining*, Tesis Ph.D, Universitas Tokyo.
- Padmajavalli, R., 2006, *An Overview of Data Pre-Processing in Web Usage Mining*, The ICFAI Journal of Information Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 55-66.
- Ramadhan, H., et al, 2005, *A Classification on Techniques for Web Usage Analysis*, Journal of Computer Science 1(3), p. 413-418, Science Publication.
- Spiliopoulou, M., et al, 2007, *A Data Miner Analyzing the Navigational Behavior of Web Users*, wiwi.huberlin.de.

PENINGKATAN EFEKTIVITAS PENYAJIAN SEARCH RESULT DARI SISTEM TEMU KEMBALI INFORMASI MENGGUNAKAN CLUSTERING DOKUMEN

Amir Hamzah¹

¹*Dosen Tetap Jurusan Teknik Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta*

Masuk: 2 April 2009, revisi masuk: 11 Juli 2009, diterima: 15 Juli 2009

ABSTRACT

The fast expansion of text information volume has caused the difficulty of information retrieval process, mainly on the model of word-based matching. The synonymy factor of word has caused non relevant document to be retrieved, whereas the polisemy factor has caused relevant document not to be retrieved. The application of document clustering to the search results before presented to the user can increase the effectiveness of retrieval. This study elaborates the application of document clustering to improve the effectiveness of retrieval by clustering to the search result before presented to the user. Three clustering algorithms from partitional approach i.e. K-Means, Bisecting K-Mean and Buckshot, and hierarchical agglomerative approach with two cluster similarity function i.e. UPGMA and Complete Link were chosen. The performance parameter was measured using F-measure, a metric derived from Precision and Recall of retrieval. The document collections to be tested are 1000 news document and 350 academic abstract documents. The results show that the presentation of search results by using clustering has improved the number of relevant document in the up-level ranks. The improvement was statistically significant compare to the page-rank method. The improvement of F-measure as a performance metric is about 14,34% for news documents and 28,18% for abstract documents.

Keywords: search result clustering, retrieval effectiveness, F-measure.

INTISARI

Perkembangan volume informasi teks yang cepat telah menyebabkan kesulitan proses temu kembali informasi terutama pada model berbasis pencocokan kata. Faktor sinonim kata menyebabkan dokumen tidak relevan dipanggil sementara faktor polisemy menyebabkan dokumen tidak relevan dipanggil. Aplikasi clustering dokumen pada hasil pencarian sebelum disajikan kepada pengguna dapat meningkatkan efektivitas temu kembali. Kajian ini meneliti aplikasi clustering dokumen untuk meningkatkan efektivitas temu kembali dengan melakukan clustering pada hasil pencarian sebelum disajikan kepada pengguna. Dipilih tiga algoritma clustering pendekatan partisi, yaitu dari K-Means, Bisecting K-Mean dan Buckshot, serta pendekatan dari agglomerative menggunakan dua fungsi similaritas, yaitu UPGMA dan Complete Link. Parameter unjuk kerja ini diukur menggunakan parameter F-measure, suatu ukuran yang diturunkan pada Precisi on dan Recall dari temu kembali. Koleksi dokumen yang diuji terdiri dari 1000 dokumen berita dan 350 dokumen abstrak akademik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penyajian hasil pencarian dengan menggunakan clustering telah meningkatkan jumlah dokumen relevan pada ranking atas. Peningkatan signifikan secara statistik dibandingkan metode page-rank. Peningkatan nilai F-measure tersebut sebagai ukuran kira-kira sebesar 14,34% untuk dokumen berita dan 28,18% untuk dokumen abstrak akademik.

Kata kunci : clustering hasil pencarian, efektivitas temu kembali, F-measure

¹miramzah@yahoo.co.id

PENDAHULUAN

Penerapan teknologi digital dan jaringan komputer telah menyebabkan terjadinya "ledakan" informasi yang berkembang eksponensial. Pada strategi ini pencarian *query* berbasis kata (*word-matching*) kesulitan yang dijumpai muncul dari aspek bahasa, yaitu faktor sinonim pada kata yang telah menyebabkan dokumen yang tidak relevan akan terus dipanggil hanya semata-mata karena dokumen ini mengandung kata yang ada dalam *query*. Sebaliknya faktor *polisemy*, yaitu keadaan di mana suatu kata dapat memiliki lebih dari satu makna, menyebabkan ada dokumen relevan dalam koleksi yang tidak dipanggil karena tidak memuat kata yang ada dalam *query*. Kesulitan ini semakin kompleks manakala pada kenyataannya koleksi dokumen cenderung bertambah besar dan akan menghasilkan (*search result*) yang berpresisi rendah dikatakan oleh (Zamir, 1999; Tombros, 2002).

Menurut Rijbergen (1979), *clustering* dokumen telah lama diterapkan untuk meningkatkan efektivitas temu kembali informasi. Penerapan *clustering* ini bersandar pada suatu hipotesis (*cluster-hypothesis*) bahwa dokumen yang relevan akan cenderung berada pada kluster yang sama jika pada koleksi dokumen dilakukan *clustering*. Beberapa penelitian ini untuk dokumen berbahasa Inggris menerapkan *clustering* dokumen untuk memperbaiki kinerja dalam proses *searching* oleh (Frakes and Baeza-Yates, 1992; Salton, 1989; dan Tombros, 2002). Sedangkan perbaikan dalam penyajian hasil *search* ini dilakukan oleh antara lain Cutting et.al.(1992), Zamir (1999), Osinki(2004) dan Widyantoro (2007). Untuk dokumen berbahasa Indonesia penelitian bidang

$$X = \{x_{ij}\} \quad i=1,2,..,t ; j=1,2,..,n \quad (1)$$

x_{ij} adalah bobot term i dalam dokumen ke j . Pembobotan dasar yang dilakukan dengan menghitung frekuensi kemunculan *term* dalam dokumen karena dipercaya bahwa frekuensi kemunculan *term* merupakan petunjuk sejauh mana *term* tersebut mewakili isi dokumen.

$$x_{ij} = tf_i * \log(n/df_i) ; i=1,2,..,t ; j=1,2,..,n \quad (2)$$

IR adalah oleh Vega (2001) dan Tala (2004) yang meneliti efek *stemming* pada hasil pencarian. Penelitian penerapan *clustering* untuk perbaikan kinerja perolehan informasi untuk dokumen berbahasa Indonesia belum pernah dilakukan. Hal ini mengingat secara umum penelitian tentang komputasi bahasa untuk dokumen Bahasa Indonesia juga masih sangat minim (Nazief, 2000). Permasalahan dalam penelitian ini adalah bagaimana mengemas suatu hasil pencarian sedemikian sehingga dokumen yang relevan terhadap *query* akan mengelompok dalam kelompok teratas. Metode yang diajukan adalah dengan cara melakukan *clustering* pada hasil pencarian linear dan mencari label pada tiap-tiap kluster kemudian menyajikan kepada pengguna dengan petunjuk label kluster tersebut. Penelitian ini memiliki batasan model yaitu model ruang vektor dengan uji coba sistem berupa dokumen teks berita berbahasa Indonesia. Dari penelitian ini diharapkan dapat dirancang suatu sistem temu kembali informasi yang memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dalam menyajikan informasi yang selama ini berupa *list* dokumen yang sangat panjang dan membosankan bagi pengguna untuk melakukan *browsing* secara satu-persatu guna menemukan dokumen relevan yang dicari. Model ruang vektor untuk koleksi dokumen mengandaikan dokumen sebagai sebuah vektor dalam ruang kata (*feature*). Jika koleksi n buah dokumen dapat diindeks oleh t buah *term/feature* maka suatu dokumen dapat dipandang sebagai vektor berdimensi t dalam ruang term tersebut. Koleksi dokumen diwakili matrik kata-dokumen X :

Menurut Luhn (1958), kekuatan pembe-da terkait dengan frekuensi term (*term-frequency, tf*), di mana *term* yang memiliki kekuatan diskriminasi adalah *term* dengan frekuensi sedang. Pembobotan baku yang digunakan adalah *term-frequency invers-document frequency* (TF-IDF) [1] sebagai berikut:

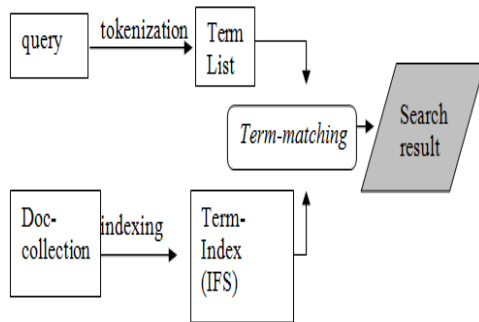
dengan t =total *term* dalam index, n =total dokumen dalam koleksi, df_i =total dokumen yang mengandung *term* ke- i .

Dalam proses *clustering*, kesamaan antara dokumen D_i dengan dokumen D_j umumnya diukur dengan fungsi similaritas tertentu. Menurut Chisholm and Kolda(1999) untuk tujuan *clustering* dokumen fungsi yang baik adalah fungsi similaritas Cosine, berikut:

$$\text{Cosine-sim}(D_i, D_j) = \frac{\sum_{k=1}^t D_{ik} D_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^t (D_{ik})^2 \sum_{k=1}^t (D_{jk})^2}} \dots (3)$$

Jika vektor D_i dan D_j masing-masing ternormalisasi sehingga masing-masing panjangnya satu, maka fungsi *cosine* menjadi:

$$\text{Cosine-sim}(D_i, D_j) = \sum_{k=1}^t D_{ik} D_{jk} \dots (4)$$



Gambar 1. Pencarian *query* berbasis kata model IFS

SRClus ini dimaksudkan untuk meningkatkan efektifitas *retrieval* dari mesin pencari. Pada model IFS hasil pencarian disajikan berupa lajur daftar panjang dokumen yang “dianggap” relevan oleh sistem. Dan pada kenyatannya karena pengukuran similaritas hanya dilakukan antara *query* dengan dokumen dan *ran-king* dalam daftar jawaban *search result* adalah didasarkan pada tingkat similaritas *query*-dokumen tanpa melihat similaritas antar dokumen maka kasus yang sering terjadi adalah dokumen yang sebenarnya relevan terhadap *query* karena kebetulan frekuensi kata *query*nya kecil akan berada pada ranking bawah. Sebaliknya suatu dokumen yang sebenarnya tidak relvan terhadap

Dalam pemrosesan *query*, simi-laritas antara *query* Q dengan dokumen D_i juga dapat digunakan formula pada persamaan (4), yaitu:

$$\text{Cosine-sim}(Q, D_i) = \sum_{k=1}^t Q_k D_{ik} \dots (5)$$

Ada berbagai strategi pencarian (*search strategies*) dalam IR antara lain: *boolean search*, *inverted file search*, *probabilistic search*, *extended boolean search* (Salton, 1989). Dari model-model *search* tersebut yang banyak digunakan adalah *inverted files search* (IFS) karena alasan efisiensi.

Sekema IR model IFS dapat dilihat seperti pada Gambar 1. Dalam *indexing* model IFS *term* terindeks akan menunjuk pada *list* yang memuat daftar dokumen yang mengandung *term* tersebut pada Gambar 2, sehingga jika suatu *query* diberikan akan dengan cepat diberikan jawaban daftar dokumen yang memuat *term* tersebut.

Term Fdoc link

t_1	2	•	d_1	0.447	d_2	0.555			
t_2	3	•	d_1	0.894	d_2	0.832	d_3	0.596	
t_3	3	•	d_3	0.745	d_4	0.485	d_5	0.588	
t_4	3	•	d_6	1	d_7	1	d_8	1	
t_5	3	•	d_3	0.298	d_4	0.728	d_5	0.196	3
t_6	2	•	d_4	0.485	d_5	0.785			

Gambar 2. Struktur data pada pencarian *query* model IFS

query karena kebetulan mengandung kata *query* dengan frekuensi besar akan berada paaa ranking atas.

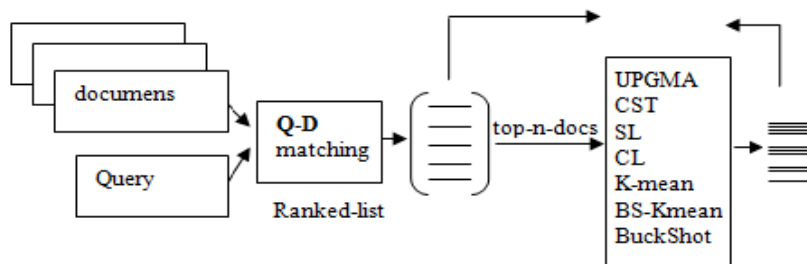
Pada *SRClus* tersebut dapat diasumsikan bahwa hasil pemrosesan IFS masih merupakan kumpulan dokumen yang secara ideal semua relevan terhadap *query*, tetapi secara kenyataan tetap mengandung dokumen yang tidak relevan. Dokumen tidak relevan ini jika jumlahnya banyak dan berada pada ranking atas dalam daftar *search result* maka pengguna akan menemukan kesulitan mencari dokumen yang relevan sesungguhnya yang kebetulan ada di ranking bawah. Dengan asumsi jika dilakukan *clustering* pada hasil ini maka sesuai dengan *cluster hypothesis* bahwa

dokumen relevan akan mengelompok dengan dokumen yang relevan dan sebaliknya. Pusat kluster ini selanjutnya dapat digunakan sebagai representasi kluster tersebut yang dapat diukur pada tingkat similaritasnya terhadap *query*. Pusat kluster yang merupakan rata-rata vektor dokumen dalam kluster tersebut juga dapat digunakan mengekstrak kata-kata yang dapat dijadikan sebagai label kluster yang mewakili tentang apa kluster tersebut. Algoritma SRCLus dapat dituliskan sebagai berikut:

Algoritma SRCLus:

- Lakukan pencarian *query* dengan metode IFS.
- Lakukan clustering pada hasil pencarian
- Cari pusat-pusat kluster dari hasil clustering
- Cari label-label kluster berdasarkan informasi pusat kluster
- Tentukan similaritas pusat kluster terhadap *query* yang diberikan
- Sajikan hasil pencarian perkluster ter-ranking berdasar tingkat similaritas pusat kluster terhadap *query*, dengan bantuan label kluster

Secara sekema pemrosesan SRCLus dapat digambarkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Skema penyajian hasil dengan SRCLus

Evaluasi suatu model *retrieval* oleh suatu sistem IR yang paling umum adalah ukuran *Recall* dan *Precision* (Rijsbergen, 1979). *Recall* didefinisikan sebagai rasio cacah dokumen relevan terpanggil dengan cacah total dokumen terpanggil, sedangkan *Recall* didefinisikan sebagai rasio antara cacah dokumen relevan terpanggil dengan total cacah dokumen relevan dalam koleksi. Parameter tunggal ukuran keberhasilan *retrieval* yang menggabungkan *Recall* dan *Precision* adalah parameter *F-measure* (Rijsbergen, 1979):

$$F\text{-measure} = \frac{(\beta^2 + 1)PR}{\beta^2 P + R} \dots\dots (6)$$

dengan β merupakan nilai parameter

kepentingan antara aspek *Precision* dan *Recall*. Jika *Recall* (R) dan *Precision* (P) memiliki bobot yang sama penting, $\beta = 1$, maka parameter *F-measure* menjadi seperti persamaan (7) berikut.

$$F\text{-measure} = \frac{2PR}{P + R} \dots\dots\dots (7)$$

Bahan penelitian ini berupa koleksi dokumen teks berbahasa Indonesia, yang terdiri dari dua buah koleksi berita dan koleksi abstrak, yaitu seperti tersaji dalam Tabel 1 berikut.

Adapun daftar *query* untuk masing-masing koleksi dan informasi relevansi dengan pemeriksaan manual untuk tiap *query* adalah seperti pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1. Koleksi dokumen untuk tes

Koleksi	Σ doc	Σ Term	Σ index term	Σ cluste r	Σ Query
News1009	1009	18.255	5.233	21	10
Abstract	350	5.110	1.119	30	10

Tabel 2. Daftar *query* untuk koleksi dokumen berita Nws1009.dok

No	Query	Num of Rel Doc
1	Pemberangkatan jamaah haji	38
2	Pertandingan piala dunia	183
3	Pasar uang dollar	67
4	Penumpasan gam aceh	61
5	Kerusuhan ambon maluku	51
6	Pertandingan tinju tyson lewis	21
7	Tki indonesia di malaysia	30
8	Penyelesaian kasus tommy Suharto	67
9	Pertandingan tenis junior	30
10	Penyelesaian kasus bulog akbar tanjung	83

Tabel 3. Daftar *Query* untuk koleksi dokumen akademik abstrak

No	Query	Num of Rel Doc
1	Aplikasi logika fuzy	20
2	Sistem informasi	45
3	Jaringan syaraf tiruan	17
4	Pengolahan citra	10
5	Algoritma genetika	17
6	Database	15
7	Sistem pendukung keputusan	16
8	GPS GPRS komunikasi data	29
9	Rekayasa perangkat lunak	24
10	Keamanan system informasi	21

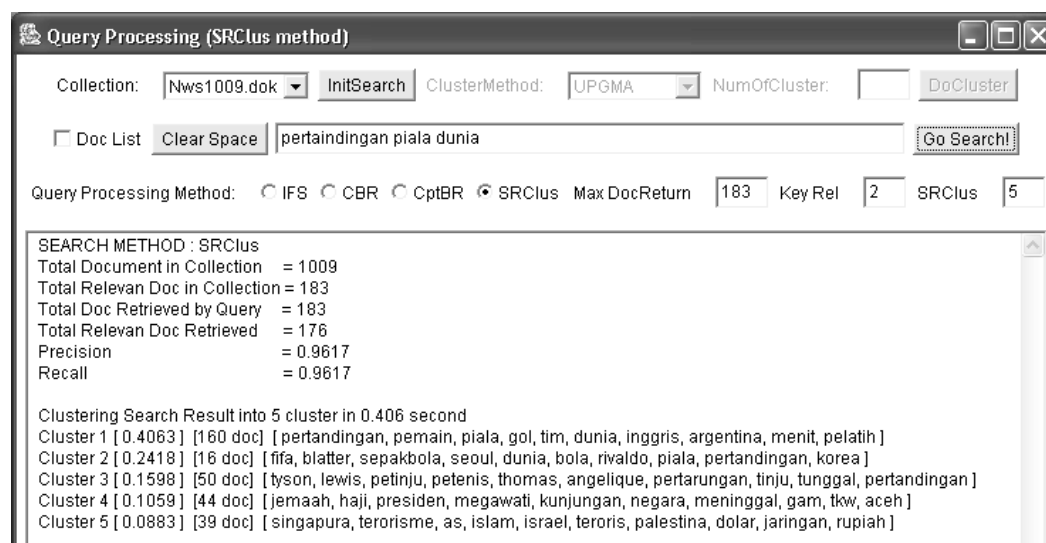
Proses *pre-processing* berupa ekstrak kata, perancangan kode untuk IFS maupun SRClus dan perancangan antar muka grafis dilakukan dengan kode program JAVA (jdk1.4.2). Analisis dilakukan dengan cara pemanggilan *query* secara linear (IFS) dengan mengambil informasi banyak dokumen yang relevan sebagai nilai *cut-off* (batasan jumlah dokumen yang harus dikembalikan). Hasilnya dievaluasi dengan menghitung *F-measure*-nya. Selanjutnya dengan algoritma SRCLus diterapkan dengan nilai *cut-off* yang sama dengan IFS, hasil dokumen yang dikembalikan diambilkan dari kluster dengan ranking teratas jika telah memenuhi atau ditambahkan kluster dibawahnya dan seterusnya. Kemudian nilai untuk *F-measure* dari SRClus juga ditentukan. Hasil pengujian statistik digunakan untuk membandingkan *F-measure* dari IFS dengan SRClus. Uji statistik hasil dengan uji t wilcoxon sign-rank untuk berpasangan.

PEMBAHASAN

Hasil perancangan antar muka grafis untuk membandingkan kinerja IFS dengan SRClus disajikan seperti dalam Gambar 4 dan Gambar 5. Dari Gambar 4 terlihat bahwa pada IFS, dalam 183 dokumen *ranking* teratas hanya 153 yang relevan. Jika hasil pencarian dikluster terlebih dahulu dengan SRClus, dalam contoh dikluster menjadi 5 buah kluster, terlihat bahwa 2 kluster pertama berkaitan dengan piala dunia seperti tersaji dalam 10 kata yang dipilih sebagai label dari masing-masing kluster, yaitu label kluster 1 [pertandingan, pemain, dst...] dan label kluster 2 [fifa, blatter, dst ...], sedangkan pada kluster ke 3,4 dan 5 berhubungan dengan dokumen lain. Setelah dilakukan *clustering* ternyata dalam 183 dokumen pertama terdapat 176 dokumen relevan. Terjadinya peningkatan dokumen relevan sebanyak 23 buah dokumen.



Gambar 4. Pencarian *query* “pertandingan piala dunia” dengan model IFS



Gambar 5. Pencarian *query* “pertandingan piala dunia” dengan model SRClus

Untuk perbandingan hasil evaluasi temu kembali metode SRClus dengan temu kembali metode IFS untuk seluruh *query* pada koleksi dokumen

berita Nws1009.dok disajikan dalam Tabel 4. Adapun hasil analisis statistik perbedaan rerata kinerja IFS dan kinerja SRClus disajikan dalam Tabel 5.

Tabel 4. Hasil *retrieval* koleksi News1009 dengan model IFS dan SRClus

No	Query	F-IFS	F-SRClus
1	Pemberangkatan...	0.4079	0.4342
2	Pertandingan ..	0.4290	0.4836
3	Pasar uang dolar...	0.4925	0.4925
4	Penumpasan ...	0.4836	0.4918
5	Kerusuhan ...	0.4412	0.4608
6	Pertandingan...	0.5000	0.5000
7	Tki indonesia ...	0.3833	0.4667
8	Penyelesaian ...	0.3806	0.4851
9	Pertandingan...	0.2000	0.4667
10	Penyelesiaian ...	0.4157	0.4458
	Average	0.4134	0.4727

Dari Tabel 4 dapat ditunjukkan bahwa kinerja *retrieval* dengan melakukan *clustering* pada *search result* dapat meningkatkan temu kembali dari cara *linear* (IFS), yaitu rerata 0.4772 untuk SRClus dan dibandingkan 0.4134 untuk IFS. Peningkatan ini setelah diuji secara

statistik adalah signifikan pada taraf alfa 5% (lihat Tabel 5). Sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan *clustering* akan meningkatkan kinerja temu kembali dibandingkan dengan penyajian langsung hasil pencariannya.

Tabel 5. Hasil uji statistik beda *retrieval* SRClus dan IFS koleksi Nws1009.dok

Mean	Std.Deviation	T	df	Sig(2-tailed)
-0,05934	0,08084	-2,321	9	0,045

Untuk koleksi abstrak, kinerja SRClus disajikan dalam Tabel 6 dengan uji statistik hasil perbandingan pada Tabel 7. Dari Tabel 6 terlihat bahwa kinerja SRClus memberikan rata-rata *F-measure* sebesar 0.3248 dibandingkan de-

ngan kinerja IFS sebesar 0.2534. Dari uji statistik juga terlihat bahwa perbaikan kinerja SRClus terhadap IFS signifikan hampir mencapai taraf 1% , yaitu pada taraf signifikansi 1,1%.

Tabel 6. Hasil *retrieval* IFS dan SRClus untuk koleksi abstrak

No	Query	F-IFS	F-SRClus
1	Aplikasi logika fuzy	0.3250	0.3750
2	Sistem informasi	0.3000	0.3000
3	Jaringan syaraf...	0.4118	0.4118
4	Pengolahan citra	0.2500	0.4500
5	Algoritma genetika	0.1765	0.2647
6	Database	0.3000	0.3667
7	Sistem pendukung ..	0.2500	0.3125
8	GPS GPRS komu...	0.1552	0.1897
9	Rekayasa perang...	0.2708	0.2917
10	Keamanan system...	0.0952	0.2857
	Average	0.2534	0.3248

Tabel 7. Hasil uji statistik *retrieval* SRClus dan IFS koleksi abstrak

Mean	Std.Deviation	T	df	Sig (2-tailed)
-0,07133	0,07124	-3,166	9	0,011

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah bahwa penerapan *clustering* dokumen ternyata mampu meningkatkan kinerja *retrieval* meskipun ia bekerja pada level penyajian. Peningkatan *F-measure* sebagai kinerja ukuran efektivitas adalah sebesar 14,34% untuk koleksi berita dan 28,18% untuk koleksi abstrak akademik. Dengan demikian dapat disarankan untuk perbaikan perancangan suatu mesin pencari dalam skala data yang besar, penerapan *clustering* dilakukan untuk upaya penyajian hasil pencarian yang

lebih efisien dari pada penyajian berbasis *page-rank* seperti yang telah umum diterapkan saat ini.

Penerapan *clustering* dokumen ini dapat juga digunakan untuk merancang system temu kembali yang lebih efektif karena saat ini volume data yang ada dalam bentuk digital seperti pada web perkembangannya sangat pesat sehingga mengakibatkan terus membesarnya ukuran koleksi. Ukuran koleksi yang besar pada gilirannya akan menyebabkan hasil pencarian yang cenderung membesar pula. Untuk seleksi dokumen tidak relevan dapat dirancang

dengan menerapkan clustering, yaitu dengan menghapuskan saja hasil pencarian yang pusat klusternya kurang relevan dengan *query* yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Chisholm, E. and T. G. Kolda, 1999, New Term Weighting Formula for the Vector Space Method in Information Retrieval, *Research Report*, Computer Science and Mathematics Division, Oak Ridge National Library, Oak Ridge, TN 3781-6367.
- Cutting, D. R., D. R. Karger, J. O. Pederson, and J. W. Tukey, 1992, Scatter/Gather: A Cluster-based Approach to Browsing Large Document Collection, *Proceeding 15th Annual Int 7ACM SIGIR Conference on R&D in IR*, June 1992.
- Frakes, W.B., and Baeza-Yates, R., *Information Retrieval, Data Structures and Algorithm*, Prentice Hall, Englewood New Jersey, 1992.
- Luhn, H.P., 1958, The Automatic Creation of Literature Abstracts *IBM Journal of Research and Development*, 2:159-165.
- Nazief, B., 2000, Development of Computational Linguistic Research: a Challenge for Indonesia, *Computer Science Center*, University of Indonesia
- Salton, G., 1989, *Automatix Text Processing, The Transformation, Analysis, and Retrieval of Information by Computer*, Cornell University, Addison Wisley Publishing Comp, New York.
- Tala, F. Z., 2004, A Study of Stemming Effect on Information Retrieval in Bahasa Indonesia, *Master Thesis*, Universiteit van Amsterdam, The Netherlands.
- Osinki, S. , 2004, Dimensionality Reduction Techniques for Search Engine Results Clustering, *Master Thesis*, University of Sheffield, UK.
- Rijsbergen, C. J., 1979, *Information Retrieval*, Information Retrieval Group, University of Glasgow .
- Tombros, A., 2002, The Effectiveness of Query-Based Hierarchic Clustering of Documents for Information Retrieval, *PhD Thesis*, University of Glasgow.
- Vega, V. B. , 2001, Information Retrieval for the Indonesian Language, *Master Thesis*, National University of Singapore.
- Widyantoro, D., H., 2007, Toward the Development of The Next Generation Search Engine, *Proceeding of The International Conference on Electrical Engineering and Informatics*, ICEEI2007, Bandung.
- Zamir, O.E., 1999, Clustering Web Document : A Phrase-Based Method for Grouping Search Engine Result, *PhD. Dissertation*, University of Washington.

PERAMALAN KAPASITAS BATERAI PADA KENDARAAN LISTRIK DENGAN METODA COULOMETRI

¹Bambang Sri Kaloko

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Jember

Masuk: 16 April 2009 2009, revisi masuk : 21 Juli 2009, diterima: 25 Juli 2009

ABSTRACT

This article proposes a new coulometric approach to calculate the state of charge of a lead acid battery in electric vehicles. The main existing state of charge algorithms have two major defects: a state of charge definition not adapted to electric vehicle applications and the nonoptimal use of static performance of the accumulator to estimate its state under dynamic stresses. In order to improve these two weaknesses, we propose a new coulometric algorithm linked to the performance of the electric vehicle and where the ampere hours virtually discharged are obtained by applying statistical equivalence coefficients to the real current profile. The evaluation of this new algorithm on real discharges reveals a significant improvement with less than 5% errors in all cases studied.

Keywords: *state of charge, coulometry, electric vehicle*

INTISARI

Artikel ini memperkenalkan suatu pendekatan coulometri untuk menghitung kapasitas muatan suatu baterai asam (Pb), digunakan kendaraan listrik. Algoritma yang sudah ada dalam penentuan kapasitas muatan suatu baterai memiliki dua kekurangan, yaitu pertama tidak adaptif untuk digunakan pada kendaraan listrik dan kedua tidak optimal bila digunakan dengan beban yang dinamis. Untuk memperbaiki dua kekurangan tersebut maka metode coulometri digunakan untuk menentukan kapasitas baterai/Ah dengan menerapkan persamaan statistik. Evaluasi terhadap algoritma baru ini memberikan perbaikan dengan tingkat ke-salahan tidak kurang dari 5%.

Kata kunci: kapasitas muatan, coulometri, kendaraan listrik

PENDAHULUAN

Kendaraan listrik membutuhkan suatu energi listrik yang memiliki dimensi tidak besar, dapat dipindah tempat, dapat diisi ulang dan dapat didaur ulang. Berbagai jenis sumber energi listrik ini dikembangkan untuk menjalankan kendaraan listrik, tetapi namun baterai masih sangat populer untuk kendaraan jenis ini. Baterai yang digunakan untuk kendaraan listrik harus memiliki daya tinggi, energi besar, kapasitas muatan ini besar, memiliki masa pakai yang panjang, memiliki masa kerja yang panjang dan dapat didaurulang serta harga yang tidak terlalu tinggi. Sampai saat ini baterai yang digunakan untuk kendaraan listrik memiliki usia kerja yang pendek dan harganya masih tinggi (Husein, 2003). Baterai yang

digunakan untuk kendaraan listrik harus memiliki karakteristik listrik dan karakteristik kerja. Karakteristik listrik meliputi kapasitas baterai, arus baterai/laju discharge, pengisian state of charge, pemakaian baterai ini, efisiensi, daya dan energi suatu baterai (Dhameja, 2002).

Penelitian tentang kendaraan listrik diperlukan seiring dengan tingginya harga minyak dunia, isu pemanasan global dan pencemaran udara. Disamping itu diperlukan juga pengaturan energi untuk menjalankan kendaraan listrik. Model matematis baterai asam Pb telah dibangun untuk menentukan rugi internal baterai, kapasitas baterai/Ah dan tegangan. Model menggunakan komponen nonlinier dengan menggunakan bahasa pemrograman BASIC. Model ini cukup akurat me-

¹b_srikaloko@yahoo.com

menentukan performa baterai untuk kondisi temperatur yang bervariasi, arus pengisian/*charge* dan arus pemakaian bervariasi (Salameh, et al, 1992). Kelemahan dari model ini adalah suatu konsentrasi elektrolit dianggap konstan sehingga belum bisa menggambarkan baterai secara utuh.

Metode *Coulometry* merupakan suatu cara untuk menentukan jumlah muatan yang ada pada baterai. Metode ini dapat digunakan untuk menentukan pengisian baterai ini yang digunakan pada mobil listrik (Caumont, et al, 2000; Bagotsky, 2006). Metode coulometry memungkinkan untuk menentukan kapasitas baterai/Ah berdasarkan konsentrasi elektrolit yang ada pada baterai. Metode ini memiliki kelebihan yaitu dapat menentukan pengisian baterai pada mobil listrik dan juga dapat mengestimasi kapasitas muatan baterai bila diberi beban dinamis. Algoritma ini memiliki kesalahan tidak kurang dari 5% terhadap nilai aktual.

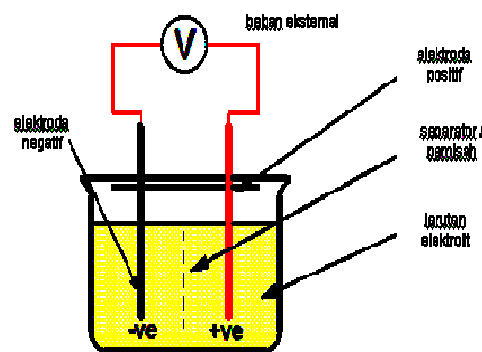
Nilai energi, efisiensi dan pengisian baterai sangat penting untuk kendaraan listrik. Suatu pendekatan model reaksi elektrokimia digunakan untuk menentukan besarnya pengisian baterai pada kendaraan listrik. Metode ini mengukur pengisian baterai berdasarkan reaksi elektrode, rugi-rugi internal dan konsentrasi elektrolit dalam baterai (Ying, et al, 2008). Pemodelan matematis ini baterai berdasarkan proses fisika kimia pada elektrode dan elektrolit telah dibangun (Ledovskikh, et al, 2003). Model mensimulasikan besarnya tegangan, tekanan gas dan temperatur baterai selama bekerja. Model didasarkan pada pengaruh termodinamika, kinetika dan proses difusi dalam baterai.

Baterai terdiri dari satu atau lebih sel elektrokimia. Sel elektrokimia ini suatu bentuk baterai dengan terhubung secara seri atau paralel sesuai dengan kebutuhan. Satu sel baterai berisi empat komponen dasar ditunjukkan pada Gambar 1 yaitu:

- Elektrode positif yang menerima elektron dari rangkaian eksternal ketika sel baterai melepas energi listrik,
- Elektrode negatif yang memberikan elektron ke rangkaian eksternal ketika sel baterai melepas energi listrik.

- Elektrolit, yaitu larutan kimia yang berfungsi untuk menghantarkan ion antara elektrode positif dan negatif,
- Separator/pemisah berfungsi untuk mengisolasi secara elektrik elektrode positif dan negatif.

Dalam beberapa desain baterai jarak fisik antar elektrode memberikan isolasi elektrik, sehingga tidak diperlukan pemisah. Ketika sel baterai disisipkan dalam rangkaian yang lengkap maka muatan elektron mengalir di sekitar rangkaian. Muatan elektron yang mengalir dalam rangkaian eksternal ini menimbulkan arus listrik. Sedang dalam sel muatan mengalir dalam bentuk ion dari satu elektrode ke elektrode lainnya. Elektrode positif menerima elektron dari rangkaian eksternal ini saat melepas energi listrik. Elektron-elektron ini selanjutnya bereaksi dengan bahan aktif elektrode positif disebut sebagai reaksi reduksi. Reaksi dilanjutkan aliran muatan menuju elektrode negatif melalui larutan elektrolit. Pada elektrode negatif terjadi reaksi oksidasi antara bahan aktif elektrode negatif dengan muatan yang mengalir melalui larutan elektrolit, mengakibatkan terjadinya kelebihan elektron yang selanjutnya akan diberikan ke rangkaian eksternal.



Gambar 1. Sel tunggal baterai elektrokimia.

Perlu untuk diingat bahwa dalam sistem tertutup masing-masing elektron yang dihasilkan dalam reaksi oksidasi di elektrode negatif ini akan diikuti dengan konsumsi elektron disisi elektrode positif melalui reaksi reduksi. Proses akan berlanjut pada bahan aktif sampai reaksi menjadi lambat, sehingga baterai tidak mampu lagi menyediakan elektron.

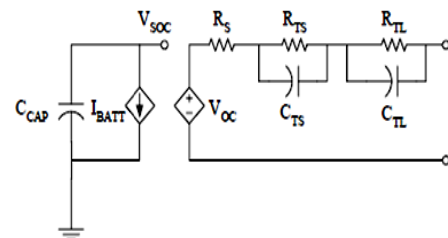
Baterai asam Pb banyak digunakan sebagai media penyimpanan energi elektrokimia. Banyak penelitian tentang baterai jenis ini, namun pokok permasalahan yang ada pada baterai ini masih belum terjawab. Hal ini yang menjadi permasalahan dalam pabrikasi baterai jenis ini karena sulitnya memahami kondisi spesifik yang ada. Baterai jenis ini telah digunakan sejak lama, namun permasalahan mendasar yang menjadi landasan dalam menentukan performa baterai belum terpecahkan. Performa baterai akan diketahui dengan baik jika dioperasikan dalam kondisi statis (arus dan temperature konstan), padahal penggunaan baterai untuk kendaraan listrik membutuhkan kondisi yang bervariasi (Caumont, et al, 2000).

Mobil listrik umumnya menggunakan baterai sebagai sumber energi utamanya (Larminie, 2003). Namun baterai pada mobil listrik memiliki kelemahan yaitu kapasitas muatan (Ah) yang terbatas sehingga perlu dilakukan pengisian kembali. Baterai juga mempunyai masa pakai yang terbatas ketika dilakukan pengisian yang berulang-ulang atau jika diberi beban dinamis yang bervariasi. Perlu dilakukan pengaturan pembebanan agar baterai tidak bekerja keras.

Untuk menerapkan baterai pada kendaraan listrik, perlu diketahui bagaimana karakteristik baterai yang akan dipakai. Ada dua karakteristik utama baterai yaitu karakteristik listrik dan karakteristik kerja. Karakteristik listrik baterai meliputi tegangan sumber baterai, kapasitas baterai (Ah), besarnya daya dan energi suatu baterai. Karakteristik kerja baterai untuk menentukan lama pemakaian baterai. Untuk menganalisis permasalahan tersebut perlu digunakan suatu pendekatan. Pendekatan ini diperlukan untuk mendapatkan data-data tentang baterai yang akan digunakan untuk kendaraan listrik. Pendekatan yang dipakai adalah pendekatan model dan pendekatan eksperimen. Pemodelan dilakukan dengan membuat model ini persamaan rangkaian listrik dan analisis model. Sedangkan eksperimen dilakukan dengan mengukur kerapatan larutan elektrolit, mengukur tegangan baterai dan mengu-

kur impedansi baterai (Nugues, 1996 dan Smimite, 1997).

Penelitian tentang penggunaan baterai pada kendaraan listrik telah banyak dilakukan. Baterai dimodelkan menjadi dua rangkaian listrik yang berbeda, satu rangkaian merepresentasikan kapasitas baterai dan rangkaian yang lain merepresentasikan karakteristik transien dan tahanan internal baterai seperti pada Gambar 2 (Knauff, Singh et al, 2007). Hasil simulasi model *tesbed* baterai terhadap data eksperimen mempunyai tingkat kesalahan sebesar 0,19%. Model ini cukup bagus untuk memodelkan suatu baterai, namun tidak adaptif terhadap perubahan suhu/temperatur dan konsentrasi elektrolit.



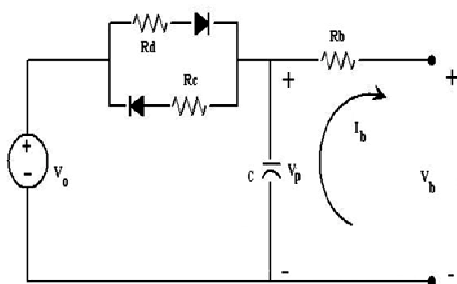
Gambar 2. Model Rangkaian Baterai (Singh et al, 2007).

Model baterai juga dikembangkan dari persamaan Butler-Volmer dengan mengukur terminal output baterai. Model ini cocok untuk mengestimasi tegangan dan arus baterai, tetapi memiliki kelemahan karena baterai harus dalam kondisi terisi antara 60% ~ 80% (Yun, et al, 2004).

Simulator untuk menentukan optimasi pengisian muatan baterai dibuat dengan menggunakan metode Euler dan Peukerts maka dapat ditentukan besarnya tegangan dan arus baterai (Lee, et al, 2001). Baterai dibagi dalam dua mode yaitu mode pengisian muatan dan mode pemakaian energi. Sedangkan cara menentukan pengisian muatan baterai dan lama pemakaian baterai telah dibangun dengan menggunakan metode logika *fuzzy* (Wang dan Singh, 2001). Model ini cukup efektif untuk baterai asam yang memiliki kerugian kapasitas baterai karena pengaruh temperatur yang rendah, rugi internal yang tinggi, berkurangnya jumlah elektrode dan pembentukan sulfasi pada elektroda karena reaksi kimia de-

ngan larutan asam sulfat. Sedangkan implementasi logika *fuzzy* untuk menentukan pengisian muatan baterai dan lama pemakaian baterai juga telah dilakukan (Singh dan Reisner, 2001). Pengembangan logika *fuzzy* dengan metode *coulometri* untuk menentukan pengisian muatan baterai juga telah dikembangkan (Gaddam, et al, 2000). Input yang diukur dalam eksperimen, adalah temperatur dan arus pemakaian. Outputnya adalah efisiensi pemakaian. Estimasi pengisian muatan baterai untuk Scooters listrik dengan metode *fuzzy neural network* telah dikembangkan. Estimasi ini digunakan untuk menentukan jumlah energi yang dibutuhkan oleh scooters. Kelemahan metode ini adalah belum adaptif untuk temperatur yang bervariasi (Lee, Shiah dan Wang, 2007). Penelitian lain tentang estimasi pengisian muatan baterai pada baterai asam Pb dengan metode *coulometri* dan *radial basis function*. Model ini lebih adaptif terhadap perubahan temperatur pada baterai (Sauradip, et al, 2001).

Model matematis untuk melakukan estimasi pengisian muatan pada baterai telah juga dikembangkan (Chiasson, et al, 2005). Persamaan matematis dikembangkan dari model Thevenin baterai, untuk mendapatkan respon dinamis ini seperti Gambar 3.



Gambar 3. Model dinamis baterai (Chiasson, et al, 2005).

Persamaan dinamis dari model baterai tahap *charging* dan *discharging* adalah dengan: (R_c : tahanan charging, R_d : tahanan *discharging*, I_b : Arus baterai, C : kapa-sitas polarisasi baterai, V_{oc} : tegangan open circuit, V_c : tegangan

kapasitor internal, V_b : tegangan terminal).

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_d C} + V_{oc} \frac{1}{R_d C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p \leq V_{oc}$$

$$\frac{dV_p}{dt} = -V_p \frac{1}{R_c C} + V_{oc} \frac{1}{R_c C} - I_b \frac{1}{C}, \quad V_p > V_{oc}$$

..... (1)

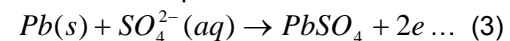
dan

$$I_b = \frac{V_p - V_{oc}}{R_b} \quad \text{..... (2)}$$

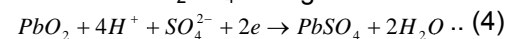
Model pemakaian baterai asam Pb dengan membagi beban secara bertingkat telah dibangun oleh Igor Papić, 2006. Model disimulasikan ini dengan menggunakan teknik besaran arus discharge konstan. Kelebihan energi listrik disimpan kedalam baterai ketika beban rendah, dan mengembalikan energi tersebut ke beban apabila kebutuhan beban sangat tinggi. Metode ini dikenal dengan nama *battery energy storage system* (BESS). Model ini dapat digunakan untuk meramal daya yang diperlukan oleh beban, tetapi memiliki kekurangan yaitu tidak dapat digunakan untuk kondisi temperatur yang bervariasi.

Prinsip kerja baterai berdasarkan reaksi redoks, yang terdiri dari reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi adalah reaksi yang melibatkan pelepasan elektron oleh suatu zat, sedangkan reaksi reduksi adalah reaksi yang melibatkan pengikatan elektron oleh suatu zat.

Atom timbal pada anoda ketika di-reaksikan pada larutan asam sulfat H_2SO_4 akan melepaskan elektronnya (e^-) dan menimbulkan ion timbal (Pb^{2+}). Reaksi oksidasi pada sisi anode adalah :

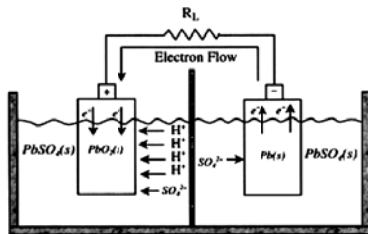


Elektron (e^-) bermuatan negatif dan ion timbal (Pb^{2+}) bermuatan positif. Pada kondisi standar ($25^\circ C$, 1 atm), potensial di anoda dengan reaksi seperti persamaan (3) adalah $-0,31$ volt. Pada katode terjadi pengikatan elektron oleh ion Pb^{4+} menjadi ion Pb^{2+} . Reaksi dengan larutan asam sulfat H_2SO_4 sebagai berikut:



Potensial reduksi standar yang dihasilkan pada katode dengan reaksi seperti persamaan (4) adalah 1,7 volt. Potensial sel (E_{sel}) merupakan beda potensial yang terjadi antara katode dan anode. Apabila anode dan katode dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan mengalir elektron (e^-) dari anode ke katode, sehingga mengalir arus listrik dari katode ke anode. Oleh karena itu kutub positif terjadi pada katode dan kutub negatif terjadi pada anode. Besarnya beda potensial untuk satu sel baterai asam Pb adalah:

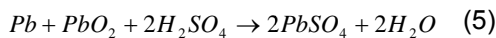
$$E_{sel} = E_{katoda} - E_{anoda} = 1,7 - (-0,31) = 2,01 \text{ volt}$$



Gambar 4. Prinsip kerja baterai asam Pb (Husein, 2003).

Elektron (e^-) yang mengalir ke katode melalui penghantar akan membentuk ion Pb^{2+} , ion ini bereaksi dengan larutan asam sulfat membentuk molekul $PbSO_4$ dan membentuk air (H_2O).

Prinsip dasar baterai adalah sebuah reaksi kimia antara elektrode negatif dan elektroda positif dengan suatu larutan elektrolit:



Baterai akan memberikan energi listrik selama kedua elektrode masih memiliki beda potensial. Setelah kedua elektrode tidak lagi memiliki beda potensial maka dikatakan baterai tersebut kosong atau tidak bermuatan. Untuk itu perlu dilakukan proses pengisian baterai dengan memberikan arus listrik agar berlangsung reaksi redoks kembali.

Usaha listrik maksimum (W_{el}) suatu baterai yang beroperasi pada temperatur dan tekanan konstan diberikan oleh perubahan energi bebas Gibbs dari suatu reaksi kimia, yaitu:

$$W_{el} = \Delta G = - e.F.E_{sel} \dots\dots\dots (6)$$

F = konstanta Faraday (96485 C/mol), E_{sel} = tegangan sel ideal (V), Perubahan energi bebas Gibbs diberikan oleh persamaan:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \dots\dots\dots (7)$$

ΔH = perubahan *enthalpy* (J/mol), ΔS = perubahan *entropy* (-163,25 J/mol K), T = temperatur (K).

Besar ΔH pada operasi standar dengan temperatur 25°C dan tekanan 1 atm dengan hasil reaksi berupa air adalah -285,8 kJ/mol. Perbedaan antara ΔH dan ΔG menghasilkan $T.\Delta S$, yaitu pengaruh panas timbal balik. Perbedaan tersebut merepresentasikan panas yang muncul disekeliling ketika proses berlangsung timbal balik, yang berarti keadaan berlangsung dalam kondisi setimbang. Jika $T.\Delta S$ positif, proses elektrokimia memerlukan energi, ditandai dengan suasana lingkungan yang dingin. $T.\Delta S$ berharga negatif, bila proses elektrokimia membebaskan energi, ditandai suasana lingkungan yang panas.

Persamaan kesetimbangan tegangan sel $E_0(V)$ adalah:

$$E_0 = - \frac{\Delta G}{n.F} \dots\dots\dots (8)$$

dengan n: jumlah muatan elektron yang dihasilkan; F: konstanta Faraday, sama dengan 96485 As/equiv.; n.F berarti jumlah muatan listrik hasil reaksi elektrokimia 1.F=26,802Ah/equiv; 2.F=53,604 Ah /equiv); $n.F.U^0$ e-nergi listrik yang timbul (kJ). Model Shepherd merupakan model baterai yang paling sering digunakan untuk menganalisa baterai, menguraikan tentang perilaku elektrokimia baterai. Model ini digunakan bersama dengan persamaan Peukert untuk mendapatkan tegangan baterai dan pengisian muatan baterai:

$$V_T = E_0 - R_I I - \frac{K_I}{1-f} \dots\dots\dots (9)$$

dengan V_T tegangan terminal baterai (volt), E_0 tegangan rangkaian terbuka ketika baterai diisi penuh (volt), R_I ham-

batan internal baterai (ohm), K , hambatan polarisasi (ohm), I arus sesaat (ampere).

$$f = \int \frac{I}{Q_0} dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

dengan f adalah ampere jam yang terkumpul dibagi dengan kapasitas baterai penuh (Q_0).

Rugi tegangan polarisasi adalah rugi-rugi yang diakibatkan oleh reaksi kimia yang terjadi pada elektrode. Besar rugi tegangan polarisasi dapat dicari dari persamaan (9) dan persamaan (10) berikut:

$$V_p = K \frac{Q}{Q - it} \quad \dots\dots (11)$$

dimana :

K : konstanta polarisasi, Q : kapasitas baterai (Ah), i : arus beban (A), t : lama wak-

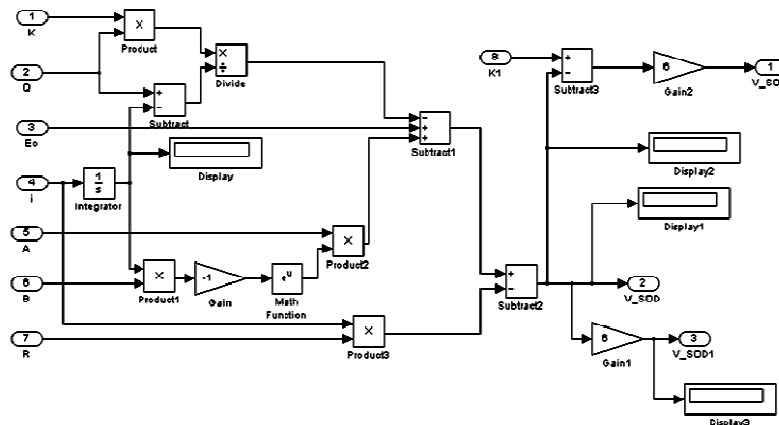
tu pengisian (detik).

Dengan memasukkan persamaan (10) dan (11) ke dalam persamaan (9) dan dengan memasukkan tegangan jatuh pada saat baterai bekerja maka menghasilkan persamaan tegangan keluaran (V_{out}) per-selnya sebagai berikut:

$$V_t = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + Ae^{-Bit} - iR_{int} \dots (12)$$

dengan A dan B adalah suatu konstanta.

Model tegangan keluaran bebahan dalam bentuk blok diagram dibuat berdasarkan persamaan (12), seperti pada Gambar 5. Model ini diperlukan untuk mengetahui tegangan keluaran baterai terhadap perubahan arus beban.



Gambar 5. Model baterai pada kendaraan listrik.

Model baterai pada gambar 5 menjelaskan performa baterai ketika baterai sedang diisi muatan dan ketika baterai sedang memberikan muatan/energi ke beban. Dari kedua fase itu maka model dibuat menjadi dua mode yaitu mode kapasitas baterai/*State of Charge* dan mode besarnya muatan yang dilepaskan/*State of discharge*.

State of Charge adalah besarnya kapasitas baterai pada suatu waktu t tertentu. Arus yang mengalir merupakan perubahan muatan per satuan waktu.

$$dSoC_T = -dq \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$SoC_T(t) = Q_T - \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (14)$$

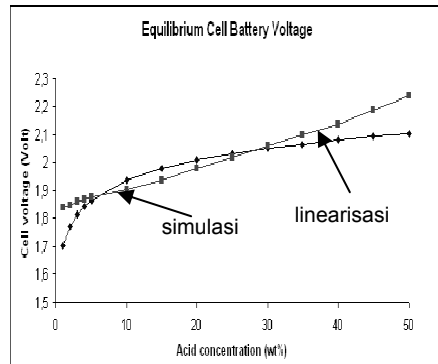
State of discharge adalah besarnya muatan yang telah dikeluarkan dari baterai pada waktu tertentu. Persamaan matematis *state of discharge* diperoleh dari kapasitas maksimum baterai dikurangi dengan kapasitas baterai pada waktu tertentu.

$$SoD_T(t) = \Delta q = \int_0^t i(\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$SoD_T(t) = Q_T - SoC_T(t)$$

PEMBAHASAN

Simulasi model ini telah dilakukan menggunakan data (Kiehne, 2003). Hasil simulasi dengan menggunakan Si-mulink dijelaskan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tegangan sel baterai vs konsentrasi larutan.

Hasil simulasi program MATLAB/SIMULINK terhadap tegangan satu sel baterai asam H_2SO_4 berkisar antara nilai 1,7 volt sampai 2,1 volt dengan konsentrasi larutan sebesar 1wt%(1g/cm³) - 50wt% (1,4g/cm³). Linearisasi tegangan sel baterai secara praktis ditentukan menurut persamaan(16) (Kiehne, 2003):

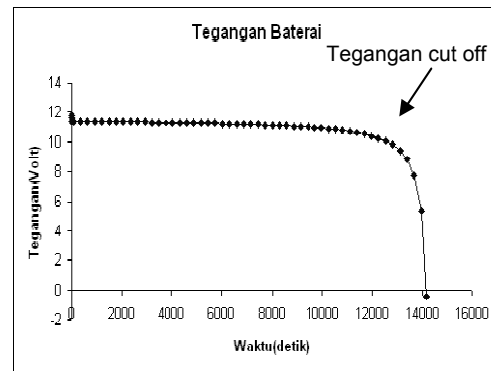
$$V_{sel} = \text{konsentrasi larutan} + 0,84 \dots (16)$$

Pendekatan linear pada konsentrasi tersebut memberikan nilai tegangan satu sel baterai asam Pb sebesar 1,84volt untuk konsentrasi larutan 1g/cm³ ~ 2,24volt untuk konsentrasi larutan 1,4g/cm³. Penyimpangan model Matlab/SIMULINK terhadap model linear rata-rata sebesar 3,63% (kurang dari 5%).

Gambar 7 menjelaskan tegangan baterai asam Pb ketika sedang bekerja dengan simulasi terhadap enam sel elektrode menghasilkan tegangan maksimum 12 volt dan tegangan cut off 9,6 volt. Tegangan cut off adalah tegangan baterai dimana baterai sudah tidak boleh lagi dibebani. Tegangan baterai sendiri tergantung dari banyaknya sel elektrokimia yang tersusun secara seri. Dengan n sel elektrokimia maka be-

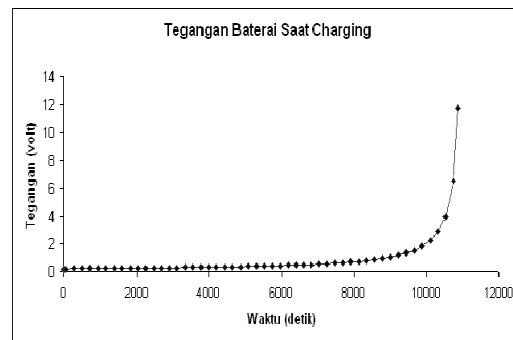
sar tegangan keluaran baterai menjadi :

$$V_{baterai} = n \cdot V_t \dots \dots \dots (17)$$



Gambar 7. Tegangan baterai vs waktu ketika baterai bekerja

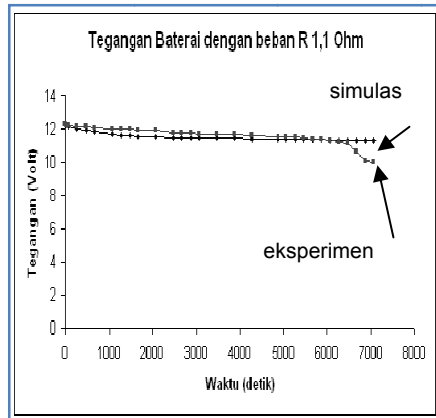
Model diatas diperoleh dari enam buah sel elektrokimia jenis Pb yang tersusun secara seri.



Gambar 8. Tegangan baterai vs waktu ketika baterai diisi.

Gambar 8 menjelaskan tentang tegangan baterai asam Pb saat dilakukan pengisian muatan. Dari simulasi model tegangan baterai asam Pb diperlukan waktu pengisian selama 10900 detik dengan arus pengisian 0,45 ampere untuk mendapatkan tegangan baterai sebesar 12 volt dan kapasitas 5 Ah.

Gambar 9 menjelaskan pengujian baterai asam Pb 12 volt, 5 Ah dengan beban R 1,1 ohm, memberikan nilai tegangan baterai sebesar 12,5 volt sampai 10 volt saat cut off. Waktu mencapai cut off adalah 7069 detik.



Gambar 9. Tegangan baterai vs waktu.

KESIMPULAN

Kapasitas baterai ini sangat penting bagi kendaraan listrik. Nilai kapasitas ini dapat ditentukan dari besarnya muatan suatu baterai. Nilai kapasitas muatan dapat didekati dari dua perhitungan. Pertama dengan menentukan integrasi terhadap arus konstan yang digunakan untuk mengisi baterai sampai diperoleh suatu tegangan nominal baterai. Kedua dengan metoda coulometri yaitu penentuan kapasitas baterai berdasarkan jumlah muatan yang ada pada baterai. Hasil simulasi dengan MATLAB/Simulink terhadap data eksperimen memberikan nilai yang mendekati dengan kesalahan tidak lebih dari 5%.

DAFTAR PUSTAKA

- Caumont, O, Le Moigne, P, Rombaut, Muneret, X., Lenain, P., *Energy Gauge for Lead-Acid Batteries in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 15, No3. September 2000, pp.354-360.
- Chiasson, J, Vairamohan, B, *Estimating the state of charge of a battery*, IEEE Transactions on Control System Technology, Volume 13, Issue 3, May 2005, pp.465-470.
- Dhameja, S., 2002, *Electric Vehicle Battery Systems*, Newnes, United States.
- Gaddam, V. R, Wang, X.Q., Arey, S., Yang, Z.J. and Singh, P, *Fuzzy Logic Based Internal and External SOC Meters for Li/SO₂ Cells*, 2000, www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/IE_SOCLi.pdf.
- Husain, I., 2003, *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*, Pertama, CRC Press, United States.
- Kiehne, A, 2003, *Battery Technology Handbook*, Second Edition, Marcel Dekker, NY.
- Knauff, M., McLaughlin, J., Dafis, C., Niebur, P., Singh, P., Kwatny, Nwankpa, C., *Simulink Model of a Lithium-Ion Battery for the Hybrid Power System Testbed*, 2007, www.power.ece.drexel /Students/Knauff .pdf
- Kunzli, N., *Public-Health Impact of Outdoor and Traffic-Related Air Pollution: A European Assessment*, The Lancet, Vol. 356, September 2000, pp. 795-801.
- Larminie, J, Lowry, J, 2003, *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Son, USA.
- Lee, W, Sunwoo, M, *Vehicle Electric Power Simulator for Optimizing the Electric Charging System*, *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 2, No. 4, 2001, pp. 157-164.
- Lee, D.T., Shiah, S.J., Lee, C.M. and Wang, Y.C., *State of Charge Estimation for Electric Scooters by Using Learning Mechanisms*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 56, No. 2, March 2007, pp. 544-556.
- Lew, F., 2004, *Reducing Oil Consumption in Transport: Combining Three Approaches*, Office of Energy Efficiency, Technology and R&D International Energy Agency.
- Nugues, S., *Mesure de l'état de charge d'une batterie par coulométrie corrigée par impédancemétrie*, Thèse de doctorat, Octobre 1996, INPG.
- Papic, I., *Simulation Model for Discharging a Lead Acid Battery Energy Storage System for Load Leveling*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol 21, No. 2, JUNE 2006, pp. 608-615.
- Patterson, P., 2002, *Quantifying the Fuel Use and GHG Reduction Potential of EVs and HEVs*, Available April

- 26 , 2002:<http://www.ott.doe.gov/pdfs/evsl7.pdf>
- Sauradip, M.S., Sinha, K., Muthukumar, K., *Estimation of State of Charge of Lead Acid Battery using Radial Basis Function*, IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp.131-136.
- Singh, P., Reisner, D.E., *Development of Fuzzy Logic Based Lead Acid Battery Management Techniques with Applications to 42V Systems*, www.ece.villanova.edu/~singh/PAPER/DMT42v.pdf.
- Smimite, H., *Etude du comportement et gestion d'une batterie au plomb à recombinaison équipant un véhicule électrique*, Thèse de doctorat, November 1997, Université de Montpellier.
- Wang, X., Singh, P., *Preliminary Design of a Smart Battery Controller for SLI Batteries*, 2001, www.ece.vill.edu/singh/PAPER/PDSBCLI.pdf.
- Yun, H.S., Lee, J.H., B.H. Cho, "Modeling of 36V Lead Acid Battery for the 42V Automotive System Simulation", 2004, www.pearlx.snu.ac.kr/Publication/icpe_0407.pdf.

ANALISIS PERLAKUAN PANAS *NORMALISING* PADA PENGELASAN ARGON TERHADAP SIFAT MEKANIK HASIL LASAN BAJA KARBON RENDAH

Basuki Widodo¹

¹Jurusan Teknik Mesin, ITN Malang

Masuk: 24 April 2009 , revisi masuk: 26 Juni 2009, diterima: 30 Juli 2009

ABSTRACT

Welding is a fabric Welder i.e a fabrication process that applied to joint metal material by using temperature dissociation energy of diatomic. Up to this day, welding has been used widely on joining steel and engine constructions. The influence of thermal cycle on welding causes metallurgical changes i.e residual stress and changes of mechanical characteristics (hardness, strength tensile, reconnaissance of macro and micro structures) on the result of low carbon steel weldment. This research was done to obtain the proper treatment for normalizing weldment result on different current to mechanical character. The value of hardness and strength tensile is best obtained after normalizing process at temperature of 860°C is at the current of 140A with hardness mean value of 78,67 HRB (weld), 73,89 HRB (HAZ) and 70,11 HRB (mains), while strength tensile is 45,835 Kgf/mm².

Keywords: Steel, Normalizing, Welding.

INTISARI

Pengelasan merupakan suatu proses fabrikasi yang digunakan untuk menyambung material logam dengan menggunakan energi panas. Hingga saat ini, las telah banyak dipergunakan secara luas dalam penyambungan batang-batang pada konstruksi bangunan baja dan konstruksi mesin. Pengaruh siklus termal pada pengelasan menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan metalurgi seperti tegangan sisa dan perubahan sifat mekanik (kekerasan, kekuatan tarik, pengamatan struktur makro dan mikro) hasil lasan baja karbon rendah. Dengan dilakukan penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perlakuan normalising hasil lasan yang paling tepat pada arus yang berbeda terhadap sifat mekanik. Harga kekerasan dan kekuatan tarik terbaik yang diperoleh setelah proses Normalising temperature 860°C adalah pada arus 140A dengan nilai rata-rata kekerasan 78,67HRB (las), 73,89HRB (HAZ) dan 70,11HRB (induk), sedangkan kekuatannya dengan nilai 45,835 Kgf/mm².

Kata Kunci: Baja, Normalisasi, Pengelasan.

PENDAHULUAN

Dewasa ini teknik pengelasan secara umum banyak digunakan dalam proses penyambungan batang-batang pada kontruksi baja di bidang industri maupun di bidang permesinan. Salah satunya adalah pengelasan busur gas dimana gas di hembuskan ke daerah las untuk melindungi busur dan logam yang mencair. Gas yang sering di gunakan sebagai pelindung adalah argon (Ar), helium (He), karbondioksida (CO₂) atau campuran dari gas-gas (AWS, 1991). Proses penyambungan logam seringkali diakhiri

dengan pemanasan daerah sekitar hasil lasan dengan hidrogen rendah yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa akibat pengelasan. Material yang digunakan Baja karbon rendah dengan kandungan karbon 0,23%, kemudian dilakukan proses pengelasan MIG dengan gas pelindung argon, setelah itu dilakukan proses perlakuan normalising pada hasil las tersebut dengan suhu pemanasan dan pendinginan yang sesuai sehingga diharapkan akan dapat mengetahui sifat mekanik dari baja tersebut. Baja karbon adalah paduan antara besi dan

karbon. Sifat dari baja karbon tergantung dari seberapa besar karbon yang dikandungnya, oleh karena itu baja karbon dibagi menjadi tiga macam berdasarkan kadar karbon yang dikandungnya, yaitu (Surdia, dkk, 2000):

- Baja karbon rendah (*Low Carbon Steel*), mengandung karbon kurang dari 0,3%.
- Baja karbon sedang (*Medium Carbon Steel*), mengandung karbon antara 0,3-0,40%.
- Baja karbon tinggi (*High Carbon Steel*), mengandung karbon antara 0,40-0,8%.

Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*) bersifat lunak, kekuatan relatif rendah tetapi keuletannya tinggi atau sering disebut baja lunak (*mild steel*) dengan kandungan karbon kurang dari 0,3%. Baja karbon rendah sangat luas penggunaannya sebagai baja konstruksi, rangka kendaraan, mur, baut, pipa, tangki minyak dan lain-lain karena memiliki sifat pengerjaan yang baik seperti sifat keuletan, sifat mampu tempa, kelunakan dan mampu mesin yang baik. Sehingga dengan keadaan tersebut baja karbon rendah sangat baik sekali untuk disambung dengan proses pengelasan (Wiryosumarto, dkk, 2000). Sifat baja karbon rendah (*Low Carbon Steel*) yang ditunjukkan sebagai baja ringan mempunyai bahan yang sebagian besar digunakan sebagai pembuatan konstruksi umum. Baja ini sederhana karena hampir mempunyai sifat-sifat pengerjaan yang diinginkan. Sifat-sifat tersebut diakibatkan oleh komposisi dari baja ini. Besi (ferit) memberikan keuletan, kemampuan tempa, plastisitas kemagnetan, kelunakan dan elastisitas tetapi dengan mudah membentuk oksida yang mengakibatkan karat dan pembentukan kerak yang tebal jika berada dalam keadaan pijar (ASM Handbook, 1992).

Karbon yang bukan merupakan unsur logam jika di tambahkan pada besi, menghasilkan baja dan bertanggung jawab terhadap bertambahnya kekerasan dan kekuatan tarik dan semakin banyak karbon yang ditambahkan, semakin tinggi kekuatan tarik dan kekerasan tetapi terhadap pengurangan pada sifat-sifat pengerjaan yang diinginkan seperti keuletan, kemampuan tempa dan semakin

besar resiko dalam pengelasan dan peretakkannya juga pada pembengkokan atau penekukan tajam (Van Vlack, 1994).

Sifat mekanik adalah salah satu sifat terpenting, karena sifat mekanik menyatakan kemampuan suatu bahan untuk menerima beban dan energi tanpa menimbulkan kerusakan pada bahan atau komponen tersebut. Sering kali bila suatu bahan mempunyai sifat mekanik yang baik tetapi kurang baik pada sifat yang lain, maka diambil langkah untuk mengurangi kekuatan tersebut dengan berbagai cara. Misalnya saja pada baja, baja mempunyai sifat mekanik yang cukup baik (kuat, keras, tangguh) tetapi mempunyai sifat tahan tarik yang kurang baik, maka seringkali sifat tahan tarik ini diperbaiki dengan cara penambahan unsur Si dengan cara dipadu tanpa harus mengganti baja jenis tersebut (Surdia dkk, 2000). Untuk menggunakan bahan teknik yang tepat, maka harus di kenali dengan baik sifat-sifat bahan yang mungkin akan di pilih untuk di pergunakan. Sifat-sifat ini tentunya banyak macamnya, dan dapat ditinjau dari berbagai segi atau bidang keilmuan, sifat kimia dan lain sebagainya.

Adapun unsur-unsur kimia yang berpengaruh dalam baja karbon rendah di antaranya (Van Vlack, 2000):

- Karbon (C), unsur ini merupakan unsur yang paling penting dan berpengaruh terhadap sifat kekerasan. Semakin meningkat kadar karbonnya, maka semakin meningkat pula kekerasannya tetapi sifat keuletannya dan mampu lasnya semakin turun. Kadar karbon 0,25% dengan pendinginan cepat akan menghasilkan baja yang keras dan rapuh pada batas las. Penambahan sedikit unsur paduan pada umumnya akan menaikkan tegangan tarik. Kekuatan maksimum pada daerah las tergantung kadar karbonnya.
- Silikon (Si), berfungsi sebagai deoksidator yang ditambahkan selama pembuatan baja untuk menaikkan ketangguhan dan kekerasannya, akan tetapi pengaruhnya tidak besar. Jika kandungan karbon agak tinggi maka silikon akan mempermudah kecenderungan untuk retak. Agar didapat hasil penyelesaian yang baik, kandungan

silikon jangan melebihi 0,1% meskipun sampai sejumlah 0,3% tidak berakibat serius seperti pada fosfor dan sulfur.

- Mangan (Mn), kandungan Mn kurang dari 0,3% akan menaikkan ketahanan korosi dan mencegah keretakan pada logam las, tetapi apabila kandungan Mn lebih dari 0,3% sampai 0,5% akan menyebabkan kepekaan terhadap retak dan pori-pori didalam las yang lebih besar.
- Nikel (Ni) akan menaikkan ketangguhan atau ketahanan terhadap beban benturan (*impact*).
- Chrom (Cr), unsur ini dapat menaikkan ketahanan korosi dan oksidasi disamping kekuatan suhu tinggi dan sifat-sifat *Creep*.
- Molibdenum (Mo), unsur ini dapat menguatkan fase ferit dan menaikkan kekuatan baja tanpa kehilangan keuletan. Dapat berfungsi sebagai penyetabil karbida sehingga mencegah pembentukan grafit pada pemanasan dengan waktu yang lama. Karena itu penambahan Mo ke dalam baja dapat menaikkan kekuatan dan ketahanan *creep* pada suhu tinggi.
- Aluminium (Al) berfungsi sebagai deoksidan, Al_2O_3 akan mengambil tempat pada batas butir. Dengan demikian berfungsi sebagai penghalus butir dan mencegah pertumbuhan butir pada saat proses pemanasan.

Selain elemen-elemen pepadu diatas terdapat juga unsur-unsur impurities yang terdapat didalam baja yang mempengaruhi sifat-sifat tersebut (Smith, 2002), antara lain :

- Sulfur (S), kandungan sulfur akan menambah sifat mampu mesin dari baja, akan tetapi akan menurunkan keuletan, tegangan *impact* dan sifat mampu lasnya sampai pada jumlah tertentu, yaitu kira-kira 0,035% dengan Mn memperbaiki sifat mampu las. Apabila kandungan S sampai mencapai 0,05% akan menimbulkan pengaruh yang kurang baik pada pengelasan.
- Fosfor (P) dalam jumlah yang besar akan menambah ketangguhan tetapi akan menurunkan keuletan terutama pada baja karbon tinggi. Pada baja

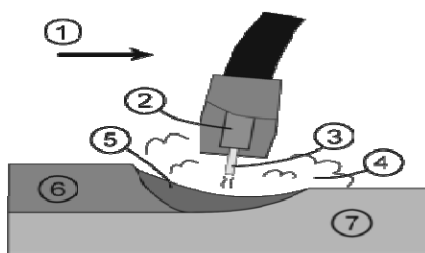
karbon rendah fosfor akan bersifat mampu mesin dan ketahanan terhadap korosi udara. Dalam pengelasan kandungan fosfor yang lebih dari 0,01% akan mempengaruhi dan membuat hasil pengelasan menjadi rapuh dan menyebabkan mudah retak, oleh sebab itu harus dijaga agar kandungan fosfor serendah mungkin.

- Hidrogen (H_2) dapat larut ke dalam baja cair yang kemudian berusaha keluar ketika cair dituang dan membeku. Tetapi sebagian hydrogen terperangkap didalam logam membentuk rongga-rongga (*Porositas*).
- Nitrogen memiliki efek pengerasan dan penggetasan terhadap baja. Karena itu dalam beberapa hal mungkin menguntungkan dan dalam beberapa hal mungkin merugikan

Pengelasan merupakan pelaksanaan pengerjaan yang amat penting dalam teknologi produksi dengan bahan baku logam. Cara pengelasan yang digunakan pada sekarang ini adalah pengelasan cair dengan busur dan gas atau dengan las busur listrik dan las gas (Schonmetz, dkk., 1985).

Proses pengelasan adalah proses penyambungan dua buah atau lebih material logam menjadi satu kesatuan dengan adanya energi panas (Wiryosumarto, dkk., 2000). Energi panas yang digunakan untuk mencairkan logam pada proses pengelasan dapat berasal dari pembakaran gas, sinar elektron, gesekan, gelombang ultrasonik, tahanan listrik atau busur listrik. Baja karbon rendah dapat dilas dengan semua cara pengelasan. Sifat mampu las dari baja berbeda-beda tergantung dari kualitas komposisi kimia dan sifat-sifat mekanis lainnya. Sifat mampu las ini sangat penting untuk di ketahui karena akan menentukan sifat-sifat mekanis dan konstruksi yang akan di buat. Dalam las logam gas mulia, kawat las pengisi yang juga berfungsi sebagai elektroda diumpankan secara terus-menerus. Busur listrik terjadi antara kawat pengisi dan logam induk. Dalam banyak hal penggunaan las MIG sangat menguntungkan. Hal ini disebabkan karena sifat-sifatnya yang baik, misalnya konsentrasi busur yang tinggi, maka

busurnya sangat mantap dan percikan-nya sedikit sehingga memudahkan operasi pengelasan. Karena dapat menggunakan arus yang tinggi maka kecepatannya juga sangat tinggi, sehingga efisiensinya sangat baik. Ketangguhan dan elastisitas, kedekatan udara, ketidapekaan terhadap retak dan sifat-sifat lainnya lebih baik dari pada yang dihasilkan dengan cara pengelasan yang lain. Proses las MIG secara garis besar digambarkan sebagai berikut:



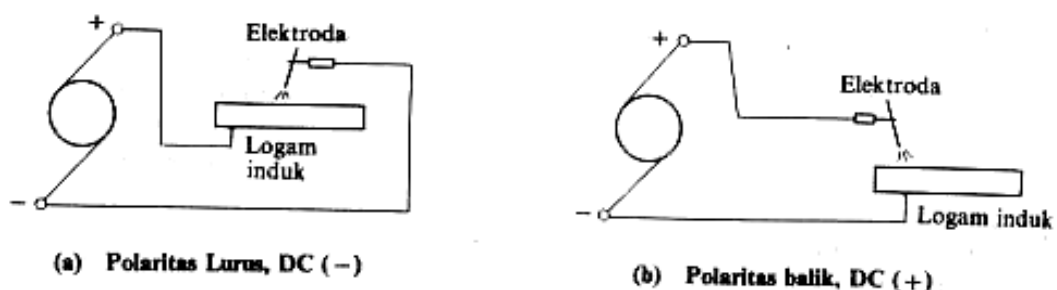
Gambar 1. Las MIG. (1) Arah pengelasan, (2) Contact tube, (3) Electroda, (4) Gas pelindung, (5) Cairan logam, (6) Logam lasan, (7) Logam induk (Wiryosumarto, dkk., 2000).

Dalam proses pengelasan terdapat beberapa parameter las (Schonmetz, 1985 dan Wiryosumarto, dkk., 2000), yaitu:

- Tegangan Busur Las, tingginya tegangan busur tergantung dari panjang busur yang dikehendaki dan dari jenis elektroda yang digunakan. Pada dasarnya busur listrik yang terlalu panjang tidak dikehendaki karena stabilitasnya mudah terganggu sehingga hasil pengelasannya tidak rata. Di-

samping itu tingginya tegangan tidak banyak mempengaruhi kecepatan pencairan, sehingga tegangan yang terlalu tinggi hanya akan membuang energi saja.

- Besar Arus Las yang diperlukan tergantung dari bahan dan ukuran dari lasan, geometri sambungan, posisi pengelasan, macam elektroda dan diameter inti elektroda.
- Kecepatan Pengelasan tergantung pada jenis elektroda, diameter inti elektroda, bahan yang dilas, geometri sambungan, ketelitian sambungan dan lain-lainnya. Dalam hal hubungannya dengan tegangan dan arus las, dapat dikatakan bahwa kecepatan las hampir tidak ada hubungannya dengan tegangan las tetapi berbanding lurus dengan arus las. Karena itu pengelasan yang cepat memerlukan arus yang tinggi.
- Polaritas Listrik, pemilihan polaritas ini tergantung pada bahan pembungkus elektroda, kondisi termal dari bahan induk, kapasitas panas dari sambungan dan lain sebagainya. Bila titik cair bahan induk tinggi dan kapasitas panasnya besar sebaiknya digunakan polaritas lurus dimana elektrodanya dihubungkan dengan kutub negatif. Sebaliknya bila kapasitas panasnya kecil seperti pada pelat tipis maka dianjurkan untuk menggunakan polaritas balik dimana elektrodanya dihubungkan dengan kutub positif. Seperti terlihat pada gambar 2 berikut.



Gambar 2.. Diagram Rangkaian Listrik Dari Mesin Las listrik DC (Wiryosumarto, dkk., 2000)

Mesin las yang ada pada unit peralatan las berdasarkan arus yang di-

keluarkan pada ujung-ujung elektroda dibedakan menjadi beberapa macam :

- Mesin Las Arus Bolak-balik (Mesin AC). Arus listrik bolak-balik atau arus AC yang dihasilkan oleh pembangkit listrik, listrik PLN atau generator AC, dapat digunakan sebagai sumber tenaga dalam proses pengelasan. Besarnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh sumber pembangkit listrik belum sesuai dengan tegangan yang digunakan untuk pengelasan. Bila terjadi tegangannya terlalu tinggi atau terlalu rendah, sehingga besarnya tegangan perlu disesuaikan terlebih dahulu dengan cara menaikkan atau menurunkan tegangan. Alat yang digunakan adalah transformator atau trafo. Kebanyakan trafo yang digunakan pada peralatan las adalah jenis trafo step down, yaitu trafo yang berfungsi untuk menurunkan tegangan. Hal ini disebabkan kebanyakan sumber listrik mempunyai tegangan yang cukup tinggi. Padahal kebutuhan tegangan yang diperlukan untuk pengelasan hanya 55 volt sampai 85 volt.
- Mesin Las Arus Searah (Mesin DC). Arus listrik yang digunakan untuk memperoleh nyala busur listrik adalah arus searah. Arus searah ini berasal dari mesin las yang berupa dynamo motor listrik searah (gambar 3). Dynamo dapat digerakkan motor listrik, motor bensin, motor disel atau motor penggerak mula yang lain. Mesin arus searah yang menggunakan motor listrik sebagai penggerak mulanya memerlukan peralatan yang berfungsi sebagai penyearah arus. Penyearah arus berfungsi untuk mengubah arus bolak-balik menjadi searah. Arus listrik AC yang diubah menjadi DC pada proses pengelasan mempunyai beberapa keuntungan antara lain:
 - Nyala busur listrik yang dihasilkan lebih stabil dan terang
 - Setiap jenis elektroda dapat digunakan untuk pengelasan pada mesin DC
 - Tingkat kebisingannya lebih rendah
 - Mesin las lebih fleksibel, karena dapat diubah ke arus AC atau DC



Gambar 3. Mesin Las Arus DC

Heat treatment adalah proses pemanasan dan pendinginan yang terkontrol dengan maksud merubah sifat-sifat mekanik dari logam (Dieter, 1996). Heat treatment secara umum dapat diartikan sebagai berikut :

- Pemanasan sampai temperatur tertentu dan kecepatan tertentu.
- Mempertahankan temperatur tertentu hingga temperturnya merata.
- Pendinginan dapat dengan media air, oli, udara, kamar dan dalam tungku.

Ketiga hal tersebut tergantung dari sifat yang diinginkan dari kegunaannya. Pada perlakuan panas, baja akan mengalami siklus pemanasan dan pendinginan. Siklus tersebut akan diikuti oleh perubahan atau transformasi fase selama proses berlangsung.

Perlakuan panas adalah suatu proses pemanasan dan pendinginan logam dalam keadaan padat untuk mengubah sifat-sifat fisik logam tersebut. Baja dapat dikeraskan sehingga ketahanan aus dan kemampuan memotong meningkat, atau baja dapat dilunakkan untuk memudahkan permesinan lebih lanjut. Melalui perlakuan panas yang tepat, tegangan dalam dapat dihilangkan, besar butir diperbesar atau diperkecil, ketangguhan ditingkatkan atau dapat dihasilkan suatu permukaan yang keras di kelilingi inti yang ulet. Untuk memungkinkan perlakuan panas yang tepat, susunan kimia baja harus di ketahui terlebih dahulu karena perubahan komposisi kimia, khususnya karbon dapat mengakibatkan perubahan sifat-sifat fisik.

Perlakuan panas dimulai dengan proses pemanasan dengan cara menaikkan temperatur logam di atas temperatur dimana mulai terjadi transformasi struktur

dari ferit menjadi austenit. Kemudian logam ditahan pada temperatur tersebut, dilanjutkan dengan pendinginan, secara terstruktur perlakuan panas memiliki tahapan sebagai berikut :

- *Heating* yaitu proses pemanasan baja sampai temperatur tertentu dengan maksud memberi kesempatan agar terjadi perubahan struktur dari atom-atomnya.
- *Holding* yaitu proses penahanan pada temperatur pemanasan tertentu dengan tujuan untuk memberikan kesempatan pemerataan panas pada baja, memberikan waktu pada baja untuk berdekomposisi, agar terjadi homogenisasi struktur baru yang terbentuk.
- *Cooling* yaitu proses pendinginan dengan kecepatan tertentu dengan tujuan untuk mendapatkan struktur dan sifat-sifat logam yang diinginkan.

Proses perlakuan panas secara luas dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu proses perlakuan panas yang menghasilkan kondisi seimbang dan perlakuan panas yang menghasilkan kondisi tak seimbang. *Annealing*, *normalizing*, pembebasan tegangan adalah sebagai contoh pengerjaan baja yang menghasilkan kondisi yang seimbang, sedangkan pengerjaan baja dalam kondisi yang tidak setimbang adalah pekerjaan pengerasan (*hardening*) dan proses penyepuhan (*tempering*). Penjelasan dari klasifikasi proses perlakuan panas (Dieter, 1996) sebagai berikut :

- *Annealing* : Baja dipanaskan sampai suhu austenit kemudian didinginkan dalam tungku sehingga temperaturnya turun. Annealing mempunyai sifat melunakkan, menghilangkan tegangan dalam dan membentuk butiran yang kasar dengan sifat lunak.
- *Normalising* : Memanaskan baja sampai sedikit di atas suhu kritis kemudian setelah suhu merata didinginkan diudara. Normalising mempunyai tujuan menghaluskan struktur butir, menambah kekerasan dibandingkan annealing.
- *Hardening* : Baja dipanaskan mencapai suhu tertentu antara 770° C – 830° C, kemudian di tahan pada suhu tersebut selama beberapa saat dan

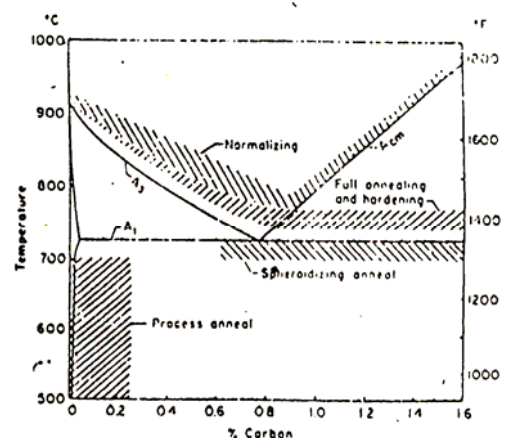
didinginkan secara mendadak dengan mencelupkan ke dalam air, air garam, oli atau media pendingin lainnya. Hardening (berpendingin air) mempunyai fasa martensit dimana fasa ini mempunyai sifat keras dan getas juga rapuh. Hardening (berpendingin oli) mempunyai fasa martensit dan bainit dimana fasa ini mempunyai sifat yang kurang dari fasa martensit.

- *Tempering* : Memanaskan kembali baja yang telah dikeraskan pada suhu 150-650°C dan didinginkan secara perlahan-lahan.

Normalising adalah suatu proses yang bertujuan untuk mendapatkan struktur butiran yang halus dan seragam, menghilangkan tegangan dalam. Proses perlakuan panasnya adalah :

- Dipanaskan sampai sedikit di atas suhu kritis atas untuk baja hypereutektoid.
- Dipanaskan sampai sekitar 50°C diatas temperatur A_{cm} untuk baja hypereutektoid.

Pendinginan pada proses normalising lebih cepat dari pada pendinginan pada *full annealing*. Karena pendinginan dilakukan pada udara luar, sehingga kesempatan membentuk ferrit proeutectoid akan lebih sedikit dan perlit akan lebih banyak dibandingkan dengan full annealing. Dengan laju pendinginan yang lebih tinggi tersebut, maka terbentuk perlit yang lebih halus.

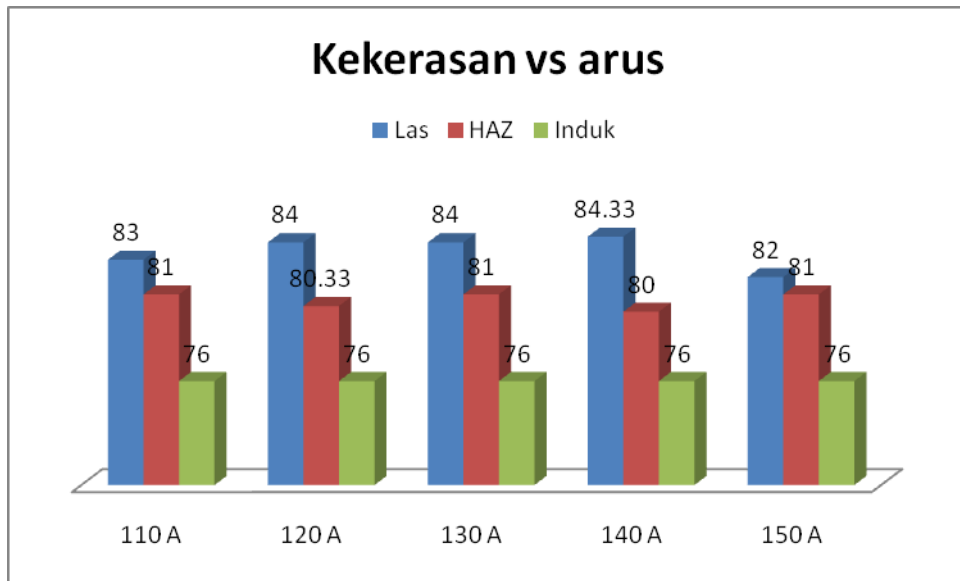


Gambar 4. Diagram suhu heat treatment untuk baja karbon biasa (Dieter, 1996)

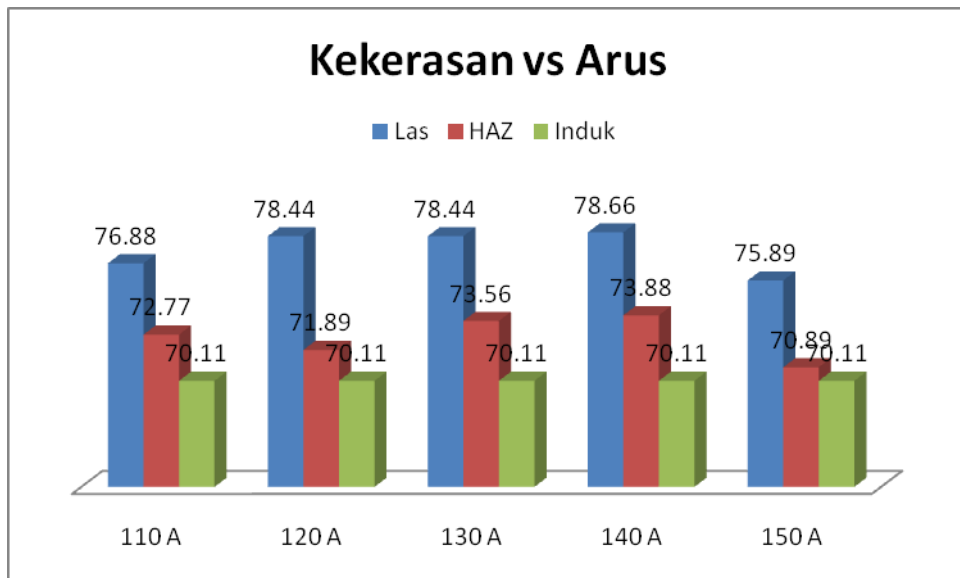
PEMBAHASAN

Pada gambar 5, terlihat kekerasan awal dari masing-masing penggunaan arus pengelasan, kekerasan yang tertinggi terdapat pada daerah las berkisar antara 82–84HRB, dan diikuti kekerasan daerah HAZ berkisar antara 80–81HRB dan logam induk dengan 76HRB. Secara umum dapat disimpulkan bahwa arus las tidak mempunyai pengaruh yang signi-

fikan terhadap kekerasan pada daerah las maupun HAZ. Gambar tersebut juga menunjukkan proses pengelasan berjalan dengan baik mengingat hasil kekerasan pada daerah las jauh lebih tinggi dibandingkan dari logam induk. Hal ini dilakukan pada pengelasan konstruksi agar bila terjadi kegagalan tidak pada bagian daerah las.



Gambar 5. Hubungan Variasi Arus Terhadap Kekerasan sebelum Normalising

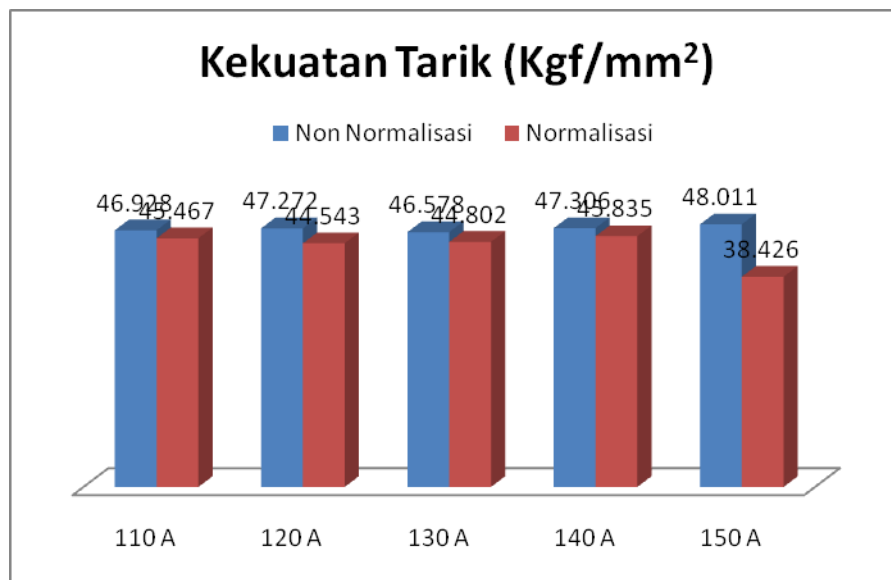


Gambar 6. Hubungan Variasi Arus Terhadap Kekerasan rerata sesudah Normalising

Sedangkan pada gambar 6 menunjukkan perubahan kekerasan setelah mengalami proses normalising. Semua daerah mengalami penurunan kekerasan. Untuk daerah las penurunan berkisar 2-10%, daerah HAZ berkisar 7-12% dan logam induk 8%.

Dilihat dari gambar secara keseluruhan nilai kekerasan daerah las, HAZ dan logam induk sebelum dan sesudah perlakuan mengalami perubahan penurunan. Dimana sebelum proses perlakuan normalising pada daerah las mempunyai nilai kekerasan antara 82 – 84 HRB dan daerah HAZ mempunyai nilai kekerasan antar 80 – 81. Sedangkan setelah dilakukannya proses normalising nilai

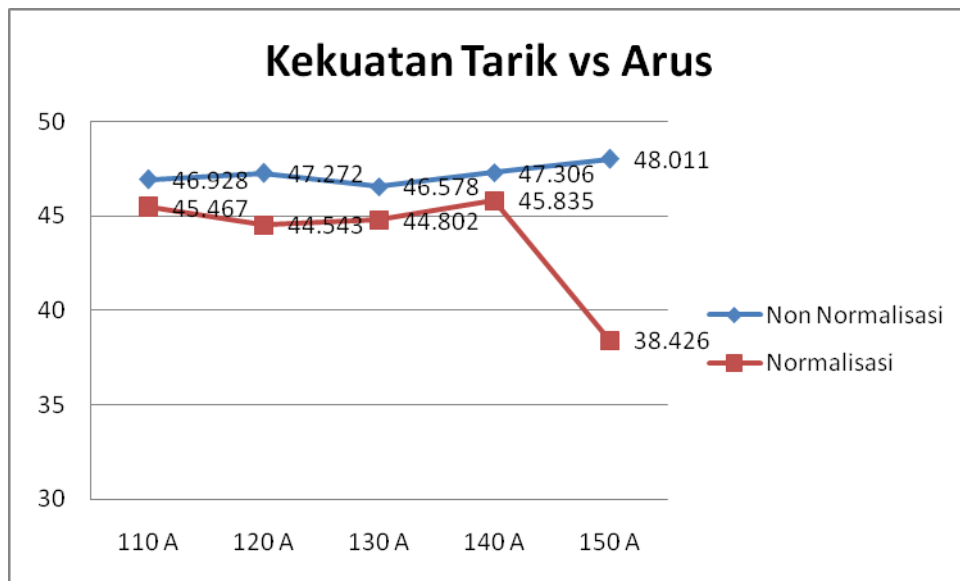
kekerasan daerah las berkisar antara 75,89 –78,44 dan daerah HAZ mempunyai nilai kekerasan antara 70,78 – 73,56 HRB). Perubahan penurunan kekerasan ini disebabkan karena pada proses normalising temperatur 860°C dengan kadar karbon 0,23% dan ditahan selama setengah jam, Austenit terurai secara serentak membentuk Austenit+Ferit sehingga pada saat pendinginan mencapai temperatur A_1 , komposisi sisa austenit akan bertransformasi menjadi perlit, sehingga setelah transformasi selesai terdiri dari ferrit dan perlit dimana ferrit bersifat lunak dan ulet, perlit bersifat keras dan kurang ulet.



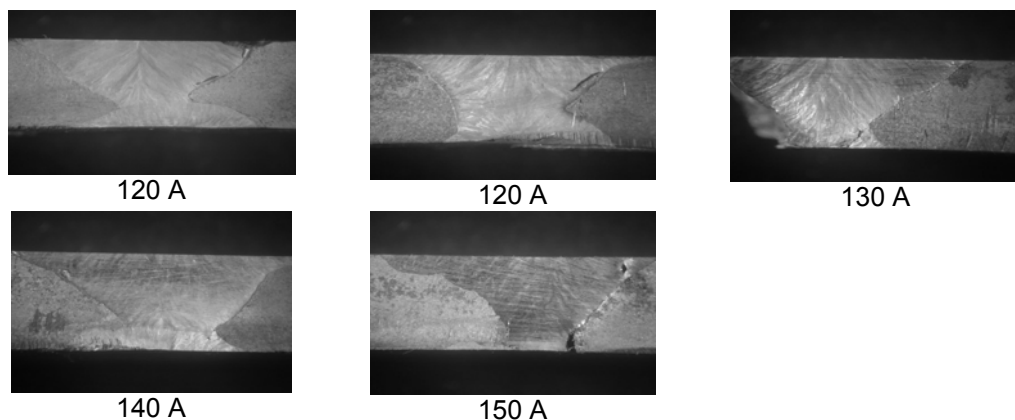
Gambar 7. Kekuatan tarik sebelum dan sesudah Normalising

Berdasarkan gambar 7 dan gambar 8 berikut bahwa terjadi perubahan penurunan kekuatan tarik dari sebelum dan sesudah proses normalizing. Namun perubahan tersebut tidak signifikan, melemahkan kekuatan tarik yang ada, sehingga dapat disimpulkan bahwa proses normalisasi ini berhasil menghilangkan tegangan sisa akibat pengelasan. Perubahan tersebut disebabkan karena proses normalizing pada temperatur 860°C dengan kadar karbon 0,23% dan penahanan selama setengah jam menggunakan pendinginan udara mengakibatkan

terbentuknya austenit yang bertransformasi menjadi ferrit, Dengan turunnya temperatur, inti ini akan tumbuh makin besar, dan semakin banyak austenit yang berubah menjadi ferrit. struktur ferrit ini yang cenderung menurunkan kekuatan tarik. Kekuatan tarik paling rendah setelah proses normalizing terdapat pada arus 150A dengan nilai kekerasan rata-rata 38,426 (kgf/mm²). Dan kekuatan tarik paling tinggi setelah proses normalizing terdapat pada arus 140A dengan nilai kekerasan rata-rata 45,835 (Kgf/mm²).



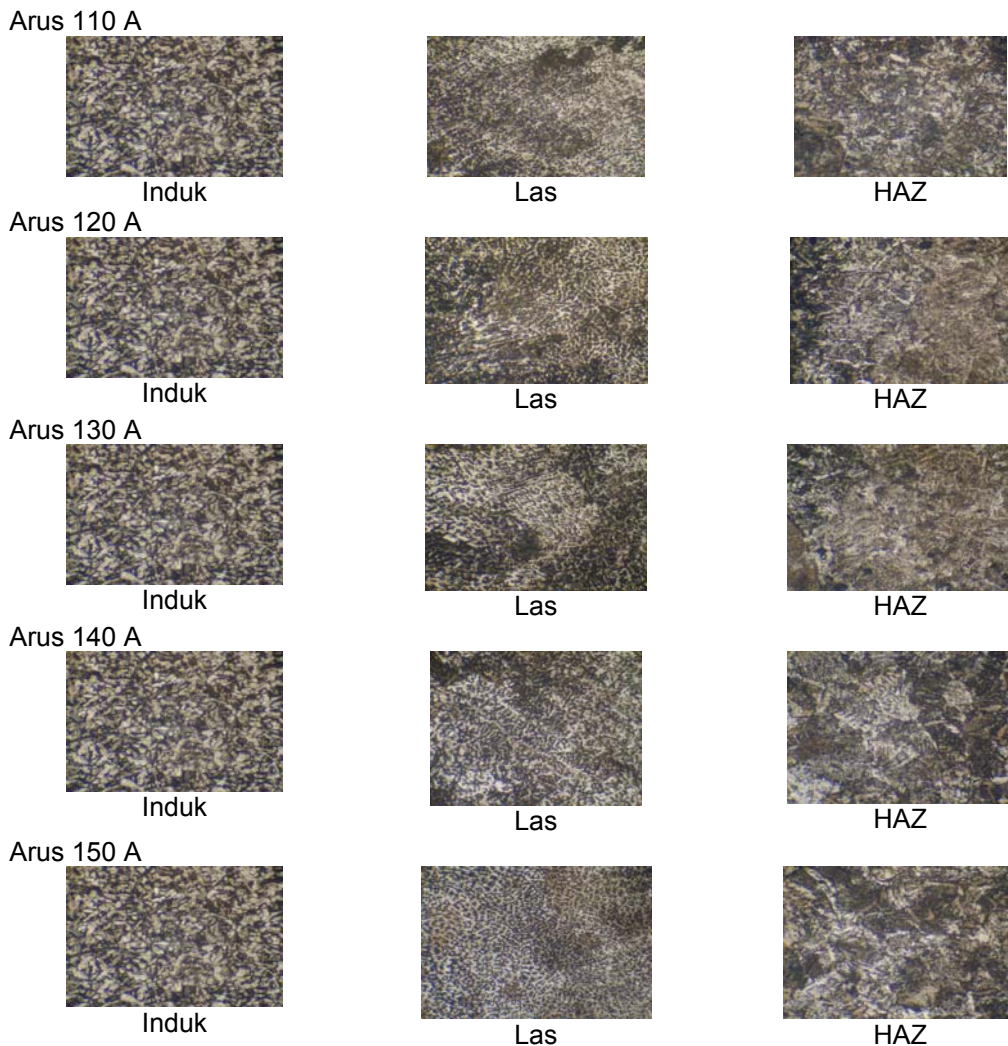
Gambar 8. Perubahan kekuatan tarik sebelum dan sesudah Normalising terhadap arus pengelasan



Gambar 9. Struktur Makro Hasil Pengelasan

Gambar 9 memperlihatkan struktur makro pada daerah las dan sekitarnya. Tidak terlihat perbedaan yang menyolok dari kontur lasan terhadap daerah HAZ. Hal ini dibuktikan dari pengujian kekerasan dan pengujian kekuatan tarik yang menghasilkan hasil yang serupa. Dari hasil struktur mikro (terlihat pada gambar 10 dan 11) daerah logam induk yang mengalami rambatan suhu pengelasan menghasilkan struktur perlit dan Ferrit. Untuk daerah HAZ yang mengalami rambatan panas yang cepat pada saat pengelasan hingga mencapai suhu $\pm 900^{\circ}\text{C}$ akan membentuk struktur austenit + ferrit dan perlit. Perlit terlihat lebih ba-

nyak, ini disebabkan karena kadar karbon yang tidak sempat larut dalam besi α akan menjadi perlit yang tumbuh lebih banyak dan menyebar membentuk lamel – lamel. Ukuran butir tidak beraturan, ada yang halus dan ada yang kasar. Hal ini disebabkan pada daerah ini butiran mengalami tahap pertumbuhan. Sedangkan untuk daerah las yang menggunakan elektroda A.5.9 (ER308LSi) dengan temperatur lasan mencapai $1350^{\circ}\text{C} - 1500^{\circ}\text{C}$, akan membentuk struktur ferrit pada matrik austenit dan struktur perlit. Pembentukan perlit dimulai dengan terbentuknya inti sementit di batas butir austenit.

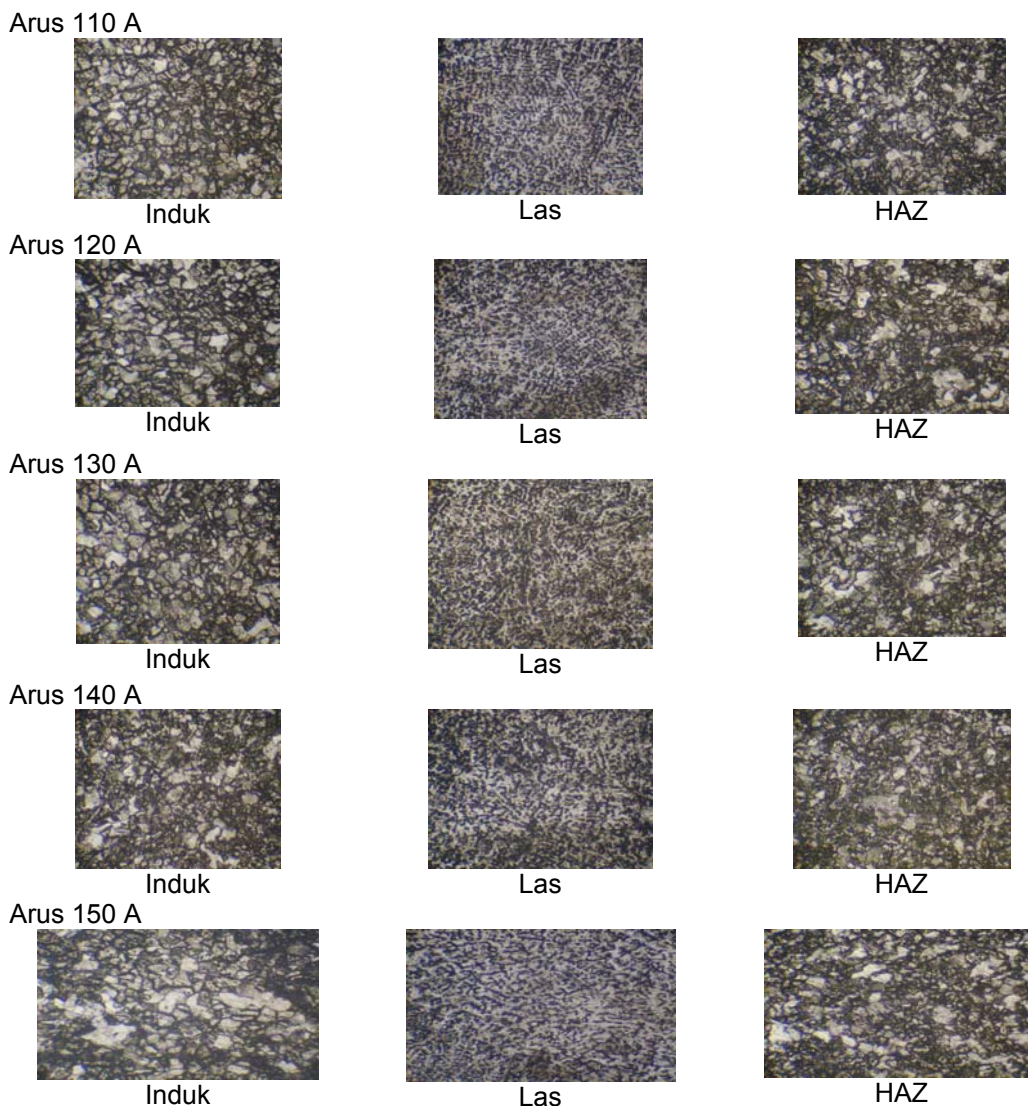


Gambar 10. Struktur Mikro Sebelum Normalising

Struktur Mikro Setelah Normalising, pada daerah logam induk terlihat struktur kristal perlit dan ferrit yang tumbuh menyebar dan membesar (lihat gambar 11) mengakibatkan penurunan kekerasan walupun prosentasenya kecil namun karena kekerasan awal juga tidak tinggi maka terlihat cukup signifikan. Sedangkan pada daerah HAZ memiliki struktur perlit yang lebih banyak dan tumbuh menyebar, terdiri dari lamel – lamel ferrit dan sementit. Ferrit yang bersifat lunak dan ulet sedangkan sementit keras tetapi agak getas. Dan untuk daerah las masih terdapat pembentukan struktur ferrit yang terdapat pada matrik austenit,

dan struktur perlit hanya saja struktur pembentukannya terlihat lebih halus di bandingkan sebelum perlakuan normalizing.

Secara umum hasil struktur mikro yang didapatkan antara sebelum dan sesudah normalizing tidak jauh berbeda, penghalusan butir terlihat tidak terlalu menyolok, dan bentuk fase tidak berubah secara signifikan. Melihat hasil struktur mikro ini dapat disimpulkan proses normalizing ini telah menghilangkan tegangan sisa yang terjadi namun tetap masih dapat mempertahankan sifat kekerasan maupun kekuatan tariknya



Gambar 11. Struktur Mikro Setelah Normalising

KESIMPULAN

Dari data hasil pengujian proses normalizing temperature 860°C pada hasil pengelasan argon (110A, 120A, 130A, 140A, 150A) dapat menurunkan sifat mekanis (kekerasan dan kekuatan tarik) dari baja karbon rendah dengan kandungan karbon 0,23 %. Penurunan kekuatan tarik yang paling tinggi terjadi pada pengelasan 150A dengan prosentase penurunan mencapai 19,96 %. Dan penurunan kekuatan tarik paling rendah terjadi pada pengelasan 110A dan 140A yaitu dengan prosentase penurunan 3,11 %.

Sedangkan untuk penurunan kekerasan daerah Las paling tinggi terjadi pada pengelasan 150A dengan prosentase penurunan 9,65 % dan penurunan kekerasan daerah Las paling rendah pada pengelasan 140A dengan prosentase penurunan 2,08%. Untuk daerah HAZ mengalami prosentase penurunan paling tinggi 12,48% pada pengelasan 150A dan penurunan paling rendah pada pengelasan 140A dengan 7,65%. Dari pengamatan struktur mikro dapat disimpulkan bahwa dengan dilakukannya proses normalizing pada hasil las argon dapat berpengaruh pada pertumbuhan bu-

tiran ferrit dan perlit di daerah las, HAZ dan logam induk.

Harga kekerasan dan kekuatan tarik terbaik yang diperoleh setelah proses Normalising temperatur 860°C adalah pada arus 140A dengan nilai rata-rata kekerasan 78,67 HRB (las), 73,89 HRB (HAZ) dan 70,11 HRB (induk), sedangkan kekuatan tariknya dengan nilai 45,835 (kgf/mm²).

DAFTAR PUSTAKA

- ____ 1992, *Properties and Selection Ferrous*, ASM Handbook, Ninth edition Ohio
- ____ 1992, *Metallography and Microstructure*, ASM Handbook, Ninth edition Ohio
- AWS, 1991, *Fundamental of Welding*, Welding Handbook, Seventh Edition, Vol I.
- Dieter, GE, Terjemahan Djaprie, S, 1996, *Metalurgi Mekanik*, Edisi Ketiga, Jilid 1, Erlangga Jakarta.
- Djaprie S, 2000, *Teknologi Mekanik I*, Edisi Ketujuh, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Schonmetz Alois & Gruber Karl, 1985, *Pengetahuan Dalam Pengerjaan Logam*, Penerbit Angkasa, Bandung.
- Smith, WF, 2002, *Foundations of Material Science And Engineering*, McGraw, Hill International Editions, Singapore.
- Surdia T, & Shinroku S, 2000, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Van Vlack, LH, 1994 Terjemahan Djaprie, S. *Ilmu Dan Teknologi Bahan* Edisi Kelima, Erlangga, Jakarta.
- Wiryosumarto H, & Toshie O, 2000, *Teknologi Pengelasan Logam* Pradnya Paramita, Jakarta.

PENYELESAIAN ARUS PERALIHAN RANGKAIAN SERI R-L DENGAN TEGANGAN ARUS SEARAH BERBASIS MATLAB

Dwi Setyowati¹

¹Jurusan Matematika, Fakultas Sains Terapan, IST AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 8 Mei 2009, revisi masuk: 14 Juli 2009, diterima: 19 Juli 2009

ABSTRACT

A Case study was taken as a research to investigate the physical process occurred in a simple electric circuit which consists of resistance component R and inductance L with direct voltage source. The general form of series circuit is represented a differential equation of the first order to count the current transfer equation can be found by many methods, they are the first ordered solution, Euler method, the third order Runge-Kutta method, and the forth order Runge-Kutta by using Matlab program.

The examinationon by using step measurement with $h = 0,05$ caused error value to the first order solution method = 2.79%, Euler method = 3.8%, the third order Runge Kutta method = 2.1%, the forth order Runge Kutta method = 2.26%, using step measurement $h = 0.1$ caused error value to the first order solution = 2.27%, Euler method = 5.23%, the third order Runge Kutta method = 2.27%, the fourth order Runge Kutta method = 1.85% and using step measurement $h = 0,15$ caused error value to the first order solution = 5.81%, Euler method = 22,35%, the third order Runge Kutta method = 7.19%, the forth order Runge Kutta method = 4.7%.

Keyword: R-L circuit Transferring Current, Matlab

INTISARI

Studi kasus yang diambil dalam penelitian ini adalah proses fisis yang terjadi pada rangkaian listrik yaitu dengan memperlihatkan rangkaian seri yang terdiri atas komponen hambatan R dan induktansi L ini dengan sumber tegangan searah. Bentuk umum rangkaian seri merupakan persamaan diferensial orde pertama untuk menghitung persamaan arus peralihan dapat diselesaikan dengan berbagai metode, yaitu dengan metode penyelesaian orde satu, Metode Euler, Metode Runge-Kutta Orde-3 dan Metode Runge Kutta orde keempat dengan menggunakan bahasa pemrograman Matlab. Hasil pengujian yang dilakukan dengan menggunakan metode penyelesaian orde satu, Metode Euler, Metode Runge Kutta Orde-3 dan Metode Runge Kutta orde keempat adalah dengan menggunakan ukuran langkah $h=0,05$ kesalahan pada metode penyelesaian orde satu sebesar 2,79%, Metode Euler= 3,8%, Metode Runge Kutta Orde ketiga 2,51 % dan Metode Runge Kutta orde ke empat= 2,26% untuk ukuran langkah $h= 0,1$, nilai kesalahan pada metode penyelesaian orde satu sebesar= 2,27%, Metode Euler 5,23%, Metode Runge Kutta Orde ketiga 2,27% dan Metode Runge Kutta orde ke empat= 1,85%. dan ukuran langkah $h=0,15$ kesalahan pada metode penyelesaian orde satu sebesar 5,81%, Metode Euler= 22,35%, Metode Runge Kutta Orde ketiga= 7,19% dan Metode Runge Kutta orde keempat= 4,7%.

Kata Kunci: Arus Peralihan Rangkaian Seri R-L, Matlab

PENDAHULUAN

Metode numerik untuk persamaan diferensial sangatlah penting bagi rekayasawan dan fisikawan sebab ini masalah yang praktis sering membawa persamaan diferensial yang tidak dapat dipecahkan. Banyak hukum-hukum fisis

ka, mekanika, termodinamika dan kimia didasarkan atas observasi empiris yang menunjukkan perubahan dalam besaran besaran fisis dan kondisi dari sistem. Hukum-hukum tersebut pada prinsipnya menunjukkan terjadinya perubahan-perubahan. Bila dihubungkan dengan per-

samaan kontinuitas untuk massa, energi, momentum dan rangkaian listrik, biasanya akan tersusun persamaan-persamaan diferensial. Jadi penyelesaian persamaan diferensial ini sangatlah penting diketahui di bidang keteknikan.

Persamaan diferensial ini pada umumnya dibedakan atas persamaan ordiner yang hanya melibatkan satu dari variabel bebas saja dan persamaan diferensial parsial ini yang umumnya menyangkut dua atau lebih variabel bebas. Meskipun sebagian dari persamaan diferensial dapat diselesaikan secara eksak atau analitis ini, namun di dalam praktek masih banyak persamaan diferensial yang tidak dapat diselesaikan secara analitis atau bila dapat diselesaikan jawaban yang diperoleh seringkali sulit untuk diinterpretasikan, karena mungkin berbentuk deret tak berhingga, sehingga dengan bantuan komputer maka persoalan tersebut dapat diselesaikan dengan mudah (Munif, 1998)

Bentuk umum persamaan diferensial ordiner dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$f(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \frac{d^3y}{dx^3}, \dots, \frac{d^ny}{dx^n}) = 0 \quad (1)$$

Persamaan (1) ini menunjukkan persamaan diferensial ordiner orde n, karena hanya terdapat bentuk-bentuk derivatife total dan derivatife yang tertinggi n. Untuk mendapatkan suatu jawaban tertentu atau khusus (*unique solution*), perlu dipakai informasi tambahan, yaitu data nilai y(x) atau derivatifnya pada beberapa nilai tertentu x. Untuk persamaan order-n, suatu jawaban khusus dapat diperoleh dengan mengetahui sebanyak n data kondisi.

Penyelesaian pendekatan terhadap persamaan diferensial ordiner seringkali dibedakan atas macam persoalan yang dihadapi, yaitu apakah merupakan *initial value problem* (IVP) atau *boundary value problem* (BVP). Alternatif lain yang dapat dilakukan untuk membicarakan metode numerik persamaan diferensial ordiner adalah didasarkan atas macam persamaan diferensial,

Suatu persamaan diferensial orde kesatu dapat dinyatakan dalam bentuk umum $f(x, y, \frac{dx}{dy}) = 0$ atau dapat pula di-

nyatakan $\frac{dx}{dy} = f(x, y)$, algoritma numerik yang umum untuk menyelesaikan persamaan diferensial satu dengan kondisi awal $y(x_0)$ didasarkan pada salah satu dari pendekatan berikut:

- Pemakaian langsung maupun tak langsung dari ekspansi deret Taylor dari fungsi jawaban f(x).
- Penggunaan formula integrasi terbuka atau tertutup.

Prosedur yang bermacam-macam pada prinsipnya dapat pula dibedakan atas metode satu langkah (*one step*) dan metode langkah jamak (*multi step*). Metode satu langkah memungkinkan penyelesaian untuk y_{i+1} , bila diberikan persamaan diferensial dan informasi nilai y_i dan x_i .

Ekspansi deret Taylor merupakan salah satu cara untuk penyelesaian pendekatan numerik yaitu dengan menyatakan fungsi jawaban y(x) dengan bentuk ekspansi Taylor sekitar titik awal x_0 sebagai berikut (Steven, C, 1999):

$$y(x_0 + h) = y(x_0) + hf'(x_0 + y(x_0)) + \frac{h^2}{2!} f''(x_0, y(x_0)) + \frac{h^3}{3!} f'''(x_0, y(x_0)) + \dots$$

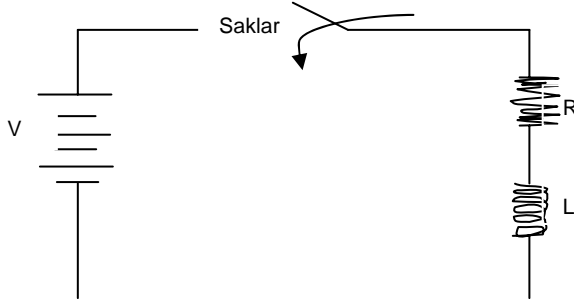
Bila $y(x_0)$ tertentu sebagai kondisi awal, $f(x_0, y(x_0))$ dapat diketahui dari persamaan semula $\frac{dy}{dx} = f(x, y)$. Metode Euler merupakan metode yang paling sederhana untuk menyelesaikan persamaan diferensial ordiner orde satu. Bentuk penyelesaian dasar ini metode Euler adalah $Y_{n+1} = y_n + (\frac{dx}{dy})\Delta x$. Pada metode Runge-Kutta adalah suatu metode yang mempunyai tingkat ketepatan yang relatif sama dengan perhitungan pendekatan deret Taylor. Metode Runge Kutta diperoleh berdasarkan ekspansi dari deret Taylor sehingga diperoleh beberapa macam metode Runge-Kutta, salah satunya metode Runge-Kutta orde keempat yang merupakan metode yang cukup banyak dikenal karena cukup tepat, stabil dan relatif mudah untuk dibuatkan program komputernya

Penyelesaian persamaan diferensial biasa dengan metode penyelesaian orde pertama, metode Euler dan metode Runge Kutta adalah proses

mencari nilai fungsi $y(x)$ pada titik x tertentu persamaan diferensial biasa $f(x,y)$. Fungsi yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengangakat studi kasus tentang rangkaian seri komponen-komponen R dan L yang terhubung dengan tegangan V , ketika saklar ditutup berlaku hukum tegangan Khirchoff, sehingga persamaan peralihan arus dalam suatu rangkaian adalah $i = \frac{V}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$ (2)

Sebuah rangkaian seri yang terdiri atas komponen hambatan R dan induktansi L yang dihubungkan dengan tegangan searah V seperti pada Gambar.1. Dalam rangkaian tersebut ketika saklar s ditutup, maka menurut Hukum Tegangan Kirchhoff jumlah tegangan pada suatu rangkaian tertutup sama dengan nol sehingga berlaku persamaan

$$\begin{aligned} V_R + V_L &= V \\ R \cdot i + L \frac{di}{dt} &= V \end{aligned} \quad \text{..... (3)}$$



Gambar 1 Rangkaian R dan L seri dengan sumber tegangan searah V (Hayt,W.H,Jr,1993)

Persamaan (2) adalah arus peralihan pada rangkaian seri ini dengan tegangan V searah yang dalam penelitian ini akan diselesaikan dengan 3 macam metode yaitu: metode penyelesaian persamaan diferensial orde pertama, metode Euler dan metode Runge Kutta orde keempat, diselesaikan dengan bantuan bahasa pemrograman Matlab. Metode Penyelesaian Persamaan Diferensial Orde Pertama berbentuk $f(x,y,y')$ dan sering dituliskan dalam bentuk eksplisit $y' = f(x,y)$. Masalah nilai awal terdiri atas sebuah persamaan diferensial dan sebuah syarat atau kondisi yang harus dipenuhi oleh solusinya, berdasarkan ekspansi deret Taylor bahwa

$$y(x+h) = y(x) + hy'(x) + \frac{h^2}{2}y''(x) \dots \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan (4) dengan hanya mengambil suku konstanta dan suku yang mengandung h pangkat satu maka metode ini disebut sebagai metode orde pertama. Pembuangan suku-suku lainnya membuat persamaan (4) menyebabkan timbulnya galat, yaitu galat pemotongan atau galat pemangkasan. Untuk h yang bernilai kecil, maka suku h yang berpangkat tiga atau yang lebih tinggi lagi akan kecil dibandingkan dengan h^2 di dalam suku pertama yang dibuang dalam persamaan(4). Penyelesaian persamaan (2), diselesaikan secara iterasi sehingga persamaannya dapat ditulis menjadi

$$i_n = \frac{V}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t_n}) \quad \text{..... (5)}$$

Iterasi ini akan berhenti bila $|i_{\text{sebelumnya}} - i_{\text{sekarang}}| < \epsilon$, dimana ϵ adalah tetapan yang harganya ditentukan.

Metode Euler ini, semua metode satu langkah yang dapat dinyatakan dalam bentuk umum:

$$y_{i+1} = y_i + \phi h \quad \text{..... (6)}$$

perkiraan *slope* ϕ dipakai untuk mengekstrapolasikan suatu harga lama y_i terhadap sebuah harga baru y_{i+1} disepanjang jarak.

Metode Runge Kutta mencapai tingkat ketepatan relatif sama dengan perhitungan suatu pendekatan dengan ekspansi deret Taylor tanpa memerlukan perhitungan dari turunan yang lebih tinggi. Metode Runge Kutta ini dapat dikatakan diperoleh berdasarkan penjabaran dari deret Taylor. Dan tergantung pada jumlah suku deret Taylor yang diperhitungkan, diperoleh beberapa macam metode Runge Kutta yang berbeda satu sama lain dalam ordenya. Dalam praktek sering dikenal adanya metode Runge Kutta orde 2,3,4,5. Namun metode yang paling banyak dipakai adalah metode Runge Kutta orde keempat.

Banyak perubahan ini terjadi, tetapi semuanya dapat ditampung dalam bentuk umum dari persamaan (6).

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad \text{..... (7)}$$

dimana $\phi(x_i, y_i, h)$ disebut suatu fungsi inkremen yang dapat diinterpretasikan

sebagai sebuah *slope* rata-rata sepanjang interval. Fungsi inkremen dapat dituliskan dalam bentuk umum sebagai berikut: $\phi = a_1 k_1 + a_2 k_2 + \dots + a_n k_n$ (8)

Di mana setiap a adalah konstanta dan setiap k besarnya adalah:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, y_i) \\ k_2 &= f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h) \\ k_3 &= f(x_i + p_2 h, y_i + q_{21} k_1 h + q_{22} k_2 h) \\ k_n &= f(x_i + p_{n-1} h, y_i + q_{n-1,1} k_1 h + q_{n-1,2} k_2 h + \dots + q_{n-1,n-1} k_{n-1} h) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (9)$$

dari persamaan diatas bahwa semua harga k berhubungan secara rekurensi, artinya k_1 muncul dalam persamaan untuk k_2 , yang muncul lagi dalam persamaan k_3 dan seterusnya. Rekurensi ini membuat Runge Kutta efisien untuk kalkulasi oleh komputer. Perluasan dari deret Taylor diperoleh berbagai jenis metode Runge Kutta Metode Runge Kutta orde pertama dengan $n=1$ ternyata merupakan Metode Euler. Penurunan Metode Runge Kutta Orde Kedua dari persamaan (7) akan diperoleh:

$$y_{i+1} = y_i + (a_1 k_1 + a_2 k_2) h \quad \dots \dots \dots (10)$$

dimana: $k_1 = f(x_i, y_i)$ dan $k_2 = f(x_i + p_1 h, y_i + q_{11} k_1 h)$ (11)
deret Taylor orde kedua

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) h + f'(x_i, y_i) \frac{h^2}{2} \dots \dots (12)$$

$f'(x_i, y_i)$ ditentukan oleh diferensi aturan rantai: $f'(x_i, y_i) = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dx}$ (13)

Dengan mensubstitusikan persamaan(13) ke dalam persamaan (12) akan diperoleh:

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i) h + \left(\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} \frac{dy}{dx} \right) \frac{h^2}{2} \dots \dots (14)$$

Dengan menggunakan manipulasi aljabar untuk menyelesaikan harga-harga a_1, a_2, p_1 , dan q_{11} , yang menjadikan persamaan (7) dan (14) ekuivalen. Adapun deret Taylor untuk suatu fungsi dua variabel didefinisikan sebagai berikut:

$$G(x+r, y+s) = G(x, y) + r \frac{\partial G}{\partial x} + s \frac{\partial G}{\partial y} \dots \dots (15)$$

maka dengan menerapkan metode persamaan (11) ini menjadi persamaan (15) disubstitusikan bersama dengan persamaan (11) ke dalam persamaan (10) suku yang serupa dalam persamaan (15) dengan persamaan (16) maka berlaku :

$$a_1 + a_2 = 1; a_2 p_1 = \frac{1}{2}; a_2 q_{11} = \frac{1}{2}$$

Jika $a_2 = \frac{1}{2}$, maka $a_1 = \frac{1}{2}$ dan $p_1 = q_{11} = 1$, lalu parameter ini dimasukkan

ke dalam persamaan(10) sehingga diperoleh:

$$y_{i+1} = y_i + \left(\frac{1}{2} k_1 + \frac{1}{2} k_2 \right) h \quad \dots \dots \dots (17)$$

dimana : $k_1 = f(x_i, y_i)$
 $k_2 = f(x_i + h, y_i + h k_1)$

persamaan (17) merupakan persamaan metode Runge Kutta orde kedua. Untuk $n=3$, suatu turunan yang serupa dengan penurunan orde kedua, sehingga bentuk metode Runge Kutta orde ketiga adalah sebagai berikut:

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 4k_2 + k_3) \right] h$$

dimana : $k_1 = f(x_i, y_i)$
 $k_2 = f(x_i + \frac{1}{2} h, y_i + \frac{1}{2} h k_1)$
 $k_3 = f(x_i + h, y_i - h k_1 + 2h k_2)$

Metode Runge Kutta yang paling populer adalah orde keempat yang seringkali disebut dengan metode Runge Kutta orde keempat klasik

$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h$$

dimana : $k_1 = f(x_i, y_i)$
 $k_2 = f(x_i + \frac{1}{2} h, y_i + \frac{1}{2} h k_1)$
 $k_3 = f(x_i + \frac{1}{2} h, y_i + \frac{1}{2} h k_2)$
 $k_4 = f(x_i + h, y_i + h k_3)$

Studi kasus yang diambil dalam penelitian ini adalah proses fisis yang terjadi dari pada rangkaian listrik yaitu dengan memperlihatkan rangkaian seri yang terdiri atas komponen resistansi berupa hambatan R dan induktansi L dengan sumber tegangan V searah seperti dalam Gambar 1, ketika saklar ini ditutup maka menurut hukum tegangan kirchhoff berlaku seperti dalam persamaan (3). Bentuk umum rangkaian seri yang terdiri atas komponen hambatan R dan induktansi L dengan sumber tegangan V searah merupakan persamaan diferensial orde pertama

Persamaan (2) merupakan model matematis untuk menghitung besar arus peralihan rangkaian seri yang terdiri dari hambatan dan induktansi, selanjutnya model matematik telah tersusun diselesaikan dengan bantuan komputer, bahasa pemrograman yang digunakan adalah Matlab.

Untuk menghitung persamaan arus peralihan ini dapat diselesaikan dengan berbagai metode, yaitu dengan

- Metode penyelesaian persamaan diferensial diorde pertama, metode menggunakan persamaan (2) penyelesaian persamaan arusnya secara iterasi dapat ditulis:

$$i_n = \frac{V}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}) \dots\dots\dots (18)$$

kondisi ini berhenti bila, dengan ϵ adalah $|i_{\text{sebelumnya}} - i_{\text{sekarang}}| < \epsilon$, tetapan yang harganya ditentukan.

- Metode Euler persamaan arus peralihan dapat dinyatakan dengan:

$$i_{n+1} = i_n + f(t_n, i_n)h \dots\dots\dots (19)$$

dengan: $f(t_n, i_n) = \frac{di_n}{dt_n} \dots\dots\dots (20)$

$$\frac{di_n}{dt_n} = \frac{V}{L} - \frac{R}{L}i_n \dots\dots\dots (21)$$

sehingga untuk mencari arus peralihan dengan metode Euler yaitu dengan mensubstitusikan persamaan (21) ke dalam persamaan (19)

$$i_{n+1} = i_n + \left(\frac{V}{L} - \frac{R}{L}i_n\right) \dots\dots\dots (22)$$

kondisi ini berhenti bila, nilai ϵ adalah tetapan yang harganya ditentukan

- Metode Runge Kutta Orde Keempat persamaan arus peralihan dapat dinyatakan dengan

$$i_{n+1} = i_n + \left[\frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)\right] \dots (23)$$

dimana : $k_1 = hf(t_n, i_n) \dots (24)$

$$k_2 = hf\left(t_n + \frac{1}{2}h, i_n + \frac{1}{2}k_1\right) \dots (25)$$

$$k_3 = hf\left(t_n + \frac{1}{2}h, i_n + \frac{1}{2}k_2\right) \dots (26)$$

$$k_4 = hf(t_n + h, i_n + k_3) \dots (27)$$

dengan $f(t_n, i_n)$ persamaan (23) dan persamaan (21), menjadi persamaan (24) sampai dengan persamaan (27) adalah:

PEMBAHASAN

Pada rangkaian seri Gambar 1. yang terdiri komponen hambatan R sebesar 50Ω , induktansi L sebesar 10 H dengan sumber tegangan V searah sebesar 100V. Setelah saklar ditutup pada saat $t=0$ dan arus $i=0$ maka penyelesaian arus peralihan dengan metode:

Seperti ditunjukkan pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4 berikut:

Tabel.1: Penyelesaian orde pertama waktu mulai $t=0,1$, arus awal $i=0$ dan $h=0.05$

iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)	iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)
1	0.5500	1.8358	0.0466	26	1.4000	1.9977	0.0007
2	0.6000	1.8721	0.0363	27	1.4500	1.9982	0.0005
3	0.6500	1.9004	0.0283	28	1.5000	1.9986	0.0004
4	0.7000	1.9225	0.0220	29	1.5500	1.9989	0.0003
5	0.7500	1.9396	0.0172	30	1.6000	1.9991	0.0002
6	0.8000	1.9530	0.0134	31	1.6500	1.9993	0.0002
7	0.8500	1.9634	0.0104	32	1.7000	1.9995	0.0001

Tabel 2: Metode Euler waktu mulai $t=0,1$, arus awal $i=0$ dan $h=0.05$

iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)	iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)
1	0.5000	1.7998	0.0667	24	1.3000	1.9980	0.0007
2	0.5500	1.8498	0.0501	25	1.3500	1.9985	0.0005
3	0.6000	1.8874	0.0375	26	1.4000	1.9989	0.0004
4	0.6500	1.9155	0.0282	27	1.4500	1.9992	0.0003
5	0.7000	1.9366	0.0211	28	1.5000	1.9994	0.0002
6	0.7500	1.9525	0.0158	29	1.5500	1.9995	0.0002
7	0.7500	1.9525	0.0158	30	1.6000	1.9996	0.0001

Dengan menggunakan persamaan diferensial orde pertama diperoleh: Hasil komputasi yang dilakukan dengan waktu mulai = 0.1, arus awal = 0, dan batasan nilai epsilon 0,0001 dengan ukuran langkah 0.05 seperti dalam Tabel.1

Penyelesaian persamaan diferensial dengan metode Euler: Hasil komputasi Metode Euler ini dilakukan dengan waktu dimulai $t=0.1$, dan arus awal = 0, batasan nilai epsilon 0,0001 dengan ukuran langkah 0.05 seperti dalam Tabel 2.

Tabel 3: Metode Runge Kutta orde ketiga $t=0,1$, arus awal $i=0$ dan $h= 0.05$

iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)	iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)
1	0.5500	1.7896	0.0598	27	1.4500	1.9977	0.0007
2	0.6000	1.8362	0.0466	28	1.5000	1.9982	0.0005
3	0.6500	1.8724	0.0363	29	1.5500	1.9986	0.0004
4	0.7000	1.9007	0.0282	30	1.6000	1.9989	0.0003
5	0.7500	1.9227	0.0220	31	1.6500	1.9991	0.0002
6	0.8000	1.9398	0.0171	32	1.6500	1.9991	0.0002
7	0.8500	1.9531	0.0133	33	1.7500	1.9995	0.0001

Penyelesaian persamaan diferensial dengan metode Runge Kutta Orde ketiga: Hasil komputasi Metode Runge Kutta orde ketiga ini dilakukan de-

ngan waktu mulai = 0.1, arus awal = 0, dan batasan nilai epsilon 0,0001 dengan ukuran langkah 0.05 seperti dalam Tabel 3.

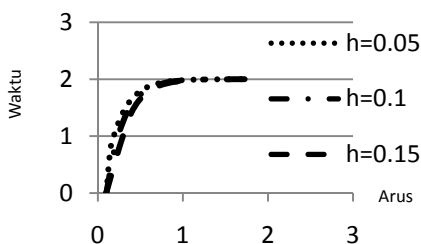
Tabel 4: Metode Runge Kutta orde keempat $t=0,1$, arus awal $i=0$ dan $h= 0.05$

iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)	iterasi	t(waktu)	I (arus)	Abs(i_1-i)
1	0.6500	1.8570	0.0388	29	1.5500	1.9981	0.0005
2	0.7000	1.8875	0.0305	30	1.6000	1.9985	0.0004
3	0.7500	1.9115	0.0240	31	1.6500	1.9988	0.0003
4	0.8000	1.9303	0.0189	32	1.7000	1.9991	0.0003
5	0.8500	1.9452	0.0149	33	1.7500	1.9993	0.0002
6	0.9000	1.9569	0.0117	34	1.8000	1.9994	0.0002
7	0.9500	1.9661	0.0092	35	1.8500	1.9995	0.0001

Penyelesaian persamaan diferensial dengan metode Runge Kutta Orde keempat: Hasil komputasi Metode Runge Kutta orde ketiga dilakukan dengan waktu mulai = 0.1, arus awal = 0, dan batasan nilai epsilon=0,0001 dengan ukuran langkah 0.05 seperti ini dalam Tabel 4.

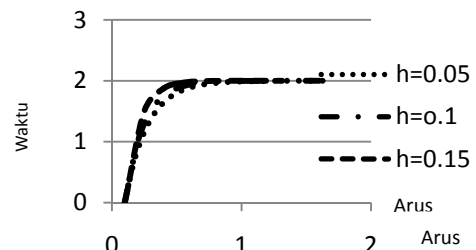
Hasil komputasi yang disajikan dalam tabel diatas secara grafik untuk masing-masing penyelesaian metode penyelesaian ini dengan variasi ukuran langkah yang berbeda.

Gambar 2 merupakan metode penyelesaian persamaan diferensial orde pertama.

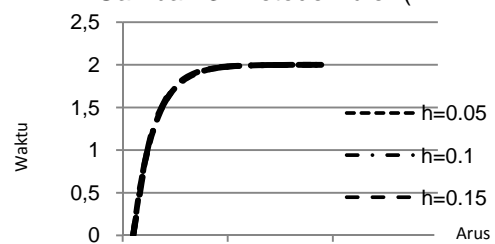


Gambar 2: Penyelesaian Orde 1

Gambar 3 penyelesaian persamaan diferensial dengan metode Euler.

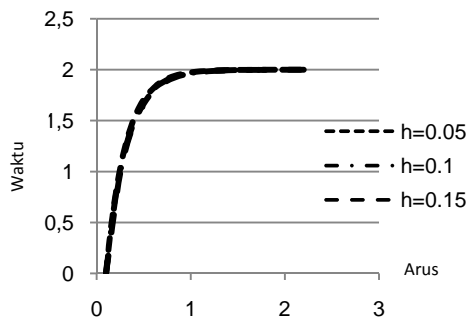


Gambar 3: Metode Euler (x)

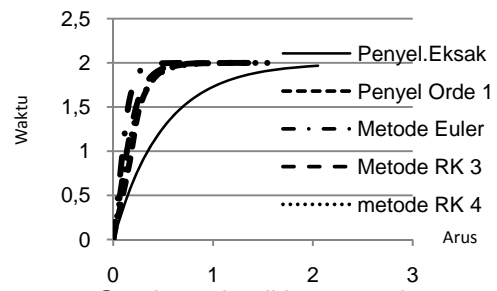


Gambar 4: Metode Runge-Kutta Orde 3

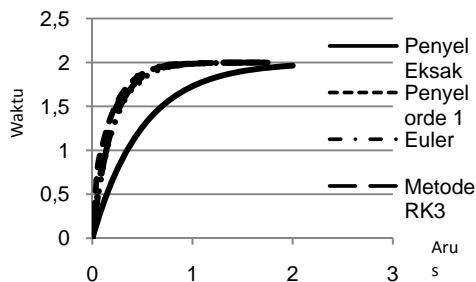
Gambar 4 adalah penyelesaian persamaan diferensial ini dengan metode Runge Kutta orde ke tiga dan Gambar 5. Penyelesaian persamaan diferensial metode Runge Kutta orde ke empat.



Gambar 5: Metode Runge-Kutta Orde 4

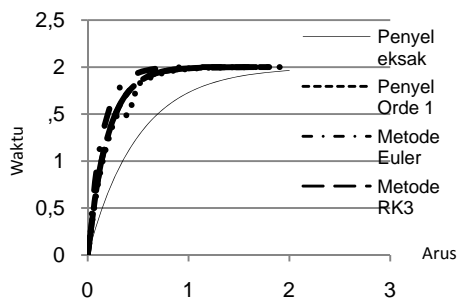


Gambar.8 hasil komputasi dengan h=0.15



Gambar 6: hasil komputasi dengan h= 0.05

Gambar 7. Hasil penyelesaian persamaan diferensial arus peralihan dalam rangkaian seri RL dengan tegangan searah V dibandingkan dengan penyelesaian arus peralihan rangkaian seri RL secara eksak, dengan ukuran langkah $h=0.1$



Gambar 7: hasil komputasi dengan h=0.1

Gambar 8. Hasil penyelesaian persamaan diferensial arus peralihan pada rangkaian seri RL dengan tegangan searah V dibandingkan dengan penyelesaian arus peralihan rangkaian seri RL secara eksak, dengan ukuran langkah $h=0.15$

Hasil pengujian yang dilakukan dengan menggunakan metode penyelesaian orde satu, Metode Euler, Metode Runge Kutta Orde 3 dan Metode Runge Kutta orde ke empat bahwa dari empat metode yang digunakan untuk mencari persamaan diferensial untuk mencari arus peralihan pada rangkaian RL tegangan searah secara rinci hasilnya dalam Tabel 5.

Tabel 5 : Hasil penyelesaian dengan berbagai metode

Metode Penyel	E_s (%) dengan $h=0.05$	E_s (%) dengan $h=0.1$	E_s (%) dengan $h=0.15$
orde 1	2.79	2.27	5.81
Euler	3.8	5.23	22.35
RK orde 3	2.51	2.27	7.19
RK orde 4	2.26	1.85	4.709

E_s : Kesalahan sebenarnya yaitu nilai hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai eksak dari persamaan

Berdasarkan Tabel 1, 2, 3, 4, ukuran langkah yang digunakan sebesar 0.05, dengan batasan epsilon yang sudah ditentukan sebesar 0.0001. Hasil yang diperoleh bahwa untuk penyelesaian orde 1 memerlukan perhitungan sebanyak 32 iterasi, metode Euler memerlukan 30 iterasi, Runge Kutta orde ke tiga memerlukan 33 iterasi dan metode Runge Kutta orde ke 4 memerlukan 35 iterasi, namun hasil komputasi ini bila dibandingkan dengan hasil eksak dapat dilihat seperti dalam Gambar.6 serta dalam Tabel.10 menunjukkan bahwa penyelesaian yang paling mendekati nilai eksak adalah metode Runge Kutta orde ke empat tersebut dengan kesalahan 2.26%, selanjutnya metode Runge Kutta orde ke tiga dengan kesalahan se-

besar 2.51% dari harga eksak, kemudian metode penyelesaian orde 1 sebesar 2.79%. serta untuk metode Euler sebesar 3.8%.

Hasil komputasi ini juga dibandingkan dengan hasil eksak dapat dilihat seperti dalam Gambar 7, menunjukkan bahwa penyelesaian yang paling mendekati nilai eksak adalah metode Runge Kutta orde ke empat dengan kesalahan 1.85%, selanjutnya metode Runge Kutta orde ke tiga dengan kesalahan sebesar 2.27% dari harga eksak, kemudian metode penyelesaian orde 1 ini sebesar 2.27%. serta untuk metode Euler sebesar 5.23%.

Berdasar Tabel 4, hasil komputasi, menunjukkan dengan ukuran langkah $h = 0.05$ bahwa metode Runge Kutta orde keempat mempunyai *error* yang paling kecil yaitu sebesar 2,26 % dan *error* yang paling besar adalah metode Euler. Jika ditinjau dari ukuran langkah yang digunakan sebesar 0.1 dari tabel tersebut menunjukkan hasil *error* yang diperoleh bahwa metode yang paling kecil nilai *error*nya adalah metode Runge Kutta orde keempat sebesar 1,85% dan metode ini yang memiliki *error* paling besar adalah metode Euler sebesar 5.23 %. Jika ditinjau dari ukuran langkah yang digunakan sebesar 0.15 dari tabel tersebut menunjukkan hasil *error* yang diperoleh bahwa metode ini yang paling kecil nilai *error*nya adalah dengan metode Runge Kutta orde keempat sebesar 4,7% dan metode yang memiliki *error* paling besar adalah dengan metode Euler 22.35%

Secara umum bahwa untuk hasil komputasi berdasarkan Tabel 4, ini menunjukkan untuk ukuran langkah $h=0.1$ dari berbagai metode bahwa metode Runge Kutta orde empat mempunyai ni-

lai *error* yang cukup stabil bila dibandingkan dengan penyelesaian orde satu, metode Euler, metode Runge Kutta Orde ketiga. Pengendalian ukuran langkah mempengaruhi pengerjaan perhitungan secara simultan, sehingga ukuran langkah yang terlalu kecil maka akan mempengaruhi proses iterasi yang terlalu panjang, jika ukuran langkah yang digunakan terlalu besar berarti meningkatkan galat pemotongan, maka akan menghasilkan *error* yang sangat besar .

KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan hasil pengujian yang dilakukan dengan menggunakan metode penyelesaian orde satu, Metode Euler, Metode Runge Kutta Orde 3 dan Metode Runge Kutta orde ke empat bahwa, empat metode yang digunakan untuk mencari persamaan ini diferensial untuk mencari arus peralihan pada rangkaian R-L ini tegangan searah seperti dalam Tabel 5, bahwa dapat disimpulkan dari keempat metode paling efektif ini adalah metode Runge Kutta Orde ke empat, ini dapat dilihat berdasarkan hasil kesalahan yang ditimbulkan dari metode tersebut. Dari Tabel 5, juga dapat disimpulkan bahwa ukuran langkah yang paling efektif digunakan metode adalah sebesar 0.1.

DAFTAR PUSTAKA.

- Steven, C, 1999, Metode Numerik Untuk teknik, Penerbit Universitas Indonesia
- Hayt, W.H, Jr, 1993, Rangkaian Listrik, Penerbit Erlangga Jakarta
- Munif, A dan Hidayatullah, A P, 1998, Cara Praktis Penguasaan Penggunaan Metode Numerik, Penerbit Guna Widya.

DEKOMPOSISI TUGAS-TUGAS SOFTWARE-DEFINED RADIO (SDR)

Eko Marpanaji^{1,2}

¹Jurusan Teknik Elektronika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Yogyakarta

²Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung,

Masuk: 26 Januari 2009, revisi masuk: 21 Juni 2009, diterima: 26 Juni 2009

ABSTRACT

This paper addresses decomposition of the tasks of Software-Defined Radio (SDR) computation by taking Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) as a case study. The aim of this research was to produce a task graph of the SDR that was needed in scheduling of distributed computing with task parallelism using genetics algorithm. Based on the tasks decomposition and the evaluation of execution time of each task, we obtained a task graph of SDR computation. We conclude that there are eleven tasks for the modulator and fifteen for the demodulator.

Keywords: *execution time, gaussian minimum shift keying, height function, modulation, task graph, task-parallelism, software-defined radio.*

INTISARI

Makalah ini membahas dekomposisi tugas-tugas komputasi *Software-Defined Radio* (SDR) dengan mengambil studi kasus skema modulasi *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK). Tujuan penelitian ini adalah menghasilkan sebuah grafik tugas (*task graph*) komputasi SDR yang diperlukan untuk proses penjadwalan komputasi terdistribusi dengan metoda paralelisme tugas (*task-parallelism*) menggunakan algoritma genetika. Berdasarkan hasil dekomposisi tugas dan pengujian waktu eksekusi masing-masing tugas, maka diperoleh sebuah grafik tugas komputasi SDR menggunakan skema modulasi GMSK yaitu 11 (sebelas) tugas untuk modulator dan 15 (lima belas) tugas untuk demodulator.

Kata Kunci: *fungsi ketinggian, gaussian minimum shift keying, grafik tugas, modulasi, paralelisme tugas, software-defined radio, waktu eksekusi.*

PENDAHULUAN

Kendala utama dalam mewujudkan sistem *Software-Defined Radio* atau disingkat SDR adalah dalam hal kebutuhan komputasi. Zheng (2007) menggunakan skema penjadwalan *weighted-selective* dan metoda paralelisme data (*data-parallelism*) dalam melakukan komputasi paralel sistem SDR dalam sebuah jaringan cluster PC ini. Kelemahan sistem tersebut adalah: metoda paralelisme data menyebabkan semua *node* komputasi akan melakukan tugas yang sama untuk paket data yang berbeda. Sedangkan skema penjadwalan *weighted-selective* akan selalu memprioritaskan *node* yang memiliki kemampuan komputasi paling tinggi. Hal ini mengakibatkan kemungkinan beberapa *node* tidak melakukan

Komputasi sama sekali karena nilai prioritasnya paling rendah. Dengan demikian, beban kerja komputasi menjadi tidak merata.

Makalah ini akan menjelaskan dekomposisi tugas-tugas komputasi dalam SDR untuk menghasilkan sebuah grafik tugas, dan merupakan bagian dari penelitian tentang skema penjadwalan komputasi terdistribusi menggunakan algoritma genetika dengan metoda paralelisme tugas atau *task-parallelism*. Tujuan penelitian tersebut adalah mengembangkan komputasi terdistribusi sebagai perbaikan terhadap kelemahan skema penjadwalan *weighted-selective* dan metoda paralelisme data yang digunakan oleh Zheng. Dengan menerapkan metoda paralelisme tugas, maka tiap-tiap tu-

¹eko@uny.ac.id

gas dapat dibagikan kepada seluruh *node* komputasi. Optimasi penjadwalan dilakukan dengan menggunakan algoritma genetika sehingga diperoleh sistem penjadwalan yang optimal dan pembagian beban kerja lebih merata.

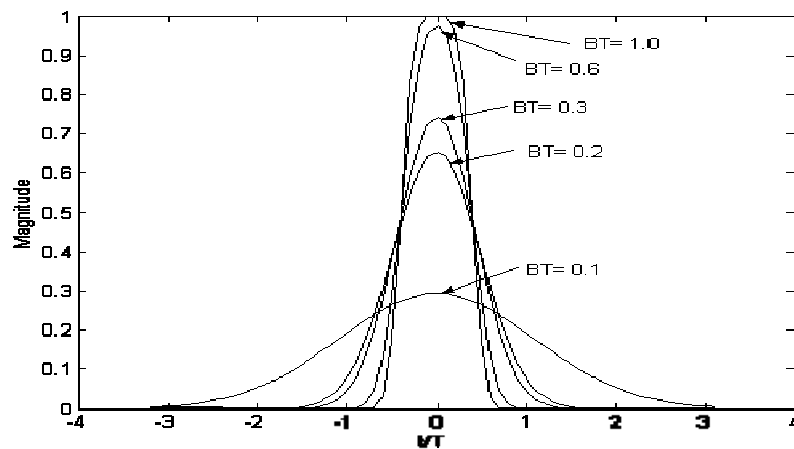
Metoda yang digunakan dalam mengatasi permasalahan tentang penjadwalan komputasi terdistribusi menggunakan algoritma genetika dengan metoda paralelisme tugas diawali dengan melakukan identifikasi tugas-tugas komputasi SDR untuk berbagai jenis modulasi, melakukan dekomposisi tugas-tugas tersebut sehingga diperoleh sebuah grafik tugas komputasi SDR lengkap dengan parameter setiap *node* dalam grafik tersebut. Parameter tiap *node* dapat diperoleh dengan menghitung nilai ketinggian

masing-masing tugas dan menguji waktu eksekusi masing-masing tugas.

Makalah ini akan menjelaskan bagaimana mewujudkan sebuah grafik tugas komputasi SDR dengan mengambil studi kasus modulasi *Gaussian Minimum Shift Keying* (GMSK). Waktu komunikasi antar *node* komputasi diabaikan.

Modulasi GMSK sangat populer dan digunakan dalam komunikasi seluler GSM. Hubungan antara *bandwidth* pada awal modulasi (B) dengan perioda bit (T) merupakan *bandwidth* dari sistem modulasi GMSK. Pada sistem seluler GSM nilai $BT = 0.3$ dengan laju bit saluran sebesar 270.8 kbps. Respons *filter* Gaussian ditentukan dengan persamaan 1 (Haykin, 2004):

$$g(t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} BT_b \left(\frac{t}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) - \operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\log 2}} BT_b \left(\frac{t}{T_b} - \frac{1}{2} \right) \right) \right] \dots (1)$$



Gambar 1. Respons *filter* Gaussian berdasarkan variasi nilai BT

Gambar 1 menunjukkan hasil simulasi respons *filter* Gaussian berdasarkan nilai BT menggunakan Matlab (Marpanaji, 2007). Untuk keperluan penjadwalan komputasi terdistribusi, maka tugas-tugas digambarkan dengan sebuah model grafik tugas (*task graph model*) dan atau *directed acyclic graph* (DAG). Grafik tugas $TG = (V, E)$ adalah DAG yang ini memiliki *node-node* V (sekumpulan m tugas atau nilai besaran $V = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$, dan sekum-

pulan garis berarah (*directed edge*) E yang ini menghubungkan *node* satu ke *node* lainnya. Garis berarah dilambangkan dengan $E = \{e_{ij}\}$ dimana e_{ij} adalah garis yang menghubungkan dua buah tugas yaitu tugas T_i menuju tugas T_j dan menunjukkan sebuah urutan atau hubungan preseden (*precedence relation*) diantara tugas tersebut dan biasanya dinotasikan dengan \gg . Sebagai contoh, garis berarah $e_{ij} \in E$

dari T_i me-nuju T_j dapat dinotasikan $T_i \gg T_j$, dan memiliki arti bahwa tugas T_i harus di-selesaikan terlebih dahulu sebelum tu-gas T_j , ini mulai dikerjakan (Hou, 1994; Lee, 2003; Rahmani, 2008). Selain itu, T_i adalah pendahulu (*predecessor*) atau leluhur (*ancestor*) dari T_j , atau biasa di- tulis $T_i = PRED(T_j)$. T_j adalah pengi-kut (*successor*) atau anak (*child*) dari T_i atau dapat ditulis $T_j = SUCC(T_i)$.

Untuk keperluan penjadwalan beberapa tugas, kita harus tahu tugas mana saja yang harus didahulukan dan tugas mana saja yang dapat dikerjakan kemudian, serta tugas-tugas mana saja yang dapat dikerjakan secara bersamaan (*concurrent*). Ada tidaknya hubungan preseden antar *node* dalam grafik tugas akan menentukan apakah *node* tersebut dapat dieksekusi secara seku-

$$height(T_i) = \begin{cases} 0, & \text{jika } PRED(T_i) = \phi \\ 1 + \max_{T_j \in PRED(T_i)} height(T_j), & \text{untuk lainnya} \end{cases} \dots\dots(2)$$

$$height'(T_j) = rand \in [\max \{height(T_i)\} + 1, \min \{height'(T_k)\} - 1] \dots\dots (3)$$

Hou (1994)., Tsujimura (1997) ini dalam menghitung fungsi ketinggian melakukan penambahan persamaan 3 untuk seluruhnya:

$T_i \in PRED(T_j)$ adan $T_k \in SUCC(T_j)$. Sedangkan Rahmani (2008) juga membuat modifikasi dalam menghitung nilai ketinggian sebuah tugas, yaitu:

$$height'(T_j) = rand \in X, \dots\dots (4)$$

dimana:

$$\min height(T_k) - 1 \leq X \leq \max height(T_i) + 1$$

untuk, $\forall T_i \in PRED(T_j), T_k \in SUCC(T_j)$

Untuk keperluan penjadwalan, parameter tiap *node* yang digunakan adalah bobot tiap *node* (waktu eksekusi) dan nilai ketinggian yang ditulis disamping tiap-tiap *node* dengan format ini ($t_i, height(T_i)$) Sedangkan waktu komunikasi untuk sementara diabaikan dengan asumsi untuk komputasi paralel

ensial atau paralel. Dua buah *node* dapat dieksekusi secara bersamaan jika tidak ada hubungan preseden ini antara dua buah *node* tersebut. Berdasarkan uraian tersebut, maka perlu dilakukan penentuan prioritas masing-masing tugas (*prioritizing of tasks*) dengan menghitung nilai ketinggian tiap-tiap tugas (*height of a task*) menggunakan fungsi ketinggian (*height function*). Nilai ketinggian tersebut menunjukkan hubungan preseden antar tugas. Jika T_i adalah leluhur T_j , maka T_i harus dieksekusi sebelum T_j , dan nilai ketinggiannya dapat ditulis: $height(T_i) < height(T_j)$. Dengan demikian, semakin kecil nilai ketinggian sebuah tugas ini, maka tugas tersebut akan semakin didahulukan, sebaliknya semakin besar nilai ketinggian sebuah tugas maka akan semakin dieksekusi lebih akhir. Nilai ketinggian dapat dihitung menggunakan persamaan 2.

$$height(T_i) = \begin{cases} 0, & \text{jika } PRED(T_i) = \phi \\ 1 + \max_{T_j \in PRED(T_i)} height(T_j), & \text{untuk lainnya} \end{cases} \dots\dots(2)$$

$$height'(T_j) = rand \in [\max \{height(T_i)\} + 1, \min \{height'(T_k)\} - 1] \dots\dots (3)$$

multiprosesor, perbedaan waktu komunikasi relatif kecil dan relatif sama.

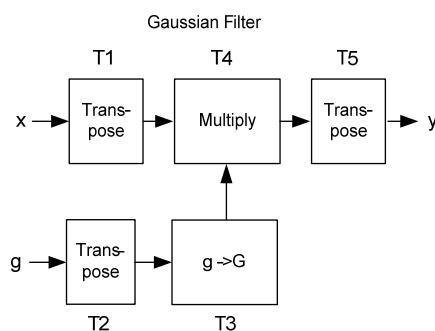
PEMBAHASAN

Dalam mengembangkan komputasi paralel dengan metoda paralelisma tugas, langkah awal yang harus dilakukan adalah membagi sebuah proses ini yang besar menjadi satuan-satuan tugas yang lebih kecil, sehingga dapat dilakukan proses komputasi terdistribusi. Namun demikian, kadang-kadang sebuah proses tidak dapat dibagi menjadi beberapa satuan tugas yang dapat diproses secara serempak semuanya. Dalam hal ini, perlu dilakukan dekomposisi tugas yang bertujuan untuk menentukan bagian proses ini yang dapat dieksekusi dalam bentuk paralel dan bagian proses yang harus dieksekusi dalam bentuk sekuensial. Beberapa tugas dapat dikerjakan secara paralel (*concurrent*) apabila tidak ada keterkaitan data antar tugas-tugas

tersebut. Dekomposisi tugas-tugas SDR dalam penelitian berdasarkan blok diagram modulasi GMSK baik dari pemancar maupun penerima. Peran algoritma sangat menentukan dalam melakukan dekomposisi tugas. Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan, maka dapat dinyatakan bahwa: kesulitan umum dalam menghasilkan tugas-tugas yang dapat diproses secara bersamaan adalah memecah algoritma komputasi yang berbentuk iterasi (*looping*) menjadi beberapa iterasi lain yang tidak memiliki keterkaitan data. Jika sebuah iterasi dapat dipecah menjadi beberapa iterasi lain tanpa keterkaitan data, maka iterasi-iterasi tersebut ini merupakan satuan-satuan tugas yang dapat diproses secara bersamaan.

Berikut ini diberikan contoh dalam melakukan dekomposisi tugas dari blok fungsi *filter* Gaussian pada modulasi GMSK. Fungsi *filter* Gaussian adalah sebuah proses konvolusi antara vektor baris ini deretan bit x dengan vektor baris respon *filter* Gaussian g . Algoritma konvolusi ini dapat menggunakan perkalian bentuk matrik (Orfanidis, 1996). Algoritma 1. Konvolusi:

- Buat vektor baris x menjadi vektor kolom x' ($\text{transpose}(x)$).
- Buat vektor baris g menjadi vektor kolom g' ($\text{transpose}(g)$).
- Buat matrik G dari vektor kolom g' .
- Kalikan matrik G dengan vektor kolom x dan tampung hasilnya dalam vektor kolom y .
- Buat vektor kolom y menjadi vektor baris y' .



Gambar 2. Dekomposisi fungsi *filter* Gaussian

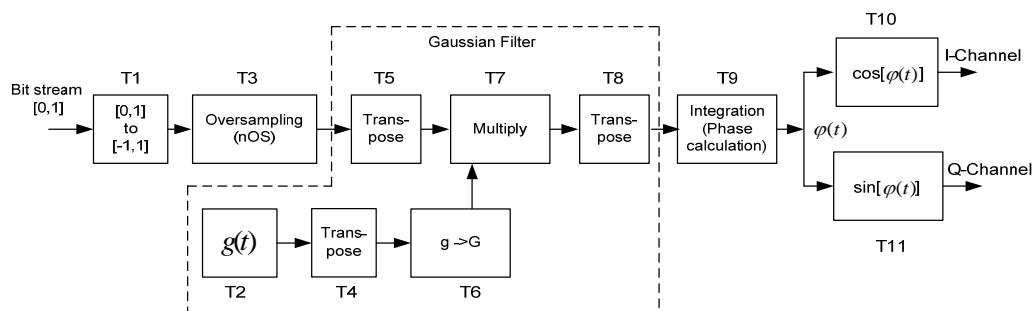
Gambar 2 menunjukkan bahwa fungsi *filter* Gaussian memiliki 5 buah komponen tugas: (1) tugas T1 melakukan transpose vektor baris x ($1 \times M$ elemen) menjadi vektor kolom x' ($M \times 1$) elemen; (2) tugas T2 melakukan transpose vektor baris g ($1 \times L$) menjadi vektor kolom g' ($L \times 1$); (3) tugas T3 membentuk matrik G yang memiliki elemen $(L + M - 1) \times M$ dimana nilai tiap-tiap elemen di salin dari vektor kolom g' dengan menggunakan Algoritma 2 dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 3; (4) tugas T4 melakukan proses perkalian matrik G dengan vektor kolom x' sehingga menghasilkan vektor kolom y yang berukuran $(L + M - 1) \times 1$; dan (5) tugas T5 melakukan transpose vektor kolom y dengan $(L + M - 1) \times 1$ elemen menjadi vektor baris y' yang berukuran $1 \times (L + M - 1)$. Berdasarkan Gambar 2, nampak bahwa fungsi T1 dan T2 tidak memiliki keterkaitan data sehingga dapat diproses secara bersamaan. Sedangkan T3 merupakan proses setelah T2; proses T4 merupakan proses setelah T1 dan T3, dan terakhir proses T5 merupakan proses setelah proses T1, T2, T3, dan T4. Dengan demikian proses T3, T4, dan T5 tidak bisa dilakukan secara paralel tetapi harus secara sekuensial. Sedangkan algoritma tugas T3 dapat dijelaskan sebagai berikut: Algoritma 2. Menyalin matrik g' ke dalam matrik G :

- Inisialisasi ukuran matrik G ini adalah $(L + M - 1) \times M$.
- *Loop*: untuk $i = 0$ sampai dengan $M - 1$ lakukan langkah 3.
- Salin vektor kolom g' kedalam matrik ke G dengan posisi baris ke- i dan kolom ke- i .

Gambar 3 menunjukkan perkalian matrik berdasarkan Algoritma 1 dan Algoritma 2 tersebut di atas. Hasil dekomposisi tugas secara lengkap pada bagian modulator GMSK ditunjukkan pada Gambar 4.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y} &= \mathbf{G} \times \mathbf{x}' \\
 &= \begin{bmatrix} g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_1 & g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ g_2 & g_1 & g_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & g_2 & g_1 & g_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_2 & g_1 & g_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_2 & g_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Gambar 3. Perkalian matrik \mathbf{G} dengan vektor kolom \mathbf{x}'



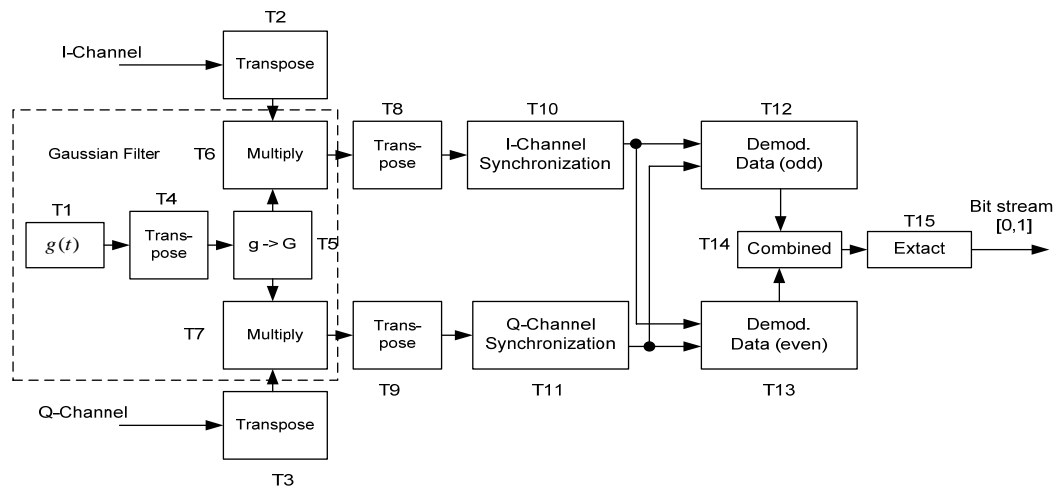
Gambar 4. Dekomposisi tugas pada modulator GMSK

Berdasarkan hasil dekomposisi tugas tersebut, maka modulator GMSK memiliki 11 (sebelas tugas), yaitu: (1) tugas T1 mengubah deretan bit non polar menjadi deretan bit bipolar; (2) tugas T2 menghasilkan *impulse response filter* Gaussian; (3) tugas T3 melakukan *oversampling*; (4) tugas T4 melakukan transpose vektor baris g ; (5) tugas T5 melakukan transpose vektor baris x ; (6) tugas T6 membuat matrik \mathbf{G} ; (7) tugas T7 melakukan perkalian matrik \mathbf{G} dengan vektor kolom \mathbf{x}' sehingga menghasilkan vektor kolom \mathbf{y} ; (8) tugas T8 melakukan transpose vektor kolom \mathbf{y} ; (9) tugas T9 melakukan integrasi untuk menghitung sudut fase θ dari vektor baris \mathbf{y}' ; (10) tugas T10 menghitung nilai cosinus dari sudut fase sehingga menghasilkan vektor baris \mathbf{I} untuk sinyal *I-Channel*; dan (11) tugas T11 menghitung nilai sinus dari sudut fase

sehingga menghasilkan vektor baris \mathbf{Q} untuk sinyal *Q-Channel*. Gambar 5 menunjukkan hasil dekomposisi tugas secara lengkap ini bagian demodulator GMSK. Berdasarkan hasil dekomposisi tugas tersebut, maka demodulator GMSK memiliki 15 (lima belas) tugas, yaitu: (1) tugas T1 menghasilkan *impulse response filter* Gaussian; (2) tugas T2 melakukan transpose vektor baris \mathbf{I} ; (3) tugas T3 melakukan transpose vektor baris \mathbf{Q} ; (4) tugas T4 melakukan transpose vektor baris g ; (5) tugas T5 membuat matrik \mathbf{G} ; (6) tugas T6 melakukan perkalian matrik \mathbf{G} dengan vektor kolom \mathbf{I}' sehingga menghasilkan vektor kolom \mathbf{i} ; (7) tugas T7 perkalian matrik \mathbf{G} dengan vektor kolom \mathbf{Q}' sehingga menghasilkan vektor kolom \mathbf{q} ; (8) tugas T8 melakukan transpose vektor kolom \mathbf{i} ; (9) tugas T9 melakukan transpose vektor kolom \mathbf{q} ; (10) tugas T10 melakukan

sinkronisasi vektor baris i' ; (11) tugas T11 melakukan sinkronisasi vektor baris q' ; (12) tugas T12 melakukan demodulasi data ganjil dari vektor kolom i' dan q' ; (13) tugas T13 melakukan de-

modulasi data genap dari vektor kolom i' dan q' ; (14) tugas T14 melakukan penggabungan data ganjil dan genap; dan (15) tugas T15 melakukan ekstraksi bit menjadi deretan bit non polar.



Gambar 5. Dekomposisi tugas pada demodulator GMSK

Setiap *node* dalam grafik tugas memiliki dua parameter yang sangat diperlukan dalam proses penjadwalan, yaitu nilai ketinggian dan waktu eksekusi. Nilai ketinggian dapat dihitung setelah susunan *node* dalam grafik tugas bisa terbentuk berdasarkan hubungan antar *node* (*precedence relations*), sedangkan waktu eksekusi diperoleh dengan mengeksekusi fungsi tersebut. Penelitian ini menggunakan bahasa pemrograman JAVA, sehingga waktu eksekusi diperoleh dengan cara mengimplementasikan algoritma dalam bentuk *method-method* dari kelas yang didefinisikan untuk modulator dan demodulator GMSK, dan menjalankan atau mengeksekusi setiap *method* tersebut. Spesifikasi komputer yang digunakan dalam menghitung waktu eksekusi masing-masing tugas untuk modulator dan demodulator GMSK ditunjukkan pada Tabel 1. Waktu eksekusi absolut setiap tugas pada modulator GMSK disajikan pada Tabel 2 dalam satuan nano detik (10^{-9} detik). Pengujian waktu eksekusi dilakukan untuk beberapa ukuran data, yaitu 8 bit, 32 bit, 64 bit, 128 bit, 256 bit, 512 bit, dan 1024 bit.

Tabel 1. Spesifikasi Komputer

No	Komponen	Spesifikasi
1.	Processor	Intel Pentium 1.73 GHz
2.	RAM	DDR2 794 MHz, 1.272 MByte
3.	Sistem Operasi	Window XP Home Edition
4.	Bahasa Pemrograman	Java

Berdasarkan hasil eksperimen untuk memperoleh waktu eksekusi tiap-tiap tugas modulator GMSK, nampak bahwa waktu eksekusi dari T3 (menghasilkan respons *filter* Gaussian) untuk data 8 bit memiliki waktu eksekusi paling tinggi. Hal ini disebabkan fungsi tersebut melibatkan *method* yang berfungsi untuk menghitung nilai erf (*error function*) seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1. Dua fungsi lain yang juga sangat besar waktu eksekusinya adalah T6 dan T7.

Grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam bit terhadap waktu eksekusi ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Gambar 6 menunjukkan

grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam satuan bit terhadap waktu eksekusi masing-masing tugas komputasi pada modulator GMSK dari Gambar 4. Waktu eksekusi yang ditampilkan

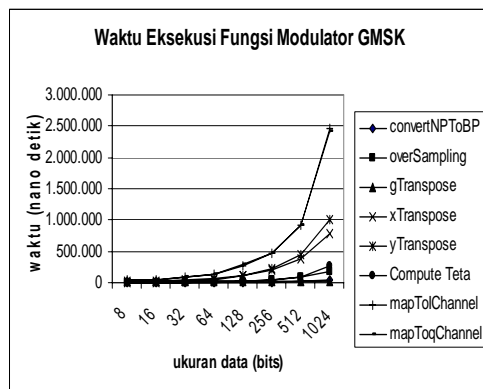
dalam gambar ini adalah: (1) tugas T1 (2) tugas T3; (3) tugas T4; (4) tugas T5; (5) tugas T8; (6) tugas T9; (7) tugas T10; dan (8) Tugas T11.

Tabel 2. Waktu Eksekusi Absolut Tugas-Tugas Modulator GMSK (dalam nano detik)

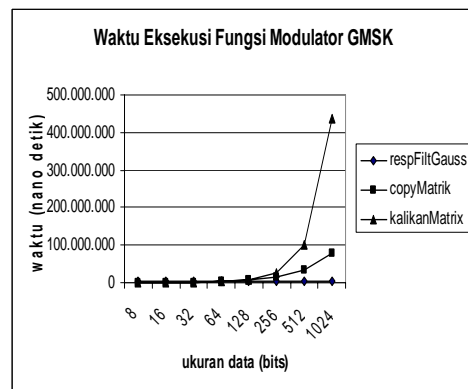
Tugas	Fungsi	Jumlah Data (bit)						
		16	32	64	128	256	512	1024
T1	convertNPTToBP	713	1.338	2.603	5.153	10.594	20.594	40.470
T2	overSampling	2.306	4.138	9.231	19.547	40.344	94.470	188.530
T3	respFiltGauss	4.688.000	4.688.000	4.720.000	4.720.000	4.688.000	4.684.000	4.658.000
T4	gTranspose	15.800	15.200	18.600	15.800	15.600	15.600	16.000
T5	xTranspose	6.240	25.000	49.700	102.180	210.620	390.640	783.120
T6	copyMatrik	374.000	0	3.376.000	7.280.000	16.064.000	33.750.000	79.560.000
T7	kalikanMatrix	220.000	814.000	2.468.000	7.782.000	27.032.000	101.844.000	436.686.000
T8	yTranspose	21.800	40.600	65.600	115.400	219.000	437.400	1.018.400
T9	Compute Teta	5.658	7.940	12.468	20.624	45.340	95.620	270.920
T10	mapToI Channel	51.520	79.040	134.700	267.800	478.100	926.920	2.463.120
T11	mapToq Channel	52.840	79.060	134.680	286.600	474.700	920.620	2.427.520

Peningkatan waktu eksekusi sebanding dengan peningkatan jumlah data yang akan diproses. Sedangkan waktu eksekusi dari tugas T4 relatif tetap dalam arti waktu eksekusi tidak dipengaruhi oleh ukuran data yang akan diproses oleh modulator GMSK. Waktu eksekusi paling tinggi adalah tugas T10 dan T11, yaitu untuk data 1024 bit waktu eksekusi T10 adalah 2.463.120 nano detik dan T11 adalah 2.427.520 nano detik. Kedua tugas ini memiliki waktu eksekusi relatif sama karena tugas yang

dikerjakan adalah sama, T10 menghitung nilai cosinus dan T11 menghitung nilai sinus. Urutan waktu eksekusi dari yang paling besar ke waktu ekeekusi yang paling kecil berikutnya dari tugas-tugas tersebut setelah T10 dan T11 untuk ukuran data 1024 adalah T8 dengan waktu eksekusi 1.018.400 nano detik, T5 dengan waktu eksekusi 783.120 nano detik, T9 dengan waktu eksekusi 270.920 nano detik, T2 dengan waktu eksekusi 188.530 nano detik.



Gambar 6. Grafik hubungan antara ukuran data (bit) terhadap waktu eksekusi



Gambar 7 Grafik hubungan antara ukuran data (bit) terhadap waktu eksekusi

Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam satuan bit terhadap waktu eksekusi masing-masing tugas komputasi pada modulator GMSK dari Gambar 4 selain tugas-tugas yang telah ditampilkan pada Gambar 6. Tugas-tugas yang ditunjukkan pada grafik ini adalah: (1) tugas T3; (2) tugas T6; dan (3) tugas T7. Berdasarkan gambar tersebut maka penambahan jumlah data secara eksponensial juga akan mengakibatkan peningkatan secara eksponensial terhadap waktu eksekusi dari tugas-tugas T6 dan T7. Dengan kata lain, peningkatan waktu eksekusi sebanding dengan peningkatan jumlah data yang akan diproses. Sedangkan waktu eksekusi dari tugas T3 relatif tetap dalam arti waktu eksekusi tidak dipengaruhi oleh ukuran data yang akan diproses oleh modulator GMSK.

Waktu eksekusi paling besar dari kelompok tugas tersebut di atas adalah tugas T7, yaitu untuk data 1024 bit waktu eksekusi T7 adalah sebesar 436.686.000 nano detik. Urutan berikutnya tugas T6 dengan waktu eksekusi untuk data 1024 bit adalah 79.560.000 nano detik. Sedangkan tugas T3 waktu eksekusi tidak terpengaruh oleh besarnya ukuran data yang akan diproses oleh modulator GMSK yaitu sebesar 4.658.000 nano detik.

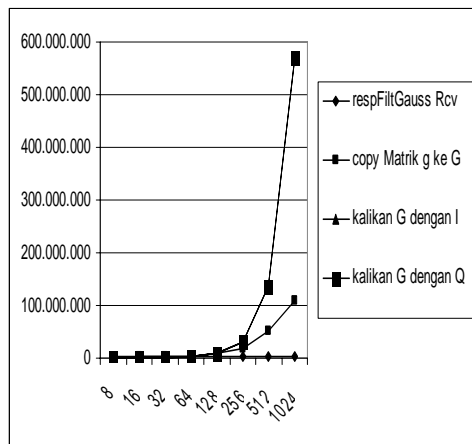
Tabel 3 menunjukkan waktu eksekusi absolut dari tugas demodulator GMSK dalam satuan nano detik (10^{-9} detik). Pengujian waktu eksekusi dilakukan untuk beberapa ukuran data, yaitu 8 bit, 32 bit, 64 bit, 128 bit, 256 bit, 512 bit, dan 1024 bit. Pada bagian demodulator, nampak bahwa waktu eksekusi T1 (menghasilkan respons *filter Gaussian*) memiliki sifat yang sama seperti pada modulator. Sedangkan untuk data 1024 bit, waktu eksekusi yang tinggi adalah T5, T6 dan T7. Untuk demodulator, tugas mengalikan matrik ada dua, yaitu untuk sinyal *I-Channel* dan sinyal *Q-Channel*.

Grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam bit terhadap waktu eksekusi ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Gambar 8 menunjukkan grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam satuan bit terhadap waktu eksekusi masing-masing tugas komputasi pada demodulator GMSK seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Waktu eksekusi yang digambarkan pada grafik ini adalah 4 (empat) tugas dari demodulator GMSK yang memiliki waktu eksekusi terbesar. Tugas-tugas tersebut adalah: (1) tugas T1; (2) tugas T5; (3) tugas T6; dan (4) tugas T7.

Tabel 4. Waktu Eksekusi Absolut Tugas-Tugas Demodulator GMSK (nano detik)

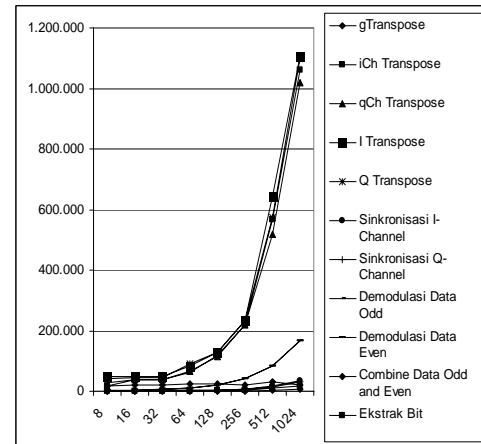
Tugas	Fungsi	Jumlah Data (bit)						
		16	32	64	128	256	512	1024
T1	respFiltGauss Rcv	3.280.000	3.250.000	3.030.000	3.032.000	2.934.000	2.970.000	2.906.000
T2	gTranspose	21.800	21.800	24.800	25.000	21.800	31.200	22.000
T3	iCh Transpose	37.600	37.600	62.600	118.600	218.800	565.400	1.062.400
T4	qCh Transpose	37.600	37.600	65.400	115.800	218.800	518.600	1.018.600
T5	copy Matrik g ke G	1.906.000	1.906.000	4.536.000	8.372.000	17.218.000	52.218.000	107.718.000
T6	kalikan G dengan I	938.000	938.000	3.592.000	9.876.000	31.188.000	137.440.000	568.500.000
T7	kalikan G dengan Q	938.000	938.000	3.592.000	9.876.000	31.188.000	137.440.000	568.500.000
T8	I Transpose	47.000	47.000	84.200	128.200	234.400	643.400	1.106.000
T9	Q Transpose	43.800	43.800	91.000	128.000	234.600	575.000	1.100.200
T10	Sinkronisasi I-Channel	1.560	1.900	1.900	2.500	5.940	17.500	33.780
T11	Sinkronisasi Q-Channel	1.580	2.480	2.800	3.420	6.240	12.500	29.680
T12	Demodulasi Data Odd	3.740	5.320	10.900	20.660	41.260	82.820	167.500

Berdasarkan Gambar 8 tersebut maka penambahan jumlah data secara eksponensial juga akan mengakibatkan peningkatan waktu eksekusi secara eksponensial untuk tugas-tugas T5, T6 dan T7. Dengan kata lain, peningkatan waktu eksekusi sebanding dengan peningkatan jumlah data yang akan diproses. Waktu eksekusi tugas T1 relatif tetap dalam arti waktu eksekusi tidak dipengaruhi oleh ukuran data yang akan diproses oleh demodulator GMSK.



Gambar 8. Grafik hubungan antara ukuran data (bit) terhadap waktu eksekusi

Waktu eksekusi paling besar adalah tugas T6 dan T7, yaitu untuk data 1024 bit waktu eksekusi T6 adalah sebesar 568.500.000 nano detik dan T7 adalah 568.500.000 nano detik. Urutan berikutnya ini adalah tugas T5 yaitu 107.718.000 nano detik, dan terakhir adalah T1 ini dengan waktu eksekusi 2.906.000 nano detik. Namun demikian, waktu eksekusi tugas T1 tidak terpengaruh oleh besarnya ukuran data yang akan diproses oleh demodulator GMSK.



Gambar 9. Grafik hubungan antara ukuran data (bit) terhadap waktu eksekusi

Gambar 9 menunjukkan grafik hubungan antara variasi ukuran data dalam satuan bit terhadap waktu eksekusi masing-masing tugas komputasi pada demodulator GMSK seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, selain yang telah ditampilkan pada Gambar 8. Waktu eksekusi yang digambarkan pada grafik ini adalah 11 (sebelas) tugas demodulator GMSK selain yang telah ditampilkan pada Gambar 8. Tugas-tugas tersebut adalah: (1) tugas T2; (2) tugas T3; (3) tugas T4; (4) tugas T8; (5) tugas T9; (6) tugas T10; (7) tugas T11; (8) tugas T12; (9) tugas T13; (10) tugas T14; dan (11) tugas T15.

Berdasarkan Gambar 9 tersebut maka penambahan jumlah data secara eksponensial juga akan meningkatkan waktu eksekusi tugas-tugas T3, T4, T8, T9, T12, T13 secara eksponensial. Dengan kata lain, peningkatan waktu eksekusi sebanding dengan peningkatan jumlah data yang akan diproses. Enam

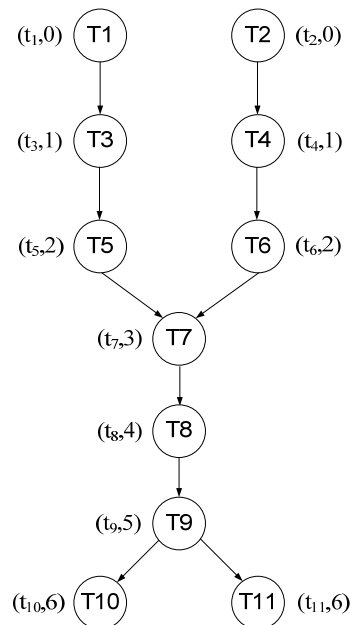
tugas ini memiliki waktu eksekusi yang terbesar dibanding tugas-tugas lain yang digambarkan dalam grafik ini. Sedangkan waktu eksekusi dari tugas T10, T11, T14, T15 memiliki waktu eksekusi yang lebih rendah serta memiliki sifat akan berubah secara eksponensial jika ukuran data berubah secara eksponensial. Khusus untuk tugas T2 relatif tetap dalam arti waktu eksekusi tidak dipengaruhi oleh ukuran data yang akan diproses oleh demodulator GMSK.

Waktu eksekusi paling besar dari kelompok tugas tersebut adalah tugas T1, yaitu 2.906.000 nano detik. Empat tugas berikutnya yang memiliki waktu eksekusi terbesar di bawah waktu eksekusi T1 adalah waktu eksekusi tugas T3, T4, T8, dan T9. Masing-masing waktu eksekusi T3, T4, T8, dan T9 untuk ukuran data 1024 bit secara berturut-turut adalah 1.062.400 nano detik, 1.018.600 nano detik, 1.106.000 nano detik, dan

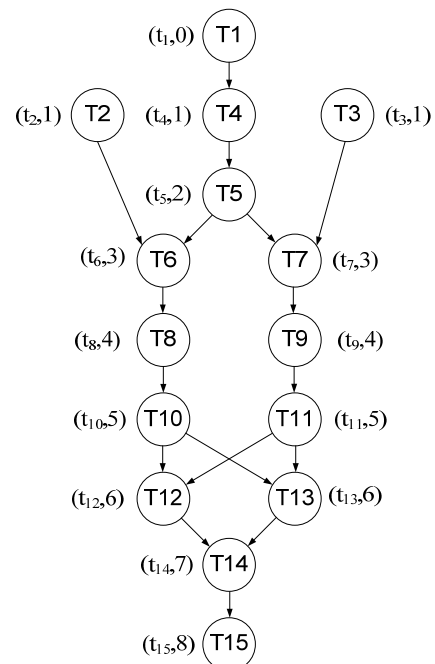
1.100.200 nano detik. Sedangkan waktu eksekusi T12 dan T13 merupakan kelompok berikutnya yaitu untuk ukuran data 1024 bit memiliki waktu eksekusi 167.300 nano detik dan 165.300 nano detik. Terakhir, tugas yang memiliki waktu eksekusi paling rendah adalah tugas T10, T11, T14, dan T15 yaitu untuk ukuran data 1024 bit secara berturut-turut memiliki waktu eksekusi sebesar 33.780 nano detik, 29.650 nano detik, 5.350 nano detik, dan 17.597 nano detik.

Berdasarkan uraian tentang dekomposisi tugas serta pengujian untuk memperoleh waktu eksekusi, maka grafik tugas modulator GMSK ditunjukkan pada Gambar 10 dan grafik tugas demodulator GMSK ditunjukkan pada Gambar 11.

Grafik tugas modulator GMSK tersebut terdiri dari 11 (sebelas) *node* atau tugas seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Masing-masing nilai ketinggian untuk tiap-tiap *node* tugas sudah dicantumkan, sedangkan parameter waktu eksekusi untuk menyatakan bobot komputasi dapat diperoleh dari Tabel 2 berdasarkan ukuran data yang diinginkan.



Gambar 10. Grafik tugas modulator GMSK



Gambar 11. Grafik tugas demodulator GMSK

Sedangkan Grafik tugas untuk demodulator GMSK ditunjukkan pada Gambar 11, yaitu terdiri dari 15 (lima belas) *node* atau tugas, dan parameter tentang nilai ketinggian masing-masing *node* tugas telah dicantumkan sedangkan parameter bobot komputasi dapat diperoleh dari Tabel 3 untuk waktu eksekusi absolut berdasarkan ukuran data yang diinginkan.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan grafik tugas untuk modulator dan demodulator GMSK untuk keperluan penjadwalan komputasi terdistribusi dengan metoda paralelisme tugas, dimana modulator terdiri dari 11 (sebelas) tugas dan demodulator terdiri dari 15 (lima belas) tugas. Waktu eksekusi paling besar adalah fungsi menghitung respons *filter* Gaussian, yaitu T3 pada modulator dan T1 pada demodulator. Waktu eksekusi yang tergolong besar berikutnya adalah fungsi menyalin matrik (T6 pada modulator dan T5 pada demodulator), dan fungsi mengalikan matrik (T7 pada modulator, T6 dan T7 pada demodulator).

DAFTAR PUSTAKA

- Haykin, S. (2004) : *Communication System*, 4th ed. New York, John Wiley & Sons, Inc, pp. 396 – 402.
- Hou, E. S. H., Ansari, N., dan Ren, H. (1994) : A Genetic Algorithm for Multiprocessor Scheduling, *Journal of IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems*, **Vol. 5, No. 2**, pp. 113 –120.
- Lee, Y. H., dan Chen, C. (2003) : A Modified Genetic Algorithm For Task Scheduling In Multiprocessor Systems, [On-line], Available at <http://parallel.iis.sinica.edu.tw/cthpc2003/papers/CTHPC2003-18.pdf>.
- Marpanaji, E., dkk. (2007) : Pengukuran Unjuk Kerja Modulasi GMSK pada Software-Defined Radio Platform, *Jurnal Telkomnika*, Vol. 5, No. 2 Agustus 2007, 73 – 84.
- Orfanidis, S. J. (1996) : *Intoduction to Signal Processing*, New Jersey, USA, Prentice Hall, 132 – 134.
- Rahmani, A. M., Vahedi, M. A. (2008) : A Novel Task Scheduling In Multiprocessor Systems With Genetic Algorithm By Using Elitism Stepping Method, *Journal of Computer Science*, Vol. 7 No. 2 June 2008. [On-line]. Available at <http://www.dcc.ufla.br/infocomp/artigos/v7.2/art08.pdf>.
- Tsujimura, Y., dan Gen M. (1997) : *Genetic Algorithms for Solving Multiprocessor Scheduling Problems Simulated Evolution and learning*, Heidelberg, Springer Berlin, pp. 106 – 115. [On-line], Available at <http://www.springerlink.com/content/w461447527q15-086/fulltext.pdf>
- Zheng, K., Li G., dan Huang L. (2007) : A weighted Scheduling Scheme in an Open Software Radio Environment, Communication, Computer and Signal Processing, PacRim 2007, *Proceedings of IEEE Pacific Rim Conference, Canada, August, 2007*, pp. 561 – 564.

PERILAKU KOROSI PADA SAMBUNGAN PLAT PEMBENTUK BODI MOBIL

Ellyawan S. Arbintarso¹

¹Jurusan Teknik Mesin FTI – Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 27 Maret 2009, revisi masuk: 15 Juli 2009, diterima: 19 Juli 2009

ABSTRACT

Effect of plate joint on automobile body which susceptible to corrosion has been investigated also corrosion rate on automobile plate when the coating has impacted. Rain and sea water was used as corrosion medium as normally affected on automobile plate. Low carbon steel has been choosed as standart plate. The forming of plate as a joint which folding and welding used a standart manufacture of automobile industry. The results have shown the losses weight of plate faster on the sea water environment. After immersed in the sea water for 627 hours the corrosion rate of folding plate joint has 0.000806 mpy, although it was at a standstill outstanding level. Coating paint can decreased 20% corrosion rate, but still need attention to care if the automobile body was impacted.

Keywords: Corrosion Rate, Plate Joint, Low Carbon Steel, Automobile Body

INTISARI

Pengaruh model penyambungan pada plat bodi mobil yang rentan terhadap korosi telah diteliti begitu juga dengan laju tingkat korosi yang terjadi pada plat bodi mobil apabila lapisan pelindung terkena regangan (benturan). Media korosi yang digunakan adalah air hujan dan air laut yang diasumsikan sering terpapar pada plat bodi mobil. Baja karbon rendah dipilih sesuai standard bahan plat untuk bodi mobil sedangkan proses pembentukan sambungan menggunakan lipatan dan las yang digunakan pada industri karoseri mobil. Dari hasil pengujian tampak bahwa plat mengalami penurunan berat yang lebih tajam pada lingkungan air laut. Penurunan berat plat setelah direndam selama 672 jam yaitu diperoleh laju korosi plat dalam MPY (mils per year) terendah pada sambungan plat tipe lipatan yaitu 0,000806 mpy, namun secara umum masih dalam batas tahan korosi (*Outstanding level*). Cat pelindung mampu menurunkan laju korosi sebesar 20%, namun perlu diberi perhatian khusus bila terjadi regangan (benturan) yang dapat menjadi pemicu sel korosi.

Kata Kunci : Laju Korosi, Sambungan Plat, Baja Karbon Rendah, Bodi Mobil

PENDAHULUAN

Pembentukan bodi kendaraan ini (mobil) dengan proses press tentunya banyak terjadi bengkokan-bengkokan dengan jari-jari tertentu sesuai desain dari perusahaan masing-masing. Dari bengkokan tersebut menyebabkan terjadinya perubahan struktur mikro dan tegangan sisa, dimana pada akhirnya berpengaruh terhadap sifat mekanis dan laju korosi. Kendaraan memiliki resiko karat cukup besar. Kelembaban udara, cipratan air hujan, lumpur, benturan atau gesekan dengan benda lain yang menyebabkan lapisan pelindung terkelupas. Rusaknya pelindung metal akan mempercepat pro-

ses korosi dan menjalarnya karat. Karat timbul akibat reaksi oksidasi antara material logam dengan oksigen. Jadi, selama material logam terlindungi oleh cat atau lapisan di atasnya, maka proses oksidasi akan sulit terjadi. Dan seluruh produsen mobil telah melapisi produknya dengan cairan antirarat dan cat. Pemicu timbulnya karat ini biasanya terjadi akibat kesalahan pemilik dalam merawat, seperti ketika mencuci mobil yang mengakibatkan adanya sisa air ini yang tidak terlihat sehingga mengendap lama dibagian bodi mobil dan membiarkan terlalu lama mobil dalam keadaan kotor setelah terkena hujan. Bagian yang sering terlewatkan dan

¹arbintarso@yahoo.co.uk

sulit untuk dilakukan pengecekan adalah pada bagian body yang tertutupi karet atau karpet, seperti celah body, bagian bawah/ spakbor, rantai, engsel pintu dan jika mobil menggunakan *roof rack*, bagian bodi mobil yang tertutupi atau dijepit pemegangnya juga menjadi titik yang rawan terkena karat. Karat muncul disebabkan permukaan besi/ bagian yang mengandung unsur logam bersentuhan langsung dengan air yang mengandung asam sehingga mengalami proses oksidasi oleh udara. Semakin dibiarkan air dan kotoran menempel pada besi semakin banyak pula zat asam bereaksi terhadap besi yang menjadikannya karat.

Adapun tujuan penelitian yang diharapkan adalah: untuk mengetahui pengaruh model penyambungan pada plat bodi mobil yang rentan terhadap korosi dan untuk mengetahui laju tingkat korosi yang terjadi pada plat bodi mobil apabila lapisan pelindung terkena regangan (benturan). Pengelasan maupun pelipatan plat dapat mengakibatkan tegangan sisa ini yang dapat memicu SCC (*Stress Corrosion Cracking*), selain itu faktor eksternal berupa benturan dapat juga menyebabkan terkelupasnya lapisan pelindung dan menambah tegangan sisa yang telah ada. Media korosi yang digunakan adalah air hujan dan air laut dimana kedua media ini dipilih karena mobil sering mendapatkan paparan dari media ini.

Mengingat besar efek deformasi plastis yang terjadi pada bahan struktur, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada bahan yang diaplikasikan pada lingkungan korosif terutama perilakunya terhadap korosi retak tegang (SCC). Korosi retak tegang (SCC) adalah peristiwa pembentukan dan perambatan retak dalam logam yang terjadi secara simultan antara tegangan tarik yang bekerja pada bahan tersebut dengan lingkungan korosif. Proses korosi retak tegang (SCC) dapat terjadi dalam beberapa menit jika berada pada lingkungan korosif atau beberapa tahun setelah pemakaiannya. Hal ini terjadi karena adanya serangan korosi terhadap bahan. Korosi yang retak tegang (SCC) merupakan kerusakan yang paling berbahaya, karena tidak ada tanda-tanda sebelumnya.

Tercatat beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian menyangkut korosi retak tegang, diantaranya; Badaruddin, dkk., (2005) yang menyimpulkan bahwa korosi intergranular terjadi pada baja karbon rendah dalam lingkungan air laut, kondisi tersebut terjadi pada pembebanan 70% di atas tegangan luluh bahan. Sedangkan Fritz, dkk. (2001), telah melakukan penelitian terhadap baja paduan 6% Mo (UNS NO8367), pada lingkungan air laut menggunakan temperatur yang berbeda dengan specimen uji Ubend. Hasil pengujian yang didapat menunjukkan bahwa pada temperatur di atas 1200°C, SCC terjadi hanya bergantung dari kandungan khloridanya, dengan bentuk perpatahan yang diketahui adalah transgranular yang bercabang. Kirk, dkk (2001), melakukan penelitian pada *stainless steel* fasa austenit. Kesimpulan yang dihasilkan menunjukkan bahwa ketahanan material ini terhadap korosi retak tegang yang terjadi sangat signifikan terhadap beban yang diberikan, dimana waktu proses pencelupan pada larutan 42% MgCl₂ pada temperatur 1450°C, dapat memperpanjang umur korosi retak tegang dari 33 jam menjadi 1000 jam pada pembebanan 70% dari tegangan luluh bahan, sedangkan pada beban 90% peningkatan yang terjadi tidaklah signifikan.

Mursid (1994) melakukan penelitian tentang pengaruh proses *press fanel roof* (salah satu bagian dari bodi kijang) di Toyota Astra Motor, yaitu melakukan pengepressan lembaran plat SPCD dengan merubah arah roll Ø 25; Ø 90 dan jari-jari bengkokan yang terbentuk adalah 0 mm; 15,6 mm; 22 mm; 27,8 mm; 38 mm. Didapatkan hasil bahwa pada arah roll Ø 25 kekuatan tarik, kekuatan luluh dan kekerasannya paling tinggi juga diikuti dengan meningkatnya laju korosi. Untuk jari-jari kelengkungan 27,8 mm; 38 mm didapatkan kekerasan dan kekuatan tarik yang tinggi dan laju korosinya rendah yaitu 0,0835 mpy.

Afolabi, dkk. (2007) menyimpulkan bahwa baja karbon menengah rentan terhadap SCC apabila terpapar soda api (*Caustic*) maupun media basa lainnya, sehingga keuletan baja karbon tersebut menurun. Baja nirkarat juga mengalami korosi yang tinggi bila me-

ngalami SCC khususnya pada media asam klorida, seperti yang diutarakan oleh Huang (2002), sehingga perlu dilakukan pemberian inhibitor untuk mengurangi laju korosi yang terjadi. Inhibitor akan mempengaruhi efek proses anodik yang terjadi. Yamane dkk. (2006) melakukan penelitian tentang korosi titik maupun korosi seragam terhadap baja yang dipres maupun ditekuk dalam lingkungan air laut, mendapatkan bahwa tegangan sisa pada baja tersebut memicu kenaikan laju korosi yang pada kedua permukaan baik yang mengalami tegangan tarik ataupun tekan.

Sambungan las, pada pemakaiannya akan selalu mendapat tegangan baik dari beratnya sendiri ataupun gaya-gaya luar yang bekerja. Suatu ciri retak korosi tegangan akibat gabungan tegangan tarik statik dan lingkungan biasanya terjadi secara mendadak tanpa adanya gejala awal serta tidak dapat diduga (Trethewey, dkk., 19-91)

Pada kebanyakan struktur *engineering*, titik paling lemah adalah kurangnya perhatian pada pengendalian korosi selama tahapan perancangan. Memang tidaklah ekonomis bila umur sebagian komponen pabrik mempunyai umur jauh lebih panjang dibanding umur pabrik secara keseluruhan. Memasang knalpot dari baja nirkarat mungkin tidak efektif dari segi biaya apabila umur knalpot itu akan jauh lebih panjang dibanding umur kendaraannya sendiri. Sebaliknya, kalau knalpot terbuat dari baja lunak yang hanya akan bertahan dua atau tiga tahun, hal ini menimbulkan korosi. Sehingga harus merancang struktur yang bias mengantisipasi hal tersebut.

Sesudah menetapkan umur yang diharapkan untuk sebuah komponen atau struktur, umur ini harus diperbandingkan dengan umur sistem pengendalian korosi yang akan digunakan. Jika umur sistem pengendalian lebih pendek dari umur struktur, maka metode pembaharuan harus sudah dipikirkan sejak tahapan perancangan, dan perancang harus merencanakan akses khusus yang akan diperlukan untuk pemeriksaan, perawatan, dan penggantian. Seandainya sistem pengendalian di suatu bagian struktur gagal karena sesuatu yang belum jelas se-

belum mencapai umur yang diharapkan untuk struktur keseluruhan.

Metode pelindungan logam terhadap serangan korosi adalah dengan pelapisan. Prinsip umum dari pelapisan yaitu melapiskan logam induk dengan suatu bahan atau material pelindung. Jenis-jenis pelapisan sebagai pelindung proses korosi dapat dibagi secara umum tiga bagian yaitu pelapisan organik, non organik dan logam.

Pelapisan logam dan non organik yaitu pelapisan dengan ketebalan tertentu material logam dan non organik dapat memberikan pembatas antara logam dan lingkungannya. Metode pelapisan dengan logam :

- *Electroplating* (Penyepuhan listrik): dengan cara komponen yang akan dilapis dan batangan atau pelat logam direndam dalam suatu larutan elektrolit yang mengandung garam-garam logam bahan penyepuh. Kemudian suatu potensial diberikan ke dalam sel sehingga komponen sebagai katoda dan batangan logam penyepuh menjadi anoda, ion-ion logam penyepuh dari larutan akan mengendap ke permukaan komponen sementara dari anoda ion-ion terlarut.
- *Hot dipping* (Pencelupan panas): dengan cara komponen dicelupkan ke dalam wadah besar berisi logam pelapis yang meleleh (dalam keadaan cair). Antara logam pelapis dan logam yang dilindungi terbentuk ikatan secara metalurgi yang baik karena terjadinya proses perpaduan antarmuka (*interface alloying*).
- *Flame spraying* (Penyemprotan dengan semburan api): Logam pelapis berbentuk kawat diumpankan pada bagian depan penyembur api dan meleleh kemudian segera dihembuskan dengan tekanan yang tinggi menjadi butiran-butiran halus. Butiran-butiran halus dengan kecepatan 100-150 m/s menjadi pipih saat menumbuk permukaan logam dan melekat.
- *Cladding*: Lapisan dari logam tahan korosi dilapiskan ke logam lain yang tidak mempunyai ketahanan korosi terhadap lingkungan kerja yang kurang baik namun dari segi sifat mekanik, dan fisik cukup baik.

- *Diffusion* (pelapisan difusi) : Teknik mendifusikan logam pelapis atau pelapis bukan logam ke dalam lapisan permukaan logam yang dilindungi dengan membentuk selapis logam paduan pada komponen

Pelapisan Organik yaitu pelapisan ini memberikan batasan-batasan antara material dasar dan lingkungan. Pelapisan organik antara lain cat, vernis, enamel dan selaput organik dan sebagainya.

Laju korosi dihitung menggunakan percobaan korosi dalam kurun waktu tertentu dimana diketahui perubahan berat suatu material akibat korosi, kemudian dihitung dengan persamaan berikut: (Fontana, 19-82):

$$MPY = \frac{534 W}{D A T} \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

W = kehilangan berat (mg)

D = berat jenis (gr/cm^3)

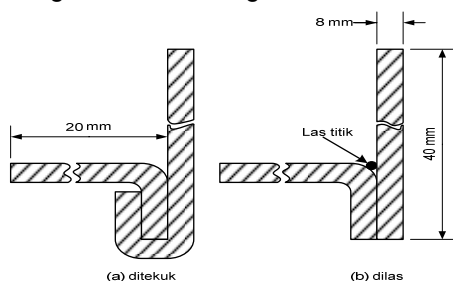
A = luas benda uji (cm^2)

T = Waktu (jam)

Laju korosi diekspresikan sebagai massa yang hilang persatuan luas, dimana dianggap merata dalam satuan luas tersebut. Laju korosi juga diekspresikan sebagai kedalaman penetrasi korosi ke dalam logam induk.

Bahan komponen yang banyak dipa-kai pada bodi kendaraan adalah plat baja karbon rendah dengan ketebalan 8 mm. Sampel dibentuk dalam bentuk dan ukuran tertentu. Sampel diolah menjadi beberapa spesimen dengan desain seperti pada gambar 1.

Model plat bodi mobil dirancang se-suai dengan keadaan sesungguhnya dengan desain sebagai berikut :



Gambar 1. Desain plat spesimen untuk a) sambungan ditekuk, b) sambungan dilas titik

Spesimen dibuat sebanyak 24 buah dengan perincian: kelompok I (12 buah) dicelupkan pada lingkungan air laut dan kelompok II (12 buah) dicelupkan pada lingkungan air hujan. Ukuran plat yang digunakan adalah tebal 8 mm dan memiliki lebar 20 mm. Proses pelipatan/penekukan, pengelasan, dan pengecatan serta pendempulan dilakukan di salah satu pabrik karoseri di Yogyakarta, dengan demikian mutu sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Lingkungan air merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi laju korosi, pada lingkungan air yang memiliki pH tinggi, laju korosi secara umum akan menjadi lebih cepat. Dengan asumsi bahwa jika laju korosi plat baja karbon rendah pada lingkungan air yang memiliki pH tinggi, maka laju korosi plat baja karbon rendah pada lingkungan air hujan, dan air laut diperkirakan juga tinggi. Pengkajian dilakukan pada suhu kamar, asumsi ini diambil berdasarkan pada kenyataan bahwa saat proses korosi pada plat mobil secara umum terjadi pada temperatur ruang.

Proses awal pengujian laju korosi dengan cara benda uji mula-mula ditimbang untuk mengetahui berat awalnya. Kemudian benda-benda uji kelompok I (12 buah) dicelupkan pada lingkungan air laut dan kelompok II (12 buah) dicelupkan pada lingkungan air hujan. Setelah 168 jam, benda-benda uji diangkat dan dibersihkan dari karat selanjutnya ditimbang dan penurunan berat yang terjadi dicatat, penimbangan ini dilakukan setiap 168 jam. Adapun langkah-langkah dalam pengujian korosi adalah sebagai berikut:

- Menyiapkan benda uji sebersih mungkin
- Menyiapkan peralatan yang akan digunakan dalam pengujian
- Memberi perlakuan pada masing-masing benda uji sesuai dengan rancangan penelitian yaitu tanpa pelindung, dan dipukul, dicat, dicat (dipukul), didempul dan cat, didempul dan dicat (dipukul)
- Benda uji dipukul untuk menyesuaikan dengan kondisi sebenarnya pada plat bodi mobil yang mengalami benturan.

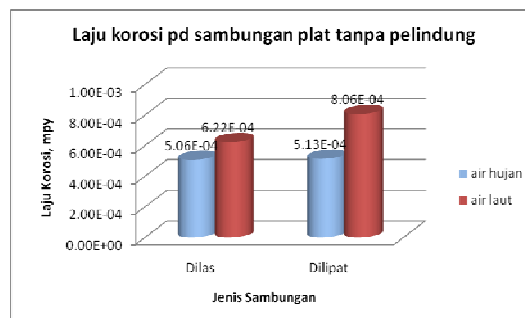
- Memberi pengkodean pada masing-masing benda uji.
- Penimbangan awal benda uji sebelum benda uji dicelup ke dalam fluida air hujan, dan air laut.
- Mencelupkan benda uji kedalam fluida yang digunakan dalam pengujian yaitu air hujan, dan air laut.
- Menimbang semua benda uji yang telah direndam selama 7 hari dan kelipatannya sebanyak 4 kali.
- Melakukan pencatatan setelah selesai penimbangan.

PEMBAHASAN

Pada gambar 2 terlihat benda uji tanpa lapisan pelindung setelah menjalani perlakuan pencelupan proses korosi. Model plat dengan las, laju korosi yang terjadi tidak menunjukkan perbedaan yang besar untuk media korosi air hujan dan air laut sedangkan untuk model plat dengan lipatan mengalami perbedaan yang cukup signifikan antara media air hujan maupun air laut. Air hujan adalah media korosi paling lambat dalam proses pengkorosian, terlihat untuk kedua macam sambungan mempunyai laju korosi sebesar kurang lebih 5.10^{-4} mpy atau lebih kecil dibandingkan dengan media air laut berkisar antara $6,22.10^{-4}$ mpy sampai $8,06.10^{-4}$ mpy untuk kedua jenis sambungan tersebut. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Yamane dkk. (2006) dimana korosi meningkat akibat terjadinya SCC pada plat baja yang dipres dan ditebuk pada lingkungan air laut.

Kemampuan suatu lingkungan dalam kondisi tertentu menjadi penyebab proses korosi dengan laju tertentu. Faktor-faktor yang mempengaruhi korosivitas lingkungan air adalah karakteristik fisik meliputi kecepatan aliran dan temperatur air, karakteristik kimia meliputi pH, konsentrasi karbon dioksida dan alkalinitas air, karakteristik biologi meliputi jumlah mikroorganisme aerob maupun anaerob dalam lingkungan air.

Laju kimia termasuk reaksi korosi akan semakin membesar dengan naiknya temperatur sehingga mendorong terjadinya reaksi oksidasi pada logam atau meningkatkan kemampuan lingkungan untuk mengoksidasi logam.

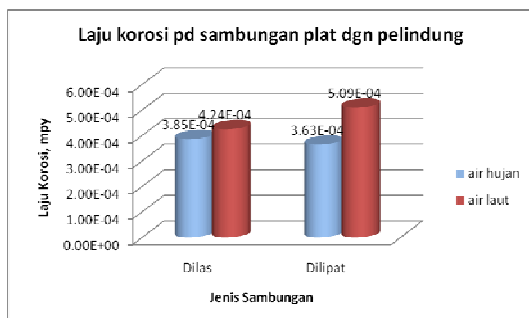


Gambar 2. Laju korosi pada sambungan plat tanpa lapisan pelindung (cat)

Dari gambar 2 juga memperlihatkan sambungan lipat mengalami korosi yang lebih cepat dibandingkan pengelasan. Faktor tegangan sisa pada proses pelipatan plat memicu terjadinya SCC, sehingga laju korosi meningkat.

Mengacu pada penelitian Suriadi (20-07), laju korosi semakin meningkat seiring dengan semakin meningkatnya derajat deformasi. Tanpa adanya perubahan plastis dari material sampai terjadi deformasi 20% dengan rata-rata laju korosi $0,0627 \text{ mm/th}$ ($3,984.10^{-4}$ mpy) pada media air laut. Dari perbedaan media pengkorosi maka terlihat bahwa media udara memberikan laju korosi lebih rendah dari air tawar dan begitu pula media air laut. Dari hasil perhitungan statistik menunjukkan bahwa temperatur pemanasan dan media pengkorosi memiliki interaksi yang nyata terhadap laju korosi AISI 3215. Laju korosi yang tertinggi yaitu rata-rata $0,0627 \text{ mm/th}$ ($3,984.10^{-4}$ mpy) pada media air laut dan laju korosi yang terendah pada hasil penelitian adalah $0,0333 \text{ mm/th}$ ($2,68.10^{-4}$ mpy) pada media udara. Bila dibandingkan hasil korosi pada sambungan plat, ternyata lebih tinggi laju korosinya lebih dua kali lipatnya terutama pada sambungan lipat. Hal ini menunjukkan perubahan deformasi plastis sambungan ini lebih tinggi dari 20%.

Untuk benda uji dengan lapisan pelindung, laju korosi menurun dibanding tanpa pelindung, baik untuk sambungan las maupun dilipat. Untuk media air hujan, turun hanya kisaran 3.10^{-4} mpy dan untuk air laut antara $4.10^{-4} - 5.10^{-4}$ mpy seperti terlihat pada Gambar 3.

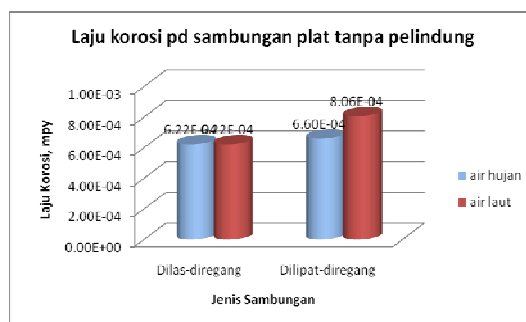


Gambar 3. Laju korosi pada sambungan plat dengan lapisan pelindung (cat)

Cacat-cacat (*holidays*) pada cat atau coating biasanya disebabkan karena terlewat oleh alat pelapis, *pinholes* (lobang) yang ditinggalkan oleh *solvent* yang menguap saat pengeringan cat, retakan akibat tegangan mekanik / thermal yang berlebihan, penetrasi akar tumbuhan, pelarut yang ada dalam tanah, kegiatan bakteri dalam tanah, kondisi lingkungan yang korosif (mis: lingkungan air laut), dsbnya. Cat biasanya terdiri dari cat dasar (primer) dan pelapisan (cat) lanjutan. Cat primer dipakai sebagai pengikat antara baja dan cat, sedangkan pelapisan selanjutnya dilakukan setelah (cat) primer kering. Namun dengan berkembangnya teknologi cat saat ini, cat primer telah ditambah dengan pelarut dan inhibitor pasivator, dan pelapisan selanjutnya tidak perlu menunggu primer kering (*curing time* dan *top coat* dilakukan bersama-sama).

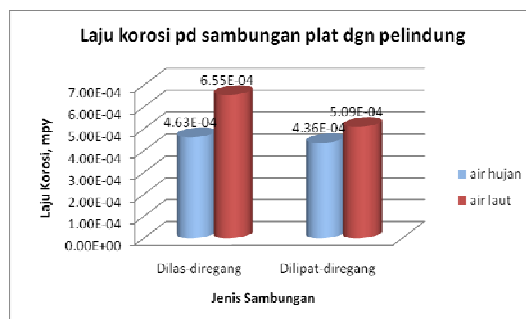
Untuk memenuhi syarat-syarat tersebut di atas maka di dalam cat terkandung zat-zat yang disebut *Binder* (pengikat), *Pig-ment* (bahan cat), *Extender / filler* (bahan pengisi), *Solvent* (pelarut), dan *Additives* (bahan penambah). *Additives* berfungsi meningkatkan kelenyutan, kelarutan, kecepatan pengeringan, kekerasan cat, mencegah oksidasi, pembentukan kulit di permukaan, dan sebagainya. Bila cat yang kita pakai dan kita beli telah memenuhi syarat tersebut di atas, hal terpenting yang harus diperhatikan adalah persiapan permukaan logam yang akan dicat. Karena tahap inilah yang menentukan hasil akhir pengecatan. Apakah cat tersebut tahan lama atau cepat terkelupas.

Dengan demikian dari Gambar 3, dapat dipastikan bahwa lapisan pelindung telah bekerja dengan baik pada spesimen ini. Kemudian pada pengujian berikutnya akan diperlihatkan pengaruh adanya tegangan yang diwakili dengan diberikan pres/pukulan ke spesimen. Diharapkan hal ini dapat memperlihatkan karakteristik sambungan tersebut apabila menerima beban yang menyebabkan pecahnya selaput pelindung.



Gambar 4. Laju korosi pada sambungan plat tanpa lapisan pelindung (cat) yang dikenai tegangan

Gambar 4 memperlihatkan, pengaruh perlakuan meningkatkan laju korosi khususnya dengan media air hujan, dari kisaran 5.10^{-4} mpy menjadi $6,2.10^{-4}$ mpy. Namun untuk media air laut tidak menunjukkan perubahan laju korosi, tetap di kisaran $6,2.10^{-4}$ sampai 8.10^{-4} mpy. Hal ini dirasa meragukan mengingat pemukulan pada bagian benda uji akan menyebabkan bertambahnya tegangan sisa yang seyogyanya memicu korosi lebih cepat.

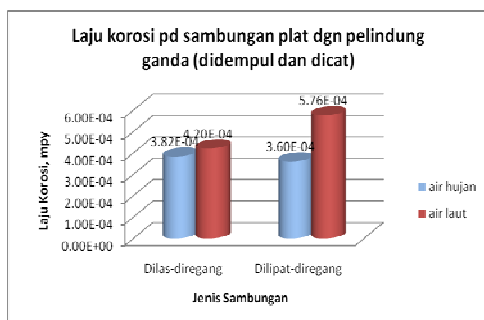


Gambar 5. Laju korosi pada sambungan plat dengan lapisan pelindung (cat) yang dikenai tegangan

Korosi yang berinteraksi dengan lingkungannya diantaranya adalah *stress Corrosion* yaitu korosi yang timbul sebagai akibat bekerjanya tegangan dan media korosif. Korosi ini menyebabkan terjadinya keretakan. Tegangan yang bekerja pada material logam adalah tegangan tekan yang merupakan tegangan sisa.

Pada spesimen dengan lapisan pelindung juga mengalami peningkatan laju ko-rosi setelah mengalami perlakuan tegangan. Terlihat pada gambar 5, spesimen mengalami kenaikan antara 1.10^{-4} sampai 2.10^{-4} mpy, khusus untuk model plat yang dilas mengalami kenaikan laju korosi yang tinggi. Bila dicermati lebih dalam pada bagian las titik, cat mengalami keretakan sewaktu menerima tegangan, sehingga korosi banyak terjadi di daerah ini. Sedang pada model plat dilipat hampir tidak terjadi keretakan pada catnya.

Sedangkan gambar 6 memperlihatkan laju korosi pada sambungan plat dengan pelindung ganda yaitu dilakukan pelapisan dempul kemudian baru dilakukan pengecatan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dempul sebagai lapisan awal pada pelapisan pelindung mobil yang biasa digunakan pada pabrik karoseri mobil.



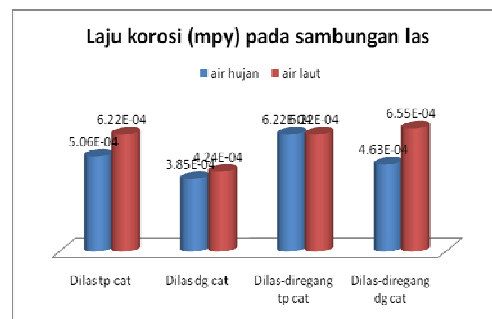
Gambar 6. Laju korosi pada sambungan plat dengan lapisan pelindung ganda (cat dan dempul) yang dikenai tegangan

Pada spesimen model plat yang dilas menunjukkan kemajuan dengan pemberian dempul, lapisan pelindung lebih bertahan ketika diberi tegangan dibandingkan hanya diberi cat saja. Dari pengamatan pada bagian las titik tidak ditemukan suatu retakan-retakan halus

sehingga laju korosi menurun dibandingkan pada gambar 5. Hampir semua keseluruhan spesimen mengalami penurunan laju korosi berkisar 1.10^{-4} mpy. Pemberian lapisan awal berguna untuk menahan terjadinya benturan yang dapat menyebabkan mengelupasnya lapisan pelindung.

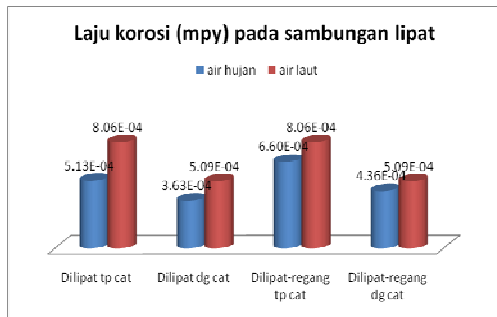
Untuk baja, pemanasan di atas suhu kamar meningkatkan laju korosi, tetapi juga mengurangi kelarutan oksigen (Jones, 19-92). Sebuah system yang tertutup, laju korosi terus bertambah meskipun di atas suhu 80°C karena walaupun kelarutannya berkurang tetapi oksigen tidak dapat keluar dari system.

Pada proses penyambungan dengan las mengakibatkan pemanasan pada logam. Daerah berwarna hitam akibat pemanasan las dapat menyebabkan masalah korosi (Avery, dkk., 1999). Daerah tersebut adalah HAZ yang banyak mengandung kerak kromium bercampur dengan besi, nikel dan oksida-oksida lainnya. Kromium ini berdifusi keluar dari *base metal* ketika kerak hitam tersebut terbentuk.



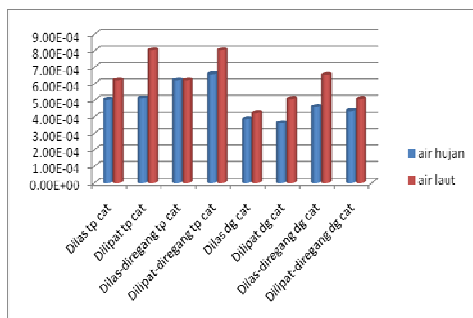
Gambar 7. Laju korosi pada sambungan las

Gambar 7 memperlihatkan laju korosi pada sambungan las. Secara umum media air laut lebih korosif, namun tidak signifikan hasilnya. Penggunaan cat menunjukkan pengurangan korosi, namun adanya retak pada lapisan pelindung justru meningkatkan laju korosi mencapai $0,000655$ mpy. Konsentrasi air laut pada retakan cat menyebabkan meningkatnya laju korosi, dalam hal ini terjadi korosi sumuran pada beberapa tempat namun secara umum korosi merata lebih dominan.



Gambar 8. Laju korosi pada sambungan lipat

Laju korosi pada sambungan lipat lebih tinggi dibandingkan dengan laju korosi pada sambungan las. Gambar 8 memperlihatkan laju korosi pada sambungan lipat dimana media korosi air laut lebih dominan dibandingkan media air hujan. Laju korosi terjadi tertinggi sebesar 0,000806 mpy terjadi untuk sambungan lipat tanpa cat baik yang diregang maupun tidak. Akibat pengerjaan dingin suatu benda akan mengalami deformasi, dimana akan timbul *stress cell*. *Stress cell* terjadi karena ada bagian yang mengalami tegangan yang berbeda dengan bagian lainnya. Bagian yang mengalami tegangan yang lebih besar akan menjadi anoda dan akan terkorosi lebih hebat. Seperti contoh batang logam yang ditekek, korosi lebih cepat terjadi pada daerah tekukannya karena telah mengalami deformasi berupa tegangan.



Gambar 9. Laju korosi sambungan plat dengan dan tanpa cat

Gambar 9 menunjukkan perbandingan laju korosi pada semua jenis sambungan dan perlakuannya. Terlihat media air laut cukup signifikan meningkatkan laju korosi. Pemberian lapisan cat cukup efektif menurunkan laju korosi

namun perlu diingat apabila terjadi retakan pada pelindungnya, dapat menjadi subur terjadinya korosi sumuran yang menyebabkan penetrasi korosi lebih dalam.

Secara umum korosi yang terjadi adalah korosi merata, terjadi disekitar lipatan dan daerah lasan. Korosi merata adalah jenis korosi dimana pada korosi tipe ini laju korosi yang terjadi pada seluruh permukaan logam atau paduan yang terpapar atau terbuka ke lingkungan berlangsung dengan laju yang hampir sama. Hampir seluruh permukaan logam menampakkan terjadinya proses korosi.

Korosi merata terjadi karena proses anodik dan katodik yang berlangsung pada permukaan logam terdistribusi secara merata. Ini terjadi karena adanya pengaruh dari lingkungan sehingga kontak yang berlangsung mengakibatkan seluruh permukaan logam terkorosi. Korosi seperti ini umumnya dapat ditemukan pada baja di atmosfer dan pada logam atau paduan yang aktif terkorosi (potensi korosinya berada pada daerah kestabilan ionnya dalam diagram potensial pH, Fontana, 1987). Kerusakan material oleh diakibatkan oleh korosi merata umumnya dinyatakan dengan laju penetrasi yang ditunjukkan tabel sebagai berikut :

Tabel 1. Tingkat ketahanan relatif korosi terhadap laju penetrasi

Ketahanan Relatif Korosi	mpy	mm/yr	µm/yr	nm/h
Outstanding	< 1	< 0.02	< 25	< 2
Excellent	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10
Good	5-20	0.1-0.5	100-500	10-150
Fair	20-50	0.5-1	500-1000	50-150
Poor	50-200	1-5	1000-5000	150-500
Unacceptable	200+	5+	5000+	500+

(Jones, 1992)

Dari Tabel 1 tersebut dapat diukur ketahanan relatif korosi untuk sambungan plat yang tidak melebihi dari 1 mpy. Berarti sambungan plat tersebut masih termasuk dalam kategori *Outstanding* yaitu tahan terhadap korosi.

KESIMPULAN

Model sambungan plat dilipat mempunyai laju korosi yang lebih tinggi dibandingkan dengan sambungan las titik. Korosi terjadi pada tekukan dengan

perlakuan pengerjaan dingin pada benda uji yaitu mendapat perlakuan *bending* sebesar 180° ini menyebabkan terjadinya keretakan. Selain itu pada proses penyambungan terjadi pemanasan pada logam yang dapat menyebabkan efek korosi yang semakin cepat. Temperatur pemanasan dan media pengkorosi memiliki interaksi yang nyata terhadap laju korosi. Hal ini ditunjukkan pada nilai laju korosi pada benda uji yang tidak mendapat perlakuan tanpa cat cukup tinggi mencapai 0,0008 mpy.

Penggunaan cat cukup efektif menurunkan laju korosi berkisar 20%. Namun perlu diingat apabila terdapat keretakan pada lapisan pelindung maka akan rentan terhadap korosi jenis konsentrasi (setempat) yang biasanya mempunyai penetrasi lebih dalam.

Secara umum, ketahanan korosi sambungan ini masuk dalam kategori *Out-standing* yang berarti tahan korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afolabi, A.S., and Borode, J.O., 2007, Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Medium Carbon Steel in Caustic and Potash Media, *AU J.T.* 10(3):165-170 (Jan. 2007)
- Avery, SE., Lamb, S., Powell, CA., Tuthill, AH., 1999, Stainless Steel for Portable Water Treatment Plants, http://www.stainlesswater.org/index.cfm/ci_id/11841.htm
- Badaruddin M, dan Sugiyanto, 2005, Efek Shot Peening Terhadap Korosi Retak Tegang (Scc) Baja Karbon Rendah Yang Di Milling Dan Tempering Dalam Lingkungan Air Laut, *Jurnal Teknik Mesin Univ. Kristen Petra Surabaya*, 11-14.
- Fontana, M. G., 1987, *Corrosion Engineering*, 3rd edition, McGraw-Hill Inc., Si-ngapore.
- Fritz, D.J., Ronald. J. Gerlock, 2001, J. Desalination, 13/5, 93-97.
- Huang, Y., 2002, *Stress Corrosion Cracking Of AISI 321 Stainless Steel In Acidic Chloride Solution*, Bull. Mater. Sci., Vol. 25, No. 1, February 2002.
- Jones, DA., 1992, *Principles and Prevention of Corrosion*, Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- Kalpakjian, S., 2001, *Manufacturing Engineering and Technology*. Prentice-hall, inc, New Jersey
- Kirk, D. Render, PE., 2001, Effects of Peening on Stress Corrosion Cracking in Carbon Steel, *International Conference Of Shot Peening 7th*, Institute Precision Mechanics Warsaw Poland, 142-147.
- Mursid, M., 1994, *Pengaruh Arah Roll Dan Jari-jari Kelengkungan Pada Proses Press (Bodi Kijang) Terhadap Sifat Mekanis Dan Laju Korosi*, Skripsi S1, Jurusan Ilmu Bahan, Universitas Indonesia (tidak dipublikasikan).
- Suriadi, I.G.A.K. dan Suarsana, I.K., 2007, Prediksi Laju Korosi dengan Perubahan Besar Derajat Deformasi Plastis dan Media Pengkorosi pada Material Baja Karbon. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Cakram Vol 1 No. 1 Desember 2007 hal. 1-8*.
- Threthewey, KR., dan Chamberlain., J., 1991, *Korosi Untuk Mahasiswa dan Rekayasawan*, Penerjemah Alex Tri kantjono Widodo, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Yamane, M., Tanaka, K., Matsuda, B., Fuji-kubo, M., Yanagihara, D., and Iwao, N., 2006, Residual Strength Evaluation of Corroded Steel Members in Marine Environments, *Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore and Polar Engineering Conference San Francisco, California, USA, May 28-June 2, 2006*, ISBN 1-880653-66-4.

ANALISIS PENGENDALIAN KUALITAS DAN EFEKTIVITAS DENGAN INTEGRASI KONSEP *FAILURE MODE & EFFECT ANALYSIS* DAN *FAULT TREE ANALYSIS* SERTA *OVERALL EQUIPMENT EFFECTIVENESS*

Joko Susetyo¹

¹Jurusan Teknik Industri, IST AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 8 Februari 2009 , revisi masuk: 10 Juni 2009, diterima: 15 Juli 2009

ABSTRACT

Effective measurement with Overall Equipment Effectiveness (OEE) method and concept of Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Fault Tree Analysis (FTA) is hoped able to increase production volume and quality. OEE method is based on three factors, they are: availability, performance and quality. OEE value is got by multiplying the three factors. FMEA concept is carried out to decide the critical rating, evidence, and deflection rating. RPN calculation is the result of those three rating multiplication shows the risk level of a failure. FTA concept is carried out by using OR gate to know the probability of failure evidence. The analysis that is got show OEE value of Paper Machine in two year: first year 60%, increase to 83% in the second year. Cutter Asahi's OEE value, in the first year, is 67%, in the second year become 73%. The first cause of low OEE is PLN drop power energy. The FMEA result identification is got highest RPN value that is 245 at Paper Machine process, with failure mode dirty, the main cause is dirt that dissolved in its production process and the screen that does not work maximally. To handle that cause needs a routine checking and cleaning in the process and screen by Paper Machine operator. Identification result of FTA indicates that highest failure probability on Paper Machine part is 0.01145.

Keywords: Quality Control, Effectivity, OEE, FMEA, FTA.

INTISARI

Pengukuran efektivitas dengan metode *Overall Equipment Effectiveness (OEE)* dan konsep *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* serta *Fault Tree Analysis (FTA)* diharapkan mampu meningkatkan volume produksi dan meningkatkan kualitas produk yang dihasilkan. Metode OEE didasarkan pada tiga faktor yaitu: *availability*, *performance* dan *quality*. Nilai OEE didapatkan dengan mengalikan ketiga faktor. Konsep FMEA dilakukan penentuan rating keparahan, kejadian serta rating deteksi. Perhitungan RPN yang merupakan hasil kali dari ketiga rating tersebut menunjukkan tingkat resiko suatu kegagalan. Konsep FTA dilakukan dengan menggunakan Gerbang OR untuk mengetahui probabilitas kejadian kegagalan. Dari analisis diperoleh nilai OEE *Paper Machine* dua tahunan : tahun pertama sebesar 60%,naik menjadi 83% pada tahun kedua. *Cutter Asahi* tahun pertama nilai OEE sebesar 67%, tahun kedua naik 73%. Penyebab utama dari OEE yang rendah adalah *drop power energy* PLN. Hasil identifikasi FMEA diperoleh nilai RPN tertinggi yaitu 245 pada proses *Paper Machine*, dengan mode kegagalan yaitu *dirty*, dengan penyebab utama kotoran terlarut dalam proses produksinya serta *screen* tidak berfungsi maksimal. Untuk mengatasi penyebab tersebut perlu dilakukan pengecekan dan pembersihan secara rutin jalannya proses dan *screen* oleh operator *Paper Machine*. Hasil identifikasi FTA mengindikasikan bahwa probabilitas kegagalan tertinggi pada bagian *Paper Machine* yaitu 0,01145.

Kata Kunci: Pengendalian Kualitas, Efektifitas, OEE, FMEA, FTA.

PENDAHULUAN

Efektivitas suatu sistem produksi berpengaruh terhadap keuntungan yang

akan diperoleh perusahaan. Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur dan memaksimalkan efektivitas

¹jokos@akprind.ac.id

adalah dengan *Overall Equipment Effectiveness* (OEE). OEE bertujuan untuk meningkatkan efektifitas peralatan lini produksi sehingga tercapai volume lebih besar dengan hasil yang baik sehingga biaya produksi yang dikeluarkan lebih rendah. Metode ini dipilih karena perhitungannya didasarkan tidak hanya pada faktor ketersediaan (*Availability*) tetapi juga faktor unjuk kerja (*Performance Efficiency*) dan kualitas (*Quality Rate*) (Hansen, 2001). Penelitian ini dilakukan dengan tujuan menganalisis efektivitas proses produksi, menentukan jumlah *defect*, mengidentifikasi dan menganalisis mode kegagalan dan pengaruhnya serta menentukan probabilitas terjadinya kegagalan. Ada beberapa tindakan yang dapat direkomendasikan untuk mengeliminasi atau meminimalkan munculnya kegagalan fungsional. Tindakan pencegahan terhadap kegagalan memerlukan analisis kegagalan yang akan terjadi. Untuk tindakan pencegahan ini, analisis kegagalan dapat dilakukan dengan menggunakan suatu konsep yaitu *Failure Mode & Effect Analysis* (FMEA) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) sehingga dengan mengetahui penyebab kecacatan ini maka dapat dilaksanakan penanggulangan sehingga dapat mengurangi tingkat kecacatan produk. Mesin-mesin yang digunakan oleh perusahaan untuk proses produksi jumlahnya relatif banyak. Sementara mesin-mesin tersebut dalam proses produksinya belum mampu menghasilkan *zero defect*. Sehingga dalam penelitian ini akan difokuskan pada *Paper Machine* dan mesin *Cutter Asahi* karena mesin tersebut mempunyai efek paling besar dalam proses produksinya.

OEE merupakan pengukuran efektivitas peralatan secara keseluruhan untuk mengevaluasi seberapa capaian performansi dan *reliability* peralatan (umumnya mesin). OEE merupakan indikator performansi produktivitas yang didasarkan pada level tertentu dari performansi yang diharapkan. Besarnya kesempatan untuk memperbaiki produktivitas yang diidentifikasi dengan menggunakan OEE tergantung pada langkah yang tepat yang diambil oleh perusahaan. Dengan OEE dapat diketahui dan di-

ukur penyebab melemahnya kinerja peralatan.

Ada tiga indikator dasar *performansi* dan *reliabilitas* peralatan, (Gaspersz, 2007) :

- *Availability*, merupakan perbandingan antara *loading time* dengan *actual processed time* ($loading\ time = actual\ processed\ time - down\ time\ loss$). Dihitung sebagai perbandingan antara *loading time* dengan *actual processed time*. 100 % *availability* berarti proses berlangsung terus menerus tanpa adanya catatan penghentian.
- *Performance Efficiency*, merupakan perbandingan antara *ideal cycle time* dengan *actual cycle time* ($ideal\ run\ time = ideal\ cycle\ time$ dikalikan dengan *processed amount*). Dihitung sebagai perbandingan antara *ideal run time* dengan *actual run time* 100 % *performance* berarti proses secara konsisten telah bekerja sesuai dengan kecepatan maksimum teoritisnya.
- *Rate of Quality Output*, merupakan perbandingan antara *good finished* dengan total *processed amount* ($good\ finished = total\ processed\ amount - quality\ loss$). Dihitung sebagai perbandingan antara *good pieces* dengan *total pieces*. 100 % *quality* berarti tidak ada produk yang *direject* maupun *rework*.
- *OEE*, merupakan hasil perkalian antara *availability*, *performance* dan *quality rate*.

Menurut Hansen (2001) dalam *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) dapat dikategorikan menjadi :

- < 65 % , tidak dapat diterima.
- 65 – 75 % , cukup baik hanya jika ada kecenderungan adanya peningkatan tiap kuartalnya.
- 75 – 85 % , sangat bagus lanjutkan hingga *world – class level* (> 85 % untuk *batch type process* dan > 90 % untuk *continuous discrate process*)

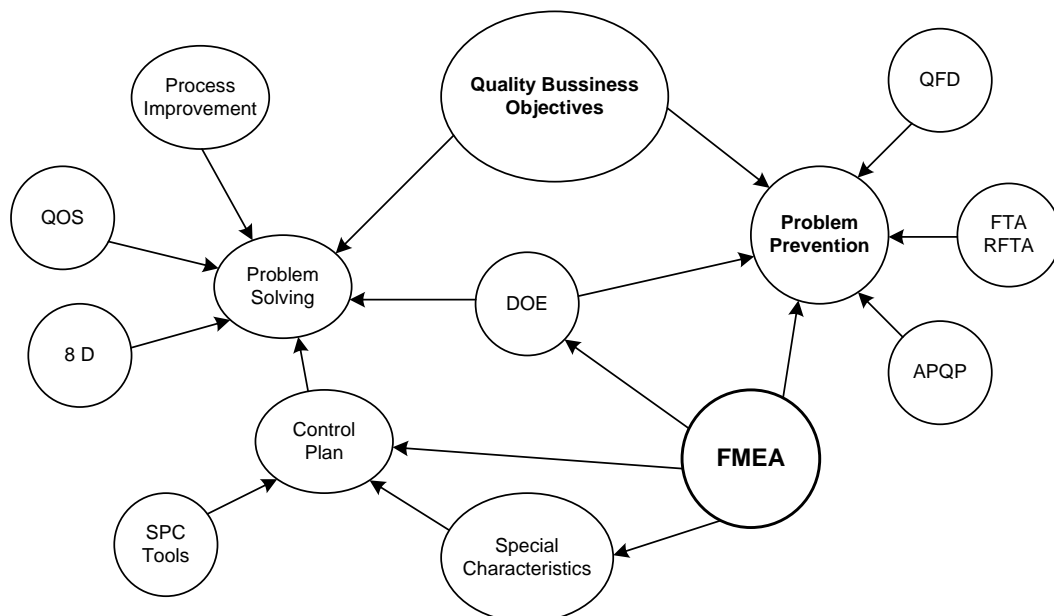
Nilai OEE dari setiap perusahaan dikatakan memenuhi standar *World Class* apabila sudah sesuai dengan kriteria berikut: 90 % *Availability*, 95 % *Performance*, 99,9% *Quality*, 85% OEE. (Vorne, 2003)

FMEA digunakan sebagai teknik evaluasi tingkat kehandalan untuk menentukan efek dari kegagalan sistem dan peralatan. Kegagalan digolongkan berdasarkan dampaknya pada kesuksesan suatu misi dan keselamatan anggota atau peralatan. Konsep *FMEA* ini berubah ketika diterapkan pada kondisi manufaktur modern yang memproduksi produk-produk konsumsi. Pada produsen dari produk-produk konsumsi tersebut kemudian menetapkan beberapa prioritas baru termasuk kepuasan dan keselamatan konsumen (Haviland, 1998).

Secara umum, *Failure Mode & Effect Analysis* (FMEA) didefinisikan sebagai sebuah teknik yang mengidentifikasi tiga hal (Haviland, 1998) yaitu:

- Penyebab kegagalan yang potensial dari proses atau produk selama siklus hidupnya.
- Efek dari kegagalan tersebut.
- Tingkat kekritisan efek kegagalan terhadap fungsi proses atau produk.

Peranan metode FMEA dalam sistem pengendalian kualitas terhadap produk yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 1 berikut :



Gambar 1. Peranan FMEA dalam sistem kualitas (Haviland, 1998)

FMEA merupakan *tool* dalam menganalisis kehandalan (*reliability*) dan penyebab kegagalan untuk mencapai persyaratan kehandalan dan keamanan produk dengan memberikan informasi dasar mengenai prediksi kehandalan, desain produk, dan desain proses. Dalam FMEA terdapat beberapa hal yang berpengaruh antara lain:

Rating keparahan (*severity*) adalah rating yang berhubungan dengan tingkat keparahan efek yang ditimbulkan oleh mode kegagalan. Efek dirating pada skala satu sampai sepuluh, dengan sepuluh sebagai tingkat yang paling parah.

Sumber *fundamental* dari kegagalan menyangkut berbagai aspek dari

desain, pemilihan material, kekurangan atau kelemahan material, fabrikasi dan pemrosesan, pengerjaan ulang, perakitan, inspeksi, uji coba atau *testing*, pengendalian kualitas (*quality control*), penyimpanan dan pengiriman, kondisi kerja, pemeliharaan dan penyimpanan yang tidak diduga akibat kelebihan beban atau kerusakan mekanis atau kimia dalam kerja. Terkadang pula, lebih dari satu sumber tersebut memberikan kontribusi terhadap terjadinya kegagalan (Ford Motor Company, 1992).

Rating kejadian (*occurrence*) adalah rating yang berhubungan dengan *estimasi* jumlah kegagalan *kumulatif* yang muncul akibat suatu penyebab ter-

tentu pada elemen dengan jumlah yang ditentukan yang diproduksi dengan metode pengendalian yang digunakan saat ini. Rating kejadian ini diestimasi dengan jumlah kegagalan kumulatif yang muncul pada setiap 1000 komponen atau CNF (*Cumulative Number of Failure*) /1000. CNF/1000 dapat diestimasi dari sejarah tingkat kegagalan proses manufaktur dan perakitan pada komponen yang mirip atau yang dapat mewakili jika estimasi dari kegagalan dari komponen yang dimaksud tidak dapat ditentukan.

Rating deteksi (*detection*) tergantung pada metode pengendalian yang digunakan saat ini. Rating deteksi adalah ukuran kemampuan metode pengendalian tipe (2) untuk mendeteksi penyebab atau mekanisme kegagalan atau kemampuan metode pengendalian tipe (3) untuk mendeteksi mode kegagalan. Satu nilai deteksi diberikan pada sistem pengendalian yang digunakan saat ini yang memiliki kemampuan untuk mendeteksi penyebab atau mode kegagalan. Metode pengendalian dapat dikelompokkan dan dipandang sebagai sebuah sistem jika beroperasi secara independen.

Fault Tree Analysis merupakan metodologi analisis yang menggunakan model grafis untuk menunjukkan analisis proses secara visual. FTA memungkinkan untuk mengidentifikasi kejadian gagal berdasarkan penilaian probabilitas kegagalan (Dewi, 2005).

Menurut Clemens, (1993) *Fault Tree Analysis* adalah sebuah model grafik dari cabang dalam sistem yang dapat menuntun kepada suatu kemungkinan terjadinya kegagalan yang tidak diinginkan. Cabang-cabang tersebut menghubungkan antara keadaan-keadaan dan kejadian-kejadian pendukung menggunakan simbol-simbol logis standar.

PEMBAHASAN

Untuk perhitungan OEE, jenis mesin yang dianalisis yaitu *Paper Machine* dan mesin *Cutter Asahi* yang dalam proses pembuatan kertas bagian mesin ini menjadi salah satu unsur terpenting dalam produksi serta masih menghasilkan *defect* produk. Data ini meliputi jumlah produksi, waktu operasi aktual, *idle* ti-

me, *defect* produk, *theoretical cycle time* untuk kedua mesin.

Setelah seluruh data seperti jumlah produksi, waktu operasi aktual, *idle time*, *non conform product*, *theoretical cycle time* untuk kedua mesin didapat, kemudian dihitung tingkat efektivitasnya. Untuk perhitungan data maka diambil contoh pada bulan Januari tahun 2006 pada *Paper Machine*.

Perhitungan *Availability*, *Performance*, *Quality Rate* dan OEE adalah sebagai berikut :

$$Availability = \frac{loading\ time - idle\ time}{loading\ time} \times 100\%$$

$$= \frac{557,10 - 186,90}{557,10} \times 100 = 66\%$$

$$Performance = \frac{Theoretical\ cycle\ time}{run\ time} \times 100\%$$

$$= \frac{1}{\frac{15}{557,10}} \times 100 = 80\%$$

$$Rate\ of\ Quality = \frac{Goods\ units}{Total\ units} \times 100\%$$

$$= \frac{6650,25 - 119,65}{6650,25} \times 100 = 98\%$$

$$OEE = Availability \times Performance \times Quality\ rate$$

$$= 66\% \times 80\% \times 98\% = 52\%$$

Secara keseluruhan hasil perhitungan pada bulan Januari sampai Desember tahun 2006 dapat dilihat pada tabel 1 dan untuk tahun 2007 pada tabel 2 berikut:

Tabel 1. Nilai OEE *Paper Machine*

Bulan	Availability (%)	Performance (%)	Rate of Quality (%)	OEE (%)
Januari	66	80	98	52
Februari	60	85	98	50
Maret	73	92	98	66
April	74	88	99	64
Mei	73	87	98	62
Juni	61	94	96	55
Juli	66	92	96	58
Agustus	74	89	98	65
September	73	87	97	62
Oktober	68	90	97	59
November	74	90	99	66
Desember	64	96	97	60
Rata-rata	69	89	98	60

Sumber : Data Perhitungan

Tabel 2. Nilai OEE *Paper Machine* tahun 2007

Bulan	Avail abilit y (%)	Perfor mance (%)	Rate of Quality (%)	OEE (%)
Januari	87	90	98	77
Februari	84	93	98	77
Maret	90	91	94	81
April	93	92	99	85
Mei	92	95	98	86
Juni	83	100	97	81
Juli	87	95	99	82
Agustus	92	95	99	87
September	92	94	99	86
Oktober	88	97	99	84
November	93	97	99	89
Desember	85	91	99	77
Rata – rata	89	94	98	83

Sumber : Data Perhitungan

Perhitungan yang sama dilakukan pada bulan Januari sampai Desember tahun 2007 untuk *Paper Machine*, *mesin Cutter Asahi tahun 2006 dan 2007*. Secara keseluruhan hasil pengolahan data dapat dilihat pada tabel 3 dan 4 di bawah ini:

Tabel 3. Nilai OEE *Mesin Cutter Asahi* tahun 2006

Bulan	Avail abilit y (%)	Perfor mance (%)	Rate of Quality (%)	OEE (%)
Februari	59	93	96	53
Maret	73	100	97	71
April	75	100	98	74
Mei	80	99	95	75
Juni	79	100	98	77
Juli	74	100	96	71
Agustus	77	100	98	75
September	79	100	98	77
Oktober	75	100	98	73
November	59	100	97	57
Desember	64	100	96	61
Rata-rata	72	97	96	67

Sumber : Data Perhitungan

Setelah diidentifikasi seluruh mode kegagalan, efek serta penyebabnya, maka langkah berikutnya menetapkan rating *severity*, *occurrence* dan *detection*. Contoh penetapan rating *severity*, *occurrence*, dan *detection* untuk deskripsi proses *Stock Preparation* dengan mode kegagalan *tensile strength*, penyebab kegagalan *over standard* di *mixing chest* dan *freeness* terlalu tinggi dan dengan metode deteksi yang digunakan mengecek *ash content* di *Paper Machine*.

Tabel 4. Nilai OEE *Mesin Cutter Asahi* tahun 2007

Bulan	Avail abilit y (%)	Perfor mance (%)	Rate of Quality (%)	OEE (%)
Januari	71	93	96	63
Februari	65	100	98	64
Maret	77	100	98	75
April	82	100	99	81
Mei	83	87	94	68
Juni	84	100	99	83
Juli	69	100	94	65
Agustus	82	100	98	80
September	83	100	97	81
Oktober	81	100	98	79
November	65	100	98	64
Desember	76	100	97	74
Rata – rata	77	99	98	73

Sumber : Data Perhitungan

Langkah – langkahnya sebagai berikut :

- Diskripsi proses *Stock Preparation* karena dinilai mempunyai efek yang besar pada proses dan hasil output sangat terpengaruh tetapi masih aman maka diberi rating 7 untuk tingkatan keparahannya / *severity*.
- Mode kegagalan *tensile strength* dengan penyebab kegagalan *over standard* di *mixing chest* dan *freeness* terlalu tinggi karena tingkat kejadiannya agak tinggi dan untuk terjadinya kejadian kegagalan agak tinggi maka diberi rating 7 untuk tingkat kejadiannya/*occurrence*.
- Penyebab kegagalan *over standard* di *mixing chest* dan *freeness* terlalu tinggi dengan metode deteksi cek *ash content* di *paper machine* pada hasil output karena dianggap metode deteksinya mempunyai kemungkinan cukup tinggi untuk mendeteksi penyebab kegagalan maka diberi rating 4 untuk tingkat deteksinya.
- Setelah didapat nilai rating *Severity*, *Occurrence*, *Detection* maka dihitung nilai RPNnya menurut rumus:

$$RPN = 7 \times 7 \times 4 = 196$$

Selanjutnya data lebih lengkap dapat dilihat pada tabel 5.

Data kecacatan cetakan dapat memberikan informasi tentang faktor-faktor yang menjadi penyebab dari kecacatan cetakan yang terjadi. Adapun data kecacatan dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 5. Rekapitulasi RPN :

Diskripsi Proses	Mode Kegagalan	Penyebab Kegagalan	Metode Deteksi	RPN
1. Stock Preparation	Tensile Strength	- Over Standard di <i>Mixing Chest (Over Standart)</i> - <i>Freeness</i> terlalu rendah (Under Standart).	- Cek Ash Content di PaperMachine	196
	Water Resistance	- <i>Cationic Starch (Under Standart)</i> .	- Quality Control	180
2. Paper Machine	Shade Variation	- Perbedaan <i>file</i> dan <i>wire</i> pada produk kertasnya.	- Quality Control	240
	Water Drop	- Masuknya air pada jalannya proses.	- Operator Paper Machine.	180
	Calender Mark	- Tekanan Calender tidak sesuai. - Inconsistensi Calender.	- Operator Paper Machine	120
	Dirty	- Kotoran terlarut dalam proses produksi - <i>Screen</i> tidak berfungsi maksimal	- Operator paper machine	245
	Size Press	- Tekanan steam yang tidak merata dalam <i>Dryer</i> .	- Operator paper machine	108
	Concave	- Masuknya angin dalam rol akibat <i>rolling</i> kurang sempurna.	- Operator paper machine	63
3. Finishing	Off Cuts	- Pisau tumpul. - Pisau naik pada proses rewinding	- Operator Cutter	180
	Size Variation	- Bawaan dari <i>Paper Machine</i> . - Salah pengaturan ukuran	- Operator Cutter	240
	Wrinkle	- Pisau kurang tepat dalam memotong - Line produk tidak sesuai	- Operator Cutter	245

Sumber : Data Perhitungan

Dari data kecacatan produk tersebut, dapat diperkirakan probabilitas setiap kecacatan yang terjadi. Probabilitas dihitung dengan menggunakan persamaan jumlah cacat dibagi dengan jumlah produksi.

Diketahui bahwa jumlah produk dari tahun 2006 sampai 2007 adalah sebanyak 273.981,57. Sebagai contoh, penentuan perkiraan nilai probabilitas untuk jenis cacat *tensile strength* sebanyak 449,73 yaitu :

$$P = \frac{449,73}{273.981,57} = 0,00164$$

Untuk hasil perhitungan perkiraan nilai probabilitas yang lain dapat dilihat pada tabel 7 berikut :

Untuk setiap jenis kecacatan, diidentifikasi *basic event* dan gerbang *logic* yang dikaitkan dengan kontribusinya pa-

da kejadian cacat *tensile strength*. Berdasarkan identifikasi ini bisa disusun *fault tree* untuk kecacatan produk.

Tabel 6. Kumulatif Kecacatan Produk

Jenis Cacat	Jumlah Cacat Tahun 2006 (ton)	Jumlah Cacat Tahun 2007 (ton)	Total (ton)
- <i>Tensile Strength</i>	250,98	198,75	449,73
- <i>Water Resistance</i>	198,01	105,63	303,64
- <i>Shade Variation</i>	305,25	206,11	511,36
- <i>Water Drop</i>	150,45	145,25	295,70
- <i>Calender Mark</i>	268,09	175,45	443,54
- <i>Dirty</i>	425,35	287,03	712,38
- <i>Size Press</i>	275,75	225,50	501,25
- <i>Concave</i>	270,86	305,15	576,01
- <i>Off Cuts</i>	550,25	415,65	965,90
- <i>Size Variation</i>	169,74	221,84	391,58
- <i>Wrinkle</i>	389,65	298,35	688,00

Sumber : Data Perhitungan

Tabel 7. Hasil Perhitungan Perkiraan Nilai Probabilitas Kecacatan

Jenis Cacat	Jumlah Cacat (Ton)	Probabilitas (P)
- Tensile Strength	449,73	0,00164
- Water Resistance	303,64	0,00111
- Shade Variation	511,36	0,00187
- Water Drop	295,70	0,00108
- Calender Mark	443,54	0,00162
- Dirty	712,38	0,00260
- Size Press	501,25	0,00183
- Concave	576,01	0,00210
- Off Cuts	965,90	0,00352
- Size Variation	391,58	0,00143
- Wrinkle	688,00	0,00251

Perhitungan probabilitas pada gerbang logic, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Gerbang Logic I : F} \\ &= 1 - (1-0,00164) (1-0,00111) \\ &= 1 - 0,99725 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 0,00275 \\ \text{Gerbang Logic J : F} \\ &= 1 - (1-0,00187) (1-0,00108) \\ &\quad (1-0,00162) (1-0,00260) \\ &\quad (1-0,00183) (1-0,00250) \\ &= 1 - 0,98855 \\ &= 0,01145 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gerbang Logic K : F} \\ &= 1 - (1-0,00352) (1-0,00143) \\ &\quad (1-0,00251) \\ &= 1 - 0,99255 \\ &= 0,00745 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gerbang Logic L : F} \\ &= 1 - (1-0,00275) (1-0,01145) \\ &\quad (1-0,00745) \\ &= 1 - 0,97849 \\ &= 0,02151 \end{aligned}$$

Tabel 8. Urutan Probabilitas Kecacatan Produk

Kecacatan	Prob.	Penyebab	Prob	Basic Event	Prob
Off Cuts	0,00352	- Pisau tumpul.	0,00352	Finishing	0,00352
		- Pisau naik pada proses <i>rewinding</i>			
Dirty	0,00260	- Kotoran terlarut dalam proses produksi	0,00260	Paper Machine	0,00260
		- <i>Screen</i> tidak berfungsi maksimal			
Wrinkle	0,00251	- Pisau kurang tepat	0,00251	Finishing	0,00251
Concave	0,00250	- Masuknya angin dalam rol akibat <i>rolling</i> kurang sempurna	0,00250	Paper Machine	0,00250
Shade Variation	0,00187	- Perbedaan <i>file</i> dan <i>wire</i> pada produk kertasnya	0,00187	Paper Machine	0,00187
Size Press	0,00183	- Tekanan <i>steam</i> yang tidak merata dalam <i>Dryer</i>	0,00183	Paper Machine	0,00183
Tensile Strength	0,00164	- <i>Over NBKP</i> di <i>Mixing Chest</i> (<i>Over Standart</i>)	0,00164	Stock Preparation	0,00164
Calender Mark	0,00162	- Tekanan <i>Calender</i> tidak sesuai.	0,00162	Paper Machine	0,00162
		- <i>Inconsistensi Calender</i> .			
Size Variation	0,00143	- Bawaan dari <i>Paper Machine</i> .	0,00143	Finishing	0,00143
Water Resistance	0,00111	- Salah pengaturan ukuran	0,00111	Stock Preparation	0,00111
		- Kekurangan <i>AKD</i> dan atau <i>Cationic Starch</i> (<i>Under Standart</i>).			
Water Drop	0,00108	- Masuknya air pada jalannya proses.	0,00108	Paper Machine	0,00108

Sumber : Data Perhitungan

Gerbang logic L merupakan gerbang yang menunjukkan kecacatan produk, dan dari perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa nilai probabilitas kecacatan kertas yaitu sebesar 0,02151.

Fault Tree Analysis memberikan penilaian probabilitas pada setiap terjadinya kecacatan produk. Jenis kecacatan yang memiliki nilai probabilitas tertinggi menunjukkan bahwa jenis kecacatan tersebut memerlukan prioritas pertama untuk dilakukan perbaikan karena memiliki resiko kecacatan yang tinggi.

Pada gambar *fault tree* kecacatan produk kertas tersebut dapat ditunjukkan bahwa bagian *Paper Machine* merupakan bagian yang mempunyai nilai probabilitas kecacatannya tertinggi yaitu 0,01145.

Pada gambar *fault tree* kecacatan produk kertas tersebut jika dilihat dari jenis kecacatannya maka yang mempunyai nilai probabilitas tertinggi adalah jenis kecacatan *off cuts* dengan nilai probabilitas 0,00352.

Urutan besarnya probabilitas kecacatan beserta penyebabnya dapat dilihat pada tabel 8.

KESIMPULAN

Nilai OEE pada tahun 2006 untuk *Paper Machine* hanya mencapai 60% dikarenakan jumlah *breakdown* cukup tinggi mencapai 86 hari, dengan hari efektif kerja selama 365 hari, sedang untuk mesin *Cutter Asahi* tahun 2006 nilai OEE lebih tinggi yaitu 67% dengan jumlah *breakdown* 80 hari untuk 365 hari efektif kerja.

Nilai RPN tertinggi, 245 adalah pada proses *Paper Machine* dengan mode kegagalan *dirty* dikarenakan penyebab kegagalan seperti kotoran terlarut dalam proses produksi serta *screen* tidak berfungsi maksimal. Rekomendasi yang dapat diterapkan adalah selalu menjaga kebersihan dalam setiap line produksi serta melakukan pengecekan secara teratur pada *screen*. Nilai RPN 245 juga terjadi pada proses *finishing* dengan mode kegagalan *wrinkle*, penyebab kegagalan pisau kurang tepat dalam memotong serta line produk tidak sesuai. Rekomendasi yang dapat diterapkan dengan mengecek keberadaan pisau dalam mesin setiap waktu tertentu. Dari nilai RPN yang masih tinggi tersebut diharapkan produksi lebih diperhatikan sehingga RPN pada proses berikutnya dapat turun.

Dari analisis *fault tree* bagian yang paling tinggi nilai probabilitas kegagalannya adalah pada bagian *Paper Ma-*

chine dengan probabilitas 0,01145. Sedangkan untuk jenis kecacatannya yang mempunyai nilai probabilitas tertinggi adalah *off cuts* dengan nilai 0,00352. Maka rekomendasi yang dapat diterapkan adalah lebih menekankan untuk proses di *Paper Machine* dengan selalu memperhatikan baik perawatan maupun perbaikan yang lebih di bagian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Clemens, L.T., 1993, *Fault Tree Analysis*, www.weibull.com/basics/faulttree
- Dewi, L.T., dan Dewa, P.K., 2005, *Implementasi Fault Tree Analysis Pada Sistem Pengendalian Kualitas* Prosiding Seminar Nasional II, Forum Komunikasi Teknik Industri, Yogyakarta
- Ford Motor Company, 1992, *World Wide Potential Failure Mode and Effect Analysis: System – Design – Process Hand Book*.
- Gaspersz, V., 2007, *Organizational Excellence*, PT. Gramedia, Jakarta
- Hansen, R. C., 2001, *Overall Equipment Effectiveness: A Powerful Production / Maintenance Tool for Increased Profits*, 1st ed., Industrial Press Inc., New York.
- The Haviland Consulting Group, 1998, *Failure Mode & Effectiveness Analysis Methodology*, <http://www.Fmeca.com>
- Vorne Industries, 2003, *Overall Equipment Effectiveness Glossary of Terms*, <http://www.vorne.com>

ANALISIS RESISTANSI PENTANAHAN SEBAGAI UPAYA UNTUK ANTISIPASI SAMBARAN PETIR DI DAERAH PERBUKITAN WILAYAH BANTUL

Muhammad Suyanto¹; Sri Mulyaningsih²

¹Jurusan Teknik Elektro,²Jurusan Teknik Geologi IST AKPRIND Yogyakarta.

Masuk: 10 Juni 2009, revisi masuk: 21 Juli 2009, diterima: 25 Juli 2009

ABSTRACT

The aim of this study was to find an information about varying soil resistant along residence area in Bantul Regency. The aim of the study is to compiling fixed grounding system. Factors controlling the grounding are ground resistivity, electrode resistivity, environmental condition, size and shape of the system. Ground resistivity needs a good grounding system, that accomplish to safety standard for people and its equipments. The ground system should be able to prevent dangerous caused by flash, whenever nuisance come out. It purposes to overcoming the current of ground system nuisance of electricity power, in order the power could be flowing to the ground, directly; not to the equipments. The resistivity data resulted from the field work measurements, shows some different values in each place, that probably caused by different kinds of soils. For examples are regusol soil has a resistivity value of 22.05Ω, latosol 17.04Ω, and red mediteran 15.12Ω. Grumusol soil has resistivity of 7.8Ω, but after it's analyzed by grounding with 4 electrode, the value is decrease into 4.22Ω. Those are caused by grumusol soil is clayy, while the other soils are sandy. Based of IEEE recomendation of ground resistivity values, home electricity should be <10Ω, while for flash protection should be < 5Ω. Up to now, the solution for quenching the overload power, in order it's unable to damage the equipments, it's flowed to the ground directly.

Keywords: ground resistancy, grounding system, soil properties, flash

INTISARI

Penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi tentang, variasi nilai resistansi tanah disepanjang perbukitan daerah pemukiman di wilayah Bantul. Hal ini sebagai upaya untuk merencanakan suatu sistem pentanahan yang benar. Faktor-faktor yang menentukan dalam pentanahan adalah Tahanan Jenis Tanah, Resistansi elektroda, Keadaan lingkungan, Ukuran dan bentuk sistemnya. Resistansi pentanahan harus memiliki sistem pentanahan yang handal yang memenuhi standard aman bagi manusia dan peralatan yang berada di sekitarnya. Sistem pentanahan yang digunakan harus benar-benar dapat mencegah bahaya akibat sambaran petir, ketika terjadi gangguan. Hal ini bertujuan untuk menanggulangi terjadinya, arus gangguan tanah sistem tenaga listrik dapat langsung mengalir ke tanah bukan ke peralatan-peralatan listrik. Data resistansi tanah hasil pengukuran dilapangan, menunjukkan beberapa perbedaan pada setiap tempat, hal ini karena dipengaruhi oleh banyak faktor dari jenis tanah itu sendiri. Seperti pada tanah regusol mempunyai nilai resistansi rata-rata 22,05Ω, latosol 17,04Ω, mediteran merah 15,12Ω. Jenis tanah grumusol mempunyai nilai resistansi tanah 7,8Ω dan setelah dianalisis dengan pembedaan 4 batang elektroda menurun menjadi 4,22Ω, karena tanah grumusol berstruktur lempung dan tanah lainnya berstruktur pasir. Berdasarkan rekomendasi dari IEEE nilai resistansi pentanahan untuk kelistrikan rumah tangga idealnya <10 Ω, sedangkan untuk instalasi perlindungan terhadap sambaran petir harus jauh <5Ω. Sampai saat ini solusi untuk meredam potensi energi yang begitu besar, agar tidak merugikan atau merusak peralatan, hanya dengan disalurkan segera ke bumi.

Kata kunci : Resistansi tanah, Sistem Pentanahan, Sifat tanah, Sambaran petir.

¹musyant@yahoo.com; ²sri_mulyaningsi@yahoo.com

PENDAHULUAN

Pentanahan merupakan salah satu hal yang terpenting dalam bidang kelistrikan. Pentanahan erat kaitannya dengan usaha pengamanan peralatan sistem maupun personil/operator/makhluk hidup. Suatu perencanaan sistem pentanahan yang baik, memerlukan ketelitian dan keseksamaan yang tinggi, sehingga dapat diperoleh perlindungan yang terpercaya baik untuk sistem atau peralatan maupun untuk manusia serta makhluk hidup itu sendiri. Perlindungan ini menjamin pelayanan yang terus-menerus dan usia peralatan akan bertambah panjang (Riley, 1988).

Sistem pentanahan merupakan salah satu sistem pengamanan terhadap masalah gangguan hubung singkat ke tanah yang terjadi pada suatu sistem atau peralatan. Seperti gangguan satu fase ke tanah, gangguan dua fase ke tanah dan gangguan tiga fase ke tanah. Peralatan-peralatan pengaman yang sering ditanahkan terhadap gangguan hubung singkat ke tanah antara lain: generator, transformator, motor listrik serta peralatan listrik lainnya yang bertujuan untuk menghindari terjadinya kenaikan tegangan fase yang tidak terganggu.

Gangguan hubung singkat sering menyebabkan mengalirnya arus listrik yang cukup besar dan akan merusak peralatan yang terpasang hal ini akan membahayakan manusia disekitarnya bilamana tidak segera diputuskan (Niedle, 1982). Agar tidak terjadi gangguan diperlukan suatu sistem perlindungan

yang mampu melindungi terhadap kemungkinan terjadinya gangguan hubung singkat dengan memutuskan secepat mungkin arus yang mengalir dengan peralatan pemutus (*circuit-breaker*). Untuk itu diperlukan suatu nilai pentanahan sekecil mungkin agar arus gangguan dapat segera mengalir ke tanah bukan ke peralatan-peralatan.

Permasalahan yang sering timbul adalah nilai resistansi tanah akan berbeda-beda pada suatu tempat, hal ini disebabkan komposisi dari tanah yang berbeda, kandungan air tanah yang tidak sama, kelembaban tanah, dan juga jenis tanah yang pada dasarnya terdiri atas tanah rawa, tanah liat, dan tanah ladang, tanah pasir, tanah kerikil juga tanah berbatu, diperlihatkan pada Tabel 1. Keadaan ini menentukan nilai resistansi pentanahan dan berpengaruh pada hantaran listriknya. Tanah bersifat lempung mempunyai nilai resistansi tanah yang rendah, disebabkan komposisinya yang mempunyai bentuk partikel halus sehingga lebih mudah menyerap air atau mineral-mineral lain kemudian menyimpannya. Sifat-sifat inilah yang menyebabkan nilai-nilai resistansi tanah lempung mempunyai tahanan jenis rendah dibandingkan dengan tanah lainnya seperti tanah pasir dan tanah berbatu. Lain dengan tanah berpasir, tanah berpasir mempunyai bentuk partikel-partikel yang besar akan sulit untuk menyimpan atau menyerap air, sehingga tanah jenis ini mempunyai tahanan jenis yang tinggi, (SNI, 2000).

Tabel 1. Resistansi beberapa jenis tanah

1	2	3	4	5	6	7	8
Jenis Tanah	Tanah mengandung air garam	Tanah rawa	Tanah liat dan ladang	Pasir basah	Batu Kerikil basah	Pasir dan batu kerikil kering	Tanah berbatu
Resistansi Jenis(Ω -m)	5-6	30	100	200	500	1000	3000

Pengaruh kandungan uap air kelembaban dalam tanah merupakan kepentingan yang besar. Variasi dari beberapa prosen dalam kelembaban uap air akan membuat perbedaan yang menonjol dalam efektifitas hubungan antara tanah yang dipasang elektroda dengan ukuran yang sesuai. Hal ini khususnya untuk kandungan kelembaban uap air

dibawah 20%. Nilai-nilai resistivitas tanah diatas 20% tidak terlalu banyak berpengaruh, Oleh karena itu maka untuk nilai resistivitas dibawah 20% akan terjadi peningkatan secara drastis dengan adanya penurunan kandungan uap air terhadap kelembaban. Adapun Kaitannya dengan kandungan uap dan kelembaban, tes bidang menunjukkan bahwa,

dengan lapisan permukaan tanah sepuluh kali lebih baik ditanam pada batas dasar (Pijpaert, 1999). Elektroda yang diletakkan pada dasar bawah batu biasanya memberikan ground yang baik. Hal ini diperkuat oleh fakta bahwa dasar-dasar batu sering tidak dapat tembus air dan menyimpan banyak uap air yang dapat memberikan kandungan kelembaban yang tinggi.

Latar belakang, Dalam Penyaluran energi listrik diperlukan peralatan-peralatan listrik termasuk penghantar, juga dibutuhkan sistem pengamanan ini yang baik pada peralatan. Pengaman penyaluran energi listrik sangat diperlukan, jika terjadi adanya pengaruh gangguan arus hubung singkat, seperti akibat gangguan dari sambaran petir ataupun arus gangguan tanah, dapat diatasi dengan sistem pengaman yang terpasang baik. Salah satu faktor kunci setiap usaha perlindungan sistem tenaga listrik adalah dengan memasang pentanahan. Apabila suatu tindakan pengamanan atau perlindungan yang baik akan dilaksanakan, maka harus ada sistem pentanahan yang dirancang dengan benar. Pentanahan sistem tenaga listrik, baik pentanahan titik netral sistem maupun pentanahan perlengkapannya mempunyai pengaruh dalam kelancaran dan keamanan dari sistem tersebut, terutama jika dalam keadaan terjadi gangguan yang berhubungan dengan tanah (Harten dan Setiawan, 1991). Suatu metode cara pembumian atau pentanahan yang baik dan efektif, ini diharapkan kerugian yang ditimbulkan oleh gangguan akibat petir dapat dikurangi sehingga sedapat mungkin dihindari, karena menjamin keandalan dan keamanan penyaluran tenaga listrik.

Pelaksanaan dalam pemasangan pentanahan pada sistem tenaga listrik ini maupun pentanahan perlengkapan, berdasarkan kondisi dari lingkungan ini yang bervariasi sehingga sering terjadi penyimpangan terhadap fasa yaitu perilaku sistem itu sendiri, maka perlu dilakukan perbaikan resistansi tanah pada sistem penyaluran energi listrik, disekitar areal lokasi pemukiman penduduk di daerah perbukitan wilayah Bantul. Syarat untuk mencapai tujuan pemasangan

dan perbaikan pentanahan yang baik, dari sistem pentanahan biasanya melihat kemungkinan terjadinya hal-hal berikut:

- Seringnya terjadi gangguan akibat sambaran petir
- Bervariasinya nilai kondisi tanah pada daerah perbukitan di wilayah Bantul.
- Perubahan iklim setiap tahun akan mempengaruhi resistansi tanah.

Tinjauan Pustaka, Tujuan pentanahan mengacu pada nara sumber atau orang yang dalam kenyataannya telah melakukan penelitian ini tentang sistem pentanahan, yaitu diantaranya: Perlindungan kawat untuk sambaran langsung dari petir, digunakan 1 atau 2 kawat tanah yang terletak diatas kawat fasa dengan sudut perlindungan kurang dari 18° . Dengan demikian terjadinya loncatan balik (*back flash over*) karena sambaran petir ini secara langsung pada puncak menara atau kawat tanah tetap masih ada, dan untuk mengurangnya tahanan kaki menara harus dibuat tidak kurang 10Ω . Tahanan kaki menara 10 Ohm dapat diperoleh dengan menggunakan satu atau lebih berupa batang pengetanahan (*grounding rod*) ini, boleh menggunakan sistem *Counterpoise* tergantung dari tahanan jenis tanah dimana menara transmisi itu berada. (Hutauruk, 1991). Pentanahan tiang menara terdiri dari kawat tembaga atau kawat baja yang diklem pada pipa pentanahan yang ditanam didekat pondasi tiang menara, atau dengan menanam plat aluminium atau tembaga disekitar pondasi tiang yang berfungsi mengalirkan arus dari kawat tanah akibat sambaran petir (Hakim, 1998).

Lapisan tanah terdiri atas lapisan-lapisan ini yang dapat diasumsikan mempunyai nilai tahanan jenis yang berbeda, maka dalam memilih dan memasang sistem pentanahan perlu diketahui kondisi-kondisi pada lapisan tanah yang dalam. Mengingat keterbatasan dari pada alat-alat pengukuran nilai tahanan tanah dalam menyelidiki kondisi spesifik tanah tersebut, hal ini dapat dikembangkan suatu metode atau cara pemikiran yang dapat menggambarkan nilai taha-

nan jenis tanah pada kedalaman tertentu (Pabla, 1994).

Pada jaringan saluran udara, selain di sumber dan dikonsumsi penghantar PEN-nya harus dibumikan paling sedikit disetiap ujung cabang yang panjangnya lebih dari 200m. Demikian pula untuk instalasi pasangan luar, penghantar PEN-nya harus dibumikan. Resistansi pembumian total seluruh sistem tidak boleh lebih dari 5Ω. Untuk daerah yang resistansinya sangat tinggi, resistansi total seluruh sistem boleh mencapai 10Ω (SNI, 2000).

Struktur tanah dianggap homogen maka tahanan elektroda untuk 1 batang rod akan semakin kecil bila elektroda tersebut ditanam semakin jauh dari permukaan tanah. Pemasangan Untuk 2 batang elektroda, bila jarak antara keduanya menjadi lebih besar dari panjang elektroda maka nilai tahanan pentanahan menjadi semakin kecil. Bilamana jumlah elektroda semakin banyak maka tahanannya semakin kecil, baik pada tanah homogen maupun tak homogen (Tadjuddin, 1998).

Rumus Dwight ini menunjukkan, bahwa hambatan tanah merupakan faktor kunci yang menentukan hambatan elektroda dan pada kedalaman beberapa pasak harus ditanam dalam tanah agar diperoleh hambatan yang rendah. Hambatan tanah sangat bervariasi di berbagai tempat. Persamaan (1) untuk hambatan tanah dari berbagai sistem elektrode, Semua pernyataan ini dalam persamaan-persamaan diperoleh hubungan $R = \rho L/A$ dan didasarkan pada asumsi bahwa hambatan tanah seragam pada seluruh volume tanah, kendati hal ini tidak mungkin atau sangat jarang digunakan (Sayogo, 2003). Persamaan yang biasa digunakan untuk pasak tunggal dikembangkan oleh Dwight, menurut (Hutauruk, 1991) adalah :

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \dots\dots (1)$$

dimana: $\rho = 2 \pi a R_A$, hambatan rata-rata tanah (Ω-m), L= Panjang pasak tanah (m), a= Jari-jari penampang pasak (m), R =Hambatan pasak ke tanah (Ω).

Dengan memberi air, membasahi tanah atau dengan mengubah komposisi kimia dengan memberikan unsur garam disekitar elektroda agar mendapatkan nilai tahanan jenis tanah yang rendah. Cara ini hanya mampu bertahan sementara saja. Untuk mendapatkan tahanan jenis tanah yang rata-rata rendah untuk keperluan pentanahan maka diperlukan pengukuran dalam jangka waktu tertentu, misalnya selama setahun. Biasanya tahanan tanah juga tergantung dari tingginya permukaan tanah dari permukaan air yang konstan

Elektrode pentanahan, merupakan suatu penghantar yang ditanam ke dalam tanah, adalah untuk menyalurkan arus listrik dari penghantar pentanahan ke tanah (Hakim, 1998). Bila menggunakan batang pentanahan, resistansi tanah dihitung terlebih dahulu menggunakan persamaan (2)

$$R = (\rho / 2 \pi L) \ln (2L / d) \dots\dots (2)$$

Jika menggunakan persamaan (2), resistansi akan berkurang dengan menambahkan panjang pada batang pengetanahan. Dalam hal ini batang pentanahan dihubungkan paralel satu sama lainnya. persamaan diatas tetap dapat digunakan untuk menghitung resistansi pentanahan, bila ini variabel "d" diubah menjadi "A" dan jari-jari dari batang pentanahan dianggap sama. Nilai A adalah kelipatan dari batang pentanahan yang tergantung atas penempatan masing-masing batang pentanahan sebagai berikut :

Penempatan 2 Batang diletakkan di mana saja. $A = \sqrt{ar}$ (3)

3 Batang diletakkan membentuk segitiga $A = \sqrt[3]{a^2 r}$ (4)

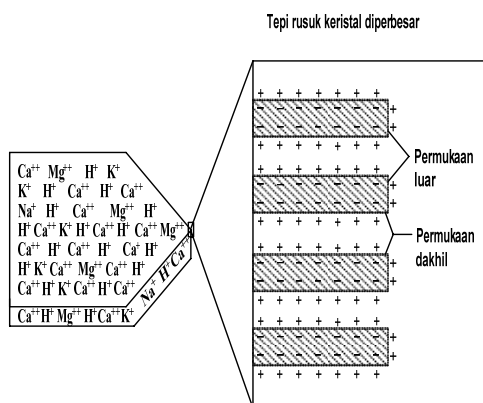
4 Batang diletakkan membentuk segiempat $A = \sqrt[4]{2 \frac{1}{2} a^3 r}$ (5)

r = Jari-jari dari masing-masing batang pentanahan (harus sama).

a = Jarak antara batang pengetanahan.

Bahan Penyusun lempung, ter-bentuk dari unsur-unsur senyawa SiO₂, Al₂O₃, air dan unsur-unsur yang lain se-

perti Mg, Fe, dan K. Setiap partikel lempung ini dapat tersusun dari sejumlah lempung-lempung dari $\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ dan $\text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ yang saling mengikat satu sama lain. Partikel-partikel lempung ini disebut mikrosel (misel) yang terbentuk kristal dan memiliki dua permukaan luar dan permukaan bagian dalam ini yang terdapat diantara dua lempung kristal. Partikel-partikel permukaan lempung ini bermuatan listrik negatif, mengikat ion-ion positif atau kation-kation. Umumnya pada partikel-partikel mempunyai permukaan luar yang besar. Beberapa hal lainnya juga mempunyai permukaan dalam berbentuk antara dua buah satuan kristal berbentuk lempeng (Goenadi dan Radjagukguk, 1995).



Gambar 1. Bagan kristal lempung silikat berstruktur lempeng bermuatan listrik.

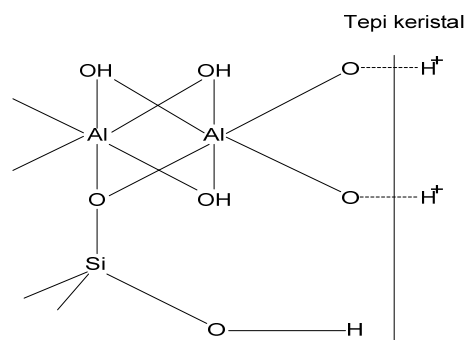
Partikel lempung silikat biasanya bermuatan listrik negatif, hal ini menghasilkan fenomena yang dikenal sebagai lapis kembar ion. Zarah koloid menjadi lapis ion dalam, juga sebagai anion besar dimana permukaannya bermuatan listrik negatif lebih banyak. Adapun lapis ion luar terdiri dari kation-kation aneka ragam yang tersebar dan terjebak longgar yang menyelubungi dan ada pula yang masuk ke inti. Disamping lapis kation terjebak itu, juga terdapat sejumlah besar molekul air, sebagian molekul itu terbawa oleh kation terjebak, karena kation-kation itu terhidrasi. Kation terjebak di koloid lempung daerah basah (humid) berdasarkan jumlah berturut-turut adalah pertama: H^+ , Al^{+++} , Ca^{++} kedua: Mg^{++} , ketiga: K^+ , Na^+ . Lempung daerah

humida ini dianggap sebagai kelompok Ca-H. Sedang di daerah kering adalah: Ca dan Mg.

Lempung silikat ini berstruktur lempeng bermuatan listrik negatif serta kation-kation terabsorpsi, tiap satuan misel ini memiliki struktur mineral tertentu, dan tersusun atas atom-atom Al dan Si. Sebuah atom Si dikelilingi oleh empat atom O membentuk bidang empat (tetraeder) dan bidang delapan untuk atom alumina dikelilingi enam atom O atau gugus OH. Sejumlah tetraeder saling bergabung berdampingan membentuk lempeng begitu juga dengan atom Al yaitu :

- Sebuah bidang empat/tetraeder silika, yang bila bergabung berdampingan dapat membentuk lempeng.
- Sebuah bidang segi delapan (oktaeder) alumina.

Permukaan luar mineral datar semacam kaolinit memiliki O dan OH yang berperanan sebagai bidang muatan negatif. Gugus-gugus ini terikat pada atom Si dan Al dalam lapisan masing-masing. Pada pH tinggi $-\text{OH}$; ($-\text{O}^+\text{H}^+$). H^+ ini terikat longgar dan siap bertukar dengan kation-kation lain. Ion-ion H terikat secara kovalen. Terdapat beribu-ribu gugus semacam ini menyebabkan mineral lempung kaolinit bermuatan listrik negatif.



Gambar 2. Bagan tepi (rusuk) terpecah suatu kristal kaolinit.

Menurut Suprojo, (1993) kedudukan atom silika (Si) dilapis tetraeder (silika) dan Al dilapis oktaeder (alumina) dapat digantikan oleh ion-ion lain yang berukuran sebanding. Gambar 2. Memperlihatkan bagan tepi(rusuk) terpecah suatu kristal kaolinit, oksigen dalam hal

ini penyebab muatan listrik negatif, pada pH tinggi ion hidrogen ini terikat longgar dan bertukar kation-kation lain.

Gejala tersebut pergantian isomorfik. Ion-ion seperti Fe, Zn, dan Mg berukuran tidak terlalu berselisih dengan Al, akibatnya ion-ion ini dapat menggantikan Al di pusat lapis oktaeder. Pergantian isomorfik ion bermartabat dua misal Mg^{++} oleh ion bermartabat tiga misal Al^{+++} menyebabkan muatan negatif tak terjenuhi, berasal dari atom O dilapis itu. Tanpa pergantian isomorfik suatu Mg^{++} oleh Al^{+++} muatan positif dan negatif setimbang. Bila terjadi pergantian, ketidakseimbangan akan menyebabkan terbentuk sebuah muatan negatif dilapis oktaeder. Kejadian seperti ini terdapat dikelompokkan monorillonit dan warganya. Pergantian isomorfik Mg oleh Al dilapis alumina dan Al oleh Si di lapis silika menyebabkan kristal monmorilonit memiliki jaringan muatan negatif tinggi. Monmorillonit ini disebut juga *bentonite* yang mana *bentonite* adalah suatu jenis tanah yang mempunyai nilai tahanan jenis sangat rendah, baik sekali untuk sistem pentanahan tenaga listrik.

Jenis-jenis tanah di Indonesia dibagi menjadi 12 macam yaitu: Jenis tanah orgasol, aluvial, regosol, litusol, latusol, grumusol, podsolik merah kuning, podsol, andosol, mediteran merah kuning, hodromorf kelabu (*Gleisol*), tanah sawah (*paddy soil*). Namun dalam pengamatan dari data yang diperoleh adalah sebagai berikut:

- Tanah Orgosol atau tanah gambut. Jenis tanah ini berasal dari bahan induk bahan organik dari hutan rawang atau rumput rawang, mempunyai ciri-ciri: tidak terjadi deferensiasi horisontal secara jelas, ketebalan >0,5m, warna coklat kehitam-hitaman, tekstur debu-lempung tidak berstruktur, dan konsistensi tidak lekat, kandungan organik lebih dari 30% untuk tekstur lempung lebih dari 20% untuk tekstur pasir, bersifat sangat asam (pH=4,0), kandungan unsur hara rendah
- Tanah regosol. Jenis tanah ini masih muda, belum mengalami deferensiasi horison, tekstur pasir, struktur berbutir tunggal, konsistensi lepas-lepas, pH umumnya netral, kesuburan sedang,

berasal dari bahan induk material *volkanis piroklatis* atau pasir pantai. Penyebarannya di daerah lereng vulkan muda dan daerah benting pantai dan gumpuk-gumpuk pasir pantai.

- Tanah litosol. Tanah bermineral tanpa atau sedikit perkembangan profil, batuan induknya batuan beku atau batuan sedimen keras, solum tanah dangkal (kurang dari 30cm) bahkan kadangkala merupakan singkapan batuan induk. Tekstur tanah beraneka dan pada umumnya berpasir, umumnya tak berstruktur, warna kandungan batu, kerikil dan kesuburan bervariasi. Litosol dapat dijumpai disegala iklim, umumnya ditopografi berbukit, pegunungan, kemiringan lereng miring hingga curam.
- Tanah Latosol. Jenis tanah ini telah berkembang atau terjadi deferensiasi horison, solum dalam, tekstur lempung, struktur ini remah hingga gumpal, konsistensi gembur hingga teguh, warna coklat, merah hingga kuning. Latosol tersebar didaerah beriklim basah, antara 300-1000m, batuan induk tuf, material volkanis, breksi batuan beku intrusi.
- Tanah Grumusol. Tanah mineral yang mempunyai perkembangan profil, agak tebal, tekstur lempung berat, struktur kersai dilapisan atas dan gumpalan hingga pejal dan lapisan bawah, konsistensi bila basah sangat lekat dan plastis, bila kering sangat keras dan tanah retak retak mempunyai sifat *self mulching* oleh kandungan lempung montmorillonit, umumnya bersifat alkalis, kejenuhan basa dan kapasitas absorpsi tinggi, permeabilitas lambat dan peka erosi. Jenis ini berasal dari batu kapur, mergel, batuan lempung bersifat basa, tersebar didaerah iklim sub-humid atau subarid, curah hujan kurang dari 2500 mm/tahun.
- Tanah mediteran merah kuning. Tanah mempunyai perkembangan profil, solum sedang hingga dangkal, warna coklat hingga merah, mempunyai horison B argillik, tekstur geluh hingga lempung, struktur gumpal bersudut, konsistensi teguh dan lekat bila basah, pH netral hingga agak basa, kejenuhan basa tinggi, daya absorpsi se-

dang, permeabilitas sedang dan peka erosi, berasal dari batu kapur keras dan tef volkanis bersifat basa.

Penyebaran di daerah beriklim sub humid, bulan kering nyata, curah hujan kurang dari 2500mm/tahun, di daerah pegunungan lipatan, topografi karst dan lereng vulkan ketinggian dibawah 400m. Khusus tanah Mediteran Merah Kuning di daerah topografi karst disebut "Terra Rossa". Sifat-sifat tanah pasir, alasan mengapa tanah yang berstruktur pasir ini mempunyai nilai tahanan tanah tinggi karena sifat-sifat pasir berlawanan dengan sifat-sifat tanah berstruktur lempung. Tanah berstruktur pasir mempunyai ukuran partikel-partikel sebesar (0,05-2mm) ini, kemampuan menyimpan dan menyerap air rendah, mempunyai ukuran pori yang besar, mempunyai luas permukaan yang kecil, tidak adanya reaksi-reaksi dalam jenis tanah ini sehingga tanah pasir jarang mengandung garam-garaman dan juga mineral lain yang berpengaruh terhadap nilai resistansi tanah. Berkaitan daya menyimpan air, tanah pasir mempunyai daya pengikat terhadap lengas tanah yang rendah karena permukaan kontak tanah pasir didominasi oleh pori-pori mikro 1, oleh karena itu air yang jatuh ketanah pasir akan segera mengalami perkolasi dan air kapiler akan mudah lepas karena evaporasi.

Perbaikan nilai resistansi tanah di daerah perbukitan pemukiman penduduk, hal ini dimungkinkan sering terjadinya gangguan aliran listrik pada saluran udara tegangan tinggi, lebih banyak disebabkan karena pengaruh akibat sambaran petir. Sering kita lihat fenomena terjadinya petir merupakan hal yang alami dari sifat kelistrika di bumi. Petir memiliki energi yang sangat besar hingga mencapai 5.10¹¹joule. Sehingga akibat sambaran petir yang mengenai sistem proteksi listrik dapat membuat tanah di sekitar blokade menjadi konduktif. Oleh karena itu suatu sistem pentanahan haruslah memiliki tingkat keamanan yang tinggi sehingga, jika terjadi gangguan akibat petir tidak sampai merusak bangunan dan peralatan yang dilindungi

disekitarnya sambaran petir. Untuk mengatasi gangguan tersebut dilakukan perbaikan nilai resistansi pentanahan di daerah dimana bangunan dan aliran listrik dipasang, agar mempunyai nilai resistansi tanah <5 Ohm, perlu dilakukan suatu usaha perbaikan sesuai dengan yang disarankan PUIL 2000, untuk bangunan pemukiman penduduk nilai resistansi harus ≤5 Ohm.

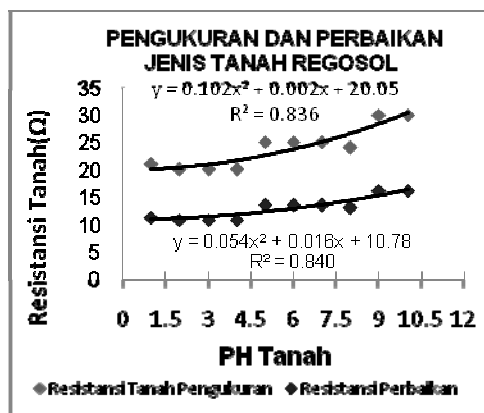
PEMBAHASAN

Penelitian ini mengkaji apakah ada pengaruh dari berfariasinya jenis tanah terhadap nilai resistansi pentanahan untuk pengamanan akibat hubungan singkat akibat sambaran petir. Berdasarkan kajian dari data yang diperoleh, maka akan diketahui kaitan antara jenis tanah terhadap nilai pentanahan sesuai dengan hasil data yang diperoleh. Data faktual tentang hasil penelitian, menginformasikan bahwa jenis tanah dapat juga mempengaruhi nilai pentanahan kaki menara transmisi dengan melihat berdasarkan data. Data penelitian, diperoleh dari dua instansi yang terkait, yaitu: PT PLN/persero Unit Pelayanan Transmisi Jogjakarta dan Pusat Data Sumberdaya Alam dan Pengkajian Teknologi Terapan (Pusdat) Jurusan Tanah Fakultas Pertanian di UGM. Mekanisme perolehan data adalah dari hasil pengukuran nilai pentanahan menara sepanjang lintasan yang dilalui transmisi Gardu Induk (G.I) Bantul. Pada intinya peneliti ingin mengetahui resistansi dan jenis tanah yang ada disekitar perbukitan di wilayah Bantul, dengan cara melalui hasil pengukuran jalur lintasan menara transmisi yang terpasang di wilayah Bantul.

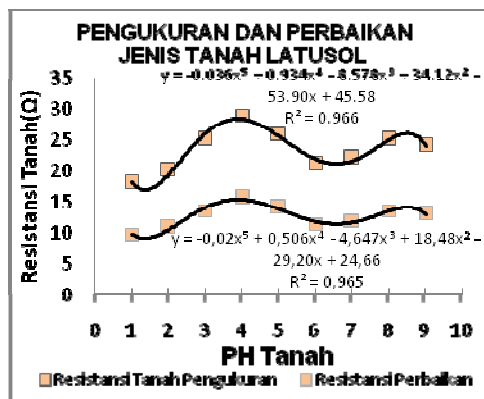
Berdasarkan peta tanah yang dimiliki oleh jurusan tanah UGM, didapat informasi mengenai nama dan jenis tanah disetiap menara transmisi disepanjang lintasan jalur transmisi di Bantul. Berdasar jalur lintasan menara transmisi yang dimiliki oleh PT. PLN, dapat dianalisis, perbaikan dengan menggunakan 4 batang pasak (*ground rod*) disetiap titik-titik. Hasil pentabelan dari data dan perhitungan baik sifat-sifat tanah maupun nilai resistansi tanah dan analisis perbaikan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil analisis resistansi tanah sebelum dan setelah perbaikan

No	Kondisi Sifat-sifat Tanah dan Tekstur dari Tanah yang diteliti	Nilai rata2 pH Tanah Sebelum dan setelah perbaikan	Nilai rata-rata Resistansi Tanah Sebelum perbaikan (Ohm)	Nilai rata-rata Resistansi Tanah Setelah perbaikan (Ohm)
1	Regusol /Pasiran-geluh pasiran	6,42	22,05	12,96
2	Latusol /Geluh lempung-lempung	6,42	17,04	12,45
3	Mediteran Merah/Geluh-geluh lempung	6,42	15,12	9,21
4	Gromusol/Lempung	6,42	7,81	4,22



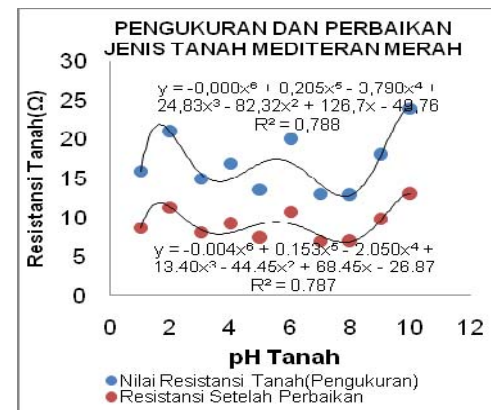
Gambar 3. Grafik Hubungan Nilai Resistansi Tanah terhadap pH Tanah Jenis Regosol.



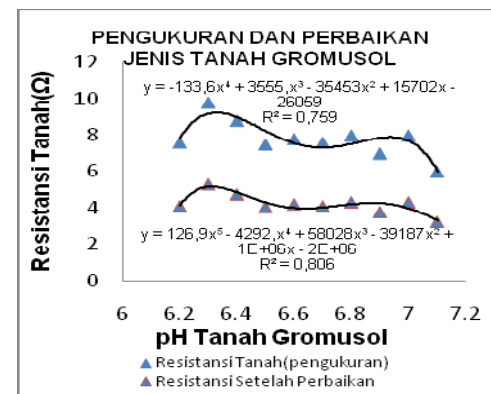
Gambar 4. Grafik Hubungan Nilai Resistansi Tanah terhadap pH Tanah Jenis Latusol.

Analisis Data, memperlihatkan nilai rata-rata hasil pengukuran dan perbaikan ditunjukkan pada Tabel 2 untuk memudahkan pembacaan, maka dibuatkan visualisasi dengan gambar masing-masing jenis tanah secara sendiri-sen-

diri sehingga dalam hal ini ada lima jenis grafik yang berbeda. Kemudian dari ke empat gambar grafik tersebut diambil nilai rata-ratanya.

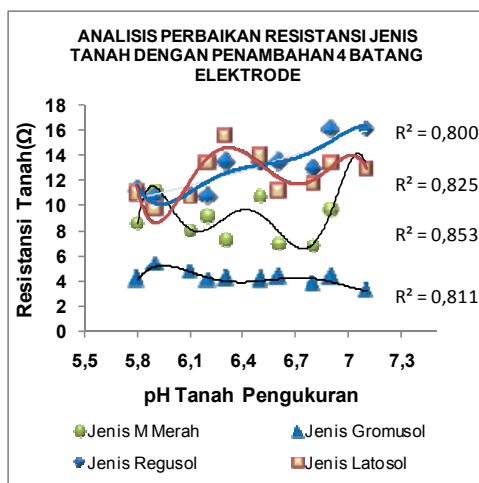


Gambar 5. Grafik Hubungan Nilai Resistansi Tanah terhadap pH Tanah Jenis Mediteran Merah



Gambar 6. Grafik Hubungan Nilai Resistansi Tanah terhadap pH Tanah Jenis Gromusol.

Kontribusi perbaikan resistansi tanah jenis regusol, latusol, mediteran merah, gromusol terhadap pH dari tanah diperlihatkan pada Gambar grafik 3, 4, 5 dan 6. Dari grafik perbandingan ini akan diketahui manakah jenis tanah yang mempunyai nilai pentanahan yang tinggi dan jenis tanah yang mempunyai nilai pentanahan yang rendah, berdasarkan nilai rata-rata ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik kontribusi perbaikan resistansi tanah jenis regusol, latusol, mediteran merah dan gromusol terhadap pH tanah.

Terlihat seperti pada Gambar 7, merupakan grafik akhir, nilai resistansi tanah pada tiap-tiap jenis tanah, dimana tanah gromusol ini mempunyai nilai resistansi pentanahan yang paling rendah dengan kontribusi perbaikan sekitar nilai 81,1%. Sedangkan tanah regusol 80%, latosol 82,5%, mediteran merah 85,3%, hal ini mempunyai penyebaran nilai resistansi lebih tinggi. Dapat difahami karena jenis tanah gromusol ini mempunyai struktur lempung berat, sedangkan tanah lainnya berstruktur pasir atau bahan dasar batu. Alasan mengapa tanah yang berstruktur lempung mempunyai nilai tahanan pentanahan rendah karena tanah lempung mempunyai ukuran partikel yang sangat kecil, bisa juga disebut bersifat koloid. Koloid adalah suatu sistem berfase dua, salah satu penyusunnya terbagi halus sekali (*fase dispers*) dan terlarut (*terdispersikan*) dalam

menyusun yang tersebut kedua (*medium dispersi*). Akibatnya hanya pada tanah lempung terjadi reaksi kimia dan fisika. Dan juga sifat koloid ini dapat mengikat ion-ion atau air dan kadang-kadang berupa garam-garam bebas. Menurut Suprojo, (1993) dari U.S.D.A (*Unitate States Department of Agriculture*) ukuran partikel tanah ini dibedakan menurut ukurannya menjadi tiga, yaitu pasir debu, dan lempung. Fraksi pasir berdiameter sekitar 2 mm-0,05mm. Fraksi debu berdiameter antara 0,05-0,002mm. Dan fraksi lempung berdiameter lebih kecil dari 0,002 mm.

KESIMPULAN

- Nilai rata-rata resistansi tanah jenis tanah Regosol adalah 22,05Ω dan setelah diperbaiki turun sebesar 12,96 Ω
- Nilai rata-rata resistansi tanah jenis tanah latusol adalah 17,04Ω dan setelah diperbaiki turun sebesar 12,45Ω
- Nilai rata-rata dari resistansi tanah jenis tanah Mediteran Merah adalah 15,12Ω dan setelah diperbaiki turun sebesar 9,21Ω
- Nilai rata-rata Resistansi tanah jenis tanah Grumusol adalah 7,81Ω dan ini sepertinya untuk jenis tanah yang tidak memerlukan perbaikan, karena sudah memenuhi standart sebesar 4,22Ω berdasar (PUIL., 2000).

DAFTAR PUSTAKA

- Hakim, RA.,1998, "Perhitungan Tegangan Permukaan Tanah Diatas Elektroda
- Harten PV, Setiawan E., 1991, *Instalasi Listrik Arus Kuat Jilid II*, Bina Cipta, Bandung
- Hutauruk, T.S. 1991. *Pengetanahan Neutral Sistem Tenaga dan Pengetanahan Peralatan*. Erlangga. Jakarta.
- Neidle, M.,1982, *Elektrical Instalation Technology*, Macmillan Press Ltd.
- Pabla, A.S. 1994. *Sistem Distribusi Daya Listrik*. Erlangga. Jakarta.
- Pijpaert, K.. 1999. *Peraturan Umum Untuk Elektrode Bumi dan Penghantar Bumi*. Available at [http //www : elektroindonesia. com /elektro/ ener24b. html](http://www : elektroindonesia.com /elektro/ ener24b. html). Diakses 26 Januari 2006.

- Riley, R.P. 1988, "Electrical Grounding", De
Imar Publishers inc, New York.
- Sayogo, B. 2003. *Antisipasi Untuk Arus
Netral yang Besar*. Available at
[http : //www.google.com/](http://www.google.com/). Diak-
ses 26 Juni 2005.
- SNI, 2000, Pesyaratan Umum Instalasi
Listrik (PUIL), Badan Standard-
risasi, SNI 04-0225-2000, Mentri
Energi dan Sumber Daya Mine-
ral, Jakarta, Indonesia
- Suprojo, JSW, 1993, "Pengantar Geografi
Tanah", Departemen Pendidikan
dan Kebudayaan, Fakultas Geo-
grafi UGM, Yogyakarta.
- Tadjuddin, 1998. *Bentuk-bentuk elektrode
pentanahan*, Available at [http//
www. elektroindonesia.com/ e-
lektro](http://www.elektroindonesia.com/). Diakses 26 Jan, 2006.

PENGARUH HASIL-HASIL UJIAN DI SEKOLAH TERHADAP HASIL UJIAN NASIONAL DI SMU NEGERI 1 LIMBOTO KABUPATEN GORONTALO

Noeryanti¹

¹Jurusan matematika, Fakultas Sains Terapan, IST AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 23 Februari 2009, revisi masuk: 19 Juli 2009, diterima: 24 Juli 2009

ABSTRACT

The aim of the research is to know whether the result of school examination influences the result of national examination significantly. Observation data was taken from the third year science students of SMUN1 Limboto Gorontalo Regency Gorontalo Province. The best method to get regression model with unbiased estimator is used the least square was done by using classical assumption examination, those are normal, multicollinear and correlation ones. The result showed that national examination data, mean of Raport, Tryout, School examination marks and Practice examination, fulfill this assumption. Base on analysis data, it that in partially, UAN grades are influenced by: Raport grades with $MSE=0,004$ and $R^2=45.9\%$, Tryout grade with $MSE= 0.09931$ and $R^2= 59.3\%$, School grade with $MSE=0.235691$ and $R^2=5.8\%$ and Practical grade with $MSE=0.09931$ dan $R^2 = 59.3\%$. Simultantly, UAN grades are influence by: Raport grade= -0.384 , Tryout grade= 0.848 , School grades = -0.303 and Practical grade= 0.082 . Based on beta coefficient, it can be concluded that mean variable of tryout mark has the most dominant influences to national examination mark. The suitable mathematics model can be stated as $\hat{Y}=4,985+ 0,182(x1)+0,370(x2)-0,261(x3)-0,280(x4)+0,376(lag_Y)$.

Keywords: UN, UAS, MSE, Multicollinearity

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah hasil ujian-ujian disekolah mempengaruhi secara signifikan terhadap hasil ujian nasional. Data observasi diambil dari data siswa kelas III Jurusan IPA di SMU N1 Limboto Kabupaten Gorontalo Propinsi Gorontalo. Untuk mendapatkan model regresi dengan estimator tak bias yang terbaik menggunakan metode kuadrat terkecil dilakukan uji asumsi klasik, yaitu uji normalitas, uji multikolinier dan uji korelasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa data Ujian Nasional (UAN), rata-rata nilai Raport, rata-rata nilai Tryout, rata-rata nilai Ujian Sekolah, dan rata-rata nilai Ujian Praktek telah memenuhi asumsi-asumsi tersebut. Dari hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa secara parsial Nilai UAN dipengaruhi oleh: nilai raport dengan $MSE=0,004$ dan $R^2=15.9\%$, Nilai Tryout dengan nilai $MSE=0.09931$ dan $R^2= 59.3\%$, Nilai Ujian Sekolah dengan $MSE=0.235691$ dan $R^2=5.8\%$ dan Nilai Ujian Praktek dengan $MSE=0.09931$ dan $R^2=59.3\%$. Secara simultan nilai UAN dipengaruhi oleh: Nilai Raport= -0.384 , Nilai Tryout= 0.848 , Nilai Ujian Sekolah = -0.303 dan Nilai Ujian Praktek = 0.082 . Berdasarkan nilai koefisien beta, dapat disimpulkan bahwa variabel rata-rata nilai tryout mempunyai pengaruh paling dominan terhadap nilai ujian nasional. Model matematis yang sesuai dapat dinyatakan sebagai $\hat{Y}=4,985+0,182(x1)+0,370(x2)- 0,261(x3) - 0,280(x4)+0,376(lag_Y)$.

Kata kunci: UN, UAS, MSE, Multikolinier

PENDAHULUAN

Menurut keputusan pemerintah penghapusan EBTANAS dengan Ujian Nasional (UAN) ini melalui Depdiknas mempunyai alasan tersendiri yaitu untuk

meningkatkan mutu pendidikan yang didasarkan terhadap UU No 20 tahun 2003 tentang sistem Pendidikan Nasional dan Kepmendiknas No 153/U/2003

¹snoeryanti@yahoo.com

Kebijakan baru ini selalu diikuti dengan pro dan kontra dari kalangan masyarakat, terlebih dalam UAN. Kebijakan yang baru sebenarnya sah-sah saja asalkan dengan tujuan yang jelas, meskipun nantinya menimbulkan pro dan kontra ini merupakan hal yang wajar. Meskipun terjadi beberapa kesenjangan dan kontroversi di kalangan pakar pendidikan, pendidik/guru, siswa dan masyarakat pada umumnya tidak menggemikan niat pemerintah dalam melaksanakan UAN. Hal ini terbukti pada tahun 2003 UAN mulai diberlakukan, sehingga guru tidak dapat melakukan evaluasi hasil belajar dan menentukan kelulusan siswa karena telah diambil alih oleh pemerintah. Dengan persyaratan minimal nilai kelulusan 3,01 yang artinya nilai dibawah 3,01 dinyatakan tidak lulus.

Kemudian dalam rangka meningkatkan mutu pendidikan nasional tahun 2004 depdiknas menaikkan standar kelulusan ini menjadi 4,01 dan sebenarnya standar kelulusan ini masih sangat rendah bila dibandingkan dengan negera-negara lain yang lebih maju. Dan pada tahun 2004 Depdiknas meniadakan ujian ulangan bagi siswa yang dinyatakan tidak lulus. Hal ini menjadi beban siswa yang akan menghadapi ujian. Tidak sedikit siswa yang mengaku stress sebelum menghadapi UAN. Tetapi pada saat menjelang berlangsungnya UAN pemerintah akan mengadakan ujian ulang bagi siswa yang belum lulus hal ini karena banyak protes dari masyarakat. Terjadi fenomena yang menarik setelah ada pengumuman UAN, banyak siswa yang bagus nilai ulangan harian dan ujian semester bahkan menjadi juara kelas tetapi dinyatakan tidak lulus (sungguh hal yang tidak disangka) tapi itulah kebijakan.

Pada tahun 2005 pergantian nama UAN diganti dengan UN (Ujian Nasional) dengan menaikkan nilai standar kelulusan dari 4,01 menjadi 4,25. Secara nasional nilai rata-rata hasil UN tahun ajaran 2004/2005 mengalami kenaikan yang signifikan dibandingkan hasil UAN tahun 2003/2004. Hasil ini membuktikan bahwa keputusan pemerintah untuk meningkatkan mutu pendidikan melalui UN dapat sedikit terwujud. Keputusan pemerintah ini tidak selamanya salah dan

terlalu memaksa siswa untuk mencapai standar kelulusan yang ditetapkan, asalkan siswa didukung dengan kualitas pendidikan itu sendiri, tentunya pada pihak pendidik dalam mengajar dan fasilitas media pembelajaran yang mendukung. Sehingga siswa menjadi lebih mudah menghadapi UN.

Bulan Mei menjadi suatu pilihan dalam pelaksanaan UN dalam tahun ajaran 2005/2006 dengan ketentuan standar kelulusan 4.50 dengan tidak memberlakukan ujian ulang bagi yang tidak lulus, tetapi melalui paket B dan C untuk SMP, SMA DAN setingkatnya.

UN pada ajaran 2006/2007 yang dilaksanakan bulan April terjadi beberapa perubahan, terutama tentang standar kelulusan. Badan Standar Nasional Pendidikan (BSN) sebagai Lembaga Independen penasejahteraan Ujian Nasional melalui Menteri Pendidikan Nasional bapak Bambang Sudibyo dalam rapat kerja komisi X DP RI di Jakarta, mengatakan bahwa pengawasan UN dilakukan oleh pengawas yang Independen dengan melibatkan dosen Perguruan Tinggi dan Widyaiswara dari Lembaga Penjamin Mutu Pendidikan (LPMP)

Selain itu Depdiknas juga akan menerjunkan aparat Inspektorat Jenderal kelengkapan menjelang dan selama UN berlangsung. Bahkan Buku Prosedur Operasi Standar (POS) akan memuat tata tertib yang lebih ketat yaitu sanksi akan diberikan terhadap peserta ujian, pengawas. Guru dan pihak-pihak tertentu lain yang melanggar tata tertib, dengan ancaman pidana bagi pelanggar pidana dalam pelaksanaan UN. Apakah memang sebegitu parahnya pelaksanaan pendidikan di Indonesia sehingga harus diancam dengan hukuman pidana, ataukah manusianya itu sendiri. Inilah menjadi sebuah pekerjaan rumah (PR) bagi generasi muda penerus bangsa.

Untuk standar kelulusan harus memiliki nilai rata-rata dari seluruh mata pelajaran yang diujikan minimal bernilai 5,00 dengan nilai tiap mata pelajaran tidak ada nilai dibawah 4,25. Kalaupun memiliki nilai 4,00 pada salah satu mata pelajaran yang diujikan, nilai dua mata pelajaran lainnya yang diujikan harus bernilai 6,00. Sedangkan di tingkat SMK

harus menggunakan ujian kompetensi. Semakin ruwet saja standar kelulusan tahun 2007, namun pemerintah merasa standar ini lebih luwes karena ada beberapa kategori ini yang dinyatakan lulus. Namun tidak akan diadakan ujian ulang lagi bagi siswa yang tidak lulus berarti mereka harus menempuh ujian paket B dan C

Selain itu pada tahun ini nilai kelulusan disertai dengan predikat kelulusan yang digolongkan menjadi 3 yaitu:

- Predikat sangat baik: nilai rata-rata lebih besar atau sama dengan 8,5
- Predikat baik : nilai rata-rata 7,5 dan kurang dari 8,5
- Predikat cukup : nilai rata-rata kurang dari 7,5

Berdasarkan uraian diatas maka tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui apakah hasil ujian-ujian yang dilaksanakan di Sekolah mempunyai pengaruh secara signifikan terhadap hasil ujian nasional (sebagai ukuran standart mutu pendidikan). Nilai ujian apa yang memberikan pengaruh dominan terhadap nilai Kemudian mengukur besarnya keeratan hubungan antara variable-variabel yang terkait dan mencari model regresi yang cocok.

Atas bantuan dari salah satu mahasiswa tingkat akhir di program studi statistika yang bernama Samsul Rizal Mustapa dengan nomor mahasiswa 04.06.0082, diperoleh data yaitu berupa data hipotetis dari 107 siswa-siswi kelas III jurusan IPA Tahun Ajaran 2006 – 2007 di SMU Negeri 1 Limboto Kabupa-ten Gorontalo Propinsi Gorontalo. Data tersebut adalah nilai raport (mulai dari semester I sampai dengan semester VI), nilai try out, nilai ujian sekolah, nilai ujian praktek dan nilai ujian nasional.

Model yang digunakan untuk menjelaskan adanya hubungan antar variabel-variabel, adalah persamaan regresi dalam analisis regresi. Persamaan regresi (*regression equation*) merupakan salah suatu persamaan matematis yang mendefenisikan hubungan antara dua variabel atau lebih. Persamaan regresi yang akan digunakan dalam membuat taksiran disebut persamaan regresi estimasi yaitu formula matematis yang me-

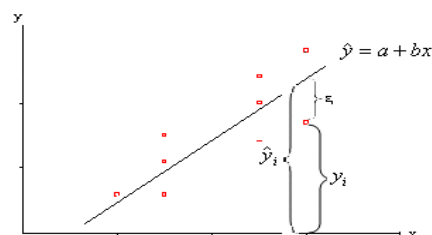
nunjukkan hubungan keterkaitan antara satu atau beberapa variabel nilai yang nilainya sudah diketahui (*known variable*) dengan satu variabel lain yang belum diketahui (Johnson, 1996).

Analisis regresi linier sederhana memanfaatkan hubungan antara satu variabel dependen dengan satu variabel independen dimana nilai rata-rata variabel tak bebas (*dependent*) merupakan fungsi linier dari variabel bebas (*independent*). Dalam analisis regresi, menentukan suatu persa maan regresi digunakan untuk menggam barkan pola atau fungsi hubungan yang terdapat antar variabel. Variabel yang akan diestimasi nilainya dikatakan variabel tak bebas (*dependent variabel*) dan biasanya di plot kan pada sumbu tegak y. Sedangkan variabel bebas (*independent variabel*) adalah variabel yang diasumsikan memberi kan pengaruh terhadap variasi variabel terikat dan biasanya diplotkan pada sumbu datar x.

Setiap pengamatan (x_i, y_i) dipandang sebagai model regresi dengan satu variabel independen dinyatakan sebagai: $y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n$

Dimana: y_i = harga variabel respon pada trial ke-i ; x_i = konstanta yang diketahui, yaitu harga variabel independen pada trial ke-i; β_0 dan β_1 = parameter yang tidak diketahui; ε_i = suku sesatan yang random dengan asumsi $\varepsilon_i \sim \text{IID } N(0, \sigma^2)$.

Persamaan diatas dipandang se bagai model persamaan regresi linier sederhana. Dengan menggunakan kecocokan garis regresi $\hat{y} = b_0 + b_1 x$, untuk setiap pasangan pengamatan akan memenuhi persamaan $y_i = b_0 + b_1 x_i + e_i$, dimana $e_i = y_i - \hat{y}_i$ disebut sisa yang memberikan galat dalam kecocokan model untuk data ke i.



Gambar 1. Estimasi garis regresi linier sederhana.

Misalkan b_0 dan b_1 ini sebagai penduga parameter β_0 dan β_1 . Dalam analisis regresi metode pendugaan untuk memperoleh nilai b_0 dan b_1 yang paling sering digunakan adalah metode kuadrat terkecil (LS), yang lebih populer dengan sebutan metode kuadrat terkecil biasa (*Ordinary Least Square/OLS*).

Dengan meminimumkan jumlah kuadrat galat (JKG) terhadap garis regresi, nilai b_0 dan b_1 persamaan (1) : (Walpole, R., 1995)

$$JKG = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \quad (1)$$

Penurunan terhadap nilai b_0

$$\frac{\partial(JKG)}{\partial b_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = n b_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{n b_0}{n} + \frac{b_1 \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

$\bar{y} = b_0 + b_1 \bar{x}$, Diperoleh nilai b_0 :

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (3)$$

Penurunan terhadap nilai b_1

$$\frac{\partial(JKG)}{\partial b_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i) x_i = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (4)$$

Nilai b_1 diperoleh dengan mensubstitusikan persamaan (3) ke persamaan (4) sbb:

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = (\bar{y} - b_1 \bar{x}) \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2$$

Sehingga nilai b_1

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (5)$$

$$\text{dimana: } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

b_0 = intersep

b_1 = kemiringan kurva linier

n = banyaknya pasangan data (Montgomery, 1992)

Analisis regresi linier berganda digunakan untuk memanfaatkan hubungan antara satu variabel dependen dengan beberapa ≥ 2 variabel independen, namun masih menunjukkan diagram hubungan yang linier.

Apabila y_i sebagai respon yang diamati pada nilai $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}$ dari k peubah bebas, maka tiap pengamatan ($x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{ki}, y_i$) memenuhi persamaan berikut :

$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i$ sebagai model populasi, untuk setiap $i = 1, 2, 3, \dots, n$ diestimasi dengan persamaan

$$y_i = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + \dots + b_k x_{ki} + e_i$$

Bila ε_i dan e_i masing-masing galat acak yang berkaitan dengan respon y_i , dengan menggunakan metode kuadrat terkecil untuk mencari penduga b_0, b_1, \dots, b_k maka diperoleh bentuk:

$$JKG = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{1i} - \dots - b_k x_{ki})^2 \quad (6)$$

Jika JKG diturunkan berturut-turut terhadap b_0, b_1, \dots, b_k dan disamakan dengan nol, maka persamaan normalnya :

$$n b_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki} = \sum_{i=1}^n y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{1i}^2 + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{1i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{2i} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{2i}^2 + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{2i} x_{ki} = \sum_{i=1}^n x_{2i} y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^n x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^n x_{ki} x_{1i} + \dots + b_k \sum_{i=1}^n x_{ki}^2 = \sum_{i=1}^n x_{ki} y_i$$

Penyelesaian dari sistem persamaan linier di atas, digunakan untuk memperoleh besaran nilai b_0, b_1, \dots, b_k .

Dari k-peubah bebas x_1, x_2, \dots, x_k dan dari n-pengamatan y_1, y_2, \dots, y_n dinyatakan dengan persamaan 7:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i \quad (7)$$

atau dinyatakan dalam bentuk matriks $y = X\beta + \varepsilon$ dimana;

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix}$$

Matriks X terbentuk sebagai : $A = X'X$ dan $g = X'y$, sehingga persamaan normal dapat dinyatakan dalam bentuk matriks, $Ab = g$ (8)

Bila matriks A tak singular, maka penyelesaian untuk koefisien regresi dapat dinyatakan sebagai:

$$b = A^{-1}g = (X'X)^{-1}X'y \quad \text{.....} \quad (9)$$

Model regresi tersebut diatas diperoleh dari *Ordinary Least Squares*, yaitu model regresi yang menghasilkan estimator linier tak bias yang terbaik. Kondisi ini akan terjadi jika dipenuhi beberapa asumsi yang biasa disebut uji asumsi klasik, yaitu yang pertama Regresi linear klasik mengasumsikan bahwa e_i didistribusikan secara normal dengan rata-rata $[E(e_i)] = 0$ dan variansi $[E(e_i)] = \sigma^2$, atau $e_i \sim N(0, \sigma^2)$. (Draper, 1992), (Walpole, 1995).

Jadi Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui apakah dalam model regresi variabel terikat dan variabel bebas keduanya mempunyai distribusi normal ataukah tidak. Sebab uji dilakukan agar memperoleh model regresi yang baik dan yang memiliki distribusi data normal, paling tidak mendekati normal. Banyak cara untuk menguji kenormalan data ini, salah satu cara termudah yaitu dengan melihat histogram data, yang membandingkan antara data observasi dengan distribusi yang mendekati distribusi normal. Dapat juga menggunakan uji Kolmogorov-Smirnov. Uji klasik kedua ini adalah Uji multi-kolinieritas, yaitu salah satu uji yang digunakan untuk menguji apakah di dalam model regresi

ditemukan adanya korelasi antar variabel-variabel independen. Model regresi yang baik seharusnya tidak terjadi korelasi. Jika variabel-variabel independen saling berkorelasi, maka variabel-variabel ini tidak ortogonal. Variabel ortogonal adalah variabel yang nilai korelasi antara sesama variabel-variabel independennya sama dengan nol.

Untuk mengetahui ada atau tidaknya multikolinieritas di dalam model regresi adalah (a).Nilai R^2 yang dihasilkan oleh suatu estimasi model regresi empiris sangat tinggi, tetapi ini secara individual variabel-variabel bebas jika terlalu banyak menjadi tidak signifikan mempengaruhi variabel terikat. (b). Jika antara variabel bebas ada korelasi yang cukup tinggi (umumnya di atas 0,90), maka akan menunjukkan adanya multikolinieritas. Hal ini tidak adanya korelasi yang tinggi antar variabel bebas tidak berarti bebas dari multikolinieritas. Multikolinieritas dapat disebabkan karena adanya efek kombinasi dua atau lebih variabel bebas. Multikolinieritas dapat dilihat dari nilai *tolerance* dan *variance inflation factor* (VIF). Nilai *tolerance* yang rendah sama dengan nilai VIF tinggi ($VIF=1/tolerance$) dan menunjukkan adanya kolonieritas yang tinggi. Nilai cutoff yang umum dipakai adalah nilai *tolerance* 0,10 atau sama dengan nilai VIF di atas 10.(Ghozali, 2002),(Hair, 1995)

Heteroskedastisitas ini merupakan salah satu uji untuk melihat apakah dalam model regresi terjadi ketidaksamaan variansi dari residual satu pengamatan ke pengamatan yang lain. Jika variansi dari residual satu pengamatan ke pengamatan yang lain tetap, maka disebut homoskedastisitas, dan jika berbeda disebut heteroskedastisitas. Mencari model regresi yang baik jika tidak terjadi heteroskedastisitas. Cara untuk melihat adanya heteroskedastisitas:

- Melihat grafik plot antara nilai prediksi variabel terikat (ZPRED) dengan residualnya (SRESID). Ada tidaknya heteroskedastisitas dapat dilakukan juga dengan melihat ada tidaknya pola tertentu pada grafik scatterplot antara SRESID dan ZPRED dimana sumbu Y adalah Y yang telah diprediksi dan sumbu X adalah residual (Y prediksi –

Y sesungguhnya) yang telah distudenti zed. Jika ada pola tertentu, seperti titik-titik yang ada membentuk pola tertentu yang teratur (bergelombang, melebar kemudian menyempit) maka mengindikasikan telah terjadi heteroskedastisitas. Jika tidak ada pola yang jelas, dan titik-titik menyebar di atas dan di bawah angka 0 pada sumbu Y maka tidak terjadi heteroskedastisitas.

- Menggunakan Uji Glejser ini, menggunakan untuk membuat regresi nilai absolut residual terhadap variabel bebas menggunakan formula sbb :

$$|U_t| = \alpha + \beta X_t + v_j \quad (\text{Ghozali, 2002})$$

Gejala heteroskedastisitas ditunjukkan oleh koefisien regresi dari variabel independen terhadap nilai absolut residunya (e). Jika nilai probabilitasnya lebih besar dari nilai α (0,05), maka dipastikan tidak mengandung unsur heteroskedastisitas. (Suliyanto, 2005)

Autokorelasi merupakan gangguan pada fungsi regresi yang berupa korelasi diantara faktor gangguan. Autokorelasi terjadi jika ada korelasi nyata antara e_i dengan e_j , sehingga mengakibatkan $\text{cov}(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ untuk $i \neq j$ tidak berlaku lagi. Adapun akibat dari adanya korelasi serial ini terhadap penaksiran regresi adalah :

- Varian residual (*error term*) akan diperoleh lebih rendah dari semestinya dan akan meninggikan R^2 .
- Pengujian hipotesis dengan menggunakan *t-statistik* dan *F-statistik* akan menyesatkan.

Uji mengenai auto-korelasi bisa menggunakan Uji Durbin-Watson karena uji ini bisa digunakan pada sembarang sampel besar maupun kecil. Pengujian terhadap nilai uji Durbin-Watson dengan sebaran nilai auto-korelasi dinyatakan dalam Tabel 1:

Tabel 1. Sebaran Nilai Autokorelasi

Durbin Watson	Kesimpulan
Kurang dari 0,697	Ada Autokorelasi
0,697 s.d. 1,641	Tanpa Kesimpulan
1,641 s.d. 2,359	Tidak ada Autokorelasi
2,359 s.d. 3,303	Tanpa Kesimpulan
Lebih dari 3,303	Ada Autokorelasi

Formula Durbin Watson dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}; t = \text{waktu.}$$

Jika ternyata uji autokorelasi tidak terpenuhi, maka untuk menghilangkan pengaruh autokorelasi dengan memasukan *lag* variabel dependennya ke dalam model regresi. Sedangkan untuk menguji apakah *Error term* e_t termasuk dalam *autocorrelated* atau *non-autocorrelated* digunakan uji Durbin-Watson. (Algifari, 2000)

Dalam model regresi berganda uji koefisien beta dilakukan untuk menentukan variabel manakah yang secara parsial paling dominan terhadap struktur pendanaan, terhadap model regresi berganda yang diperoleh sebelumnya. Uji koefisien beta ini dilakukan terhadap variabel independen dan variabel yang paling dominan adalah variabel yang memiliki nilai koefisien beta yang terbesar. (Suliyanto, 2005)

PEMBAHASAN

Dengan mengambil nilai ujian nasional sebagai variabel *dependent*, sedangkan variabel *independent* meliputi : rata-rata nilai raport pada semester I s/d VI, rata-rata nilai try out, nilai ujian sekolah, dan nilai ujian praktek, diperoleh statistik deskriptif disajikan pada Tabel 2 berikut ini:

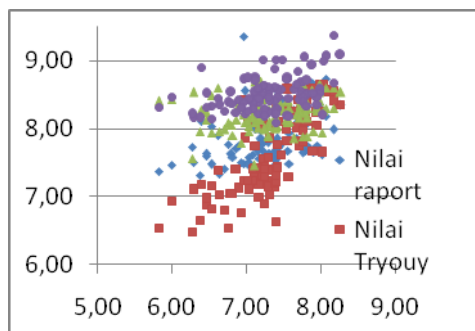
Tabel 2. Descriptive Statistics: UAN, Nilai Raport, Tryout, Ujian sekolah, dan Ujian Praktek.

Variable	N	Min	Max	Mean	Std. Dev
UAN	107	5,82	8,27	73,3090	0,49551
Nilai Raport	107	4,67	8,67	6,9907	1,03149
Nilai Tryout	107	6,47	8,65	7,6469	0,58566
Nilai Ujian Sekolah	107	7,45	8,68	8,2119	0,22696
Nilai Ujian Praktek	107	8,08	9,37	8,5104	0,24952
Valid N (listwise)	107				

Penyebaran data kemajuan siswa yang terdiri atas nilai raport, nilai try-out, dan nilai ujian akhir sekolah serta nilai praktek terhadap nilai UAN dapat dilihat seperti pada Gambar 2.

Untuk mendapatkan model regresi ini dengan estimator tak bias yang terbaik menggunakan metode kuadrat terkecil, maka dilakukan uji asumsi klasik, yang terdiri atas uji normalitas, uji multikolinier dan uji korelasi.

Uji normalitas data dilakukan menggunakan alat bantu software Minitab, yang hasilnya dapat diringkas dalam Tabel 3, dengan memilih test Anderson-Darling, test Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk),



Gambar 2. Sebaran Data Kemajuan Siswa

test Kolmogorov-Smirnov dan melihat grafik histogram dari masing-masing data. Tabel 3 tersebut menunjukkan ringkasan hasil uji kenormalan untuk data Ujian Nasional (UAN), rata-rata nilai Raport, rata-rata nilai Tryout, rata-rata nilai Ujian Sekolah, dan rata-rata nilai Ujian Praktek.

Dari Tabel 3 memberikan petunjuk adanya kenormalan data. Untuk data UAN dinyatakan terdistribusi normal dengan Mean=7,33093 dan Standard deviasi = 0,495515, untuk data Raport terdistribusi normal dengan Mean=7,85402 dan Standard deviasi=0,358503, untuk data Tryout terdistribusi normal dengan Mean=7,64692 dan Standard deviasi=0,585663, untuk data Ujian Sekolah terdistribusi normal dengan Mean=8,21187 dan standard deviasi= 0,226957, dan untuk data Ujian Praktek terdistribusi normal dengan Mean= 8,51037 dan Standard deviasi=0,249524.

Tabel 3. Hasil Uji Kenormalan Data

Jenis Kegiatan	NILAI UAN
Mean	7,33093
Standart Deviasi	0,495515
Anderson-Darling	A-square =0,730 P-Value=0,056
Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk)	R = 0,9873 P-Value (approx) = 0,0454
Kolmogorov-Smirnov	D+ = 0,036; D- =0,066; D=0,066 P-Value (approx) >0,15
Jenis Kegiatan	NILAI RAPORT
Mean	7,85402
Standart Deviasi	0,358503
Anderson-Darling	A-square =1,728 P-Value=0,000
Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk)	R = 0,9631 P-Value (approx) < 0,01
Kolmogorov-Smirnov	D+ =0,119; D- =0,065; D=0,119 P-Value (approx) <0,01
Jenis Kegiatan	NILAI TRYOUT
Mean	7,64692
Standart Deviasi	0,585663
Anderson-Darling	A-square =1,958 P-Value=0,000
Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk)	R = 0,9792 P-Value (approx) < 0,01
Kolmogorov-Smirnov	D+ =0,124; D- =0,104; D=0,124 P-Value (approx) <0,01
Jenis Kegiatan	UJIAN SEKOLAH
Mean	8,21187
Standart Deviasi	0,226957
Anderson-Darling	A-square =0,345 P-Value=0,479
Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk)	R = 0,9916 P-Value (approx) >0,100
Kolmogorov-Smirnov	D+ =0,038; D- =0,037; D=0,038 P-Value (approx) >0,15
Jenis Kegiatan	UJIAN PRAKTEK
Mean	8,51037
Standart Deviasi	0,249524
Anderson-Darling	A-square =1,618 P-Value=0,000
Ryan-Joiner (Similar to Shapiro Wilk)	R = 0,9722 P-Value (approx) <0,01
Kolmogorov-Smirnov	D+ =0,099; D- =0,060; D=0,099 P-Value (approximate) < 0,01

Uji multikolinier dilakukan untuk memperoleh model regresi yang baik, yaitu suatu model yang tidak memuat adanya korelasi antara variabel-variabel independen (bebas). Menggunakan alat bantuan software Minitab diperoleh hasilnya sebagai berikut:

- Nilai $R^2 = 64.4\%$ atau nilai $R^2 \leq 90\%$ yang menunjukkan bahwa tidak ada

korelasi antar variabel independen. Maka di indikasikan tidak adanya multikolinieritas.

- Berdasarkan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa keempat variabel independen yang terdiri atas Nilai Raport, Nilai Tryout, nilai Ujian Sekolah dan Nilai ujian Praktek masing-masing memiliki nilai VIF (*variance inflation factor*) ≤ 10 , yang berarti tidak ada multikolinieritas antar keempat variabel independen.

Selanjutnya dilakukan Uji Heteroskedastisitas menggunakan pendekatan *glejser test*, diperoleh Output pada Tabel 4 yang menunjukkan bahwa tidak adanya heterokedastisitas pada keempat variabel. ini ditunjukkan oleh suatu nilai *Signifikan (sig)* dari keempat variabel independen lebih besar dari $\alpha = 0,05$.

Tabel 4. Hasil Pengujian Heteroskedastisitas Glejser Test

Mode	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	-0,414	0,668		-0,620	0,537
Nilai Raport	-0,005	0,017	-0,035	-0,307	0,760
Nilai Tryout	-0,071	0,039	-0,276	-1,827	0,071
Nilai Ujian Sekolah	-0,012	0,073	-0,019	-0,170	0,866
Nilai Ujian Praktek	0,151	0,078	0,252	1,949	0,054

a. Dependent Variable: ABRESID

Untuk melihat tidak adanya korelasi antara variabel independen terhadap variabel dependen dilakukan uji auto-korelasi. Menggunakan uji *durbin-watson*, diperoleh hasil pada Tabel 5 sbb:

Tabel 5. Model Summary (Durbin-Watson)-1

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0,867	0,751	0,742	0,25191	1,467

a. Predictors: (Constant), Nilai Raport, Nilai Yryout, Nilai ujian Sekolah, Nilai ujian praktek

b. Dependent Variable: Nilai Ujian Nasional

Nilai dari *durbin-watson* adalah =1,467 yang terletak antara 0 dan 1,604. Hal ini menunjukkan adanya autokorelasi. Salah satu cara untuk menghilangkan pengaruh autokorelasi tersebut adalah memasukkan *lag* pada variabel depen-

dennya. Setelah dilakukan penambahan variabel *lag_Y* ($Y =$ variabel tambahan) dan dilakukan uji *durbin-watson* yang kedua diperoleh Tabel 6 berikut ini:

Tabel 6. Model Summary (Durbin-Watson)-2

Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Durbin-Watson
1	0,895	0,802	0,792	0,22405	1,966

a. Predictors: (Constant), Nilai Raport, Nilai Yryout, Nilai ujian Sekolah, Nilai ujian praktek

b. Dependent Variable: Nilai Ujian Nasional

Setelah penambahan variabel *lag_Y* pada variabel dependennya diperoleh nilai *durbin-watson* = 1,966 yang sebelumnya sebesar 1,467. Hal ini menunjukkan tidak adanya korelasi antara variabel independen terhadap variabel dependen dan tidak adanya korelasi antara observasi dengan data observasi sebelumnya.

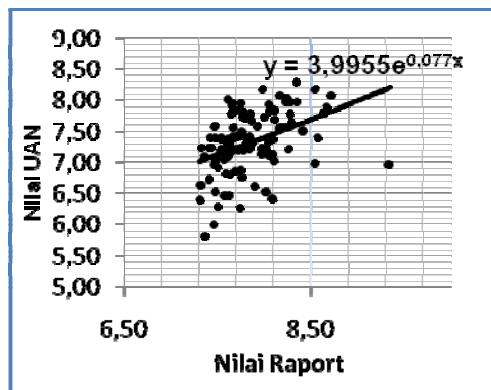
Uji asumsi klasik yang telah dilakukan diatas, bertujuan untuk memperoleh model regresi dengan estimator tak bias yang terbaik menggunakan metode kuadrat terkecil. Sehingga penggunaan analisis regresi dan korelasi cocok untuk data kemajuan siswa.

Model regresi dibentuk menggunakan alat bantu software Minitab dan software SPSS, yang keduanya saling melengkapi. Model yang diinginkan adalah model regresi yang baik, yaitu dengan cara membandingkan nilai Mean Square Error (MSE) dari masing-masing estimasi, pilih yang paling kecil.

Dari hasil analisis ini untuk data UAN versus Nilai Raport yang ditunjukkan pada Tabel 7, terdiri dari model yang diujikan, nilai MSE dan nilai R^2 . Dari hasil tersebut tampak bahwa nilai MSE terkecil terletak pada model Eksponensial.

Tabel 7 Hasil MSE dari Regression Analysis: UAN versus Nilai Raport

Model	Mean Square Error (MSE)	R-sq
Linear	0,208	16.2 %
Kuadratik	0,189	24.3 %
Kubik/Polinomial	0,191	24.4 %
Eksponensial	0,004	15.9 %



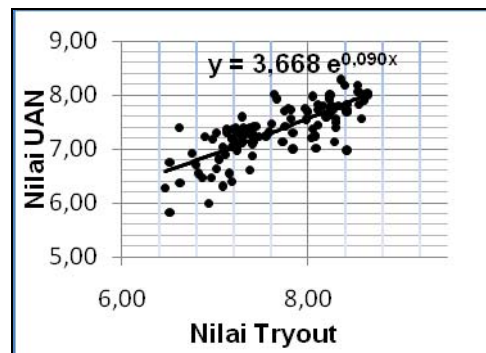
Gambar 3 Model Ekspensial Untuk Estimasi Data UAN versus Nilai Raport
UAN = 3,996*(e**(0,77*Nilai Raport))

Misalkan x_1 = Nilai Raport. Maka model regresi yang cocok untuk data UAN versus Nilai Raport adalah model regresi eksponensial. Dinyatakan sebagai berikut: $UAN = 3,996 (e^{(0,77(x_1))})$ dengan nilai MSE = 0,004. Persamaan regresi terbaik dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 3.

Hasil analisis untuk data UAN versus Nilai Raport ditunjukkan pada Tabel 8. Misalkan x_2 =Nilai Tryout. Maka model regresi yang cocok untuk data UAN versus Nilai Tryout adalah model regresi eksponensial.

Tabel 8 Hasil MSE dari Regression Analysis: UAN versus Nilai Tryout

	Mean Square Error (MSE)	R-sq
Linear	0,101	60.7 %
Kuadratik	0,099	60.6 %
Kubik/Polinomial	0,099	59.3 %
Ekspensial	0,002	58.2 %



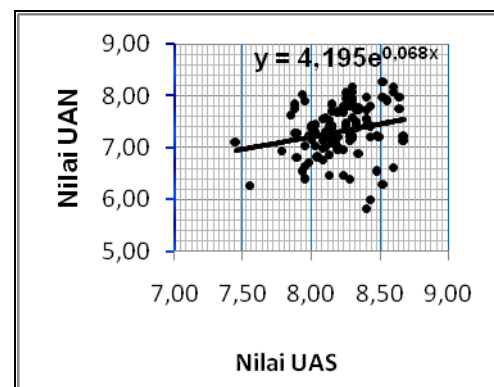
Gambar 4 Model Ekspensial Untuk Estimasi Data UAN versus Nilai Tryout
UAN = 3,668*(e**(0,090*Nilai Tryout))

Dari Table 8, nilai MSE terkecil adalah = 0,002 yang terdapat pada model regresi Ekspensial dengan persamaan terbaik Gambar 4. dinyatakan sebagai: $UAN=3,668(e^{(0,090(x_2))})$ dengan MSE = 0,002. Estimasi regresi terbaik dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 4.

Untuk data UAN versus Nilai Ujian sekolah hasil diperoleh nilai MSE yang dinyatakan dalam bentuk Tabel 9. Dari Tabel 9, nilai MSE terkecil adalah = 0,005 terletak pada baris terak-hir yang terdapat pada model regresi Ekspensial. Misalkan x_3 = nilai ujian sekolah. Maka model regresi Ekspensial ini terbaik. Dapat dinyatakan sebagai: $UAN = 4,195 (e^{(0,068(x_3))})$ dengan MSE = 0,005. Persamaan regresi terbaik dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 5.

Tabel 9 Hasil MSE dari Regression Analysis: UAN vs Nilai Ujian Sekolah

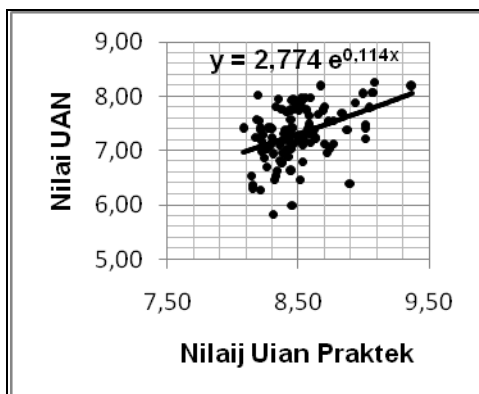
Model	Mean Square Error (MSE)	R-sq
Linear	0,234	5.5 %
Kuadratik	0,236	5.8 %
Kubik/Polinomial	0,238	5.8 %
Ekspensial	0,005	4.9 %



Gambar 5 . Model Ekspensial Untuk Estimasi Data UAN versus Nilai Ujian Sekolah
UAN = 4,195*(e**(0,068*Nilai Ujian Sekolah))

Tabel 10. Hasil MSE Regression Analysis: UAN vs Nilai Ujian Praktek

	Mean Square Error (MSE)	R-sq
Linear	0,204	17.5 %
Kuadratik	0,206	17.5 %
Kubik/Polinomial	0,207	17.9 %
Ekspensial	0,004	16.8 %



Gambar 6 Model Eksponensial Untuk Estimasi Data UAN versus Nilai Ujian Praktek UAN = 2,774*(e**(0,114*Nilai Ujian Praktek))

Hasil analisis untuk data UAN versus Nilai ujian praktek ini (Tabel 10), tampak bahwa nilai MSE terkecil terletak pada model Eksponensial.

Misalkan x_4 = nilai ujian praktek. Maka model regresi yang cocok untuk data UAN versus nilai ujian praktek adalah model regresi eksponensial. Dinyatakan sebagai:
UAN= 2,774(e^{0,114(x₄)}), dengan nilai MSE= 0,004. Persamaan regresi terbaik dinyatakan dalam bentuk grafik Gambar 6.

Misal x_1 = nilai raport , x_2 = nilai tryout, x_3 = nilai ujian sekolah, x_4 = nilai ujian praktek ini, Lag_Y= Variabel tambahan untuk menghilangkan pengaruh outokorelasi. Secara simultan, hasil analisis data, diperoleh estimasi model regresi berganda setelah ada tambahan variabel dinyatakan sebagai $\hat{Y} = 4,985 + 0,182(x_1) + 0,370(x_2) - 0,261(x_3) - 0,280(x_4) + 0,376(\text{lag}_Y)$

Tabel 11. Hasil Uji Koefisien Beta

Mode	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error	Beta		
(Constant)	4,985	1,068		4,668	0,000
Nilai Raport	0,182	0,026	0,380	6,953	0,000
Nilai Tryout	0,370	0,065	0,439	5,678	0,000
Nilai Ujian Sekolah	-0,261	0,110	-0,119	-2,369	0,020
Nilai Ujian Praktek	-0,280	0,131	-0,135	-2,137	0,035
LAG_Y	0,376	0,072	0,364	5,263	0,000

a. Dependent Variable: Nilai Ujian Nasional

Uji koefisien beta ini dilakukan untuk menentukan variabel yang berpengaruh paling dominan terhadap nilai ujian nasional. Dari tabel 11 nilai koefisien beta untuk variabel nilai raport sebesar 0,380, nilai try out sebesar 0,439, nilai ujian sekolah sebesar -0,119, nilai ujian praktek sebesar -0,135, dan untuk variabel tambahan lag_Y sebesar 0,364. Berdasarkan uji beta ini diperoleh nilai koefisien beta yang paling besar ada pada nilai tryout. Maka dapat disimpulkan bahwa nilai tryout mempunyai pengaruh paling dominan terhadap nilai ujian nasional setiap siswa.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis data penelitian tersebut dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

Secara parsial, nilai ujian nasional dipengaruhi oleh (1). nilai raport dengan MSE = 0,004 dan $R^2 = 15,9\%$. (2). Nilai Tryout dengan MSE = 0,09931 dan $R^2 = 59,3\%$. (3). Nilai Ujian Sekolah dengan MSE = 0,235691 dan $R^2 = 5,8\%$. (4) Nilai Ujian Praktek dengan MSE = 0,09931 dan $R^2 = 59,3\%$.

Secara simultan diperoleh estimasi model regresi berganda setelah ada tambahan variabel untuk menghilangkan pengaruh outokorelasi. Dinyatakan sebagai $\hat{Y} = 4,985 + 0,182(\text{nilai raport}) + 0,370(\text{nilai tryout}) - 0,261(\text{nilai ujian sekolah}) - 0,280(\text{nilai praktek}) + 0,376(\text{lag}_Y)$ dengan \hat{Y} = nilai estimasi UAN dan lag_Y= Variabel tambahan.

Berdasarkan uji beta diperoleh bahwa nilai tryout mempunyai pengaruh paling dominan terhadap nilai ujian nasional setiap siswa, sebesar 0,439.

DAFTAR PUSTAKA

- Algifari (2000), *Analisis Regresi Teori, Kasus dan Solusi*, edisi 2, STIE YKPN, Yogyakarta.
- Ghozali, I., 2002, *Aplikasi Analisis Multivariate dengan Program SPSS*, Universitas Diponegoro, Semarang.
- Hair JF JR, Anderson RE, Tatham RL, Black WC ; 1995 ; "Multivariate Data Analisis With Readings" Fourth Edition, Prentice-Hall International Inc

- Johnson. R.A and Wichern,D.W (1996)
"Applied Multivariate Statistical
Analysis", Third Edition, Prenti-
ce-Hall of India, New Delhi
- Montgomery, D.C dan Peck, E.A, 1992,
"Introduction to Linier Regres-
sion Analysis" John Willey &
Sons. New York
- Suliyanto, 2005. *Analisis Data Dalam
Aplikasi Pemasaran*, cetakan
pertama. Ghalia Indonesia. Bo-
gor.

PENGARUH TEMPERATUR TEMPER TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN KETAHANAN KOROSI PADUAN Fe-1,52Al-1,44C

Ratna Kartikasari¹

¹ Jurusan Teknik Mesin STTNAS Yogyakarta

Masuk: 3 Maret 2009 , revisi masuk: 23 Juni 2009, diterima: 27 Juni 2008

ABSTRACT

On the basis of economic and lower density considerations, Fe-Al-C alloy could be a good candidate for replacing some of the conventional stainless steel. Wherein, Al is used to replace the expensive alloy element in conventional Fe-Cr-C system. The aim of the research is to investigate tempering temperature influence to mechanical properties and corrosion resistance of Fe-1,52Al-1,44C in the 3.5% NaCl solution. Fifty kilograms of Fe-Al-C were prepared from mild steel scrap, high purity aluminium, and Fe-C. The alloy was prepared in a high frequency induction furnace with alloying was done in the ladle. Optical microstructure, mechanical properties and corrosion rate were examined. The corrosion rate, were carried out with immersion method in 3.5% NaCl. The optical micrograph shows that as cast Fe-1,52Al-1,44C alloy has ferrite and pearlite microstructure and has tendency to become ferritic microstructure with encreasing tempering temperature. Maximum tensile strength and maximum hardness took placed after hardening that was respectively 74,44kg/mm² and 298,7 VHN. Maximum elongation was reached at 450°C tempering temperature. The result of corrosion testing showed that the alloy has decreasing corrosion rate with the increasing tempering temperature.

Keywords: Fe-Al-C Alloy, Conventional Stainless Steel, Tempering Temperature, Corrosion Resistance.

INTISARI

Paduan Fe-Al-C merupakan paduan baru kandidat pengganti baja tahan karat (*stainless steel*) konvensional, dimana unsur Al berperan menggantikan unsur mahal (Cr) pada *stainless steel* konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur temper terhadap sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C dalam larutan 3,5% NaCl. Bahan baku peleburan terdiri dari: *scrap* baja rendah Mn, Al murni dan Fe-C. Peleburan menggunakan dapur induksi frekwensi tinggi kapasitas 50 kg dengan pemaduan (*alloying*) di dalam *ladle*. Austenitisasi sampai temperatur 900°C dilanjutkan dengan *quenching* dalam media air. Proses temper dilakukan pada temperatur 250°C, 300°C, 350°C, 400°C dan 450°C. Pengujian yang dilakukan adalah foto struktur mikro, pengujian tarik, pengujian kekerasan dan pengujian korosi dalam media 3,5% NaCl dengan metoda kehilangan berat. Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai struktur ferit dan perlit, kecenderungan pembentukan struktur ferit terjadi dengan semakin tinggi temperatur temper. Kekuatan tarik maksimum terjadi setelah *hardening* yaitu sebesar 74,44kg/mm² dengan regangan tertinggi sebesar 31,3% setelah temper 450°C. Kekerasan tertinggi sebesar 298,7 VHN terjadi setelah *hardening*. Hasil pengujian korosi menunjukkan bahwa laju korosi paduan 1,26Al-1,05C *as cast* akan menurun dengan semakin tinggi temperatur temper.

Kata Kunci: Fe-Al-C, Baja Tahan Karat Konvensional, Temperatur Temper, Ketahanan Korosi.

PENDAHULUAN

Stainless steel (baja tahan karat) merupakan paduan berbasis besi (Fe)

dengan kadar cromium (Cr) paling sedikit 10,5% (Shackelford, 1992). Fe-Cr-C adalah paduan baja tahan karat jenis feritik

¹kartikafajar@yahoo.com

dimana Cr berperan terhadap ketahanan korosi sekaligus berfungsi sebagai penstabil struktur ferit (Leslie, 1983). Keunggulan paduan jenis ini ditentukan oleh keberadaan unsur Cr. Kekurangan yang dimiliki oleh *stainless steel* adalah terutama pada mahalnya biaya produksi. Karena Cr merupakan material strategis dan mahal di banyak negara, dimana 95% cadangan Cr dunia hanya terdapat di Afrika Selatan dan Zimbabwe.

Berdasar pada alasan ekonomi dan strategi maka diperlukan upaya untuk menemukan paduan baru yang dapat menggantikan *stainless steel* konvensional. Diantara sistim paduan yang paling menjanjikan dapat menggantikan peran paduan Fe-Cr-C adalah paduan Fe-Al-C, dimana unsur Al menggantikan unsur Cr (Tjong, 1986 dan Wang, 1988). Unsur aluminium (Al), diketahui keberadaannya di dunia sangat melimpah, yaitu merupakan unsur terbesar ketiga di bumi dan harganya relatif murah (Shackelford, 1992) dan proses produksinya relatif mudah (Frommeyer, 2000).

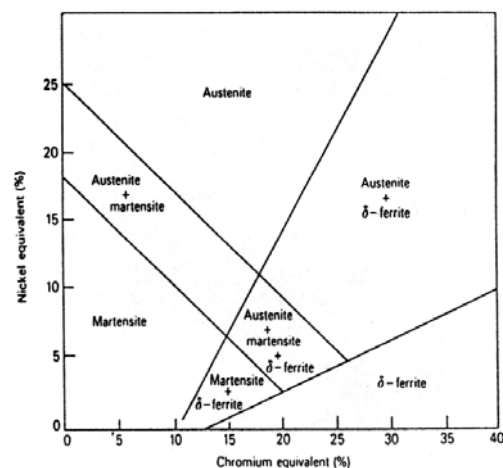
Paduan Fe-Al-C merupakan kandidat yang menjanjikan untuk menggantikan beberapa jenis *stainless steel* konvensional pada aplikasi temperatur medium sampai tinggi (Huang, 2006). Paduan Fe-Al-C feritik menunjukkan sifat-sifat fisik, mekanik dan teknologikal, ketahanan korosi dan oksidasi, dan biaya bahan baku yang rendah (Kobayashi, 2005). Paduan Fe-Al-C *lightweight steel* yang mengandung Al sampai 9% menunjukkan penurunan densitas hingga 10% lebih (Frommeyer, 2000). Sayangnya paduan Fe-Al-C pada temperatur ruang menunjukkan gejala rapuh dengan nilai ketangguhan yang rendah (Jablonska, 2006). Baligidad (1996) melaporkan bahwa penambahan karbon pada Fe-Al dengan kadar Al antara 8,5-16% akan menghasilkan paduan dengan kekuatan yang lebih tinggi dan *machinability* yang lebih baik (Baligidad, 1998). Paduan Fe-Al-C dikembangkan untuk aplikasi struktur pada temperatur sampai dengan 873K (Sikka et al., (1993) and Prakash et al., 1991),.

Mengingat Indonesia adalah salah satu negara dengan cadangan Al terbesar di dunia (*environmentalchemistry.com*, 2008), maka upaya untuk me-

ngembangkan paduan ini menjadi sangat mendesak. Apalagi kebutuhan industri dalam negeri akan bahan *stainless steel* konvensional masih dipenuhi dengan import.

Penelitian mempunyai tujuan untuk membuat paduan Fe-1,26Al-1,05C dengan modifikasi proses yang dapat dilaksanakan oleh IKM Pengecoran Logam, mempelajari sifat mekanik dan ketahanan korosi paduan Fe-1,26Al-1,05C. Untuk mengetahui pengaruh penambahan unsur dalam paduan biner terhadap fasa γ yang dihasilkan, dapat mengacu pada daftar periodik unsur-unsur (Leslie, 1983). Unsur-unsur yang berperan sebagai pembentuk struktur ferit disebut sebagai Cr equivalent dan unsur-unsur yang berperan sebagai pembentuk struktur austenit disebut sebagai Ni equivalent (Honeycombe, 1995) yang secara umum dirumuskan sebagai berikut :
Cr equivalent = (Cr) + 2(Si) + 1,5(Mo) + 5(V) + 5,5(Al) + 1,75(Nb) + 1,5(Ti) + 0,75(W)
Ni equivalent = (Ni) + (Co) + 0,5(Mn) + 0,3(Cu) + 25(N) + 30(C)

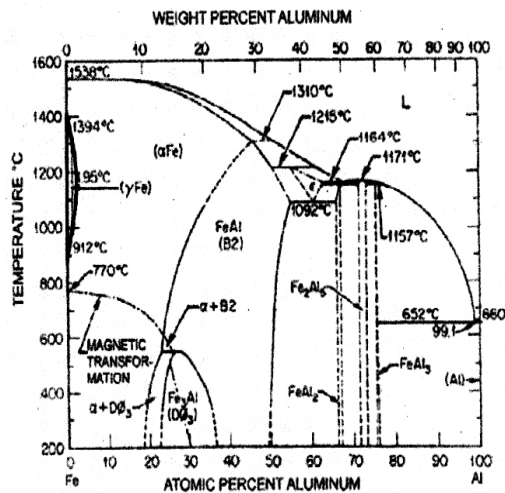
Hubungan antara Cr equivalent dan Ni equivalent digambarkan dalam diagram Schaeffler (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Schaeffler (Honeycombe, 1995)

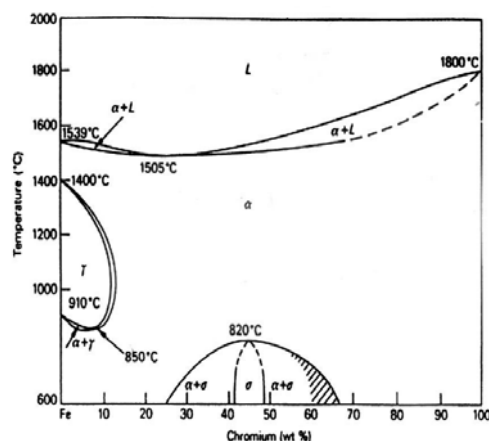
Unsur paduan yang mempunyai perilaku seperti Cr dalam sistim paduan biner Fe-Cr adalah Al. Diagram kesetimbangan Fe-Al (Gambar 2) memperlihatkan kemiripan dengan diagram kesetimbangan Fe-Cr (Gambar 3) Dari daftar periodik unsur-unsur, juga dapat diketahui

bahwa Al mempunyai *gamma loop* (loop γ) seperti Cr.



Gambar 2. Diagram Kesetimbangan Fe-Al (Chao, 2002)

Kelarutan Al dalam γ -Fe sangat kecil dibandingkan Cr (Avner, 1987). Hal ini berarti, Al hanya dapat ditambahkan dalam jumlah yang sangat terbatas.



Gambar 3. Diagram kesetimbangan Fe-Cr (Leslie, 1983)

Aluminium adalah logam reaktif yang dapat membentuk lapisan pelindung aluminium-oksida. Lapisan tersebut mempunyai sifat yang sangat stabil dalam lingkungan netral dan asam, tetapi rentan dalam lingkungan alkali (Fontana, 1988). Paduan Al (*Al alloy*) telah secara luas digunakan dalam industri, tetapi dalam *stainless steel* konvensional, Al hanya ditambahkan dalam jumlah yang ke-

cil. Sistem paduan Fe-Al bersifat feritik pada semua temperatur (setara dengan Fe-Cr *stainless steel*). Fasa γ muncul dalam area yang sangat sempit pada penambahan Al dalam jumlah kecil ($\pm 2\%$) mulai temperatur 912°C sampai dengan 1394°C.

Pada proses pendinginan lambat fasa γ dalam sistem paduan yang mengandung Al rendah dan C tinggi akan terdekomposisi membentuk fasa eutektik. Sedangkan pada pendinginan cepat akan tertransformasi membentuk struktur martensit.

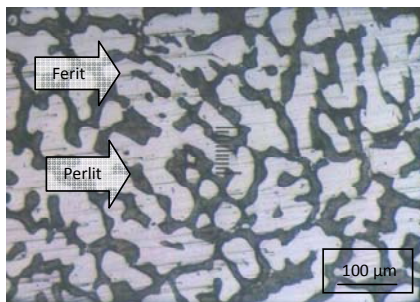
Menurut Davidson dkk. (1988), penambahan Mn pada *stainless steel* konvensional dalam jumlah besar akan menurunkan sifat-sifat paduan, tetapi dalam jumlah yang sedang akan mempunyai pengaruh yang menguntungkan, karena Mn akan berinteraksi dengan S membentuk Mn-sulfida yang akan berperan dalam meningkatkan ketahanan korosi, khususnya terhadap *pitting corrosion*. Sistem paduan Fe dengan 28-30% Mn, 8-10% Al dan 0,8-1% C di atas 850°C mempunyai struktur austenit lewat jenuh, dengan pemanasan 350-700°C struktur austenit akan terdekomposisi membentuk fasa κ (Fe,Mn)₃AlC yang akan meningkatkan kekuatan luluh secara signifikan.

Peleburan menggunakan dapur induksi frekwensi tinggi kapasitas 50 kg milik POLMAN Ceper, Klaten, Jawa Tengah dengan *alloying* dilakukan di dalam *ladle*. Bahan baku peleburan menggunakan scrap baja rendah Mn, aluminium murni dan Ferro-karbon. Coran dibuat dalam bentuk ingot dengan ukuran 3cm x 3cm x 20cm. Target komposisi yang akan dicapai adalah Fe-1,52% berat Al-1,44% berat C. Perhitungan komposisi secara manual dilakukan dengan *material balance* dengan toleransi kehilangan Al sebesar 15%. Ingot paduan Fe-Al-C selanjutnya dipotong menggunakan *meta-cut* dibentuk menjadi specimen uji tarik berdasarkan standard JIS 2201, specimen uji kekerasan dan specimen uji korosi dengan ukuran diameter 14 mm tinggi 10 mm. Proses *heat treatment* terdiri dari *hardening* yaitu pemanasan sampai temperatur 900°C selama 1 jam dilanjutkan *quenching* dalam media air.

Proses temper dilakukan pada temperatur 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C selama 1 jam. Uji korosi dilakukan dengan metoda kehilangan berat berdasar standar ASTM G31.

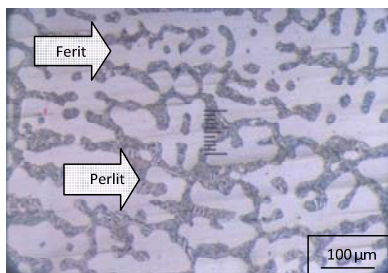
PEMBAHASAN

Gambar 4 menunjukkan struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast*, terlihat bahwa struktur paduan terdiri dari ferit dan perlit yang terdistribusi merata dengan jumlah yang hampir seimbang. Terlihat adanya pola dendritik dalam jumlah yang sangat kecil. Perubahan yang mencolok terjadi setelah austenitisasi pada temperatur 900°C.



Gambar 4. Struktur mikro paduan paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast*

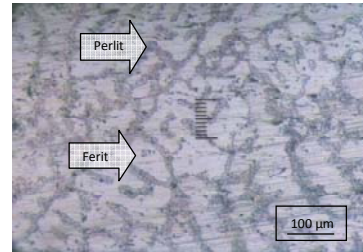
Struktur ferit mendominasi dengan ukuran butir yang besar-besaran sedangkan struktur perlit tersisa sedikit di bagian batas butir ferit (Gambar 5).



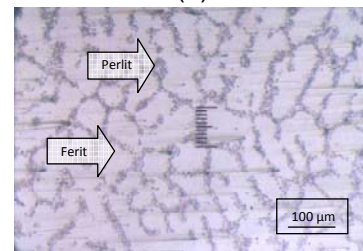
Gambar 5. Struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah hardening 900°C

Struktur perlit semakin berkurang dengan semakin tinggi temperatur temper dan pada temperatur temper 450°C struktur ferit hampir sempurna (gambar 6). Hal ini membuktikan peran Al sebagai

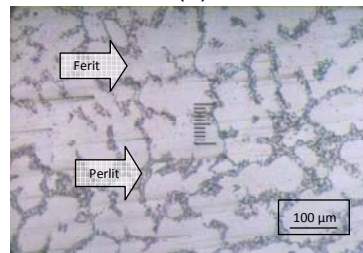
penstabil struktur ferit pada paduan Fe-1,52Al-1,44C.



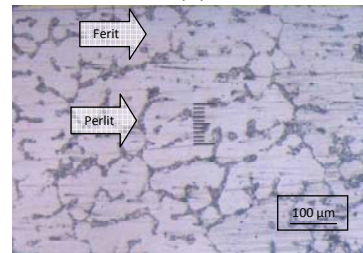
(a)



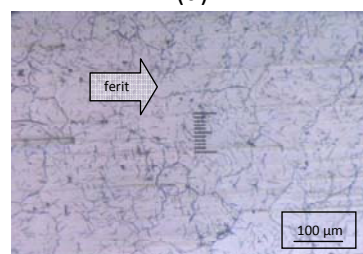
(b)



(c)



(d)

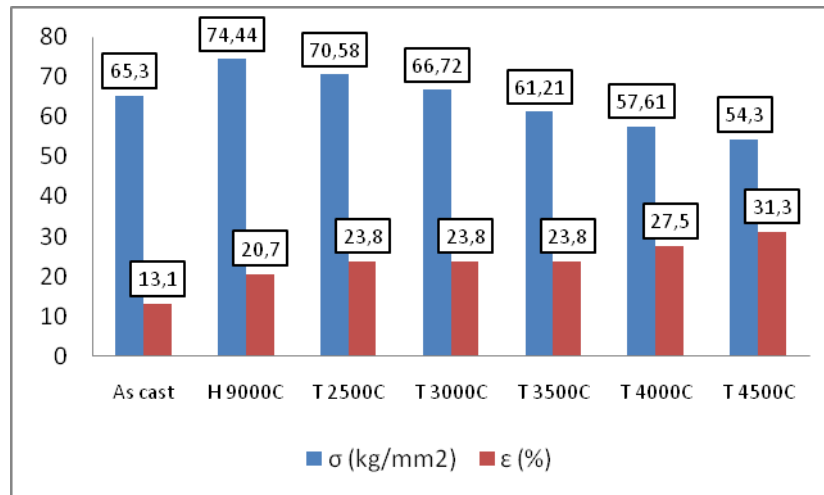


(e)

Gambar 6. Struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C (a) temper 250°C, (b) temper 300°C, (c) temper 350°C, (d) temper 400°C, (e) temper 450°C

Hasil uji kekuatan tarik menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C mempunyai kekuatan tarik sebesar 65,3 kg/mm² (Gambar 7) dengan regangan (ϵ) sebesar 13,1%. Nilai kekuatan tarik ini cukup tinggi jika dibandingkan dengan kekuatan tarik baja tahan karat feritik Fe-Cr-C yaitu berkisar 45-50 kg/mm² (AZ-

oM™.com, 2009). Hal ini disebabkan kadar karbon yang tinggi dan adanya senyawa intermetalik Fe-Al yang berperan dalam peningkatan kekuatan paduan. Akan tetapi diikuti dengan nilai regangan relatif sangat rendah.

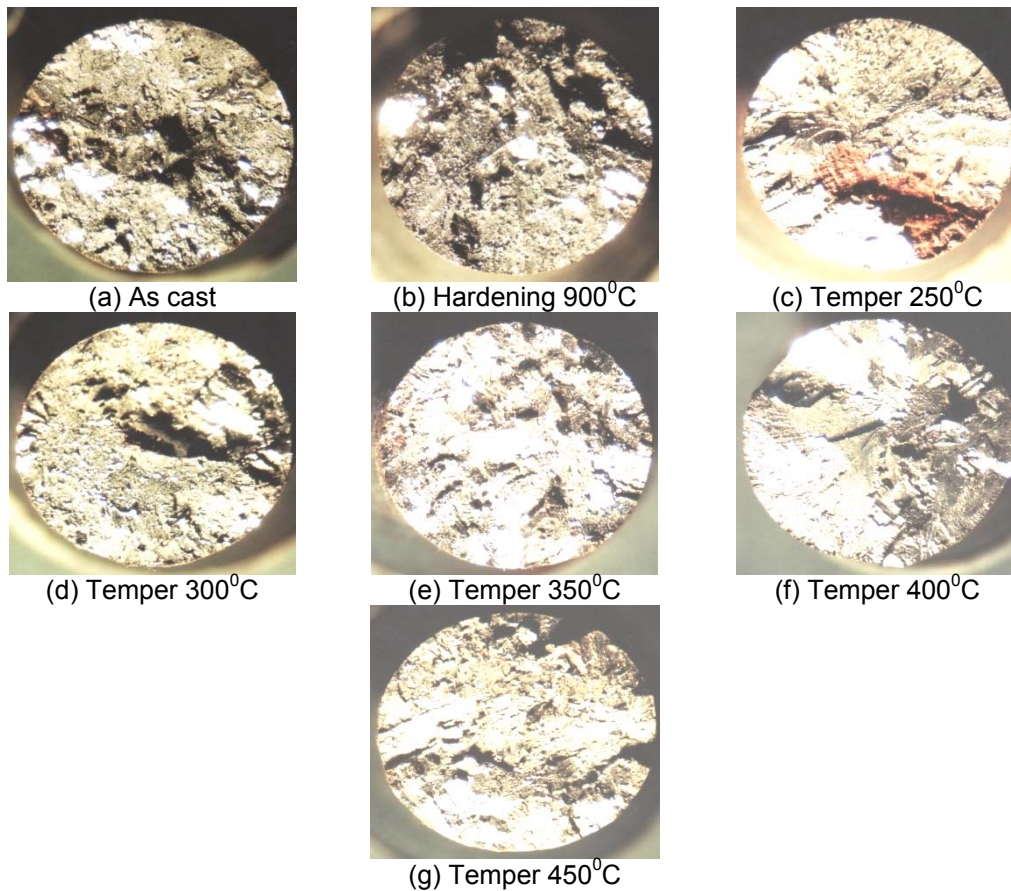


Gambar 7. Pengaruh temperatur temper terhadap kekuatan tarik dan regangan paduan Fe-1,52Al-1,44C

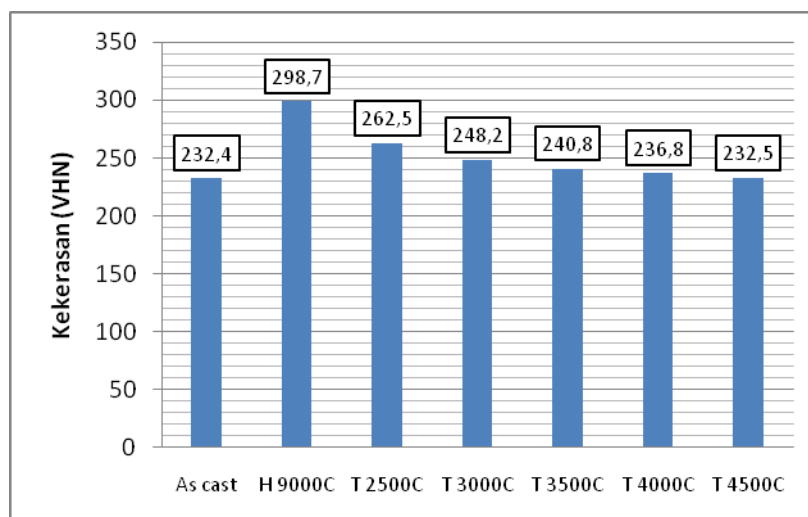
Setelah *hardening* terlihat kekuatan tarik meningkat menjadi 74,44kg/mm² yang diikuti dengan peningkatan regangan menjadi 20,7%. Fenomena ini disebabkan terjadinya perubahan struktur yang sangat mencolok dimana struktur ferit dengan ukuran yang besar lebih mendominasi dikelilingi struktur perlit dengan jumlah yang relatif lebih kecil. Pengurangan senyawa intermetalik Fe-Al setelah *hardening* berperan dalam peningkatan regangan. Proses temper akan menurunkan kekuatan. Semakin tinggi temperatur temper kekuatan tarik semakin menurun hingga mencapai nilai minimal sebesar 54,3kg/mm². Fenomena ini disebabkan semakin tinggi temperatur temper maka struktur paduan Fe-1,52Al-1,44C akan cenderung menjadi lebih feritik. Transisi getas-ulet paduan Fe-1,52Al-1,44C dapat dilihat dari permukaan patah

spesimen uji tarik pada Gambar 8. Dari gambar 8 (b) terlihat bentuk patahan getas tanpa ada bibir atau corong (cone), dan pada gambar 8 (c), (d) dan (e) terlihat adanya bibir patahan dan semakin memanjang pada gambar 8 (f) dan (g)

Gambar 9. menunjukkan bahwa paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai nilai kekerasan sebesar 232,4 VHN. Nilai kekerasan tertinggi terjadi setelah *hardening* yaitu sebesar 298,7 VHN. Semakin tinggi temperatur temper kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C semakin menurun hingga mencapai nilai minimal pada temper 450°C yaitu sebesar 232,5 VHN. Fenomena ini sesuai dengan fenomena yang terjadi pada struktur mikro paduan Fe-1,52Al-1,44C, dimana dengan kenaikan temperatur temper terjadi kecenderungan perubahan struktur menjadi lebih feritik.



Gambar 8. Foto makro permukaan patah spesimen uji tarik paduan Fe-1,52Al-1,44C



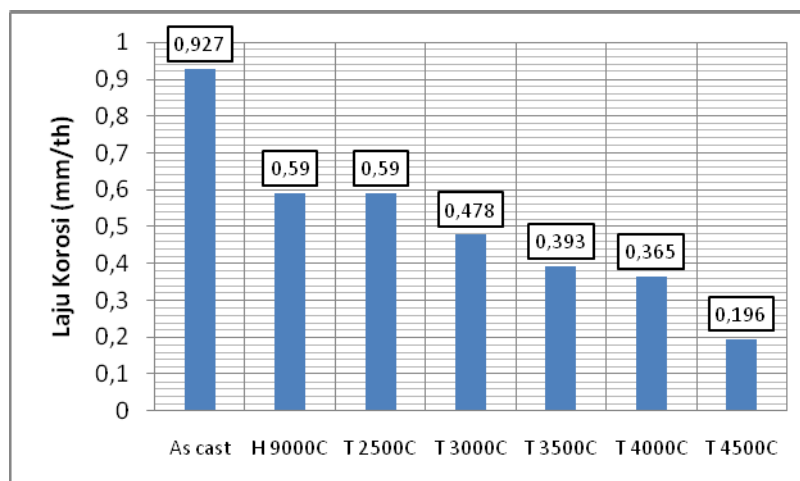
Gambar 9. Pengaruh temperatur temper terhadap kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C

Perhitungan laju korosi dilakukan dengan metoda kehilangan berat. Paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* mempunyai laju korosi sebesar 0,927 mm/th ter-

masuk katagori cukup baik berdasarkan Tabel 1 (tabel MPY) (Fontana, 1987). Laju korosi akan semakin menurun dengan naiknya temperatur temper dan

mencapai nilai minimal pada temper 450°C dengan laju korosi sebesar 0,196 mm/th. Jika dianalisis dari perubahan yang terjadi pada struktur mikro akibat proses *heat treatment* maka penurunan jumlah perlit yang terjadi cenderung menurunkan laju korosi pada paduan Fe-

1,52Al-1,44C Berdasarkan tabel 1 laju korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah temper pada temperatur 300°C sampai 450°C termasuk dalam katagori baik. Hasil tersebut dapat dilihat pada gambar 10 berikut.



Gambar 10. Pengaruh temperatur temper terhadap ketahanan korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C

Tabel 1. Tingkat ketahanan korosi berdasarkan harga MPY

Tingkat ketahanan korosi	MPY	Konversi kesatuan-satuan lain			
		mm/tahun	µm/tahun	nm/tahun	pm/tahun
Luar biasa	<1	<0.02	<25	<2	<1
Sangat baik	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10	1-5
Baik	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50	5-20
Cukup baik	20-50	0.5-1	500-1000	50-150	20-50
Kurang baik	50-200	1-5	1000-5000	150-500	50-200
Tidak dianjurkan	200+	5+	5000+	500+	200+

Sumber : Fontana, 1987

KESIMPULAN

Struktur paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* terdiri dari ferit dan perlit yang terdistribusi merata dan dalam jumlah yang sangat kecil struktur dendrit. Semakin tinggi temperatur temper struktur berubah menjadi lebih feritik. Kekuatan tarik paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* sebesar 65,3 kg/mm² dengan regangan sebesar 13,1%. Kekuatan tarik maksimal terjadi setelah *hardening* dan akan me-

nurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Nilai kekerasan paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* sebesar 232,4VHN. Nilai kekerasan tertinggi terjadi setelah *hardening* dan akan semakin menurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Laju korosi tertinggi terjadi pada paduan Fe-1,52Al-1,44C *as cast* yaitu 0,927 mm/th dan semakin menurun dengan semakin tinggi temperatur temper. Laju korosi paduan Fe-1,52Al-1,44C setelah temper pada temperatur 300°C-450°C termasuk kategori baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Avner, H.S., 1987, *Introduction to Physical Metallurgy*, McGraw-Hill Inc., Singapore.
- Baligidad, R.G., Prakash, U., Ramakrishna Rao, V., Rao, P.K., and Ballal N.B., 1996, Effect of Carbon Content on Mechanical Properties of Electroslag Remelted Fe₃-Al Based Intermetallic alloys, *Journal of Material Science and Teschnology*, Vol. 36, No. 12, 1453-1458.

- Baligheid, R.G., Prakash, U., and Radha Krishna, 1998, Effect of Carbon Addition on Structure and Mechanical Properties of Electroslag Remelted Fe-20wt.%Al alloy, *Journal of Material Science and Teschnology*, Vol. 249, No. 1-2, 97-102.
- Chao, Y.C., and Liu, C.H., 2002, Effect of Mn Content on the Microstructure and Mechanical Properties of Fe-10Al-xMn-1.0C Alloy, *Materials Transactions*, Vol. 3, No. 10, pp. 2635-2642.
- Davidson, R.M., DeBold, T. dan Johnson, M.J., 1988, *Corrosion of Stainless Steel, dalam ASM Handbook*, Metals Park, Ohio
- Environmentalchemistry.com, 2008, Environmental, *Chemistry & Hazardous Materials News, Careers & Resources*, Periodic Table of Elements.
- Fontana, G.M., 1988, *Corrosion Engineering*, 3th ed., McGraw Hill Inc., Singapore.
- Frommeyer, 2000, *Physical and Mechanical Properties of Iron-Aluminium-(Mn-Si) Lightweight Steels*, The 1999 ATS International Steelmaking Conference, Paris. Sec.4.
- Honeycombe, R.W.K. dan Bhadeshia, H.K.D., 1995, *Steel Microstructure and Properties*, 2nd ed., Edward Arnold, London.
- Huang, B.X., Wang, X.D., Rong, Y.H., Wang, L., and Jin, L., 2006, Mechanical Behavior and Martensitic Transformation of an Fe-Al-Si-Al-Nb Alloy, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 438-440, p. 306-311.
- Kobayashi, S., Zaefferer, S., Schneider, A., Raabe, D., and Frommeyer, G., 2005, Optimisation of Precipitation for Controlling Recrystallization of Wrought Fe3Al Based Alloys, *Intermetallics*, 13, 12-96-1303.
- Leslie, T., 1983, *The Physical Metallurgi of Steels*, John Willey and Sons Inc., New York.
- Prakash, U. Buckley, R.A., Jones, H. and Sellars, C.M., 1991, Structure and Properties of Ordered Intermetallics Based on the Fe-Al System, *ISIJ Int.*, vol 31, no. 10, 1113-1126.
- Shackelford, J.F., 1992, *Introduction to Material Science for Engineers*, 3th ed., McMillan Publishing Company, New York.
- Sikka, V.K., Viswanathan, S., and McKamey, C.G., 1993, in '*Structural Intermetallic*', (ed. R. Darolia et al.), Warrendale, PA, TMS. pp. 483-49.
- Tjong, S.C., 1986, Stress Corrosion Cracking behavior of the duplex Fe-10Al-29Mn-0.4C alloy in 20% NaCl solution at 100°C, *Journal of Material Science*, Vol. 21, Hal.: 1166-1170
- Wang, C. J. dan Duh, J. G., 1988, Nitriding in the high temperature oxidation of Fe-31Mn-9Al-6Cr alloy, *Journal of Materials science*, Vol. 23, Hal.: 769-775
- Wang, S., Zhang, H., dan Chen, S.J., 2000, Experiment on Fe-Al-Mn Deoxidizing and Alloying of Low-carbon Aluminium Killed Steel, *Journal Iron Steel Vanadium Titanium*, Vol. 21, No. 4., hal. 44-49.

PEMECAHAN SENYAWA KOMPLEKS DALAM KAOLIN DAN PENGAMBILAN ALUMINA DENGAN METODE KALSINASI DAN ELUTRIASI

Sukamta¹, Arif Budiman², Sutijan², Akhmad Bening W², Segar Budiharto²

¹Jurusan Teknik Kimia FTI – Institut Sains & Teknologi Akprind Yogyakarta

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, UGM Yogyakarta

Masuk: 2 Juni 2009, revisi masuk: 15 Juli 2009, diterima: 18 Juli 2009

ABSTRACT

Caolin or chines clay seldom used in industry, is formed of very little particles especially caolinite, i.e. a mixture of aluminum oxyde (Al_2O_3), silika oxyde (SiO_2) and water (H_2O). Each composition posseses a different characteristic. The article discusses a separation alumina from caolin which was from Semin, Klaten, the midle of Java, by calcination and elutriation methods. The calcination method is a separation one by breaking the bond between the substances using heat. In this case, it was used $800^\circ C$ because at this temperature it reached vitrification point and the complex bond was broken. The sample was dried under the sun, crushed, and screened by multiple screening i.e. 200 mesh, 230 mesh, 270 mesh, 325 mesh and 400 mesh. From the screening process it was gathered fraction between 325 and 400 mesh as the most one, therefor this farction was used as a sample. This one then was elutriated with fluid terminal velocity was varied. It was obtanied that the concentration of alumina incresed relatively high at the fluid velovity of 0.1278 cm/s and 0.2117 cm/s i.e. the alumina concentration increased of 5,2% dan 7,4% became 76.81%.

Keywords: Caolin, Silica, Alumina, Calcination, Elutriation

INTISARI

Kaolin atau china clay merupakan jenis batuan yang sering dimanfaatkan dalam perin-dustrian. Kaolin merupakan zat yang terbentuk dari partikel-partikel yang sangat kecil terutama dari mineral-mineral yang disebut Kaolinit, yaitu persenyawaan dari Oksida Alumina (Al_2O_3), dengan Oksida Silika (SiO_2) dan Air (H_2O). Masing – masing memiliki karakteristik yang berbeda. Dalam artikel ini dibahas pengambilan alumina dari batuan kaolin yang berasal dari kecamatan Semin kabupaten Klaten, Jawa tengah, dengan menggunakan metode kalsinasi dan elutriasi. Metode kalsinasi adalah metode pemisahan dengan memecah ikatan antar senyawa menggunakan panas, digunakan suhu $800^\circ C$ karena pada suhu ini tercapai titik vitrifikasi dan ikatan kompleks akan terpecah. Sampel batuan dikeringkan dengan sinar matahari, setelah itu diayak dengan ayakan bertingkat yaitu 200 mesh, 230 mesh, 270 mesh, 325 mesh dan 400 mesh. Dari proses pengayakan ini, fraksi butiran yang lolos 325 mesh dan tertahan 400 mesh adalah fraksi yang paling besar. Maka dari itu fraksi ini yang digunakan sebagai sampel. Sampel ini kemudian dielutriasi dengan variasi kecepatan terminal fluida. Dari sini didapatkan bahwa konsentrasi alumina bertambah relatif besar pada kecepatan aliran fluida 0,1278 cm/det dan 0,2117 cm/det dengan kenaikan kadar alumina masing-masing sebesar 5,2% dan 7,4% se-hingga kandungan alumina bertambah menjadi 76,81%.

Kata Kunci : Kaolin, Silika, Alumina, Kalsinasi, Elutriasi

PENDAHULUAN

Hampir semua tanah liat yang ada di Indonesia ini disebut "lempung". Lempung merupakan produk alam, yaitu hasil pelapukan kulit bumi yang sebagian

besar terdiri dari batuan *feldspatik* berupa batuan granit dan batuan beku. Hasil pelapukan tersebut berbentuk partikel-partikel halus dan sebagian besar dipindahkan oleh tenaga air, angin dan gletser

¹a.sukamta@gmail.com

ke suatu tempat yang lebih rendah dan jauh dari tempat batuan induk. Sebagian lagi tetap tinggal di lokasi dimana batuan induk berada. Alam memproduksi tanah liat secara terus menerus, sehingga tidak mengherankan jika tanah liat terdapat dimana-mana dan jumlahnya sangat besar.

Kaolin/*china clay* merupakan masa batuan yang tersusun dari material lempung dengan kandungan besi yang rendah, dan umumnya berwarna putih atau agak keputihan. Secara umum kaolin paling putih dibandingkan dengan semua jenis lempung karena kadar besinya relative kecil, kurang liat, dengan ketahanan api tinggi. Batuan alam yang mengandung kaolin dan feldspar mempunyai dua komponen utama yang sering digunakan di industri dan masyarakat yaitu alumina dan silika. Kaolin mempunyai rumus kimia $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ sedangkan feldspar mempunyai rumus kimia $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ atau $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. Satu partikel kaolin terdiri atas: 39% oksida alumina, 47% oksida silika, dan 14% air.

Kaolin akan terurai menjadi komponen-komponen oksidanya yaitu Al_2O_3 dan SiO_2 pada suhu $600\text{--}700^\circ\text{C}$ sedangkan untuk feldspar akan terurai menjadi komponen-komponen oksidanya yaitu K_2O , Al_2O_3 , dan SiO_2 pada suhu diatas 1100°C . Alumina adalah senyawa logam yang tahan terhadap sebagian besar asam dan korosi karena adanya gas (oksidasi). Selain itu sifat alumina yang keras, mempunyai konduktivitas panas yang besar, ulet dan dapat diperoleh dalam kemurnian yang tinggi membuat alumina banyak digunakan dalam industri seperti industri semen, pengelasan, keramik, bahan penyangga, senjata dll. Kebanyakan alumina diperoleh dari pemurnian bauksit dengan proses Bayer. Sedangkan silika adalah senyawa logam lain yang sering digunakan dalam industri kaca, serat optik, semikonduktor, campuran semen, pengemas makanan sampai untuk kegiatan medis. Oleh sebab itu proses pengambilan kaolin yang selanjutnya akan diambil senyawa oksida alumina dan silikanya memiliki prospek yang cukup cerah dan layak dikaji lebih lanjut mengingat nilai ekonomis alumina dan

silika murni yang jauh lebih tinggi dibandingkan jika masih terkandung dalam batuan alam. Karakteristik alumina dan silika, masing-masing dijabarkan ke dalam tabel 1.

Selanjutnya artikel ini membahas pengambilan alumina dari batuan tersebut. Alumina dalam batuan ini tergabung dalam senyawa kompleks kaolinite dengan silika bebas (quartz) sebagai impuritisnya. Metode pemurnian dapat dilakukan dengan berbagai macam cara. Kali ini dengan menguraikan senyawa yang ada dalam kaolin. Dalam kaolin tersebut alumina memiliki ikatan dengan silika, dan bila kaolin tersebut akan diuraikan, ikatan tersebut harus dipecah terlebih dahulu agar menjadi alumina bebas tanpa ikatan. Cara pemecahan ikatan tersebut adalah dengan pemanasan dan disebut sebagai kalsinasi. Pemecahan ini biasanya dilakukan pada senyawa kompleks. Dengan pemanasan akan terjadi reaksi zat padat, pengkristalan dan terjadi peleburan ini sehingga ikatan akan terlepas. Kalsinasi dilakukan pada suatu bahan untuk memutus ikatan molekul antar senyawa pada bahan tersebut. Metode ini dilakukan dengan menggunakan oven pada suhu tinggi.

Tabel 1. Karakteristik bahan silika dan alumina

Komponen	Silika	Alumina
Nama lain	Silikon dioksida, <i>Quartz sand</i>	<i>Calcined alumina reactive</i>
Rumus	SiO_2	Al_2O_3
Massa molar	60.1 g/mol	101,94 g/mol
Kenampakan	putih	putih
Densitas	2.2 g/cm ³ , padat	3.78g/cm ³ , padat
Hardness	6–7	9
Kelarutan di air	0.012 g / 100g air	-
Titik leleh	1650 (± 75) °C	2072 °C
Titik didih	2230 °C	2980 °C
Kristalografi	tetrahedral	heksagonal

Proses kalsinasi dilakukan untuk melepas ikatan senyawa kompleks dalam kaolin tersebut. Bahan yang akan dipecah adalah senyawa kompleks kaolin $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ menjadi $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Proses ini juga dimaksudkan untuk menjaga stabilitas termal kaolin dan untuk memperbesar pori-pori permukaan-

nya. Suhu kalsinasi yang lazim digunakan berkisar antara 200-800°C. Agar senyawa kompleks dalam kaolin dapat terpecah harus melalui proses pembakaran dengan suhu melebihi 600°C. Setelah melalui suhu tersebut kaolin akan mengalami perubahan menjadi suatu mineral yang padat, keras dan permanen, perubahan ini disebut *Ceramic Change*. Kaolin yang dibakar kurang dari 600°C belum mencapai titik kematangan keramik. Kematangan keramik atau vitrifikasi adalah kondisi keramik yang telah mencapai suhu kematangan secara tepat tanpa mengalami perubahan bentuk. Pada pembakaran di bawah suhu 800°C, mineral silika bebas (seperti mineral karbonat) akan berubah pula. Hal ini merupakan akibat dari terbakarnya semua unsur karbon (proses kalsinasi). Perubahan fisika terjadi di atas suhu 800°C yaitu pada saat bahan-bahan alkali bertindak sebagai 'Flux' atas silika dan alumina yang membentuk sebuah jaringan kristal (mulia) dan gelas yang mengikat bahan-bahan yang tidak dapat dilarutkan menjadi suatu massa yang kuat (pembakaran bis-kuit).

Bila kaolin dikalsinasi, maka akan terjadi beberapa perubahan penting (Mantell, 1951), yaitu:

Penyusutan, dari pemanasan akan menyebabkan menguapnya air, baik yang terikat maupun yang tidak terikat pada partikel padatan. Air terikat yang ikut menguap akan menyebabkan terjadinya rongga-rongga pada padatan. Rongga tersebut akan terisi oleh partikel padatan sehingga terjadi penyusutan. Perubahan porositas, rongga yang terbentuk tidak seluruhnya terisi oleh partikel padatan, akibatnya porositas padatan akan bertambah besar. Perubahan berat, akan terjadi penurunan berat padatan akibat hilangnya air dan zat-zat lain selama pemanasan.

Faktor-faktor tersebut mengakibatkan adanya perubahan fase pada kaolin karena hilangnya air dan zat-zat lain. Perubahan fase itu bergantung pada besarnya suhu pemanasan. Fase-fase beserta besarnya suhu yang diperlukan yaitu :

- Fase dehidrasi, pada suhu 20– 110°C air mekanis teruapkan dan suhu anta-

ra 150–600°C air kimia akan teruapkan (Norton, F.T., 1952).

- Fase oksidasi, terjadi pada suhu 350 – 800°C.
- Fase vitrifikasi, pada keadaan ini terjadi leburan dari bahan yang mudah melebur. Terjadi pada suhu 700 – 800°C.

Pada fase dehidrasi kekuatan akan naik, karena dengan teruapkannya air mekanis dan air kimia, maka letak butir-butir akan berdekatan dan menimbulkan kekuatan. Kekuatan bahan akan optimal pada titik vitrifikasi. Pada fase ini terjadi leburan dari bahan yang mudah melebur, dan leburan yang terjadi akan melarutkan bahan-bahan yang tidak melebur. Dengan pedoman ini diketahui bahwa silika akan melebur dan terlepas ikatannya pada fase vitrifikasi, sehingga digunakan suhu 800°C untuk suhu kalsinasi. Dengan digunakan suhu 800°C sebagai suhu pemanasan, karena silika memiliki titik peleburan di bawah alumina sehingga akan melebur, maka ikatan antar molekul dapat terlepas sehingga didapat alumina bebas dengan jumlah yang lebih besar.

Silika yang sudah terpecah ikatan senyawanya akan menjadi silika bebas. Dan silika bebas tersebut akan dipisahkan dengan proses elutriasi. Elutriasi menggunakan kecepatan linier fluida untuk melawan kecepatan terminal padatan, kecepatan terminal suatu padatan dipengaruhi oleh densitas, ukuran, dan konsentrasi padatan. Semakin besar ukuran dan densitas suatu padatan maka semakin besar kecepatan terminalnya. Sedangkan jika semakin besar konsentrasi suatu padatan maka kecepatan terminalnya akan semakin kecil karena faktor gaya interaksi antar partikel yang semakin besar. Dengan elutriasi tersebut silika dapat terpisah dari alumina.

Bahan yang masih berupa senyawa kompleks tersebut dimasukkan ke dalam oven pada suhu 800° C selama kurang lebih satu jam. Perubahan pertama yang terjadi dalam kaolin ketika dipanasi, ialah hilangnya air bebas. Kaolin mengandung silika bebas dalam bentuk pasir, kuarsa, flint dan kristal. Silika adalah subyek untuk merubah bentuk dan volume tanah liat pada suhu tertentu. Be-

berapa perubahan bersifat tetap (*konversi*) dan yang lain bersifat dapat berubah kembali (*inversi*). Selama pemanasan terjadi reaksi zat padat, terjadi pembentukan kristal dari senyawa-senyawa dalam kaolin atau disebut dengan polimorfisme. Selama pemanasan ini, bahan akan mengalami bermacam-macam perubahan komposisi hingga dicapai suhu vitrifikasi. Selama proses ini, terjadi pelepasan air, kemudian sebagian silika akan melebur. Hal ini merupakan akibat dari terbakarnya semua unsur karbon (proses kalsinasi). sehingga ikatan baku antar senyawa pada bahan tersebut akan terputus dan akan didapatkan Al_2O_3 dan SiO_2 bebas yang kemudian dipisahkan satu dengan yang lain dengan cara elutriasi.

Elutriator merupakan alat yang murah dan sederhana, tidak memerlukan tenaga besar, mampu memisahkan partikel dengan kisaran ukuran yang luas serta kappa-sitas yang besar. Pemisahan dengan cara elutriasi ini sering digunakan dalam pemisahan campuran padatan, yaitu proses pemisahan suatu campuran bahan padat dengan ukuran partikel penyusun dan berat jenis berbeda yang dipisahkan berdasarkan perbedaan kecepatan terminalnya dengan menggunakan kolom yang dialiri fluida yang dialirkan secara kontinyu ke atas dengan kecepatan ke terminal tertentu (Brown, 1950, Leva, 1951). Proses ini banyak dijumpai dalam industri-industri kimia yang memproses padatan dan dalam pemurnian mineral. Penelitian tentang pemisahan partikel-partikel padatan berdasarkan ukuran maupun berat jenisnya dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu mengenai zone gerakan partikel dan segregasi partikel. Kelompok pertama biasanya menghasilkan 'peta' (*map*) zone gerakan-gerakan partikel didalam kolom fluidisasi atau elutriasi berikut batas-batasnya. Sedangkan kelompok kedua mempelajari peristiwa Segregasi dan distribusi ukuran partikel-partikel yang dihasilkan.

Berdasar hasil-hasil penelitian yang dilakukan peneliti sebelumnya, Adham (2001) melakukan kajian tentang segregasi partikel dalam sebuah kolom fluidisasi untuk sistem suspensi partikel halus dalam gas. Hasilnya disusun se-

bagai pedoman dalam mendesain sebuah kolom fluidisasi. Bosma dan Hoffman (2002), melakukan studi kelayakan tentang klasifikasi partikel dalam sebuah kolom fluidisasi dengan memasang *baffle*. Penggunaan baffle horisontal berbentuk anyaman terbukti dapat meningkatkan efisiensi segregasi. Horio (1980) dan Zens (1983) mempelajari *Transport Disengagement Height* (TDH), yaitu ketinggian dalam kolom dimana ukuran partikel terdistribusi sepanjang posisi vertikalnya (Rhodes, 2001).

Kajian tentang kecepatan klasifikasi partikel pada sistem suspensi gas-padat dalam sebuah kolom elutriasi telah dilakukan oleh Zenz and Weil (1958) dan Geldart et al. (1979) (Rhodes, 2001). Gibilaro dan Rowe (1974) menggunakan pendekatan mekanistik teori dua fasa untuk memodelkan Segregasi partikel dalam sistem gas padat dalam sebuah kolom fluidisasi. Dua fasa yang ditinjau adalah fasa *wake* yang bergerak ke atas (*wake phase* yakni fasa gelembung gas berisi sedikit partikel padatan didalamnya) dan fasa bulk, yaitu fasa padatan dengan gas terdispersi diantaranya. Naimer et al. (1982) dan Hoffmann et al (1993) kemudian memperluas penelitian yang dilakukan oleh Gibilaro dan Rowe dan mengembangkan sebuah metode numerik untuk menyelesaikan modelnya.

Artikel ini membahas metode elutriasi yang digunakan untuk memisahkan silika dan impurities lainnya dalam kaolin sehingga didapat konsentrasi alumina yang lebih besar. Pemisahan mulai terjadi saat kecepatan linier fluida (u_f) lebih besar dari kecepatan terminal salah satu komponen partikel.

Partikel akan mencapai kecepatan terminal saat gaya gravitasi, gaya apung, serta gaya gesek dalam keadaan seimbang. Sebuah butiran padatan yang berada pada suatu fluida diam dalam pengaruh gravitasi akan jatuh dan mengalami percepatan sampai mencapai kecepatan maksimumnya yaitu kecepatan terminal yang diberikan oleh persamaan:

$$u_t = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho)}{3\rho C_D}} \dots\dots\dots (1)$$

Nilai koefisien friksi C_D merupakan fungsi dari bilangan Reynold seperti ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p < 0.1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$C_D = \left(\frac{24}{Re_p} \right) \left(1 + 0.14 Re_p^{0.75} \right) \quad 0.1 < Re_p < 1,000 \quad \dots\dots (3)$$

$$u_t = 1.73 \sqrt{\frac{g d_p (\rho_p - \rho)}{\rho}} \quad 1,000 < Re_p < 350,000 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$C_D = 0.19 - \frac{8 \times 10^4}{Re_p} \quad Re_p > 1 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (5)$$

Sebaliknya, jika suatu butiran padatan berada dalam fluida yang mengalir ke atas dengan kecepatan tertentu (v), maka butiran padatan akan mengalami beberapa kemungkinan:

- Jika kecepatan terminal butiran lebih besar dari kecepatan fluida ke atas, maka butiran akan jatuh ke bawah.
- Jika kecepatan terminal butiran lebih kecil dari kecepatan fluida ke atas, maka butiran akan terbawa arus ke atas.
- Jika kecepatan terminal butiran sama dengan kecepatan fluida ke atas, maka butiran akan tertahan/diam.

Dibandingkan dengan sistem butiran tunggal, butiran pada sistem tumpukan butiran membutuhkan kecepatan linier fluida yang lebih besar. Hal ini disebabkan karena adanya friksi yang timbul karena gesekan antar butir dalam tumpukan. Prinsip di atas dapat dimanfaatkan untuk memisahkan campuran padatan yang memiliki perbedaan densitas atau ukuran butir. Agar terjadi proses pemisahan maka perlu adanya perbedaan kecepatan linier fluida dengan kecepatan terminal butiran. Butiran dengan kecepatan terminal lebih kecil dibanding dengan kecepatan linier fluida akan terbawa keluar dari kolom (Davidson, J. F., 1985).

Pada umumnya, butiran padatan dibuat berukuran seragam dengan proses pengayakan. Umpam padatan dimasukkan ke dalam suatu kolom dimana fluida dialirkan dari bawah. Tingkat pemisahan sangat tergantung dari perbedaan densitas butiran padatan. Semakin besar beda densitas, semakin mudah terjadi

pemisahan. Semakin besar konsentrasi padatan dalam fluida, kecepatan terminal akan berkurang oleh karena adanya interaksi antara butiran padatan dengan gerak keatas cairan yang tergantikan. Viskositas cairan akan naik dengan bertambahnya konsentrasi padatan.

Bila dijumpai campuran padatan A dan B dengan densitas A lebih dari densitas B tetapi ukuran butir A kurang dari ukuran butir B maka ada kemungkinan campuran padatan tersebut tidak akan terpisah dengan sempurna, maka dari itu perlu ditentukan kisaran ukuran campuran padatan yang dapat memberikan pemisahan dengan sempurna (Sumardi, 2000).

Semakin sempit kisaran butiran suatu campuran, maka diameter butiran akan semakin seragam sehingga pemisahan campuran padatan tersebut yang memiliki berbagai densitas dengan cara elutriasi akan memberikan hasil yang semakin baik. Campuran padatan terdistribusi dalam kisaran diameter tertentu. Di setiap diameter masing masing komponen memiliki massa yang tertentu. Ada kemungkinan didalam campuran, fraksi komponen merupakan fungsi diameter. Tetapi untuk penyederhanaan, diasumsikan tidak ada distribusi komponen di setiap fraksi diameter. Masing-masing butiran komponen memiliki diameter dan densitas tertentu sehingga kecepatan terminalnya juga tertentu.

Artikel ini membahas kondisi optimum untuk memurnikan butiran kaolin yang terkandung dalam batuan alam dengan prinsip elutriasi dengan mengeksplorasi variasi kecepatan, dan pengaruh kecepatan aliran terhadap besarnya kenaikan konsentrasi alumina. Kecepatan terminal suatu padatan dipengaruhi oleh densitas, ukuran, dan konsentrasi padatan. Dengan mengabaikan faktor konsentrasi dan mempersempit kisaran diameter, kondisi optimum untuk menaikkan kadar alumina akan didapatkan dengan bervariasi kecepatan aliran fluida.

PEMBAHASAN

Karena perbedaan densitas yang dekat dan kemajemukan ukuran diameter dari bongkahan batuan kaolin, maka proses elutriasi sulit dilakukan. Sebab deng-

an perbedaan diameter yang begitu besar maka akan ada dua konstanta yang berbeda saat berlangsungnya proses pemisahan dengan elutriasi, yaitu konstanta densitas dan konstanta diameter. Maka bila menggunakan kecepatan konstan pada suatu sampel, kemungkinan zat yang terpisahkan tidak hanya berdasar beda density tetapi juga berdasar beda diameter. Karena pada batuan kaolin terdapat satu unsur yang memiliki diameter yang berbeda-beda, maka jika ada dua nilai konstanta yang berbeda (density dan diameter) penggumpalan atau pengendapan yang terjadi dapat berupa keseragaman diameter yang berbeda-beda dan bukan pengendapan unsur yang berbeda satu sama lain atas dasar densitas.

Dari evaluasi dan analisis yang dilakukan, disimpulkan bahwa harus ada penyeragaman diameter untuk satu sample elutriasi. Dengan proses pengayaan menggunakan *shift shaker* dapat menyeragamkan dan membagi diameter dalam kisaran tertentu. Kisaran tersebut dibagi dalam 4 kelompok, yaitu :

- -200 +230 mesh (61 – 73 mikron)
- -235 +270 mesh (52 – 61 mikron)
- -270 +325 mesh (43 – 52 mikron)
- -325 +400 mesh (36 – 43 mikron)

Setelah penyeragaman diameter kemudian dimasukkan dalam range diameter tersebut, selanjutnya menentukan kecepatan yang tepat untuk masing-masing range diameter tersebut. Kecepatan didapat dengan perhitungan menggunakan persamaan (1-5) untuk aliran laminar, transisi dan turbulen, tergantung pada besaran bilangan Reynold.

Dari perhitungan berdasar persamaan-persamaan di atas, didapat kecepatan masing-masing fraksi diameter. Dan proses elutriasi dapat dilakukan dengan baik, karena kini hanya ada satu konstanta yang berbeda dan unsur-unsur tersebut dapat dipisahkan.

Setelah proses pengayaan untuk pembagian fraksi diameter, maka diambil fraksi pada range -325 +400 dan 200 – 230 mesh, karena jumlah kedua fraksi ini diperoleh dalam jumlah cukup banyak. Maka kedua fraksi tersebut digunakan menjadi sampel untuk dielutriasi yang sebelumnya dilakukan analisis terlebih dahulu menggunakan XRD. Dari persamaan-persamaan (1-5) di atas, untuk di-

ameter butir 36 sampai 43 mikron (-325 +400 mesh) kecepatan aliran fluidanya adalah antara 0,1172 cm/det sampai 0,2182 cm/det. Kemudian dipakai kecepatan aliran antara 0,1278 – 0,2117 karena disesuaikan dengan rotameter yang dipakai.

Setelah dilakukan elutriasi sampel tersebut dianalisis lagi dengan menggunakan XRD. Diasumsikan bahwa hanya ada dua komponen dalam sampel yaitu alumina dan silika, sedangkan komponen yang lain diabaikan. Silika dalam sampel dianggap sebagai impuritis sehingga dengan menghitung kadar silika maka kadar alumina dapat diketahui. Perhitungan kadar alumina digunakan persamaan :

$$X_{al} = 1 - X_s \dots\dots\dots (6)$$

$$C_{al} = X_{al} \times 100\% \dots\dots\dots (7)$$

$$C_{al} = (1 - X_s) \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

Dengan

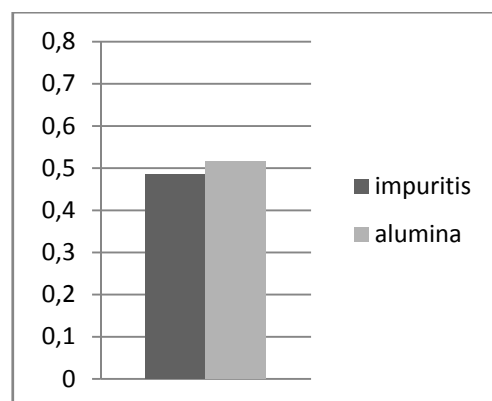
X_{al} : fraksi komponen alumina

X_s : fraksi komponen silika

C_{al} : kadar komponen alumina (%)

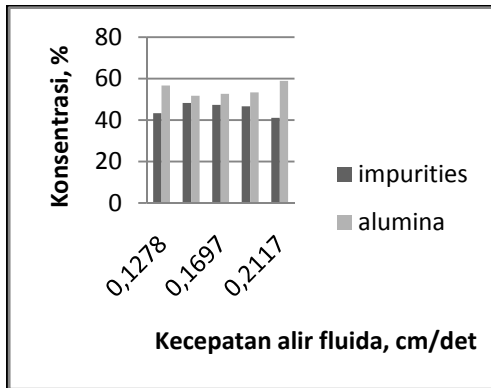
Dengan menggunakan persamaan (8), kadar alumina untuk fraksi diameter -325 +400 mesh sebelum dilakukan elutriasi adalah: $C_{al} = (1 - 0,4853) \times 100\% = 51,47\%$

Adapun profil lengkap perbandingan alumina dan silika sebelum elutriasi seperti tergambar dalam Gambar 1.



Gambar 1. Fraksi komponen impuritis dan alumina sebelum elutriasi (-325 +400)

Kemudian setelah sampel tersebut dielutriasi dengan variasi kecepatan antara 0,1278 cm/det hingga 0,2117 cm/det, diperoleh hasil seperti dalam Gambar 2 di bawah ini:

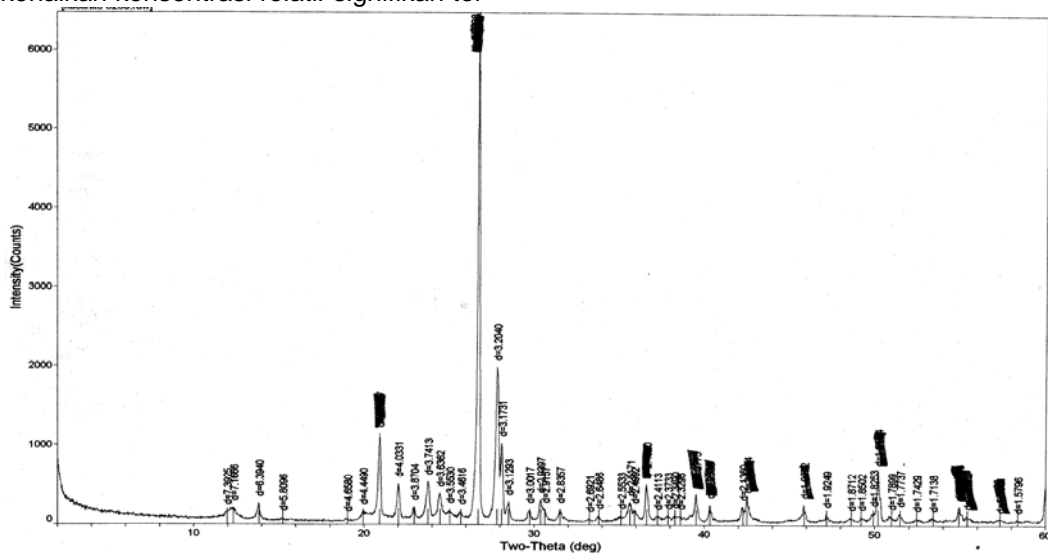


Gambar 2. Fraksi komponen alumina dan impuritis (ordinat) pada berbagai kecepatan aliran fluida (absis, cm/s).

jadi pada kecepatan aliran fluida paling kecil dan kecepatan aliran fluida paling besar yang dipakai dalam percobaan. Kecepatan aliran fluida yang paling kecil digunakan dalam percobaan ini (0,1278 cm/s) mendekati kecepatan aliran fluida untuk diameter butir 36 mikron (0,1172 cm/s) yang didapat dari persamaan (1-5). Begitu juga sebaliknya untuk kecepatan aliran paling besar yang digunakan dalam percobaan (0,2117cm/s) mendekati kecepatan aliran fluida untuk diameter butir 43 mikron (0,2182 cm/s) yang didapat dari persamaan (1- 5).

Untuk fraksi 200–230 mesh, maka setelah fraksi tersebut digunakan menjadi sample dan kemudian dicek de-

Dari profil diatas dapat dilihat bahwa kenaikan konsentrasi relatif signifikan ter-



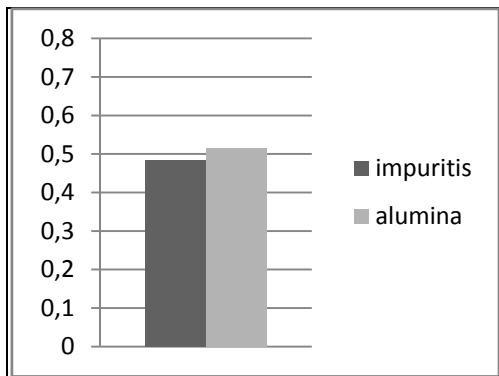
Gambar 3. Hasil analisis XRD untuk fraksi -200 +230 mesh setelah dikalsinasi dan sebelum dielutriasi.

ngan menggunakan XRD dan didapat konsentrasi impuritis di dalam kaolin tersebut sebanyak: 0,4852

Dari analisis XRD ini diperoleh hasil lengkap konsentrasi alumina yang dipresentasikan dalam Gambar 5.

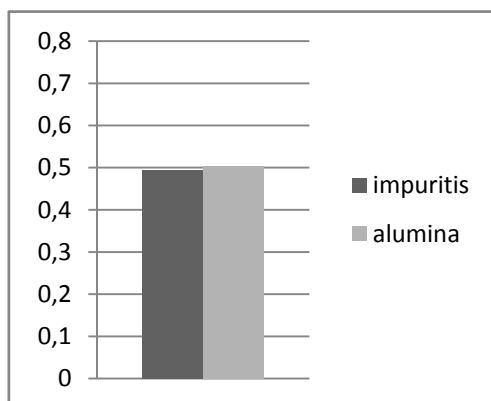
Impuritis pada sampel tersebut sebagian besar adalah silika, sehingga impuritis tersebut bisa diidentikkan dengan silika. Dan silika yang ada dalam sampel dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu silika bebas dan silika yang melekat pada alumina menjadi satu kesatu-

an. Untuk melepaskan silika yang melekat pada alumina dibutuhkan proses kalsinasi, yaitu dengan pemanasan. Selama pemanasan terjadi reaksi zat padat dari senyawa – senyawa di dalam kaolin atau disebut polimorkisme. Selama pemanasan, bahan tersebut akan mengalami bermacam–macam perubahan komposisi hingga dicapai suhu vitrifikasi, dimana pada suhu ini terjadi leburan dari bahan yang mudah melebur yaitu silika. Hal ini terjadi pada suhu antara 750–800°C.



Gambar 5. Fraksi komponen impuritis dan alumina sebelum kalsinasi (-200 +230)

Kalsinasi yang dilakukan pada suhu 800°C dikerjakan selama satu jam. Setelah proses kalsinasi sampel tersebut dicek dengan XRD untuk melihat kandungan alumina dan silika, seperti ditampilkan dalam gambar 3 di atas. Dari analisis yang dilakukan, didapatkan hasil: Alumina : 0,5047 Silika: 0,4952, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4:



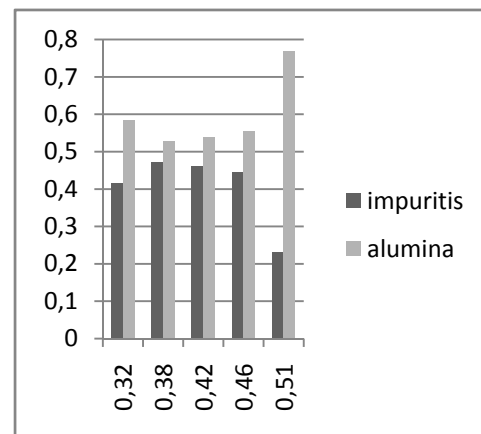
Gambar 6. Fraksi komponen impuritis dan alumina setelah kalsinasi (-200 +230)

Terlihat bahwa impuritis mengalami peningkatan, dimana impuritis tersebut adalah silika. Perbandingan kadar antara sebelum dan setelah kalsinasi dapat dilihat dalam Tabel 2.

Tabel 2. Kadar impuritis dan alumina sebelum dan setelah kalsinasi

	Silika	Alumina
Sebelum	0,4852	0,5147
Sesudah	0,4952	0,5047

Silika yang ada dalam campuran ini memang kelihatan mengalami sedikit kenaikan, namun kadar silika yang ada dan terdeteksi adalah silika bebas. Meningkatnya silika bebas adalah indikasi bahwa silika yang menempel pada alumina telah terpecah dan terlepas dari alumina menjadi silika bebas. Kemudian silika bebas tersebut diambil dengan menggunakan proses elutriasi. Elutriasi ini memisahkan silika bebas dan mengambilnya dari bahan, walaupun demikian proses ini tidak dapat mengambil silika bebas tersebut secara sempurna. Profil alumina vs silika setelah proses elutriasi disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Fraksi komponen impuritis dan alumina pada berbagai kecepatan aliran fluida setelah elutriasi (-200 +230)

Dari Gambar 7 di atas maka diketahui bahwa kalsinasi dapat memecah ikatan rangkap dalam bahan tersebut. Sehingga ikatan antara alumina dengan silika dapat terpecah dan menjadi senyawa bebas. Ini diketahui dari meningkatnya konsentrasi silika bebas setelah proses kalsinasi dibandingkan dengan konsentrasi silika sebelum kalsinasi, ini pertanda bahwa ikatan senyawa antara alumina dan silika tersebut dapat dipecahkan. Pemecahan itu sangat dipengaruhi oleh suhu pembakaran. Setelah terpecah, silika bebas tersebut dapat dipisahkan proses elutriasi. Dan banyaknya silika bebas yang berhasil dipisahkan dari bahan tersebut berbanding lurus dengan besar flow aliran yang digunakan. Karena perbedaan densitas yang dekat dan ke-

majemukan ukuran diameter dari bongkahan batuan kaolin, maka proses elutriasi sulit dilakukan. Sebab dengan perbedaan diameter yang begitu besar maka akan ada dua konstanta yang berbeda saat berlangsungnya proses pemisahan dengan elutriasi, yaitu konstanta densitas dan konstanta diameter. Maka bila menggunakan kecepatan konstan pada suatu sampel, kemungkinan zat yang terpisahkan tidak hanya berdasar beda density tetapi juga berdasar beda diameter. Karena pada batuan kaolin terdapat satu unsur yang memiliki diameter yang berbeda-beda, maka jika ada dua konstanta yang berbeda (density dan diameter) pengumpulan atau pengendapan yang terjadi dapat berupa keseragaman diameter yang berbeda-beda dan bukan pengendapan unsur yang berbeda satu sama lain atas dasar densitas. Maka dari evaluasi dan analisis yang dilakukan, disimpulkan bahwa harus ada penyeragaman diameter untuk satu sample elutriasi.

KESIMPULAN

Kenaikan konsentrasi yang relatif tinggi adalah ketika dipakai kecepatan aliran fluida yang mendekati untuk diameter butir yang paling kecil atau yang paling besar diperoleh dari persamaan.

Jumlah alumina yang dapat diambil sedikit (*recovery* kecil). Diameter butir yang kecil menyebabkan kecepatan aliran fluida kecil sehingga kecepatan prosesnya juga kecil. Proses elutriasi untuk memisahkan campuran padatan yang berbeda densitas dapat efektif jika diameter butir besar.

Proses pembakaran pada suhu 800°C dapat memutus ikatan kompleks silika alumina. Ikatan antara alumina dan silika dapat terpecah, ini diketahui dari meningkatnya kadar silika bebas. Data perbandingannya disajikan pada tabel di bawah ini:

Tabel 3. Kadar impuritis dan alumina sebelum dan setelah kalsinasi

	Silika	Alumina
Sebelum	0,4852	0,5147
Sesudah	0,4952	0,5047

Dari tabel tersebut diketahui peningkatan jumlah silika bebas dalam bahan tersebut. Proses elutriasi untuk memisahkan campuran padatan yang berbeda densitas dapat efektif jika diameter butir besar.

Banyaknya pemisahan elutriasi sebanding dengan besar flow aliran yang digunakan. Setelah proses elutriasi, kadar alumina meningkat menjadi 76,81%. Ini membuktikan bahwa proses elutriasi dapat memisahkan silika bebas, tetapi proses elutriasi tersebut tidak dapat memisahkan secara sempurna semua senyawa bebas yang ada, sehingga konsentrasi yang diinginkan tidak sempurna. Proses pemisahan dengan kalsinasi dan elutriasi memerlukan waktu yang lama dan tidak efisien, tetapi cara ini relatif lebih murah. Sedangkan bila menggunakan katalis, hasil yang didapat bisa lebih baik, akan tetapi cara ini lebih mahal.

Jika diinginkan *recovery* yang lebih besar, perlu dipakai fluida yang densitasnya mendekati densitas salah satu bahan. Jika diameter padatan kecil, elutriasi hanya efektif digunakan untuk memisahkan fraksi diameter padatan. Jika digunakan untuk memisahkan campuran padatan, tidak memberkan hasil maksimal dengan menggunakan fluida konvensional (air atau udara). Perlu dilakukan variasi tinggi *freeboard* untuk mendapatkan hasil yang lebih optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Adham, K., 2001, *Classified Particle Using Fluidized Beds*, CEP Magazine, September
- Bosma, J.C. and A. C. Hoffman, 2002, *Feasibility Study of Particle Classification in Fluidized Beds with Internal Baffles*, unpublished paper, University of Groningen, the Netherlands and University of Bergen, Norway
- Brown, G.G., 1950, "Unit Operations", John Wiley and Sons, Inc., New York
- Davidson, J.F., and Harrison, D., 1985, "Fluidization", Academic Press, London
- Gibilaro, L.G. and P.N. Rowe, 1974, *A Model for a Segregating Gas Fluidized Bed*, Chemical Engineering Science, 29, 1403-1412

- Grimshaw, R.W. and Searle, A.B., 1960, The Chemistry and Physics of Clay and other Materials, 3rd ed., Ernest Benn Limited, London
- Hoffmann, A. C., L.P.B.M. Jansen and J. Prins, 1993, *Particle Segregation in Fluidized Binary Mixtures*, Chemical Engineering Science, 48(9), 1583-1592.
- Kunii, D., and Levenspiel, O., 1969, "Fluidization Engineering", John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Leva, M., 1959, "Fluidization", Mc Graw Hill Book Company, Inc., New York
- Li, J., and Kato, K., 2001, "Estimation of the Critical Particle Size of Elutriation of Very Small Particle from Fluidized Bed", J. Chem. Eng. Japan, 34, 892 -898
- Naimer, N. S., T. Chiba and A. W. Nienow, 1982, *Parameter Estimation for Solid Mixing/ Segregation Model for Gas Fluidized Beds*, Chemical Engineering Science, 37(7), 1047-1057
- Norton, W.H., and Matson, F.R., 1957, "Element of Ceramics", Addison Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts
- Sutton, W.H., and Matson, F.R., 1956, "Factor Affecting Strength of Clay in the Temperature Range 110–800°C", Jour Am. Ceram. Soc., 39
- Norton, F.H., 1952, Element of Ceramics, 2nd ed., Eddison Wesley Publishing Company, New York
- Perry, R.H. and Green, D.W., 1999, Perry's Chemical Engineer's Handbook, 7th ed., McGraw Hill Companies, Inc, New York
- Rhodes, M., 2001, Introduction to Particle Technology, 3rd ed., John Wiley and Sons, West Sussex

PENGARUH SANDWICH LAMINATED COCO MAT DAN CHOPPED STRAND MAT TERHADAP KEKUATAN MATERIAL KOMPOSIT

Tarkono¹

¹Laboratorium Proses Produksi Jurusan Teknik Mesin,
Fakultas Teknik, Universitas Lampung

Masuk: 30 Januari 2009 , revisi masuk: 12 Juni 2009, diterima: 17 Juni 2009

ABSTRACT

The application of coco fibre is widely open. In rural area, as a main source of coco fibre, the fibre IS only used for cooking and family products. As the technology development, how coco fibre can be applied as a part of composites materials. If it compound with other specific components, we can produce a new material with better mechanical properties. In this research, coco fibre with 0,2% wetness, compound with latex then pressed to get a coco mat with 2 mm thickness. Coco mat then formed with chopped strand mat to get a sandwich laminate composite. The original tensile strength of coco mat is 2,47 kgf/mm² , and it will increased to 12,93 kgf/mm² if it formed as sandwich laminate coco fibre. The tensile strength improves about 80, 90%.

Keywords: *Coco Mat, Chopped Strand Mat, Composite.*

INTISARI

Pemanfaatan kulit kelapa sampai saat ini belum optimal. Di daerah pedesaan sebagai penghasil kelapa, sabut kelapa hanya digunakan sebagai bahan bakar untuk memasak. Dalam kehidupan sehari-hari sabut kelapa dapat dibuat sapu lantai dan alas kaki. Dengan kemajuan teknologi maka kulit kelapa dapat dijadikan bahan teknik. Ketika kulit kelapa dibuat serat dan digabungkan dengan bahan lain akan menghasilkan material yang memiliki kekuatan lebih besar. Serat kelapa dengan kelembaban 0,2% disusun secara acak dengan ketebalan sekitar 100 mm decampur latex dengan cara disemprotkan. Kemudian dipres sehingga diperoleh *coco mat* setebal 2 mm. Selanjutnya *coco mat* digabungkan dengan *chopped strand mat* akan menghasilkan material baru yaitu komposit *sandwich laminate*. Gabungan beberapa serat kelapa yang panjangnya antara 15 cm sampai 30 cm dapat bertambah kekuatannya ketika dipadukan menjadi *coco mat* . Kekuatan tarik *coco mat* hanya 2, 47 kgf/mm² dan setelah digabungkan dengan *chopped strand mat* dapat mencapai 12,93 kgf/mm². Dengan demikian terjadi peningkatan kekuatan tarik sebesar 80,90%.

Kata Kunci: *Coco Mat, Komposit, Chopped Strand Mat.*

PENDAHULUAN

Di daerah pedesaan yang banyak dijumpai tanaman, kelapa hanya dimanfaatkan buah kelapa bagian dalam sebagai bumbu masak dan bahan pembuatan minyak. Seandainya masyarakat pedesaan dapat memanfaatkan lebih jauh maka kulit bagian luarpun nilai ekonomisnya dapat melebihi buah kelapa yang dapat menghasilkan santan. Kulit luar kelapa dapat diambil seratnya yang kemudian dijadikan sebagai bahan teknik. Di Indonesia, material laminasi yang terbuat dari serat alami masih tergolong

jarang ditemukan (Tarkono, 2005). Material laminasi kayu jati dan bambu setelah mengalami patah masih memiliki kekuatan meskipun kekuatannya tidak sebesar kekuatan sebelum mengalami patah. Patahnya material laminasi tidak berarti langsung *drop* namun masih dapat menerima beban dibawah beban maksimal yang diterima oleh konstruksi seperti yang ditunjukkan pada grafik perilaku material laminasi. Sebab patahnya balok laminasi mungkin hanya pada satu layer saja sedangkan layer yang lain tidak mengalami kepatahan sehingga ma-

¹tarkono_irfan@yahoo.com

sih dapat memikul beban yang cukup berat. Dengan demikian material laminasi sangat cocok untuk membuat konstruksi yang menerima beban dinamis seperti bangunan kapal. Namun yang menjadi permasalahan sampai seberapa jauh material laminasi dapat ditekuk seperti yang dilakukan pada saat *planking* sebab konstruksi kapal merupakan konstruksi yang *trendline* (Tarkono, 2006).

Produksi laminat dari bahan papan dapat dilakukan dengan penempatan sambungan papan secara zig-zag (tidak segaris). Penempatan sambungan yang demikian akan lebih kuat dibandingkan dengan yang segaris. Papan-papan dari kedua jenis material diberi lem masing-masing permukaan dan disusun sedemikian rupa di atas meja kemudian dilakukan pengepresan dari atas ke bawah. Untuk menghindari bergesernya antara lapisan yang satu dengan yang lain maka harus dibuatkan tempat atau dijepit kiri kanan sehingga permukaannya akan tetap rata (Tarkono, 2006). Namun ada satu alasan yang kuat sehingga penelitian dapat mengubah posisi susunan layer. Alasan yang mendasar adalah masalah keawetan material. Jika bambu diletakkan di luar maka proses kerusakan material akan berjalan lebih cepat sehingga akan merugikan konstruksi. Jika papan-papan bambu masih terdapat sisa-sisa lem yang belum terbang dalam proses pengetaman maka harus dibersihkan. Tujuannya adalah pada saat pengeleman dengan papan lainnya proses peresapan lem akan lebih sempurna, dengan demikian sifat adhesinya akan lebih kuat.

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi membuat orang semakin mudah dalam memecahkan masalah. Penemuan material baru merupakan salah satu jawaban dalam memecahkan permasalahan dalam bidang ilmu material. Dengan ditemukannya teknologi penggabungan dua material atau lebih dapat memperkaya jenis material baru. Material komposit dapat digunakan di berbagai bidang, misalnya bidang teknik sipil, teknik mesin, teknik elektro, perkapalan dan bidang-bidang lain.

Penggunaan komposit sebagai bahan struktur banyak digunakan saat ini karena mempunyai beberapa keunggulan.

Jika dibandingkan bahan tunggal dengan gabungan dua atau lebih material yang memiliki sifat saling menguntungkan baik itu bahan logam maupun non logam maka terjadi peningkatan sifat mekaniknya cukup signifikan. Sifat mekanik komposit dipengaruhi oleh sifat-sifat serat dan banyaknya serat dalam komposit tersebut.

Dengan kemajuan teknologi berbagai serat alami dapat digunakan sebagai bahan teknik. Penelitian ini membahas salah satu jenis serat alami yang banyak dijumpai di Indonesia yaitu serat kelapa. Bagaimana pengaruhnya jika serat kulit kelapa digabungkan dengan bahan lain membentuk komposit.

Limbah hasil pertanian dan perkebunan kadang-kadang masih menjadi masalah yang dapat menimbulkan problem secara global. Penanganan limbah baik limbah hasil perkebunan, pertanian maupun limbah industri belum dapat teratasi secara sempurna. Jika limbah ditangani dengan sungguh-sungguh maka bukan mustahil akan mendatangkan keuntungan yang besar. Sebagai contoh pada pabrik kelapa sawit yang tersebar di seluruh daerah perkebunan di Indonesia, sekarang sudah dikembangkan pemanfaatan tempurung kelapa sawit sebagai bahan komposit partikel yang memiliki kekuatan cukup baik (Tarkono, 2007). Jika material tersebut dapat diproduksi secara besar-besaran maka dapat menggantikan papan-papan kayu yang biasa digunakan sebagai dinding rumah kayu.

Pada komposit partikel tempurung buah kelapa sawit dengan menggunakan komposisi 1 : 2, jumlah partikel di dalamnya maka tegangan didistribusikan secara merata. Inilah yang menyebabkan nilai kekuatan tariknya tinggi. Selain itu dapat memperbesar kemungkinan tidak terdapatnya rongga pada partikel dan terjadinya porositas pada komposit. Kekerasan material komposit partikel menggunakan metode pengujian Rockwell, beban awal 588 N, diperoleh kekuatan 65,59 HRL (Sugiyanto, 2008).

Dari berbagai hasil penelitian di atas maka perlu dikembangkan lebih lanjut tentang komposit laminat yang berasal dari limbah seperti hanya tulisan ini.

Tujuan penelitian ini antara lain :

- Mencoba menggabungkan antara *coco mat* dengan *chopped strand mat* untuk mendapatkan komposit material.
- Mendapatkan material komposit baru dengan memanfaatkan limbah hasil perkebunan kelapa.
- Menambah nilai jual hasil perkebunan kelapa.

Metodologi penelitian ini diawali dengan pengolahan sabut kelapa menjadi serat. Sabut kelapa dikeringkan kemudian dikupas untuk dipisahkan antara kulit, spon dan serat. Serat kelapa dipisahkan antara serat yang kecil dan serat yang pendek dengan kekeringan 0,2%. Kemudian serat kelapa dibuat *coco mat*. Pembuatan *coco mat* dilakukan dengan mencampur serat kelapa dengan latex. Proses pembuatan *coco mat* dilakukan dengan menggunakan mesin dengan sistem roda berjalan. Mesin tersebut akan menghasilkan lembaran *coco mat* dengan ketebalan 100 mm. Tahap selanjutnya lembaran spon 100 mm dipres dengan pemanasan 125°C selama 12 menit, sehingga akan diperoleh lembaran *coco mat* dengan ketebalan ± 2 mm.



Gambar 1. *Coco Mat*

Pembuatan komposit dilakukan dengan bahan-bahan *resin polyester orthophtalic*, serat penguat jenis *coco mat*, serat penguat jenis *E-Glass (Chopped strand mat)* dan katalis *methlyl ethyl katone peroxide*. Cetakan yang telah disiapkan dilapisi dengan lapisan pelepas secara merata. Tujuan pelapisan tersebut agar komposit mudah diambil dari cetakan. Mengoleskan lapisan *gelcoat* yang telah diberi resin pada permukaan cetakan sampai kering. Katalis yang digunakan pada penelitian ini adalah 3% dari

berat resin (Tarkono, 2006). Untuk mempercepat pengeringan paduan dibutuhkan katalisator sebagai penghantar reaksinya, karena katalisator mempunyai sifat mempercepat hubungan reaksi suatu paduan kimiawi. Namun dalam proses pencampuran katalisator harus dihindarkan secara langsung dengan kobalt, sebab dapat menyebabkan kebakaran. Kobalt dicampur dengan resin sebelum ditambah katalisator (Hilargo, 1984).

Tahap laminasi dilakukan dengan menuangkan cairan campuran resin dan katalis yang sebelumnya telah diberi lapisan *gelcoat* 2/3 dari volume yang dibutuhkan untuk lamina *coco mat*. Susunan lamina dibuat dengan beberapa variasi.

Tabel 1. Susunan variasi laminat

Jenis variasi	Variasi I	Variasi II	Variasi III	Variasi IV
Susunan	CM- CM- CSM- CSM- CSM- CSM- CM-CM	CM- CM- CSM- CSM- CSM- CM	CM- CM- CSM- CSM- CM- CM	CM- CM- CSM- CM-CM

Ket : CSM = *Chopped strand mat*,
CM = *Coco mat*

Pengujian spesimen menggunakan standar ASTM, pada uji tarik dengan ASTM D 3039-93 (1994) dilakukan pada kondisi temperatur ruangan 24°C, relatif humidity spesimen 50 ± 10%. Dan uji bending menggunakan standar ASTM D 790-92 (1994) pada kondisi yang sama dengan uji tarik.

Bahan komposit diartikan secara makroskopis adalah gabungan dari dua atau lebih bahan untuk menjadi bahan yang berguna (Jones, 1987). Bahan komposit dapat diklasifikasikan bermacam-macam tergantung pada konsep yang diinginkan. Salah satu klasifikasi material komposit adalah :

- Komposit *fibrous* adalah komposit yang mengandung serat dalam matrik.
- Komposit partikel adalah komposit yang mengandung satu atau lebih partikel dalam matrik.

- Komposit berlapis yaitu komposit yang tersusun atas dua atau lebih lapisan bahan yang berbeda. Jenis komposit inilah yang disebut sebagai material laminasi.

Komposit dibentuk dari dua atau lebih bahan yang berbeda jenisnya, sehingga memiliki sifat yang berasal dari bahan penyusunnya. Bergantung pada cara penyusunannya, komposit juga memiliki sifat-sifat kombinasi antara bahan penyusunnya, dan seringkali lebih baik dibandingkan dengan sifat asal bahan penyusun (Gurdal, 1999).

Berdasarkan komposisi seratnya maka komposit dapat dibedakan menjadi komposit serat panjang dan komposit serat pendek. Komposit dengan penguat serat dapat dibedakan menjadi jenis *mat* dan jenis *woven roving*. *Mat* merupakan istilah yang dipakai dalam bidang Industri, namun dalam bidang ilmu pengetahuan disebut sebagai *chopped strand mat* (Hyer, 1997).

Ikatan antara matrik dengan bahan penguat sangat penting, karena beban yang diberikan pada komposit diteruskan ke bahan penguat. Oleh karena itu modulus elastisitas bahan penguat harus lebih tinggi dari pada modulus elastisitas matriknya, sebab bahan penguat memikul beban komposit yang diteruskan dalam matrik (Vlack, 2000). Jika ditinjau dari sifat mekaniknya maka sifat material komposit sangat bertolak belakang dengan material *isotropik* seperti baja. Besarnya tegangan pada material komposit berbeda untuk segala arah sumbu.

Komposit merupakan gabungan dua atau lebih material yang berbeda. Secara garis besar komposit terdiri dari dua bagian, yaitu matrik dan penguat. Ada tiga jenis penguat yang sering digunakan dalam pembuatan komposit yaitu serat, partikel dan laminat. Sedangkan berdasarkan bahan penyusun matriknya, maka komposit juga dapat dikelompokkan sebagai berikut (Groover, 2000):

- *Metal matrix composites*
- *Ceramic matrix composites*
- *Polymer matrix composites*

Polimer merupakan makromolekul, tersusun dari molekul rantai panjang yang berulang-ulang. Pada umumnya

bentuk penguat komposit dengan matrik polimer memiliki tiga jenis polimer, yaitu (Dorel, 1995) :

- Termoplastik, merupakan polimer yang memiliki struktur berupa rantai panjang yang lurus, akan melunak dan mencair jika dipanaskan dan mengeras lagi jika didinginkan. Beberapa jenis termoplastik antara lain *polyethylene, polypropylene, nylon* dan masih banyak yang lainnya.
- Termoset, membentuk ikatan silang (*cross linked*) antar benang-benang polimer dalam bentuk tiga dimensi yang tidak mencair pada temperatur tinggi. Jenis-jenis termoset antara lain *phenol formaldehyde, melamine formaldehyde, urea formaldehyde*, resin poliester dan lain sebagainya.
- Elastomer yang merupakan jenis polimer yang memiliki elastisitas tinggi.
- Polimer natural yang merupakan polimer yang berasal dari hewan dan tumbuhan.

Termoset merupakan jenis matrik yang sering digunakan untuk bahan komposit dan menjadi populer untuk beberapa alasan, diantaranya adalah viskositas yang rendah, daya rekat yang tinggi dan temperature pemrosesan yang rendah (Hyer, 1997). Polimer merupakan bahan dasar yang sangat bermanfaat dalam dunia teknik. Bahan polimer mudah dibuat dan penerapannya mencakup berbagai bidang industri seperti industri karet, plastic, serat dan perekat. Bahan polimer ada yang cair kental, karet lunak sampai padatan keras.

Ada beberapa sifat khas dari bahan polimer secara umum, yaitu (Surdia, 2002) :

- Polimer memiliki sifat mudah dibentuk. Pada temperatur relatif rendah bahan dapat dicetak dengan penyuntikan, penekanan, ekstrusi dan sebagainya, yang menyebabkan biaya pembuatannya relatif rendah dari bahan material lainnya.
- Sebagian besar produk yang berasal dari bahan polimer cukup ringan dan kuat. Berat jenis polimer lebih rendah dibandingkan dengan bahan logam.
- Sebagian besar polimer mempunyai sifat isolasi listrik yang baik, selain

itu bahan polimer dapat dibuat menjadi konduktor dengan jalan mencampurnya dengan serbuk logam.

- Mempunyai ketahanan terhadap air dan zat kimia.
- Dapat menghasilkan produk-produk yang mempunyai sifat berbeda tergantung dari cara pembuatannya.
- Tidak tahan pada temperatur tinggi.
- Pada umumnya bahan polimer lebih murah.
- Kekerasan bahan polimer lebih rendah apabila dibandingkan dengan bahan logam maupun keramik.
- Kurang tahan terhadap pelarut, umumnya larut pada zat pelarut tertentu.
- Beberapa bahan tahan abrasi, atau mempunyai koefisien gesek yang kecil.

Laminasi merupakan salah satu jenis komposit yang dibuat dengan cara berapis. Ada beberapa keuntungan menggunakan metode laminasi dalam pembuatan suatu konstruksi antara lain :

- Lebih efisien dalam penggunaan bahan dan dapat memanfaatkan limbah yang ukurannya lebih kecil.
- Untuk konstruksi yang berbentuk rumit dapat dikerjakan dengan mudah.
- Bahan baku tidak harus berukuran besar.
- Keberhasilan dalam pembentukan suatu konstruksi akan lebih tepat dengan hanya menggunakan tenaga yang memiliki katrampilan tidak terlalu tinggi.
- Berat kostruksi secara keseluruhan akan lebih ringan dibandingkan dengan bahan dari logam.
- Akan lebih efektif jika produk yang akan dibuat merupakan produk yang bersifat seri, mengingat jig yang dibuat sebelumnya dapat digunakan lagi.
- Kelelahan material yang disusun secara laminasi akan lebih kecil dan bersifat tidak merata karena tersusun atas beberapa lapis.

Penentuan batas waktu yang diperlukan untuk memproduksi laminasi fiber gelas dari kedua unsur pembentuknya, yang perlu diperhatikan adalah proses perubahan sifat dari unsur matrik dengan unsur utama resin polyester dan

unsur tambahan. Kekuatan rekat yang terbesar terjadi pada kondisi prosentase katalis 2% yaitu 53,5 N/cm² pada batas waktu pemakaian 34 menit. Sedangkan waktu yang paling pendek dari konsentrasi kelima konsentrasi katalis dalam penelitian ini adalah 13,5 menit pada konsentrasi katalis sebesar 5%. Dengan konsentrasi katalis sebesar 5% kekuatan rekatnya sebesar 34,5 N/cm² (Tarkono, 2006).

Salah satu pendekatan *micromechanical* pada material komposit laminasi adalah dengan *mechanic of material*. Asumsi yang digunakan adalah strain dalam arah serat *unidirectional* adalah sama dalam arah serat sebagai matrik (Jones, 1995). Besarnya kandungan volume penguat dalam layer dapat dinyatakan dalam persamaan (1) (Germanischer, 1995) :

$$\phi = \frac{\psi \cdot (1 - \mu_0)}{\psi + (1 - \psi) \cdot \frac{P_v}{P_r}} \dots \dots \dots (1)$$

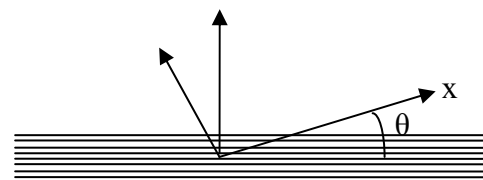
Besarnya modulus elastisitas (E_1) dinyatakan dalam persamaan (2) (Germanischer, 1995) :

$$E_1 = \phi \cdot E_v + (1 - \phi) \cdot E_r \dots \dots \dots (2)$$

Sedangkan pada arah tegak lurus arah serat (E_2) dinyatakan dalam persamaan (3) (Germanischer, 1995) :

$$E_2 = \frac{E_R}{1 + \nu_r^2} \cdot \frac{1 + 0,85 \cdot \phi^2}{(1 - \phi)^{1,25} \cdot \phi \cdot \frac{E_r}{E_v (1 - \nu_r^2)}} \dots \dots \dots (3)$$

Untuk pembebanan dengan arah sudut x dan y, dimana sumbu x dengan arah serat membentuk sudut θ seperti pada gambar 2 berikut:



Gambar 2. Arah pembebanan terhadap serat

maka besarnya modulus elastisitas pada arah sumbu x dapat dinyatakan menurut persamaan (4) (Gibson, 1994) :

$$\frac{1}{E_x} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^4 \theta \dots\dots\dots (4)$$

sedangkan untuk arah sumbu y, dinyatakan dengan persamaan :

$$\frac{1}{E_y} = \frac{1}{E_1} \sin^4 \theta + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_2} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{1}{E_2} \cos^4 \theta \dots\dots\dots (5)$$

Besarnya angka poisson's ratio, menurut (Gibson, 1994) dinyatakan menurut persamaan (6) dan (7) :

$$\nu_{12} = \varphi \cdot \nu_v + (1 - \varphi) \cdot \nu_r \dots\dots\dots (6)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \cdot \frac{E_2}{E_1} \dots\dots\dots (7)$$

Besarnya modulus geser dapat dinyatakan menurut persamaan (8) (Germanischer, 1998) :

$$G_{12} = G_r \cdot \frac{1 + 0,6\varphi^{0,5}}{(1 - \varphi)^{1,25} + \frac{E_r}{E_v} \cdot \varphi} \dots\dots\dots (8)$$

dimana :

$$G_r = \frac{E_r}{2 \cdot (1 + \nu_r)} \dots\dots\dots (9)$$

Untuk material komposit dengan struktur serat tipe mat dapat dinyatakan dengan persamaan (10) (Germanischer, 1998):

$$E_m = \frac{3}{8} E_1 + \frac{5}{8} E_2 \dots\dots\dots (10)$$

Asumsi dasar yang dipakai untuk mengetahui *macromechanical behaviour of a lamina* dari material, gaya yang bekerja pada penampang suatu lamina dianggap hanya dalam bidang 1-2 (*plane stress*). Sehingga besarnya harga σ_3 , τ_{23} , τ_{31} , ν_{23} dan ν_{31} sama dengan nol.

Hubungan regangan-regangan pada arah sumbu utama dapat dinyatakan dalam persamaan (13) (Jones, 1987)

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{Bmatrix} \dots\dots (11)$$

dengan :

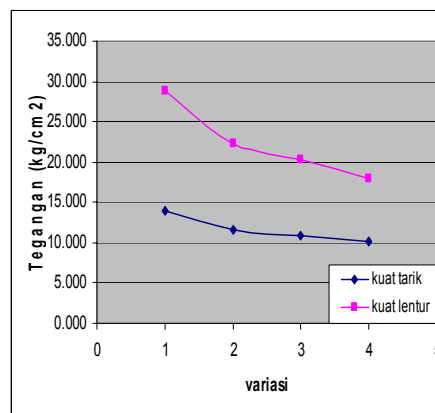
$$S_{11} = \frac{1}{E_1}; S_{22} = \frac{1}{E_2} \dots\dots\dots (12)$$

$$S_{11} = -\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{12}}{E_2}; S_{22} = \frac{1}{G_{12}} \dots\dots\dots (13)$$

PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa coco mat memiliki kekuatan tarik sebesar 2,47 kgf/mm² (lihat grafik pada gambar 3). Setelah dibuat material komposit dengan cara menggabungkan dengan *chopped strand mat* kekuatannya dapat mencapai 12,93 kgf/mm². Dari grafik pada gambar 3 menunjukkan terjadi kenaikan kekuatan material komposit seiring dengan pertambahan lapisan *chopped strand mat*. Dari gambar 3 juga dapat dilihat bahwa jika *layer chopped strand mat* diperbanyak maka kekuatannya akan naik. Hal ini terjadi pada tegangan lentur dan tegangan tarik.

Pada grafik tegangan lentur material komposit tampak bahwa tegangan lentur selalu lebih besar dibandingkan dengan tegangan tariknya (gambar 3). Kejadian serupa juga terjadi pada modulus tarik dan modulus lenturnya. Namun pada kekuatan lentur terjadi kenaikan yang drastis jika komposit ditambah jumlah *layer chopped strand mat*. Kenaikan kekuatan ini juga diikuti oleh kekuatan tarik, akan tetapi kenaikan kekuatannya tidak naik drastis seperti pada kekuatan lenturnya.



Gambar 3. Grafik variasi penambahan layer *chopped strand mat* dengan tegangan

Ada beberapa hal yang menyebabkan terjadinya bertambahnya tegangan lentur secara drastis. Pertama dengan bertambahnya layer (serat kulit kelapa) menyebabkan semakin banyaknya serat yang terikat oleh resin sehingga dapat menambah atau menahan beban yang diberikan. Kedua dengan bertambahnya jumlah serat yang tersusun secara acak berarti peluang menahan gaya yang bersifat transeversal maupun longitudinal adalah sama. Ketiga dengan bertambahnya serat kelapa berarti bebannya dapat terdistribusi secara merata. Kemudian ikatan antara resin dengan penguatnya (serat kulit kelapa) dapat seimbang, maksudnya ikatan partikelnya dapat sempurna atau sifat adesifnya semakin kuat (Gibson, 1994).

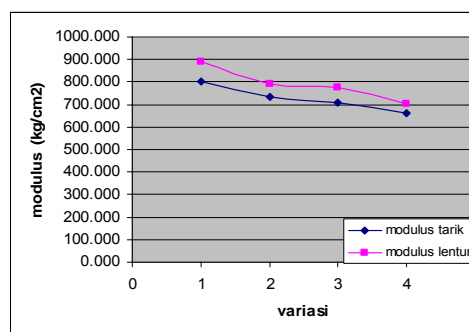
Sedangkan untuk kekuatan tariknya juga terjadi peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah layer baik *co-co mat* maupun *chopped strand mat* namun peningkatannya tidak sebesar tegangan bending. Hal ini disebabkan kuat tarik penguatnya (serat kelapa) jika dilihat tersendiri memang tidak terlalu tinggi, sehingga jika diakumulasikan maka jumlahnya juga tidak terlalu tinggi. Hal ini sesuai dengan karakteristik material seperti yang terlihat pada gambar 3. Namun secara umum material ini mempunyai beberapa kelebihan. Kelebihan yang dimilikinya adalah tegangan lenturnya yang relatif lebih besar dibandingkan dengan tegangan tariknya.

Karakteristik material seperti di atas sangat menguntungkan jika material digunakan pada konstruksi yang memerlukan pekerjaan bending, seperti konstruksi lambung kapal. Pada konstruksi kapal hampir seluruhnya berbentuk *strim line*. Lambung kapal merupakan konstruksi yang harus kedap terhadap air, maka dari itu jenis material ini cocok untuk kapal-kapal non logam seperti kapal cepat yang memerlukan konstruksi yang ringan (Gougeon, 1985).

Jika komposit ini digunakan sebagai bahan bangunan kapal, terutama konstruksi lambung maka harus memenuhi kriteria yang cocok pada lambung kapal. Seperti persyaratan kedap air, kekuatan bending yang cukup tinggi, kekuatan tarik yang memadai dan memiliki

elestisitas yang baik serta memiliki elongasi yang tinggi. Sebab kondisi kerja kapal adalah menahan beban siklik yang berasal dari ombak air laut maupun menahan beban yang bersifat statis yang berupa berat kapal beserta muatannya. Sehingga untuk keperluan konstruksi kapal memang memerlukan penelitian yang cukup panjang untuk mendapatkan kriteria yang harus dipenuhi oleh kapal.

Berbeda jika material ini akan diaplikasikan sebagai bahan bangunan konstruksi yang bekerja pada kondisi statis. Sebagai contoh misalnya digunakan sebagai konstruksi rumah. Seperti yang dapat dilihat di wilayah Indonesia. Sampai sekarang masih banyak dijumpai dinding rumah yang terbuat dari anyaman bambu ataupun papan kayu. Larangan ilegal logging menyebabkan harga kayu semakin melambung. Sehingga konstruksi rumah rakyat yang terbuat dari kayu lambat laun akan beralih ke konstruksi beton. Padahal wilayah Indonesia terkenal dengan gempa bumi, sehingga rumah yang terbuat dari konstruksi beton sebenarnya tidak menguntungkan. Apalagi rumah-rumah penduduk terutama yang berada di wilayah pedesaan tidak memperhatikan perhitungan kekuatan konstruksi seperti hasil rancangan arsitektur.



Gambar 4. Grafik variasi penambahan layer *chopped strand mat* dengan modulus bahan

Modulus elastisitas material komposit laminat yang diteliti juga mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah layer (gambar 4). Jika dilihat dari teori maka fenomena seperti ini sangat baik. Berarti material komposit tersebut dapat bekerja pada kondisi be-

ban statis maupun dinamis. Namun untuk kondisi beban dinamis masih memerlukan kajian lebih lanjut. Misalnya pada material baja, jika material tersebut diberi perlakuan panas seperti quenching maka akan terjadi pe-ningkatan kekuatan tarik dan kekerasan. Namun disisi lain akan terjadi penurunan elongasi, sehingga jika digunakan pada kondisi beban yang dinamis (kejut) akan mudah mengalami kelelahan sebab materialnya bersifat getas.

Dengan bertambahnya jumlah layer berarti penguatnya juga bertambah banyak. Modulus elastisitas penguat (serat kulit kelapa) lebih besar dibandingkan dengan modulus elastisitas matriknya. Dengan demikian maka jika jika prosentase volume dari penguatnya ditingkatkan maka secara otomatis secara umum akan meningkatkan modulus elastisitasnya. Dengan catatan tidak selamanya jika penguat ditambah terus akan selalu meningkatkan modulus elastisitasnya, berarti masih ada batasannya.

Untuk itu maka diperlukan tinjauan lebih lanjut tentang permasalahan ini. Menurut teori bahwa ikatan antara dua bagian yang digabungkan dengan bahan *adhesive bonding* maka harus memiliki beberapa persyaratan diantaranya (Raharjo, 2000):

- Kedua permukaan harus memiliki kekasaran permukaan relatif sama.
- Tekanan yang diberikan ketika penyambungan harus terdistribusi secara merata.
- Ketebalan *adhesive bonding* harus seragam, maksunya ketebalannya antara tempat yang satu dengan tempat yang lain harus sama.
- Waktu yang digunakan untuk penyambungan juga harus memenuhi standar. Maksudnya waktu penahanan harus sesuai dengan anjuran pabrik pembuatnya.
- Kedua permukaan yang akan digabungkan harus bersih dari kotoran, minyak atau sejenisnya yang dapat menghambat terjadinya rekatan secara sempurna.
- Kelembaban masing-masing harus memenuhi standar. Sebab jika kelembaban material yang akan digabungkan memiliki kelembaban yang cukup tinggi akan mengurangi daya

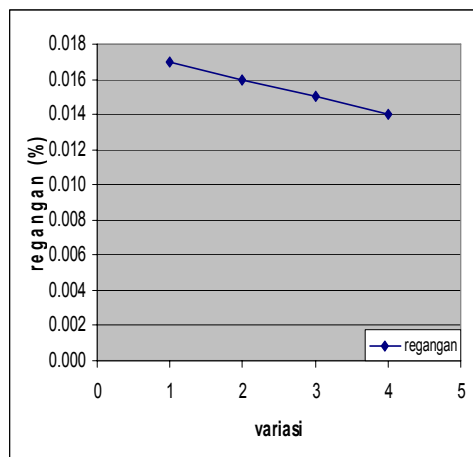
rekatnya. Begitu juga sebaliknya, jika kelembabannya relative rendah (berkisar antara 14% sampai 20%) maka daya rekatnya akan sempurna.

Ada beberapa teori yang dapat digunakan sebagai bahasan lebih mendalam. Salah satunya adalah tentang kelembaban material. Yang dimaksud di sini adalah kelembaban serat kulit kela-pa. Pada saat pembuatan pembuatan spesimen kelembaban serat kulit kelapa telah dikondisikan 14% (Tarkono, 2007). Pembuatan specimen dilakukan dengan beberapa tahap, mulai dari persiapan serat, kemudian pengeringan sampai jadi komposit laminat pada dasarnya telah memenuhi prosedur penelitian. Akan tetapi mengapa hasil yang diperoleh masih dianggap kurang maksimal. Beberapa faktor yang perlu dijadikan alasan adalah :

- Meskipun persyaratan kelembaban terpenuhi, namun dengan tahapan pembuatan komposit laminat yang dilakukan secara bertahap maka kemungkinan terjadi penambahan kadar air. Sebelum dibuat komposit kadar airnya sudah terukur 14%, dengan adanya jeda waktu antara pengeringan dengan pembuatan lapisan *coco mat* dan *chopped strand mat* dimungkinkan akibat pengaruh udara bebas menyebabkan terjadinya pertambahan kadar air. Meskipun kelembaban serat kulit kelapa masih dalam dalam ambang batas akan tetapi secara tidak langsung mempengaruhi daya rekat (*adhesive bonding*) antar matrik dengan penguatnya dalam hal ini adalah serat kulit kelapa (Dorel, 1995).
- Selain kelembaban, faktor besar kecilnya diameter serat juga dapat mempengaruhi karakteristik komposit laminat serat kulit kelapa. Daya rekat antara serat yang berdiameter kecil dengan dengan matriknya dibandingkan daya rekat serat yang berdiameter besar tentunya berbeda. Perbedaan daya rekat inilah dapat mempengaruhi modulus elastisitas material (Dorel, 1995).
- Pemberian tekanan pada saat pembuatan komposit laminat memang tidak terukur secara teliti. Tekanan

permukaan yang diberikan hanya sebatas perkiraan. Padahal tekanan yang dianjurkan harus sesuai dengan instruksi pabrik pembuat bahan. Namun sebenarnya tekanan ini tidak terlalu berpengaruh karena *adhesive bonding* yang digunakan berbentuk gel akan tetapi yang sangat berpengaruh adalah waktu pemberian tekanan sampai tekanan dihilangkan. Hal ini disebabkan jika waktunya kurang dari anjuran pabrik maka matriknya masih bereaksi. Dengan demikian reaksi yang terjadi tidak berjalan dengan sempurna.

Grafik regangan material komposit (gambar 5) menunjukkan bahwa semakin banyak prosentase *layer chopped strand mat* maka regangannya semakin tinggi. Regangan komposit yang terbuat dari satu *layer chopped strand mat* adalah sebesar 0,014 sedangkan regangan komposit yang tersusun dari empat *layer Chopped strand mat* sebesar 0.017. Jadi perbedaan antara variasi 1 yang terdiri dari 4 *layer chopped strand mat* dan variasi 4 yang tersusun dari 1 *layer chopped strand mat* adalah sebesar 17,6%.



Gambar 5. Grafik variasi penambahan *layer chopped strand mat* dengan regangan bahan

Jika dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan analisa *macromechanical behaviour of lamina* maka terjadi perbedaan. Sebagai contoh pada variasi 4, berdasarkan hasil perhitungan

tegangan yang terjadi sebesar 15,782 kgf/mm² sedangkan tegangan berdasarkan hasil tarik sebesar 10,01 kgf/mm². Jadi hasil perhitungan dan hasil uji tarik terdapat perbedaan sebesar 36,57%. Perbedaan ini disebabkan dalam perhitungan material komposit diasumsikan homogen dalam artinya pencampuran antara matrik resin dan serat pengisi menyatu sempurna, tetapi pada kenyataannya spesimen material uji tarik ditemukan *void* di dalam struktur material uji.

KESIMPULAN

Coco mat dan *chopped strand mat* dapat digabungkan menjadi komposit laminat. Penggabungan *Coco mat* dan *chopped strand mat* dengan berbagai bervariasi memiliki pengaruh yang cukup signifikan jika diadakan perubahan susunan layer dalam material komposit. Faktor yang sangat berpengaruh adalah penambahan *layer chopped strand mat*. Dan ada faktor lain yang dapat mempengaruhi kekuatan komposit, faktor yang dimaksud adalah kesalahan dalam pembuatan atau produksi. Kesalahan dalam produksi dapat berupa *void*, bahkan kesalahan komposisi resin. Dengan perkembangan ilmu pengetahuan maka dapat dibuat material komposit laminat. Komposit laminat serat kulit kelapa sawit memiliki kekuatan yang tidak begitu tinggi sehingga masih diperlukan penelitian lebih lanjut. Dengan memanfaatkan kulit luar kelapa maka secara tidak langsung dapat meningkatkan nilai jual hasil perkebunan kelapa secara umum.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D 3039-93, 1994, *ASTM Standard and Literature References for Composit Material*.
- ASTM D 790-92, 1994, *ASTM Standard Test methodes for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Materials*.
- Dorel, F. & Hartomo A.J., 1995, *Bahan Polimer Konstruksi Bangunan*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Germanischer L., 1995, *High Speed Craft, Rule for the Clasification*

- and Construction Volume 1*, Southampton, England.
- Germanischer L, 1998, *Rule for Classification and Construction Ship Technology*, West Germany.
- Gibson, F. & Ronald, F., 1994, *Principles of Composite Material Mechanics*, Mc Graw Hill. Inch.
- Gougeon, B., 1985, *Boat Construction: Wood & West System Materials*, Printed by Pendell Printing Inc., Midland MI.
- Groover, P.M., 2000, *Fundamental of Modern Manufacturing Materials, Process and System*, Prentice Hall, New Jersey.
- Gurdal, 1999, *Design and Optimization of Laminated Composite Material*, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Hilargo, C.J., 1984, *Glass Reinforced Polyester System Meterial Technology Series Volume 14*, Pennsylvania.
- Hyer, M.W., 1997, *Stress Analysis of Fibre Reinforced Composite Material*, Mc Graw Hill, New York.
- Jones, R.M., 1987, *Mechanics of Composite Materials*, Mc Graw-Hill, New York. USA.
- Sugiyanto & Tarkono, 2009, Pengaruh Komposisi Partikel Tempurung Kelapa Sawit terhadap Sifat Mekanik Komposit Partikel, Seminar Nasional Industrial Services 20-09, 29 April 2009, Halaman 138 – 144.
- Surdia, T., dkk., 2002, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Tarkono, 2005, *Penggunaan Laminasi Kayu dan Bambu untuk Komponen Balok Pada Kapal Kayu*, Tesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tarkono, 2006, Analisa Batasan waktu Optimum Dalam Produksi Laminasi Fibre Glass (GFRP), *POROS Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Universitas Tarumanegara Jakarta*, Vol. 9 Nomor 1, 1 Januari 2006, Halaman 28 -39.
- Tarkono, 2006, Perilaku Material Laminasi Bambu – Kayu Pada Industri Kelautan, *Jurnal OPTIMUM Juru-*
- san Teknik Industri Universitas Muhammadiyah Malang*, Volume 7 No. 1 Februari 2006, Halaman 60 – 70.
- Tarkono, 2006, Kajian Teknologi Produksi Material Laminasi Kayu-Bambu Berbentuk Balok Sebagai Bahan Alternatif Bangunan Kapal Kayu, *Jurnal Ilmiah Desain & Konstruksi Universitas Gunadarma*, Volume 5 No. 1 Juni 2006, Halaman 36 – 46.
- Tarkono, 2007, Pemanfaatan Limbah Industri Kelapa Sawit untuk Bahan baku Komposit, *Proseding Seminar Hasil-hasil Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Lampung*, 23 November 2007, Hal 64 – 71.
- Vlack, L.H. & Sriati, D., 2000, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Penerbit Erlangga, Jakarta.

MODAL TESTING AND FINITE ELEMENT MODEL UPDATING OF TWO NOMINALLY IDENTICAL CONCRETE BUILDING FLOORS

Taufik R. Widjaja¹

¹STIE 'Indonesia', Indonesia

Masuk: 14 Maret 2009 , revisi masuk: 18 Juli 2009, diterima: 26 Juli 2009

ABSTRACT

This paper describes a combined approach of modal testing and finite element (FE) analysis for vibration analysis of a structural system comprising two nominally identical concrete building floors located at adjacent levels. Initially, a field test of a full-scale joint two-level floor system was conducted to obtain the first five mode shapes and natural frequencies. Sensitivity-based FE model correlation and updating were then conducted to match the dynamic characteristics of the FE model with the experimental data. By setting certain indicators of good correlations between analytical and experimental models, an updated FE model comprising two nominally identical building floor was obtained

Keywords: Modal Vibration Analysis, Model Updating, Correlation, Sensitivity Analysis, Concrete Floor.

INTISARI

Makalah ini memaparkan gabungan pendekatan pengujian karakteristik modal dan analisa elemen hingga untuk analisa getaran suatu sistem struktur yang terdiri atas dua tingkat lantai bangunan beton yang secara nominal identik dan terletak pada level yang berturutan. Pada tahap awal, dilakukan pengujian lapangan atas suatu sistem gabungan dua tingkat lantai bangunan berskala penuh untuk mendapatkan lima pola bentuk getar dan frekuensi alamiah pertama/terendah. Kemudian, kajian korelasi dan updating atas model elemen hingga berdasarkan sensitivitas yang dilakukan dengan cara mencocokkan karakteristik dinamik hasil analisis elemen hingga dengan data eksperimen. Dengan mengatur indikator tertentu sebagai kriteria korelasi yang baik antara model analitikal dengan eksperimen diperoleh suatu model elemen hingga dari sistem gabungan dua tingkat lantai bangunan.

Kata Kunci: Analisis Moda Getaran, Updating Model, Korelasi, Analisa Sensitivitas, Lantai Beton.

INTRODUCTION

The use of lightweight and high strength materials has enabled long-span and slender floor structures to be constructed. This type of floor may easily satisfy ultimate limit state criteria but excessive vibration may then become a serious serviceability problem.

Among others, Allen, et al. (1987), Bachmann and Ammann (1987) and Hashimoto and Abe (1994) stated that vibrations induced by humans or machines on one floor and transmitted to other floors have been regarded as a serious source of serviceability problems. Many years later, Murray (2001) commented

that cases of annoying vibration have increased dramatically.

Furthermore, Widjaja (2004) have demonstrated that nominally identical floors usually develop closely spaced modes of vibration which have the potential of enhancing transmission of vibration between different floor levels.

The levels of vibration transmitted from one floor level to the others may be small. However, such levels of vibration may not be acceptable to hospital floors where an operation theatre is located, or production floors where microchips are being fabricated. By conducting analytical and experimental vibration analysis

¹Email: cip98trw@yahoo.com

on full-scale floor structures, more realistic, and accurate, results can be obtained.

The research presented in this paper used the 1st and 2nd floors of a 7 storey cast in-situ reinforced concrete building (Figures 1 and 2). This was a full-scale experimental building constructed inside the Building Research Establishment (BRE) Laboratory site in Carlington, United Kingdom. Each floor level had been constructed with different types of concrete quality, reinforcement detailing and methods of construction.



Figure 1. A multi-panel concrete building used in the research work (after ICE, 2000)

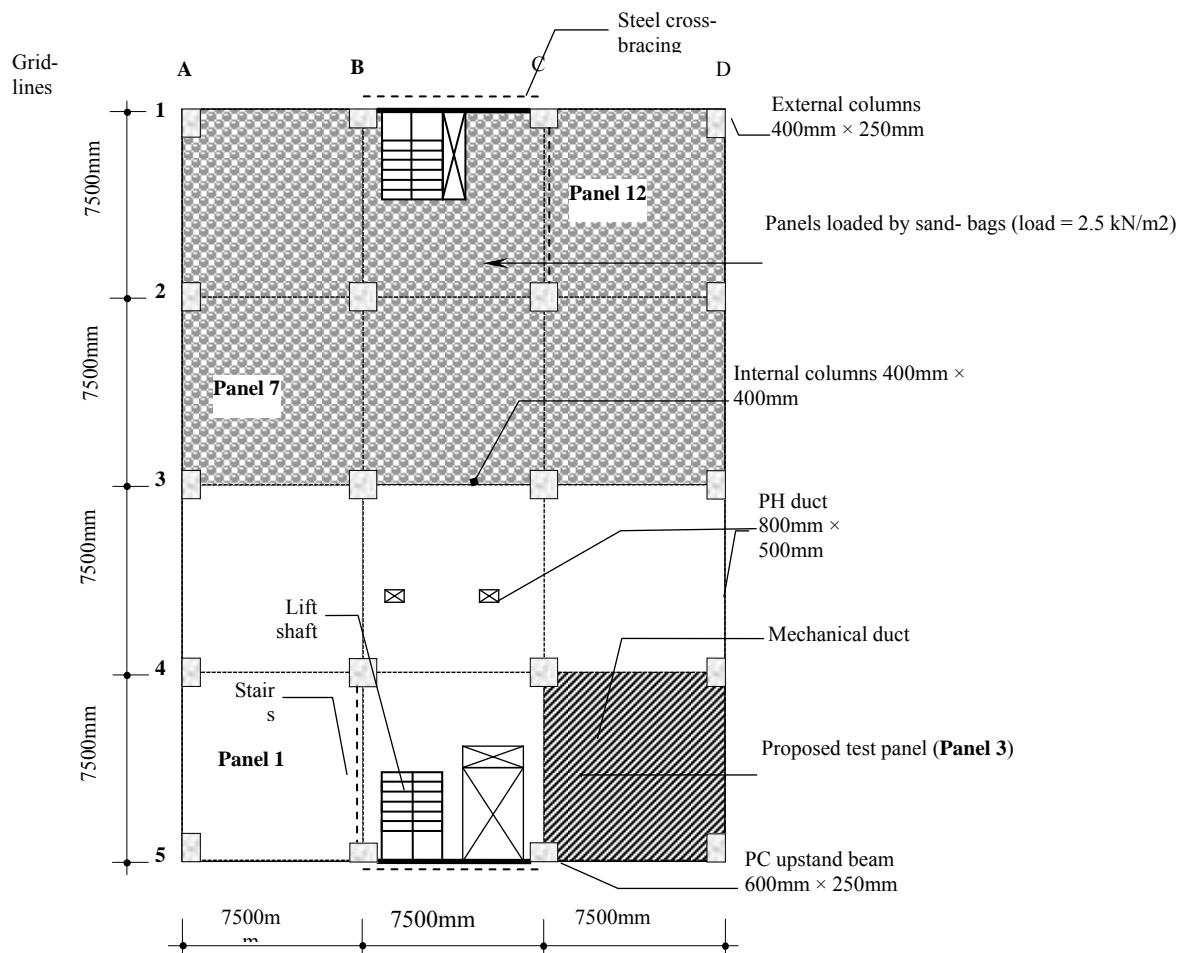


Figure 2. Typical plan view of the floor structures

Each floor had a beamless 22.5 m x 30m solid flat slab with constant thickness of 250mm and was supported by columns divided into 3 by 4 bays in plan.

This division resulted in 12 square panels spanning 7.5m between the columns. For the purpose of easy identification when a particular panel being mentioned in this

paper, the panels are numbered from 1 to 12 for the panels on the 1st floor and 13 to 24 for the panels on the 2nd floor. The numbering for the panels on the 1st floor can be seen in Figure 2, while for the 2nd floor follows the sequence as for the panels on the 1st floor.

Prior to conducting the vibration testing, a FE model comprising two floor levels, called as a 'joint two-floor FE model', was developed for the whole floor area. This was done in order to obtain a more detailed description about dynamic behavior of the floors, and especially of the vertical bending movement of the test panel during vibration.

Prior to conducting the vibration testing, a FE model comprising two floor levels, called as a 'joint two-floor FE model', was developed for the whole floor area. This was done in order to obtain a more detailed description about dynamic behavior of the floors, and especially of the vertical bending movement of the test

panel during vibration.

The flat slabs were discretised using 4-noded thin shell elements, and all columns and upstand beams were explicitly modeled using 2-noded beam elements. The 2-floor FE model comprised of 6 by 6 shell elements per panel. The length of supporting columns for each floor level was taken as 3.75 m, which was the actual height between the floor above and below. The bottom ends of ground floor columns, which were attached to the foundation, were constrained at all six DOFs. The uppermost ends of third floor columns were also assumed to be fully restrained at all six DOFs.

FE dynamic analysis was conducted to obtain the modal properties (natural frequencies and mode shapes) of the joint two-floor FE model using FE-Mtools 2.0 (DDS, 2000). The pre-test FE model and the first 13 mode shapes shown in Figure 3.

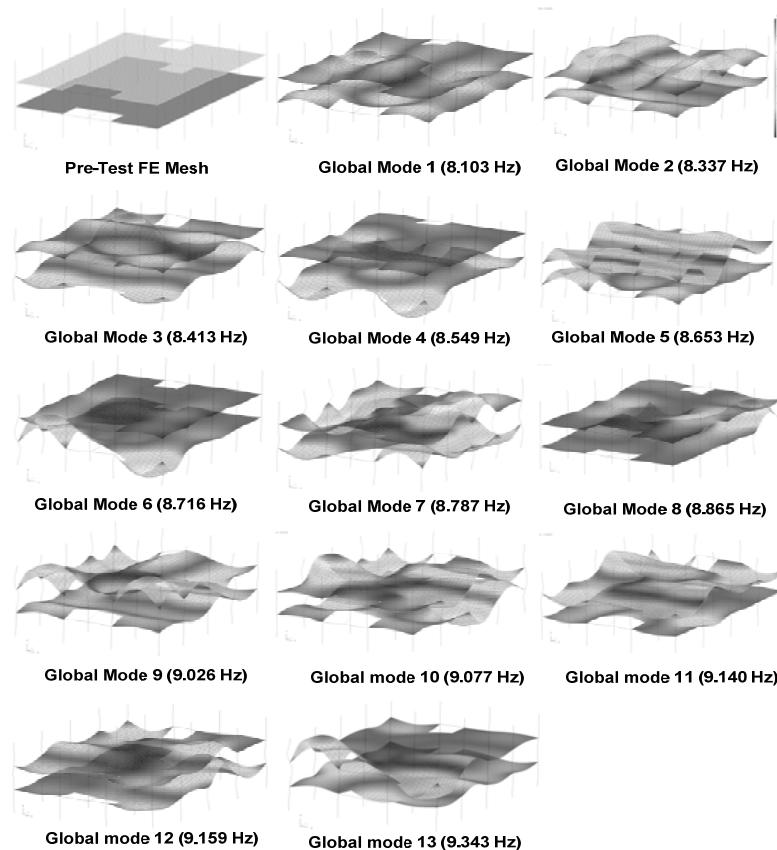


Figure 3. Pre-test FE model and the first 13 mode shapes and natural frequencies

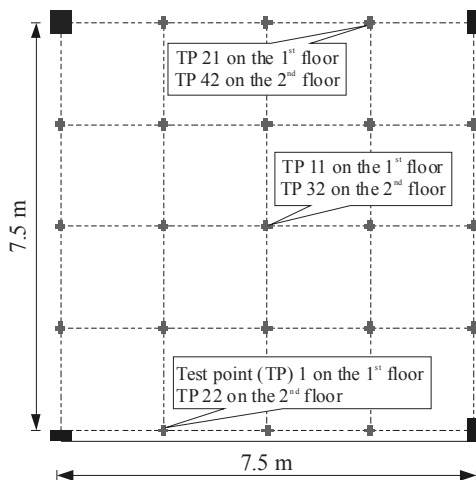


Figure 4. Proposed test grid which consists of Panels 3 (on the 1st floor level) and Panel 15 (on the 2nd floor level)

Based on this analysis a test grid was constructed as shown in Figure

4. The grid had 42 test points (TP), where TP 1 to 21 are located at Panel 3 on the 1st floor level and TP 22 to 42 are located at Panel 15 on the 2nd floor level.

A pair of corner panels of the 1st and 2nd floor levels of a full-scale experimental concrete building constructed and tested in laboratory conditions (Figures 1 and 2). The reason for conducting only the corner panels rather than the whole floors was because most of the floor areas were being loaded by sandbags for other research purposes at the time of testing. One round of testing, involving synchronous modal testing of and running and jumping measurements on the pair of corner panels, was conducted.

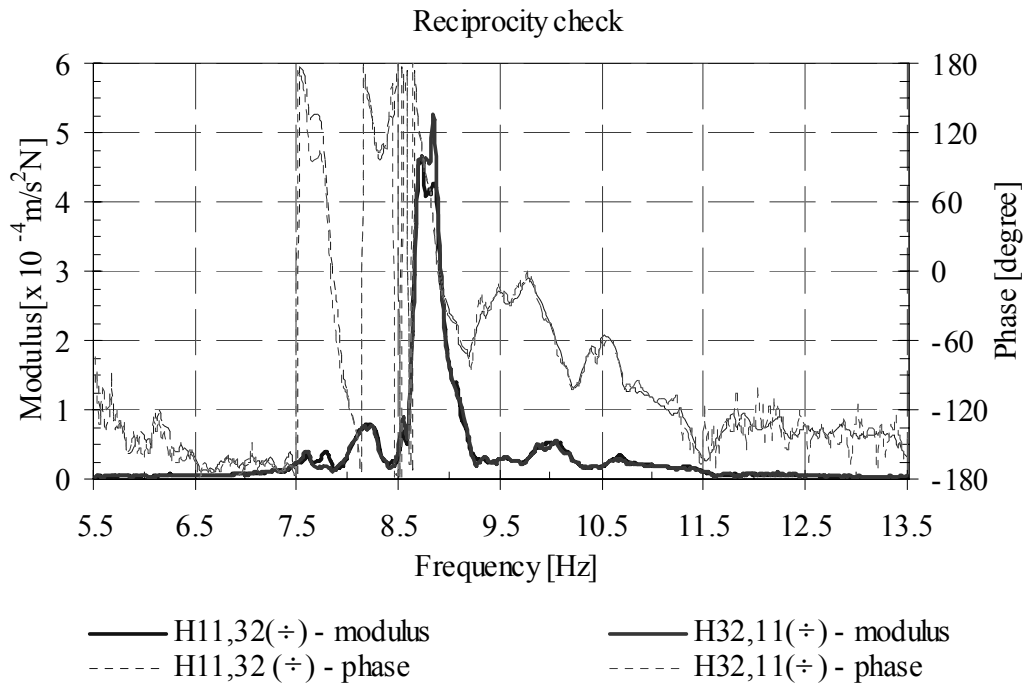


Figure 5. Reciprocity check between TP11 (on the 1st floor) and TP32 (on the 2nd floor)

After setting up the data acquisition system, the test points were marked on the test panels. Prior to conducting modal testing, a limited number of checks were performed. Firstly, the immediate repeatability check was performed

by comparing the shapes of the two FRFs. It was found that the two FRFs overlaid well and the effects of background noise were small. Next, the reciprocity check was conducted on the centre points of the two corner panels to

ensure that the structure obeys sufficiently well the Maxwell-Betty theorem of a linear system. It was also found the reciprocity check between the two points located at different floor levels was satisfactorily overlaid.

The key data acquisition parameters utilized in the FRF measurements of both panels are shown in Table 1. A swipe of modal testing was performed by using a roving APS Dynamics 113 electro-dynamics shaker as the source of excitation. A data Physics MOBILYZER SignalCalc 430 (Data Physics Corp., 2000), which was operated using a notebook PC, was used to generate the excitation voltage signal.

As the structure had closely-spaced natural frequencies, Multi-Degree of Freedom (MDOF) curve fitting of FRFs available in MODENT (ICATS, 2000) was used. The modal properties of both panels are given in Table 2.

The experimentally estimated mode shapes of both corner panels are shown in Figure 6. It can be seen that

the natural frequencies of global modes 2 and 3 at 8.625 Hz and 8.798 Hz are closely spaced. As assessed by Widjaja (2004), with the highest modal damping ratio of 2.27% is taken from mode 3, these modes satisfy the criterion for closeness of natural frequencies.

The joint two-floor FE model used for pre-test FE analysis was served as the initial FE model. The correlations between analytically calculated and experimentally estimated modal properties were done using four correlation methods:

1. Comparison of natural frequencies
2. Mode shape pairing by means of visual inspection
3. Mode shape correlation using MAC
4. Error localization using COMAC

The comparison between paired analytically calculated (FEA) and experimentally estimated (EMA) natural frequencies are presented in Table 3. The pairing was done automatically by FEMtools by initially calculating the MAC values.

Table 1. Main data acquisition parameters adopted for modal testing

Parameter description	Parameter setting/value
Data acquisition time	50 s
Frequency resolution	0.02 Hz
Frequency range of interest	Zoom 5 – 19.5 Hz
Number of Frequency domain averages	7
Force window duration (% of acquisition)	25%
Exp. window time constant	0.35
Excitation type	Logarithmic burst swept sine (chirp)
Excitation duration	10 s

Table 2. Natural frequencies and modal damping ratios of the test panels.

Global Mode No.	Natural Freq [Hz]	Modal damping ratio [%]	Floor level of observed maximum panel mode shape amplitude
1	8.223	3.81	2 nd
2	8.625	2.06	1 st
3	8.798	2.27	2 nd
4	10.028	1.96	2 nd
5	11.345	2.05	1 st

As shown in Table 3, the automatically paired EMA and FEA natural frequencies had considerable differences. This was because the FEA and EMA natural frequencies were paired by means of the highest MAC values, rather than the

closeness in natural frequencies. However, it was expected that through model updating these relatively high differences could significantly be reduced and the MAC values could also be improved.

Table 3. Automatic mode pairing between the initial FE and EMA models

No	Initial FE model		EMA model		Difference [%]	MAC [%]
	Mode	Freq. [Hz]	Mode	Freq. [Hz]		
1	5	8.73	2	8.63	1.25	84.6
2	15	9.62	1	8.22	16.94	74.6
3	19	10.77	3	8.80	22.48	76.1
4	22	11.63	5	11.35	2.52	87.2
5	24	11.98	4	10.03	19.51	65.8

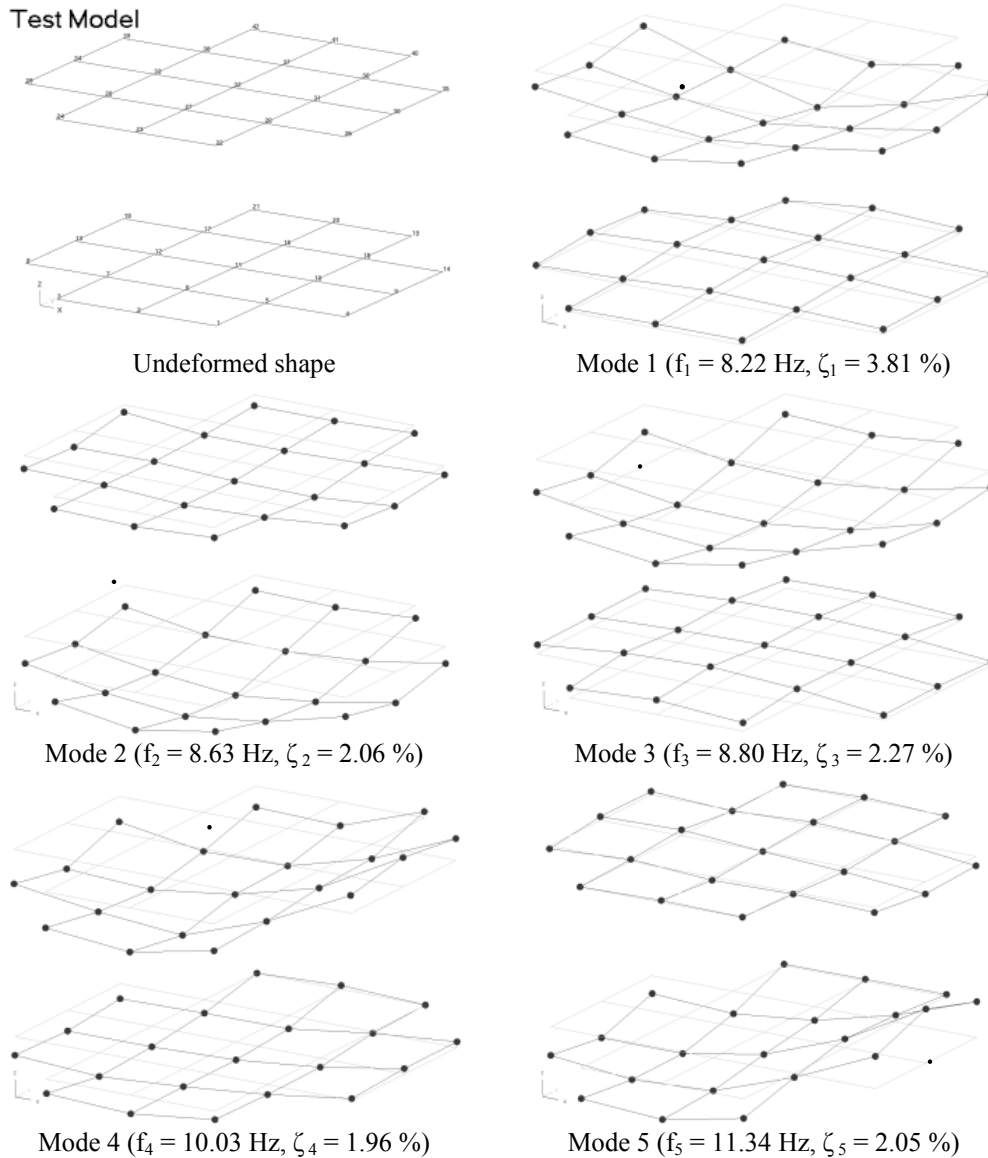


Figure 6. The first five estimated modal properties of the joint 2-level panel system

From the MAC matrix shown in Figure 7, the correlation between FEA and EMA mode shapes was also not good, and there are problems with spatial aliasing.

This problem could be, to a

great extent, attributed to insufficient data points (measured DOFs) to discriminate between the different modes (Ewins, 2000). Indeed, the test grid consisted of only a pair of corner panels, where 21 test points were used to repre-

sent one panel.

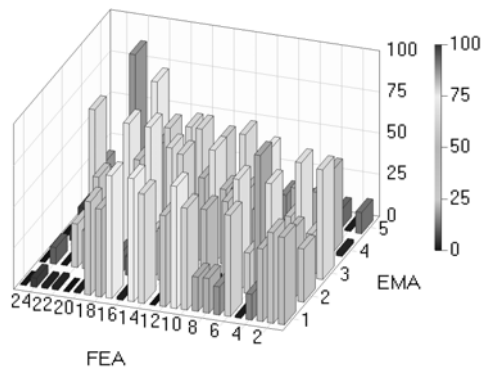


Figure 7. Isometric view of MAC matrix

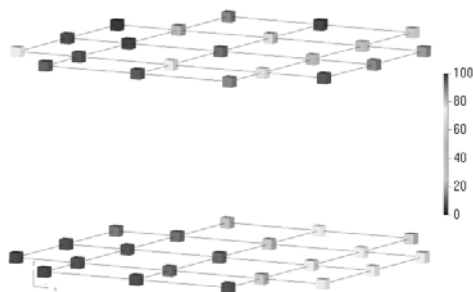


Figure 8. COMAC contour of the initial FE model using the test grid

COMAC values for the initial FE model is presented in Figure 8. As can

be seen, COMAC values for most of the test points on the first floor show good correlation between FEA and EMA DOFs. However, some of the DOFs on the second floors are poorly correlated. Considering all of the findings from correlation analysis, the initial FE model was expected to be very much improved through the model updating.

In order to come up with an updated FE model, which is in satisfactory agreement with the experimental model, conducting sensitivity analysis is necessary (Widjaja, 2004). Here, a sensitivity analysis involving parameter which shares the same category and nominal value, called 'global' parameters, was conducted using FEMTools Model Updating Suite (DDS, 2000).

There were initially 195 global parameters divided into 10 categories. The categories and number of parameters can be seen in Table 4. The result of global sensitivity analysis for the joint two-floor FE model is presented in Figure 9, which shows the sum of normalized sensitivity values considered for all five 'responses' (natural frequencies). The numbering of the parameters shown in Figure 9 follows those in Table 4.

Table 4. Global parameters of the two-joint floor FE model used for sensitivity analysis

No	Parameter No.	Category	Applied to
1.	1 – 35	Dynamic mod. of concrete ($E_{c,dyn}$)	All structural elements
2.	36 – 70	Concrete density (ρ)	All structural elements
3.	71 – 81	Cross-sectional area (A_x)	All beam and column elements
4.	82 – 92	Shear area in local y-direction (A_y)	All beam and column elements
5.	93 – 103	Shear area in local z-direction	All beam and column elements
6.	104 – 114	Torsional stiffness (I_x)	All beam and column elements
7.	115 – 125	Bending moment of inertia (I_y)	All beam and column elements
8.	126 – 136	Bending moment of inertia (I_z)	All beam and column elements
9.	137 – 160	Membrane thickness (h)	All concrete slab elements
10.	161 – 195	Poisson's ratio (ν)	All structural elements

DISCUSSION

It was revealed that the element cross-section (A_x), shear areas of (A_y and A_z) and torsional constant (I_x) of all the beams and columns are among the most insensitive global parameters. This

finding can be seen for parameters 71 up to 114 in Figure 9. On the other hand, the concrete slab thicknesses and material density of the 1st and 2nd floor panels are found to be the most sensitive global parameters.

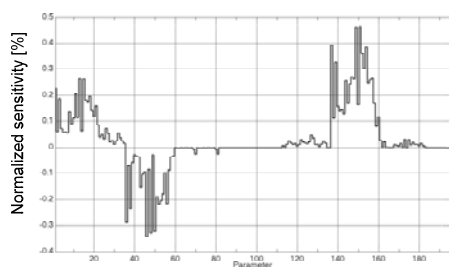


Figure 9. The sum of normalized sensitivity values of 'global' parameters

Furthermore, all the findings of global sensitivity analysis, in general, support the conclusions obtained from the local sensitivity analysis.

Table 5 summarizes the 'global' parameters of the 1st and 2nd floor levels used for model updating showing 12 categories of global parameters.

All five experimentally estimated

natural frequencies and mode shapes from modal testing conducted on both corner panels were used as the reference response. For all cases of model updating, the pairing of analytical and experimental mode shapes was automatically conducted by FEMtools (DDS, 2000) by defining minimum MAC value for the paired mode.

As it was quite difficult to pair an EMA mode shape, an analytical mode was then paired to an experimental one if their MAC value was higher 0.50. Table 3 shows the paired modes with their natural frequencies difference. The automatic pairing of mode shapes was repeated automatically in each model updating iteration. This meant that MAC values were also automatically calculated and, hence, the pairing of mode shapes might be swapped between consecutive iterations.

Table 5. Summary of the 'global' parameters selected for model updating

No.	Structural element
<i>Elastic dynamic modulus of concrete (GPa):</i>	
1.	Concrete panels on the 1 st floor
2.	Concrete panels on the 2 nd floor
3.	Columns along the North and South sides of the building
4.	Upstand beams at the East and West sides of the building
<i>Concrete density (kg/m³):</i>	
5.	Concrete panels on the 1 st floor
6.	Concrete panels on the 2 nd floor
7.	Upstand beams at the East and West sides of the building
<i>Cross-sectional area (m²):</i>	
8.	Upstand beams at the West sides of the building
<i>Bending moment of inertia (m⁴):</i>	
9.	Inner columns
10.	Upstand beams at the East and West sides of the building
11.	Columns along the North and South sides of the building
<i>Poisson's ratio of concrete:</i>	
12.	Panels 1 (at the corner of the 1 st floor) and 13 (at the corner of the 2 nd floor)

The initial FE model comprising a joint two-floor system was considered. It was found during initial updating exercises that the iteration process became very unstable and did not converge. As described by Widjaja (2004), the sensitivity-based model updating iterations converged when it satisfy the target function (CC_{abs} in FEMtools), which

was defined as the rate of change between two iteration errors. CC_{abs} was set to 0.001.

It was also found that the pairing of FEA and EMA modes swapped from one FEA mode to another. Hence, CC_{abs} always changed whenever the pairing of modes was altered. This was because the automatic pairing of FEA and EMA

modes was taken from paired modes which revealed the highest value of MAC.

As the going got tough, the target function was set to 0.005. Also, rather than having automatic pairing of FEA and EMA modes, predefined pairing was forced to be maintained during the updating process. It took more than

30 iterations to move CC_{abs} lower than 0.5% and more than 82 iterations to have the model updating iterations converged (see Figure 10).

The comparison of natural frequencies between the EMA and the initial and update FE model are presented in Table 6 and Figure 11.

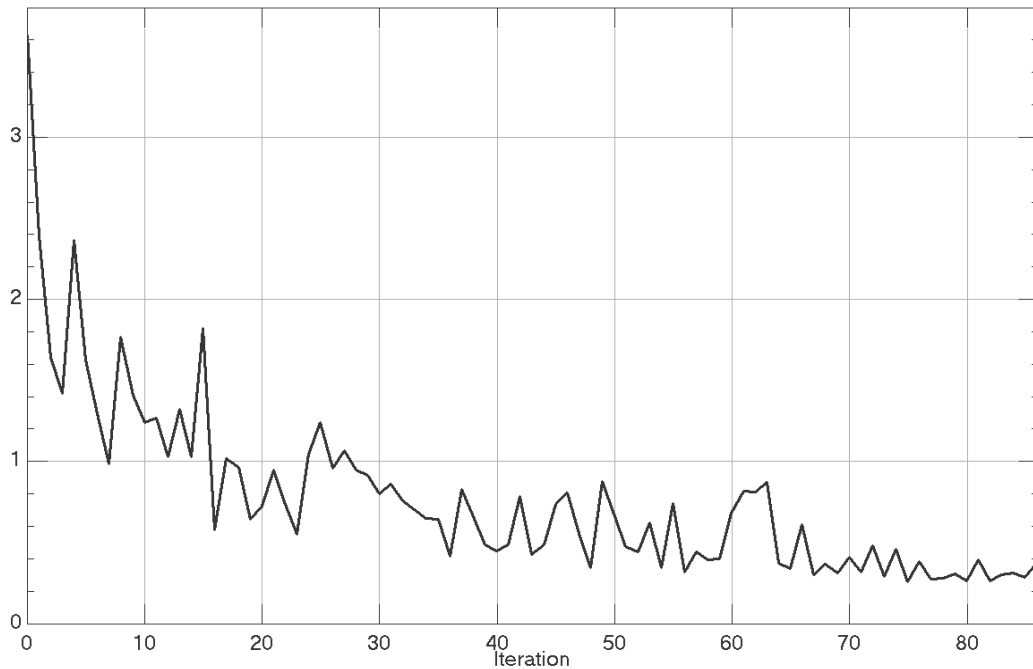


Figure 10. Model-updating iterations where vertical axis showing the value of CC_{abs} [%]

Table 6. Comparison of natural frequencies between EMA and the initial and updated FE models

No	EMA model		Initial FE model		Updated FE model	
	Mode	Freq [Hz]	Mode	Freq [Hz]	Mode	Freq [Hz]
1	1	8.22	15	9.62	1	8.22
2	2	8.63	5	8.73	5	8.63
3	3	8.80	19	10.77	8	8.80
4	4	10.03	24	11.98	16	9.98
5	5	11.34	22	11.63	22	11.25

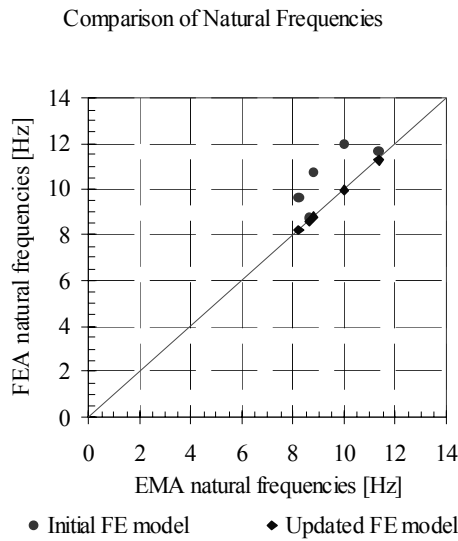


Figure 11. Comparison between EMA and initial and updated FEA models natural frequencies

It can be seen that, on average, the differences between analytically calculated and experimentally estimated natural frequencies are on average less than 0.6%, which is very small. Based on this finding, a significant improvement in the FEA model natural frequencies was achieved.

Full description of the MAC values of the updated joint floor model for each case is given in Figure 12. It can be seen, the MAC did not significantly improve after the updating. This means that the problem with spatial aliasing remains due to only small number of EMA DOFs were compared with the large number FEA counterparts.

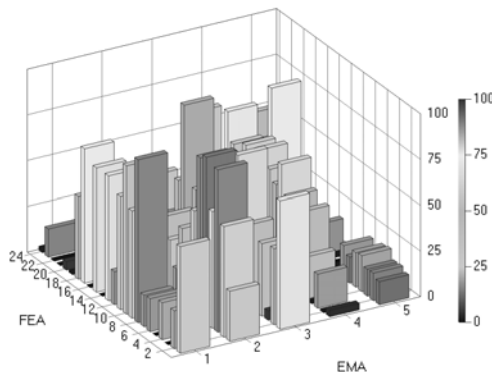


Figure 12. MAC values of the updated FE models

The COMAC diagram and contour of the updated joint two-floor FE model is presented in Figure 13. As can be seen the problem of very low COMAC values at the several test points on the 2nd floor panel does not exist. Also, the COMAC has generally very much improved.

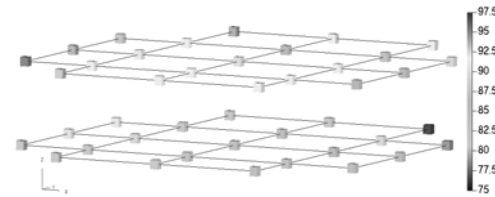


Figure 13. COMAC values of the updated FE models

Considering all these results, it can, therefore, be concluded that the updated FE model is an acceptable improvement of the initial FE model. The updated FE model was further verified against measurement data. The force time history was used to calculate time domain response at TP11 of the test grid. The analytically calculated time domain response, as can be seen in Figure 14, overlay well with the TP11 measured response. Therefore, based on this comparison, it can further be concluded that the updated FE model is a reliable analytical model of the two nominally identical real-life concrete building floors.

Conclusions

A formal procedure for conducting automatic FE model correlation and updating of two adjacent floor levels of nominally identical layout against incomplete experimental modal data (natural frequencies and mode shapes) was successfully implemented.

The success of automatic model updating was possible after good initial FE models were obtained by manual updating based on trial and error.

Therefore, combining manual and automatic updating is essential for a successful FE model correlation and updating. Furthermore, by having a reliable updated FE model, further studies, such as, simulations of vibration transmission between two adjacent floor levels can be performed with confidence.

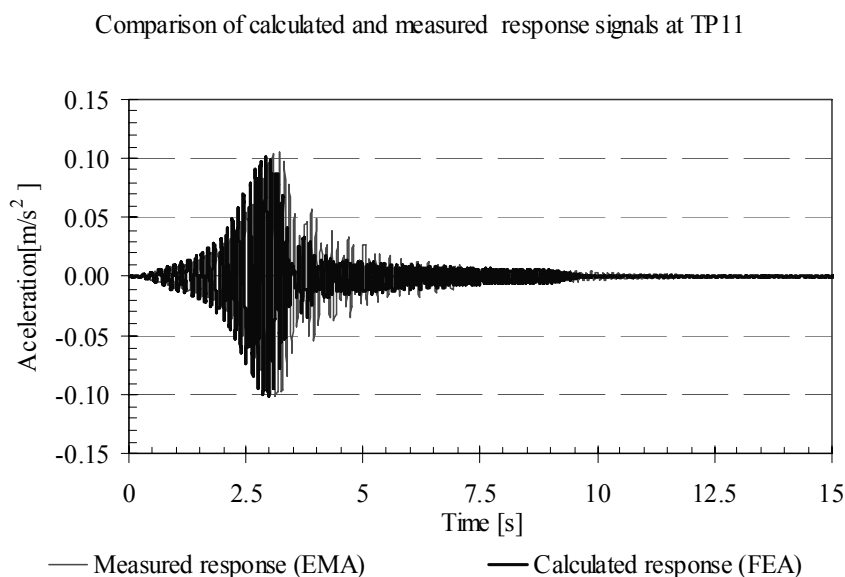


Figure 14. Comparison between measured and calculated time domain response at TP11

The number and type of FE modeling parameters used for model updating were determined based on sensitivity analysis. Sensitive parameters are those that could cause considerable change in natural frequencies and mode shapes of the FE model.

Floor mass and stiffness properties, such as modulus of elasticity, concrete density and slab thickness, were among the most sensitive parameters. Next, among sensitive parameters were also the bending stiffnesses of beams and columns. On the other hand, axial stiffnesses of columns were among the most insensitive parameters, as they had unnoticeable effect on dynamic properties of the FE model simulating vertical bending of floors.

REFERENCES

Allen, D. E., J. H. Rainer, and G. Pernica (1987), Building Vibration due to Human Activities. *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, Orlando, USA, pp. 438–447

Bachmann, H. and W. Ammann, W. (1987), *Vibrations in Structures Induced by Men and Machines*. IABSE, Zurich, Switzerland.

Data Physics Corp. (2000), *SignalCalc 440 Users Manual*. Data Physics Ltd., Huntingdon, Cambridge,

UK.

Dynamic Design Solution (DDS) NV. (2000), *FEMtools User's Guide Version 2.0*, Author, Leuven, Belgium.

ICATS (2000), *Modent, Modesh, Meshgen, Modplan Users Guide Version 6*. Author, London UK.

ICE (2000), *Research Focus*. 42, Institution of Civil Engineers (ICE), London, UK, pp.8.

Ewins, D.J. (2000), *Modal Testing—Theory, Practice and Application*, 2nd Edition, Research Studies Press Ltd., England, UK.

Hashimoto, Y. and Abe, T. (1992), Study on Large-scaled Multiple Source Problems in Environmental Vibration Engineering. *Proceeding of the 10th IMAC, Vol. I*, San Diego, USA, pp. 273–279.

Murray, T. M. (2001), *Tips for Avoiding Office Building Floor Vibrations*. Modern Steel Construction, USA.

Widjaja, T. R. (2004), *Vibration Transmission between Two Nominally Identical Building Floors*, PhD Thesis, The University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 2004.

PERUBAHAN LAJU KOROSI AKIBAT TEGANGAN DALAM DENGAN METODE C-RING

Toto Rusianto¹

¹Jurusan Teknik Mesin, Institut Sains & Teknologi AKPRIND Yogyakarta

Masuk: 19 April 2009 , revisi masuk: 29 Juni 2009, diterima: 3 Juli 2009

ABSTRACT

Stress Corrosion Cracking (SCC) generally attack to metals (steel) under internal stress. Fastener could arised internal stress to material that fastened, such as plat or other material. The experiment to observed SCC could used C-Ring method as standard ASTM G38-01(2007). Fastener and base material that made C-ring corroded in sea water with various stresses that was arrised by fastener. The result of research showed that hardness of spesimen (fastener and C-ring) was increase with increase in stress, the hardness indicated there were internal stress in spesimen. Corrosion rate for spesimen was increase with increase in stress, the higher corrosion rate at spesimen of C-ring for arrised stress 256 kg was 24,20 MPY. and lower arrised stress 69 kg was 19,14 MPY. The spesimen of fastener for arrised stress 256 kg was 7,97 MPY. and lower arrised stress 69 kg was 6,89 MPY. Duration experiment time were 9 day.

Keywords: Internal Stress, C-ring, Corrosion, Fastener, Corrosion Rate.

INTISARI

Korosi retak tegang (SCC/ *Stress Corrosion Cracking*) pada umumnya menyerang logam baja yang mengalami tegangan dalam. Tegangan dalam dapat diakibatkan adanya beban luar yang harus ditahan oleh material tersebut. Baut dapat terjadi tegangan dalam akibat pengencangan/pengikatan dari material yang diikat. Pengujian korosi retak tegang dapat dilakukan menggunakan metode *C-Ring* dengan standad ASTM G38-01(2007) dengan media korosi air laut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekerasan baut dan *C-ring* meningkat dengan meningkatnya beban. Adanya perubahan kekerasan menunjukkan adanya tegangan dalam pada spesimen. Laju korosi yang terjadi meningkat dengan meningkatnya pembebanan, korosi pada *C-ring* terbesar terjadi pada beban 256 kg sebesar 24,20 mpy dan terendah pada beban 69 kg yaitu 19,14 mpy. Sedang pada baut laju korosi terbesar pada beban 256 kg sebesar 7,97 mpy dan terendah pada beban 69 kg dengan laju korosi 6,89 mpy.

Kata Kunci: Tegangan dalam, Cincin-C, Korosi, Baut pengikat, Laju Korosi.

PENDAHULUAN

Penggunaan logam banyak digunakan dalam praktek sehari-hari mulai dari peralatan rumah tangga, konstruksi, kerangka mobil, hingga alat-alat kesehatan yang digunakan manusia. Namun logam juga masih menghadapi permasalahan dalam penggunaannya yaitu korosi. Serangan korosi umumnya berbeda-beda dan dalam kasus tertentu sangat berbahaya. Dalam perencanaan suatu konstruksi, perancang sering melupakan aspek-aspek korosi sehingga hasil dari perancangan tidak dapat berfungsi secara maksimal akibat konstruksinya terko-

rosi. Korosi memberikan permasalahan yang harus dihadapi yang tak kenal henti. Akibat korosi dapat memberikan kerugian yang cukup besar baik dari segi waktu pemakaian, pemeliharaan, perbaikan serta penggantian bagian-bagian yang rusak. Oleh karena itu perlu adanya perhatian khusus untuk meminimalkan terjadinya korosi.

Korosi dapat menyerang pada logam baik yang mengalami pembebanan maupun tidak. Pengaruh beban khususnya pada logam yang mengalami tegangan akan sangat berpengaruh terhadap ketahanan laju korosi. Korosi ini umum-

¹totorusianto@yahoo.com

nya disebut peretakan korosi-tegangan. Peretakan korosi-tegangan merupakan kombinasi adanya tegangan tarik pada logam dan adanya lingkungan yang korosif, dimana kondisi ini merupakan salah satu dari penyebab utama kegagalan material. Tegangan yang terjadi pada suatu logam umumnya berasal dari fabrikasi atau yang merupakan sisa hasil pengerjaan dan dapat juga terjadi pada saat logam sedang dalam pemakaian atau penggunaan. Dengan latar belakang ini pula maka diadakan penelitian laju korosi untuk mengetahui bagaimana pengaruh tegangan dalam yang bervariasi pada pipa dan baut yang dicelup ke dalam larutan korosif dalam hal ini menggunakan air laut.

Tujuan dilakukannya penelitian adalah untuk memahami dan mengetahui bagaimana pengaruh tegangan dalam yang dibedakan pada variasi beban terhadap laju korosi pada pipa dan baut terhadap lingkungan yang korosif.

Untuk mendapatkan sebuah analisa yang terfokus dan memudahkan dalam penyelesaian masalah khususnya korosi sebagai pengaruh dari tegangan terhadap ketahanan korosi dari material tersebut, permasalahan dibatasi pada: (1) baut sebagai elemen mesin dalam penggunaan mengalami tegangan dalam karena faktor pengencangan, untuk mengikat komponen/elemen mesin lainnya, (2) elemen mesin (*steel pipe*) yang diikat oleh baut juga mengalami tegangan akibat tekanan dari baut tersebut, akibat interaksi tersebut akan menimbulkan tegangan dalam (*internal stress*), (3) adanya *internal stress* dalam menyebabkan timbulnya korosi akibat tegangan yaitu dikenal dengan *Stress Corrosion Cracking*, (4) untuk melakukan pengujian akibat tegangan, tersebut dilakukan uji korosi dengan variabel yang berpengaruh adalah tegangan, (5) bentuk spesimen untuk uji tersebut menggunakan standar ASTM G38, menggunakan spesimen *C-ring Stress Corrosion Test*, (6) kondisi lingkungan korosi adalah air laut (*in-situ*), (7) pengamatan korosi melalui penghitungan dengan metode *weight loss*, (8) durasi pengamatan dan pengambilan data setiap 3 hari.

Korosi adalah penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungan (Threthwey, 1991). Penurunan mutu logam tidak hanya melibatkan reaksi kimia namun juga reaksi elektrokimia, yakni antara bahan terjadi perpindahan elektron. Karena elektron adalah partikel yang bermuatan negatif, maka pengangkutannya menimbulkan arus listrik sehingga reaksi demikian dipengaruhi oleh potensial listrik. Sedangkan lingkungan adalah sebutan paling mudah untuk memaksudkan semua unsur disekitar logam terkorosi pada saat reaksi berlangsung.

Jenis korosi dibedakan menjadi beberapa bentuk, hal ini digunakan sebagai dasar untuk mengklarifikasi dari korosi sehingga kita dapat mengurangi atau mengantisipasi serangan korosi. Berdasarkan hal ini korosi dapat diklarifikasikan menjadi beberapa bentuk diantaranya :

- Korosi Merata (*Uniform Attack*)
- Korosi Logam Tak Sejenis (*Galvanic Corrosion*)
- Korosi Erosi (*Erosion Corrosion*)
- Korosi Sumuran (*Pitting Corrosion*)
- Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)
- Korosi Selektif (*Selective Leaching*)
- Korosi Celah (*Crevice Corrosion*)
- Peretakan Korosi Tegangan (*Stress Corrosion Cracking*)

Peretakan korosi tegangan adalah korosi pada logam yang terjadi karena adanya gabungan antara tegangan tarik dan lingkungan yang korosif. Selama terjadi peretakan korosi tegangan, logam seperti tidak mengalami korosi pada semua permukaannya, padahal di sepanjang permukaan tersebut terjadi retakan-retakan.

Bentuk peretakan korosi tegangan memperlihatkan suatu perpatahan rapuh karena retak bercabang merambat melalui beberapa batas butir. Proses terjadinya peretakan umumnya tagak lurus dari tekanan yang terjadi dan bentuk peretakan dapat bercabang dan tidak bercabang. Bentuk peretakan yang terjadi tergantung pada komposisi logam dan kondisi lingkungan.

Faktor yang mempengaruhi peretakan korosi tegangan :

Faktor tekanan: ada beberapa perkiraan mengenai tekanan minimum yang digunakan untuk mencegah kerusakan/keropos. Tekanan minimum ini tergantung pada suhu, komposisi campuran logam, dan lingkungan. Kriteria tegangan sangat sederhana yakni logam yang dapat diregangkan. Tekanan dapat disebabkan oleh: penggunaan, residu, panas, pelepasan.

Faktor lingkungan: keretakan karena tekanan sangat dikenal dalam berbagai media yang mengandung air, tetapi terjadi juga pada cairan tertentu, larutan garam dan cairan anorganik yang tidak mengandung air. Lingkungan yang menyebabkan kerusakan karena tekanan korosi pada berbagai macam campuran logam semakin banyak, sehingga penting untuk mengevaluasi campuran logam yang ada bila komposisi lingkungan berubah. Kerusakan karena tekanan korosi dapat dipercepat oleh peningkatan suhu udara.

Faktor metalurgi: kelemahan pada peretakan korosi tegangan rata-rata dipengaruhi oleh komposisi zat-zat kimia, komposisi dan distribusi percepatan. Faktor-faktor ini selanjutnya saling berinteraksi dengan tekanan dan komposisi lingkungan yang mempengaruhi waktu peretakan. Selain itu komposisi pada paduan juga akan mempengaruhi waktu peretakan pada logam.

Mekanisme peretakan korosi tegangan sangat dipengaruhi oleh proses korosi. Sebuah lubang kecil dan takikan pada permukaan logam dapat berfungsi sebagai penyebab tekanan. Konsentrasi tekanan pada ujung lubang kecil akan meningkat dengan seketika sebagai jari-jari dari bentuk yang berkurang. Keretakan karena tekanan korosi sering diamati berdasarkan dari sebuah lubang kecil. Jika terjadi peretakan, bagian ujung yang mempercepat keretakan memiliki jari-jari yang kecil dan konsentrasi tekanan yang menyertainya adalah besar.

Deformasi plastik dari suatu campuran logam dapat terjadi dengan cepat pada permukaan sebelum adanya tanda keretakan, hal ini terjadi karena tingginya tekanan.

Pada reaksi elektrokimia terjadi reaksi anoda dan katoda dimana kedua

reaksi terjadi secara bersamaan dan mempunyai hubungan listrik agar terjadi perpindahan elektron. Ada empat komponen dalam proses terjadinya reaksi korosi

- anoda
- katoda
- elektrolit
- hubungan listrik

Penghilangan salah satu dari keempat komponen akan menghentikan reaksi korosi.



gambar 1. Retakan korosi tegangan pada stainless steel (Fontana, 1987)

Korosi logam umumnya terjadi melalui proses elektrokimia, sehingga penting untuk mengetahui dasar dari reaksi elektrokimia yang terjadi pada proses korosi. Reaksi anoda, logam mengalami reaksi oksidasi pada proses korosi. Secara umum reaksi anodik dapat ditulis



banyak elektron yang diambil dari masing-masing atom ditentukan oleh valensi logam. Reaksi katoda, banyak terjadi selama proses korosi pada logam. Reaksi umum yang terjadi adalah: (1) pelepasan hidrogen $2H^+ + 2e \rightarrow H_2$ (2) reduksi oksigen dalam larutan asam $O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$ (3) reduksi oksigen dalam larutan netral dan alkali $O_2 + 2H_2O + 4e \rightarrow 4(OH)^-$ dan (4) reduksi ion logam $M^{3+} + e \rightarrow M^{2+}$

Pelepasan hidrogen merupakan suatu reaksi katodik yang umum dalam larutan asam dan pada setiap reaksi terjadi penangkapan elektron.

Peretakan korosi tegangan adalah korosi pada logam yang terjadi karena adanya gabungan antara tegangan tarik dan lingkungan yang korosif. Selama terjadi peretakan korosi tegangan, logam seperti tidak mengalami korosi pada semua permukaannya, padahal di sepanjang permukaan tersebut terjadi retakan-retakan. Korosi sumuran menjadi pemicu terbentuknya korosi retak tegang. Bentuk retak yang terdapat pada daerah korosi sumuran adalah intergranular bercabang yang merupakan hasil dari serangan klorida pada baja karbon rendah (Badarudin, 2005).

Baja karbon rentan terhadap peretakan korosi tegangan yang disebabkan oleh beberapa perusakan, termasuk dalam larutan amoniak encer, karbonat, asam sianida, hidrosida, nitrat dan amonia anhidro (tidak mengandung air). Peretakan keduanya adalah peretakan intergranular dan transgranular, pembentukannya terjadi dalam nitrat dan hidrosida panas, dan kemudian dalam larutan asam sianida hangat (ASTM, 2007).

Batas konsentrasi dan temperatur untuk kerentanan korosi peretakan tegangan dari baja karbon dalam soda api (sodium hidroksid) didefinisikan dengan baik. Untuk contoh, peretakan korosi tegangan tidak dianggap menjadi sebuah permasalahan dibawah suhu 88°C dalam larutan dietanolamin dan monoetanolamin encer yang digunakan untuk membuang hidrogen sulfida dan karbondioksida keluar dari gas alam dan aliran sintesis gas yang kaya akan hidrogen. Meskipun demikian, pengalaman baru dalam kilang minyak bumi menyebabkan adanya pengakuan umum bahwa proses peretakan korosi tegangan yang bersifat pelepasan tekanan termal, harus diterapkan pada baja karbon biasa yang digunakan dalam amino encer pada semua konsentrasi dan temperatur.

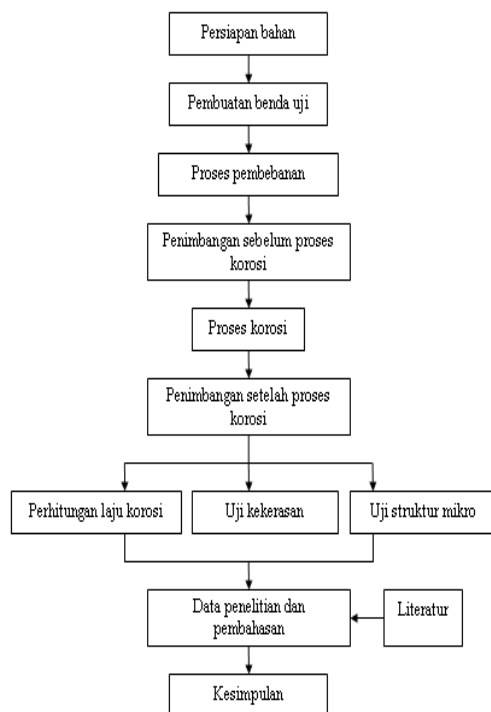
Bentuk peretakan korosi tegangan memperlihatkan suatu perpatahan rapuh karena retak bercabang merambat melalui beberapa batas butir. Proses terjadinya peretakan umumnya tagak lurus dari tekanan yang terjadi dan bentuk peretakan dapat bercabang dan tidak bercabang. Bentuk peretakan yang terjadi

tergantung pada komposisi logam dan kondisi lingkungan.

Mekanisme peretakan korosi tegangan sangat dipengaruhi oleh proses korosi. Sebuah lubang kecil dan takikan pada permukaan logam dapat berfungsi sebagai penyebab konsentrasi tekanan. Konsentrasi tekanan pada ujung lubang kecil akan meningkat dengan seketika sebagai jari-jari dari bentuk yang berkurang. Keretakan karena tekanan korosi sering diamati berdasarkan dari sebuah lubang kecil. Jika terjadi peretakan, bagian ujung yang memprocepat keretakan memiliki jari-jari yang kecil dan konsentrasi tekanan yang menyertainya adalah besar. Deformasi plastik dari suatu campuran logam dapat terjadi dengan cepat pada permukaan sebelum adanya tanda keretakan, hal ini terjadi karena tingginya tekanan.

Mamlu (2001) menyimpulkan besarnya beban penekanan pada besi beton sebelum mengalami proses korosi akan sangat berpengaruh sekali terhadap laju korosi yang terjadi pada besi tersebut. Bahwa semakin besar penekanan (pemberian beban) yang diberikan pada spesimen maka laju korosi yang terjadi akan semakin besar. Menurut Sutopo (2001) berdasarkan pengujian tarik dapat diketahui bahwa kuningan yang dikorosi dengan media korosi air aki maka kekuatan tariknya akan semakin turun. Kemudian pada kuningan yang dikorosi air aki dan air garam akan bersifat lebih lunak dan mudah patah. Dan hasil pengujian diketahui bahwa kekuatan terkecil terjadi pada media air aki pada durasi 30 hari yaitu $50,72 \text{ kg/mm}^2$. sedangkan pada media air tawar kekuatan tariknya hampir sama. Sedangkan As'ad (2007) melakukan perhitungan laju korosi dengan durasi waktu 0,5 jam, 1 jam, dan 1,5 jam mendapatkan nilai selisih W (berat yang hilang) yang semakin naik, ini disebabkan karena semakin lama logam berada pada lingkungan korosif maka semakin banyak pula logam yang akan terkikis. Sedangkan untuk nilai laju korosi (MPY) yang semakin menurun, penyebab menurunnya nilai laju korosi adalah karena pertama konsentrasi larutan yang berubah karena proses korosi.

Nugroho (2005) menghitung laju korosi dengan metode pencelupan yang dilakukan dari benda uji didapat nilai selisih dari berat awal dan berat akhir dari tiap-tiap proses korosi. Untuk benda uji dengan suhu pemanasan 400°C durasi pencelupan 4 jam didapat laju korosi 34,795 mm/tahun, pada benda uji dengan suhu pemanasan 500°C durasi pencelupan 4 jam didapat laju korosi 30,667 mm/tahun dan pada benda uji yang sama dengan suhu pemanasan 600°C durasi pencelupan selama 4 jam didapat laju korosi 35,148 mm/tahun.

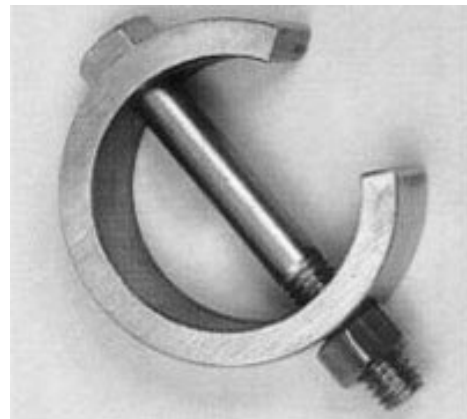


Gambar 2. Diagram alir penelitian

Mathari (2005) dengan menggunakan metode Tafel, mendapati bahwa laju korosi pada baja tahan karat jenis ferit (logam utama/ base metal) adalah sebesar 185,515 mpy, laju korosi pada baja tahan karat jenis austenit (logam utama/ base metal) adalah 123,142 mpy. Proses reaksi korosi cepat terjadi pada baja tahan karat jenis ferit, baik itu pengelasan similar (baja tahan karat jenis ferit & ferit) atau pengelasan dissimilar (baja tahan karat jenis austenit & ferit).

Agar penelitian dapat terarah, proses penelitian mengikuti diagram alir seperti pada gambar 2.

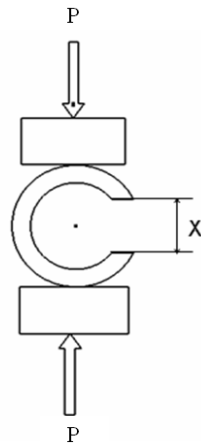
Metode penelitian antara lain benda uji yang digunakan dalam penelitian korosi adalah baut dan C-ring dari pipa. Bentuk dari spesimen menggunakan standar ASTM G38-01(2007) *Standard Practice for Making and Using C-Ring Stress-Corrosion Test Specimens*. Fungsi cincin C merupakan sebuah pegas dimana memberikan tegangan pada baut. Atau sebaliknya baut yang dikencangkan akan memberikan tegangan pada C ring, bentuk spesimen penelitian seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Benda uji

Dalam penelitian ini benda uji terlebih dahulu dilakukan proses pembebanan, untuk menentukan besarnya nilai beban yang akan diberikan pada benda kerja. Adapun besarnya beban yang diberikan pada benda uji adalah 69 kg, 136 kg, 196 kg dan 256 kg. Pemberian beban memberikan efek tegangan dalam pada spesimen. Hal tersebut dikarenakan material yang mengalami tegangan dalam kekerasannya akan meningkat.

Metode pemberian beban pada spesimen adalah sebelum pemasangan baut, C-ring diberikan beban dengan menggunakan *universal testing machine*. Deformasi yang terjadi ditandai dengan terjadinya jarak celah C-ring yang mengecil (lihat Gambar 4 tanda X). Besarnya nilai X diukur sebagai referensi untuk pengecangan C-ring oleh baut, yang merupakan besarnya nilai beban yang diberikan.



Gambar 4. Metode pembebanan pada C-ring

Benda uji dilakukan pengujian kekerasan hal ini dilakukan untuk membandingkan kekerasan benda uji yang satu dengan yang lain. Uji kekerasan bertujuan untuk menunjukkan adanya indikasi tegangan dalam yang terjadi pada konstruksi.

Waktu yang digunakan dalam percobaan korosi dilakukan selama 3 hari, 6 hari dan 9 hari. Lama waktu pengujian ini dimaksudkan agar proses pengurangan berat (*weight loss*) yang terjadi pada benda uji dapat diamati secara cermat, sehingga akan mudah dalam menghitung laju korosi.

Media korosi yang digunakan dalam pengujian ini adalah air laut. Proses pengujian menggunakan metode pencelupan dimana seluruh benda uji tercelup kedalam media korosi. Media korosi diasumsikan stabil dan pengaruh udara terhadap wadah pengujian yang terbuka dianggap dalam kesetimbangan.

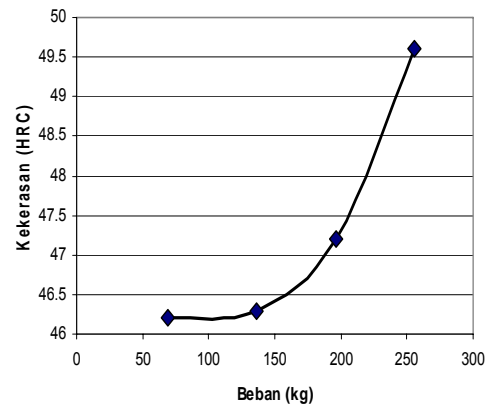
Metode uji korosi dengan menghitung selisih berat antara sebelum dan sesudah dikorosikan. Untuk mengetahui laju korosi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini (Fontana, 1987).

$$MPY = \frac{534W}{DAT} \dots\dots\dots(1)$$

PEMBAHASAN

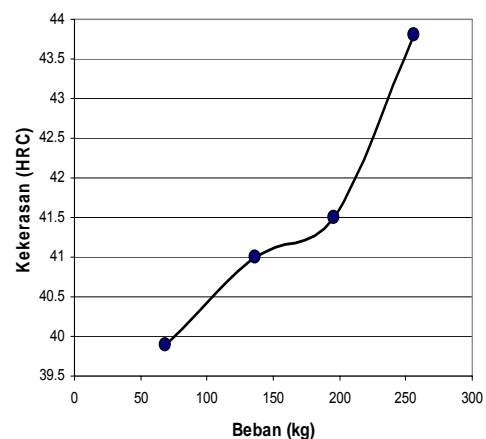
Pengujian kekerasan pada benda uji menggunakan alat uji kekerasan Rockwell dengan menggunakan pembebanan atau penggunaan beban 150 Kg,

dan penetrator yang digunakan adalah diamond cone. Tujuan pengujian kekerasan adalah untuk mengetahui pengaruh beban terhadap terjadi tegangan dalam yang terjadi pada baut. Berikut Gambar 5 dan 6 grafik hasil pengujian kekerasan pada C ring dan Baut.



Gambar 5. pengaruh beban terhadap kekerasan pada C ring.

Dari hasil pengujian kekerasan yang dilakukan pada benda uji didapatkan nilai kekerasan yang berbeda-beda. Besarnya pembebanan yang dikenakan mempengaruhi nilai kekerasan dimana semakin besar beban yang dikenakan pada benda uji nilai kekerasan yang terjadi cenderung semakin besar. Untuk C-ring kekerasan rata-rata tertinggi terjadi pada benda uji dengan beban 256 kg yaitu $49,6 \pm 3,46$ % HRC.



Gambar 6. pengaruh beban terhadap kekerasan pada baut.

Sedangkan untuk kekerasan rendah terdapat pada benda uji yang me-

ngalami pembebanan 69 kg yaitu $46,2 \pm 1,58$ % HRC. Sedangkan pada Baut kekerasan rata-rata tertinggi terjadi pada benda uji dengan beban 256 kg yaitu $43,8 \pm 2,10$ % HRC. Sedangkan untuk kekerasan terendah terdapat pada benda uji yang mengalami pembebanan 69 kg yaitu $39,9 \pm 4,72$ % HRC

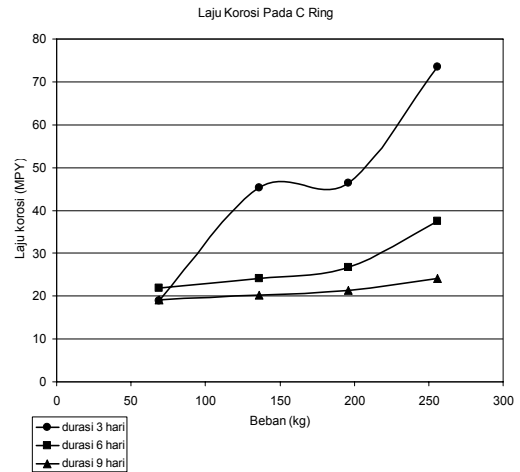
Bahan yang mengalami pembebanan pada umumnya terjadi peningkatan tegangan dalam yang dikenal dengan strain hardening. Terjadinya strain hardening juga sangat dipengaruhi oleh seberapa besar beban luar yang dikenakan pada bahan tersebut. Beban khususnya beban tarik yang dikenakan pada bahan maka bahan akan mengalami reaksi terhadap beban tersebut dengan mengalami deformasi dalam hal ini mengalami regangan/*strain*. Selama regangan masih dalam batas kemampuan bahan untuk menahan, maka energi dari luar tersebut yang berupa beban tarik, akan digunakan oleh bahan untuk mengalami peregangan. Akibatnya energi dalam bahan akan meningkat. Atau hal ini dikenal dengan terjadinya *internal stress*/tegangan dalam. Semakin besar tegangan dalam terjadi dapat menyebabkan kerusakan/perpatahan pada bahan, jika tegangan tersebut melebihi dari kemampuan dari kekuatan bahan itu sendiri.

Pengaruh pembebanan pada bahan dalam hal ini bahan diberikan tegangan tarik dan pengukuran internal stress diukur dengan tingkat kekerasan dari bahan. Semakin besar tegangan tarik yang diberikan maka semakin besar pula kekerasan yang terjadi pada bahan. Hal ini dibuktikan dengan pengujian kekerasan pada C ring dan Baut yang diberi beban tarik bervariasi, dimana kekerasannya meningkat.

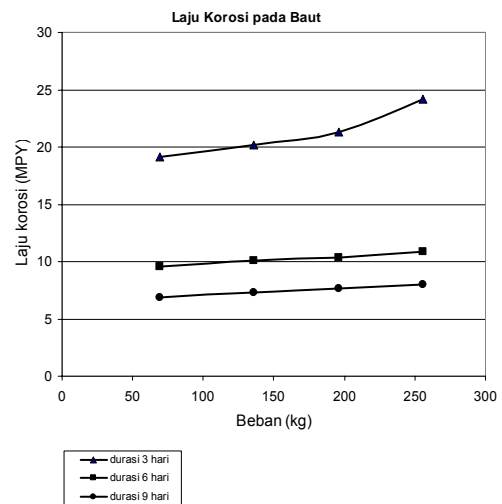
Untuk mengetahui laju korosi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (1) dan hasil uji korosi dengan menghitung selisih berat pada durasi waktu tertentu, memberikan hasil berupa grafik sebagai berikut (Gambar 7 dan 8).

Korosi adalah penurunan mutu logam akibat reaksi elektrokimia dengan lingkungan (Threthwey and Chamberlain, 1991, hal : 25). Penurunan mutu logam tidak hanya melibatkan reaksi kimia na-

mun juga reaksi elektrokimia, yakni antara bahan terjadi perpindahan elektron.



Gambar 7. Pengaruh Tegangan Dalam Terhadap Laju Korosi pada C ring



Grafik 8. Pengaruh Tegangan Dalam Terhadap Laju pada Baut

Karena elektron adalah partikel yang bermuatan negatif, maka pengangkutannya menimbulkan arus listrik sehingga reaksi demikian dipengaruhi oleh potensial listrik. Sedangkan lingkungan merupakan media yang paling mudah untuk menghantarkan elektron di sekitar logam terkorosi.

Dalam reaksi elektrokimia, reaksi yang menghasilkan elektron disebut reaksi anoda, disebut juga proses oksidasi. Sedangkan reaksi yang menangkap elektron adalah reaksi reduksi dan disebut reaksi katoda (Widharto, 1999). Kedua reaksi ini terjadi di daerah antarmuka

antara bahan padat dan bahan cair. Perlu disadari bahwa baik reaksi anoda maupun katoda bisa berlangsung di permukaan logam yang sama.

Reaksi yang terjadi pada proses korosi dengan media korosi air garam adalah sebagai berikut:

- Proses ionisasi
 $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
- Oksidasi
 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2e$
 $\text{Fe}^{2+} + \text{Cl}^- \rightarrow \text{FeCl}_2$
- Reduksi
 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e \rightarrow 4(\text{OH})^-$
- Hasil reaksi
 $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$

Dalam hal ini *ferro clorida* (FeCl_2) merupakan tahap proses korosi yang terjadi didalam proses korosi dengan larutan garam secara kontinue. Jika Cl terbatas Fe masih mengalami oksidasi yang dapat menimbulkan korosi karena masih ada senyawa H_2O .

Berdasarkan data penelitian korosi yang telah dilakukan pada benda uji terdapat hasil laju korosi yang berbeda-beda dari masing-masing benda uji. Besarnya beban yang dikenakan pada benda uji memberikan pengaruh terhadap laju korosi. Pada benda uji dengan beban yang semakin besar mengakibatkan cacat-cacat permukaan yang semakin banyak dimana banyak permukaan yang terkelupas dan membentuk suatu lubang-lubang atau ceruk, lubang pada benda uji ini menyebabkan mempercepat terjadinya korosi. Korosi ini umumnya yang terjadi adalah korosi merata. Adanya tegangan dalam pada benda uji menyebabkan timbulnya gradien tegangan pada bagian bebas dan yang mengalami tegangan. Sehingga dapat menimbulkan adanya muatan kutub anoda dan katoda sehingga dapat menimbulkan korosi. Kutub anoda akan timbul pada bagian yang mengalami tegangan dalam yang paling besar, sedang kutub katoda timbul pada bagian yang mengalami tegangan dalam paling rendah. Dengan demikian korosi akan timbul pada bagian yang paling kritis pada benda uji dimana mengalami tegangan dalam terbesar. Pada C-ring tegangan terbesar pada bagian punggung sedang pada baut pada bagian tengah.

Pada benda uji yang dikorosi baik C-ring maupun pada baut didapatkan nilai laju korosi yang semakin tinggi seiring dengan semakin besar beban pada benda uji yang menyebabkan adanya cacat-cacat pada permukaan benda uji dimana pada bagian yang cacat merupakan bagian yang paling rentan terhadap serangan korosi. Untuk C-ring yang dikorosi dengan durasi 3 hari laju korosi tertinggi terjadi pada pembebanan 256 kg yaitu 73,42 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 18,84 MPY. Sedangkan pada baut laju korosi tertinggi terjadi pada beban 256 kg yaitu 16,70 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 15,45 MPY.

Untuk C-ring yang dikorosi dengan durasi 6 hari laju korosi tertinggi terjadi pada pembebanan 256 kg yaitu 37,52 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 21,94 MPY. Sedangkan pada baut laju korosi tertinggi terjadi pada beban 256 kg yaitu 10,84 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 9,59 MPY. Sementara untuk C-ring yang dikorosi dengan durasi 9 hari laju korosi tertinggi terjadi pada pembebanan 256 kg yaitu 24,20 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 19,14 MPY. Sedangkan pada baut laju korosi tertinggi terjadi pada beban 256 kg yaitu 7,97 MPY dan terendah pada beban 69 kg yaitu 6,89 MPY.

KESIMPULAN

Peningkatan pembebanan pada spesimen C ring dan baut, kekerasannya makin meningkat. Pengaruhnya terhadap laju korosi pada C-ring dan baut meningkat dengan naiknya beban yang diberikan. Laju korosi benda uji (C-ring) yang dikorosi dengan durasi 9 hari didapatkan nilai laju korosi tertinggi pada beban 256 kg yaitu sebesar 24,20 MPY dan laju korosi terendah pada beban 69 kg sebesar 19,14 MPY. Pada baut laju korosi dengan durasi 9 hari, tertinggi pada beban 256 kg yaitu sebesar 7,97 MPY dan laju korosi terendah pada beban 69 kg sebesar 6,89 MPY.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM G38-01(2007) *Standard Practice for Making and Using C-Ring*

- Stress - Corrosion Test Specimens* <http://www.imrtest.com>.
- As'ad, M.A, 2007, Hot Dipping Plat Baja Pada Al Cair Dengan Variasi Waktu Terhadap Ketahanan Korosi Lapisan, Skripsi, Teknik Mesin, Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Akprind Yogyakarta.
- Badaruddin, M.S., 2005. Efek Shot Peening Terhadap Korosi Retak Tegang (SCC) Baja Karbon Rendah dalam Lingkungan Air Laut, *Jurnal Teknik Mesin*, Universitas Kristen Petra Vol 7, no.1 April 2005., hal 11–14.
- Fontana, M.G., 1986, *Corrosion Engineering*, 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Mamlu, MH, 2001, *Penelitian Sifat Fisis Dan Mekanis Pada Besi Beton Yang Mendapat Beban Tekan Dan Dikorosi*, Skripsi, Teknik Mesin, Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Akprind Yogyakarta.
- Mathari, 2005, *Laju Korosi Pada Pengeelasan Baja Tahan Karat Similar Dan Dissimilar*, Skripsi, Teknik Mesin, Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Akprind Yogyakarta.
- Nugroho, RA, 2005, *Korosi Pada Baja Paduan Cr (Bohler M300) Yang Mengalami Proses Pemanasan*, Skripsi, Teknik Mesin, Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Akprind Yogyakarta.
- Sutopo, E, 2001, *Pengaruh Media Korosi Pada Kuningan Terhadap Laju Korosi, Kekuatan Tarik, Kekerasan Dan Struktur Mikro*, Skripsi, Teknik Mesin, Teknologi Industri, Institut Sains Dan Teknologi Akprind Yogyakarta.
- Trethewey, K.R. and Chamberlain J., 1991, *Korosi Untuk Mahasiswa Dan Rekayasawan*, Gramedia, Jakarta.
- Widharto, S., 1999, *Karat Dan Pencegahannya*, Pradnya Paramita, Jakarta