

STUDI EKSPERIMENTAL PERFORMANSI SISTEM KOLEKTOR SURYA JENIS PALUNG SILINDRIS DENGAN ABSORBER MULTI-PIPA

Hary Wibowo¹

ABSTRACT

Solar collector cylindrical troughs with multi pipe absorbers were observed to find the best collector performance. The research put on two types collector arrangements, that are series and parallel arrangement. There are three type configurations of absorber pipes consisting of 3, 4, and 6 pipes. The objective of this research is to find a simple construction of solar collector that produce high temperature working fluid.

Three collectors were observed simultaneously. Each collector installed a type configuration and a type arrangement. Water flow rates in this experimental were 50, 125, 175, and 300 cc/minute. Observation on three collectors was done on the same time, condition, and flow. Data of observation result used to calculate actual and ideal collector efficiency. The results are presented in table and graphic to be analyzed.

Results of calculation indicate the collector efficiency on each absorber pipe arrangement and configuration. The higher collector efficiency on series arrangement, is 0.763, that was resulted from collector with 3 pipe configuration in 175 cc/minute debit of flow. The higher collector efficiency on parallel arrangement, is 0.491, also resulted from the collector with 3 pipe configuration in 175 cc/minute debit of flow too. The final conclusion, collector 3 pipe configuration in series arrangement with 175 cc/minute debit of flow is the best collector cylindrical trough in this research.

Key words : solar collector, cylindrical trough, multi pipe absorber

INTISARI

Kolektor surya palung silindris dengan absorber multi-pipa diteliti guna mendapatkan performansi kolektor terbaik. Penelitian ini dilakukan pada kolektor dengan dua macam susunan pipa absorber, yaitu seri dan paralel. Masing-masing susunan terdiri 3 macam konfigurasi pipa absorber yaitu 3 pipa, 4 pipa, dan 6 pipa. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar untuk mewujudkan konstruksi sistem kolektor sederhana dan menghasilkan temperatur fluida kerja tinggi.

Kolektor yang diteliti sebanyak tiga buah. Masing-masing kolektor dipasang satu macam konfigurasi dan susunan pipa absorber. Aliran fluida kerja kolektor terdiri 4 macam yaitu 50, 125, 175, dan 300 cc/menit. Pengamatan pada ketiga kolektor tersebut dilakukan pada saat dan kondisi serta aliran yang sama. Data hasil pengamatan digunakan untuk menghitung efisiensi kolektor aktual dan teoritis. Hasil perhitungan dipaparkan dalam bentuk tabel dan gambar grafik guna dianalisa.

Hasil perhitungan dapat menunjukkan efisiensi kolektor masing-masing susunan dan konfigurasi pipa absorber. Efisiensi kolektor tertinggi pada susunan seri, sebesar 0,763, dihasilkan oleh kolektor dengan konfigurasi 3 pipa pada debit aliran 175 cc/menit. Efisiensi kolektor tertinggi pada susunan paralel, sebesar 0,491, juga dihasilkan oleh kolektor dengan konfigurasi 3 pipa pada debit aliran 175 cc/menit pula. Kesimpulan akhir, kolektor dengan konfigurasi 3 pipa susunan seri pada aliran 175 cc/menit adalah kolektor palung silindris yang terbaik dalam penelitian ini.

Kata kunci: kolektor surya, palung silindris, absorber multi-pipa

PENDAHULUAN

Salah satu jenis kolektor surya untuk fluida kerja cair adalah *flat plate collector*. Jenis kolektor ini pada umumnya digunakan untuk menghasilkan temperatur fluida kerja rendah. Aplikasi kolektor plat datar yang sudah diproduksi

secara masal untuk peralatan rumah tangga adalah *water heater*. Adapun jenis kolektor yang dapat menghasilkan temperatur fluida kerja lebih tinggi salah satunya adalah kolektor konsentrator. Kebanyakan jenis kolektor ini mempunyai bentuk yang sulit dibuat, misalnya

¹ Staf pengajar Jurusan Teknik Mesin IST AKPRIND Yogyakarta

Compound Parabolic Concentrator (CPC). Kolektor palung silindris termasuk kolektor konsentrator yang mempunyai bentuk sederhana namun mempunyai harga *concentration ratio* yang rendah.

Jenis kolektor yang dapat menghasilkan temperatur seperti yang diharapkan tersebut adalah tipe konsentrator. Kolektor konsentrator parabola terpusat (*CPC-Compound Parabolic Concentrator*) jenis *cusp* dapat memenuhi harapan tersebut, namun konstruksinya rumit dan kurang praktis pembuatannya.

Aplikasi kolektor yang diarahkan pada teknologi tepat guna memerlukan bentuk kolektor yang praktis, sederhana, mudah pembuatannya dan dapat menghasilkan temperatur yang relatif tinggi, sesuai dengan yang diharapkan. Kolektor palung silindris (*cylindrical trough collector*) yang merupakan salah satu jenis kolektor konsentrator *low - concentrating* menjadi salah satu alternatif pilihan pemecahan masalah tersebut yang dalam hal ini digunakan absorber multi-pipa.

Absorber multi-pipa pada konsentrator jenis palung silindris ini dimaksudkan untuk mengoptimalkan penangkapan pantulan sinar matahari yang masuk kolektor. Selanjutnya hal tersebut diharapkan akan menghasilkan temperatur keluar palung optimal.

Kolektor surya digunakan untuk menangkap pancaran sinar matahari. Energi surya tersebut kemudian diserap oleh fluida kerja yang mengalir dalam pipa-pipa absorber. Kalor yang terkandung dalam fluida kerja tersebut pada umumnya tidak langsung dimanfaatkan, namun perlu ditampung lebih dulu dalam *heat storage*. Penelitian yang akan dilaksanakan hanya menitikberatkan pada sistem kolektor saja. Kolektor yang dapat menghasilkan temperatur tinggi diperlukan untuk memenuhi kebutuhan temperatur kerja serta mengatasi kerugian kalor pada *storage*. Banyaknya energi yang tertangkap ini ditunjukkan oleh besar peningkatan temperatur fluida kerja dalam kolektor.

Edenburn (1976) melakukan penelitian analisis performansi kolektor terfokus dan dibandingkan dengan hasil eksperimen. Penelitian ini dilakukan pada kolektor memusat dengan suatu reflektor

silinder parabolis dan pipa kolektor yang diselubungi *cover* transparan. Hasil prediksi dengan metode analitis *heat transfer* sesuai dengan hasil test kolektor di laboratorium.

Ortabasi dan Fehlner (1980) membandingkan performansi *ETC (Evacuated Tubular Collector)* yang dilengkapi reflektor *cusp mirror* dengan *ETC* yang dilengkapi dengan absorber *flat plate* dan keduanya mempunyai diameter *tubular 4 inch* serta harga C sebesar 1,5. *ETC* dengan *cusp mirror* mempunyai efisiensi lebih tinggi dibanding *ETC* dengan *flat-plate* pada perbandingan $\Delta T/H$ yang tinggi.

Perbandingan desain reflektor untuk kolektor surya tubular dilakukan oleh Derrick *et al* (1986). Pilihan terbaik pada reflektor *stainless steel* dari tipe Winston-Hinterberger dengan rasio geometri (C) sekitar 1,2 dan terpasang pada arah Utara-Selatan maupun Timur-Barat. Adapun Clerx dan Trezek (1987) melakukan penelitian kolektor *flat plate* dibandingkan dengan *CPC* dalam 2 arah sumbu *tracking* yang digunakan dalam sistem refrigerasi Amonia-Air untuk pembuatan es. Kolektor *flat plate* kurang dapat untuk mencapai kebutuhan pembangkitan temperatur tinggi dibandingkan dengan kolektor *CPC*.

Chakraverty *et al* (1987) melakukan analisis transien pada kolektor *CPC* yang menghasilkan temperatur 264 °C dicapai pada $\dot{m} = 0,003 \text{ kg/s}$ saat musim panas di New Delhi. Efisiensi maksimum sistem sebesar 55 % dicapai di musim panas pada $\Delta T = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ dan musim dingin pada $\Delta T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$.

Rifai (1999) menganalisa panas matahari yang dapat dimanfaatkan melalui penelitian pada konsentrator palung silindris (*Linear Parabolic Concentrator*). Absorber berupa pipa tunggal yang dilengkapi *cover* dan tanpa *cover*. Penelitian ini dilakukan pada sistem kolektor seluruhnya, termasuk tangki penyimpanan dan dilakukan dalam waktu yang tidak lama. Kesimpulan yang diperoleh antara lain bahwa panas berguna, Q_u , tergantung laju aliran massa fluida yang masuk ke dalam pipa penyerap. Selain itu efisiensi harian pipa penyerap terhadap intensitas surya, η_{Qu} , pada kolektor de-

ngan pipa absorber berpenutup lebih besar dibanding dengan tanpa penutup.

Selanjutnya Hamzah (2000) mengkaji kolektor palung semi silindris secara teori dan eksperimen. Kolektor ini mempunyai absorber pipa tunggal dari bahan tembaga yang dicat hitam diselubungi dengan cover pipa kaca. Cover ini dilengkapi isolator dan reflektor di bagian atas untuk memantulkan kembali pantulan sinar dari reflektor palung ke pipa absorber. Perolehan data penelitian didasarkan pada variasi letak absorber dan laju aliran serta fluida masuk pipa absorber. Penelitian yang dilakukan untuk menentukan performansi kolektor dengan metode *instantaneous efficiency* ini menghasilkan kesimpulan antara lain:

- ✓ Efisiensi kolektor berkurang dengan bertambahnya temperatur air masuk absorber (T_{fi}).
- ✓ Harga faktor pelepasan panas (F_R) cenderung meningkat dengan bertambahnya laju aliran massa yang melalui kolektor.

Alit (2000) melakukan studi eksperimental kolektor tubular dengan pipa absorber dari bahan tembaga yang dicat hitam. Pipa absorber berjumlah banyak disusun seri dan diletakkan secara horizontal tersusun seperti kolektor plat datar. Pipa absorber dilengkapi cover pipa kaca dari lampu neon bekas. Setengah lingkaran bagian bawah cover sisi dalam dilapisi *aluminum foil* sebagai reflektor dan sisi luarnya diisolasi. Pengujian dilakukan dengan variasi letak pipa absorber terhadap cover dan *mass flow rate*. Hasil yang diperoleh antara lain letak optimum pipa absorber pada eksentrisitas negatif untuk menghasilkan temperatur pipa penyerap tertinggi. Selain itu efisiensi kolektor menurun akibat meningkatnya temperatur fluida masuk dan penambahan jumlah pipa penyerap yang digunakan.

Kolektor jenis palung setengah lingkaran yang akan diteliti mempunyai absorber berupa pipa banyak yang disusun vertikal pada garis sumbu palung. Penelitian dilakukan untuk 3 jenis konfigurasi kolektor, yaitu 3 pipa, 4 pipa, dan 6 pipa absorber.

Permasalahan yang muncul pada penelitian kolektor palung silindris ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh jumlah absorber yang disusun secara vertikal pada pusat geometri terhadap temperatur fluida keluar kolektor.
2. Berapa laju aliran yang optimum untuk masing-masing susunan dan konfigurasi.
3. Bagaimana pengaruh susunan dan laju aliran terhadap performansi kolektor yaitu efisiensi kolektor

Agar diperoleh hasil penelitian yang optimal, diperlukan batasan masalah sebagai berikut:

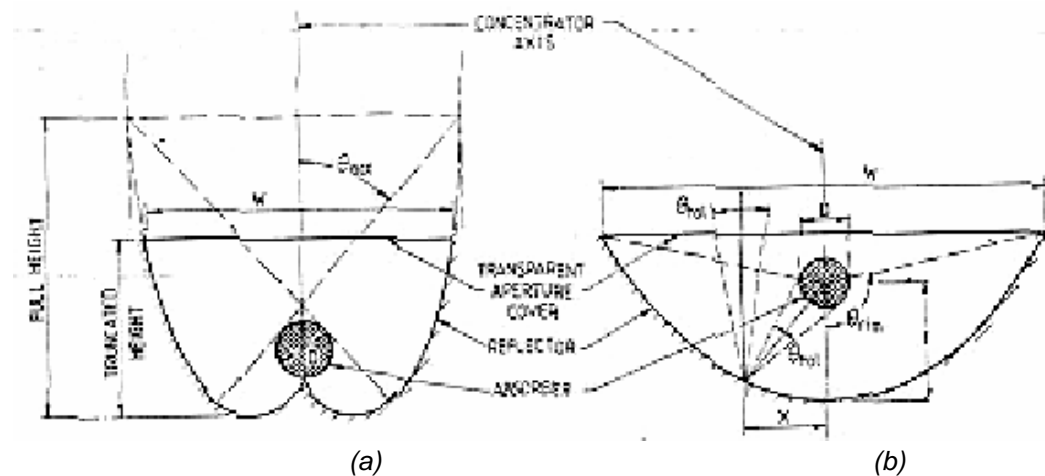
1. Susunan konfigurasi yang dipilih sebanyak 3 macam, yaitu susunan 3 pipa dengan diameter 1 *inch*, susunan 4 pipa berdiameter $\frac{3}{4}$ *inch*, dan 6 pipa berdiameter $\frac{1}{2}$ *inch*.
2. Perbandingan konsentrasi ($C = \text{concentration ratio}$) masing-masing konfigurasi adalah sama.
3. Penempatan pipa secara vertikal pada sumbu geometris yang dibatasi garis pantul yang memotong garis sumbu palung.
4. Kolektor diletakkan pada arah Utara-Selatan dan dilakukan *tracking* manual secara periodik agar *aperture* selalu mengarah pada sinar matahari.
5. Fluida kerja pada kolektor adalah air dan propertisnya dianggap konstan serta perubahan fase yang terjadi tidak diperhitungkan.
6. Aliran fluida pada pipa absorber susunan paralel diasumsikan searah dan stagnan pada daerah dekat header yang mungkin timbul diabaikan
7. Pengaruh peningkatan temperatur pada fluida kerja terhadap laju aliran diabaikan
8. Sistem bekerja dalam kondisi *steady*.

Adapun tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengkaji dan mendapatkan desain kolektor yang praktis, mudah pembuatannya, namun mempunyai efisiensi kolektor tinggi.
2. Untuk mendapatkan susunan dan konfigurasi optimum dari pipa absorber pada kolektor palung silindris.
3. Untuk mencari performansi kolektor palung silindris yang menggunakan (absorber multipipa yang disusun secara vertikal)

Duffie dan Beckman (1980: 283) menjelaskan tentang terminologi *collector*, *receiver*, dan *concentrator*. *Collector* diaplikasikan untuk sistem keseluruhan termasuk *receiver* dan *concentrator*. *Receiver* adalah elemen dari sistem yang menyerap radiasi surya dan mengkonversikan ke bentuk energi lain, termasuk absorber, yang berhubungan dengan *cover* dan *insulation*. *Concentrator* atau sistem optik adalah bagian dari kolektor yang mengarahkan radiasi ke *receiver*. Konsentrator dapat berupa *reflector* atau

refractor, dapat berbentuk *cylindrical* maupun *surfaces of revolution* dan dapat pula *continuous* maupun *segmented*. Selain itu *receiver* bisa berbentuk cembung (*convex*), datar (*flat*), atau cekung (*concave*) serta dapat berpenutup (*covered*) maupun tidak berpenutup (*uncovered*). Kolektor surya terkonsentrasi *line axis* yang umum digunakan saat ini menurut Prapas *et al* (1987: 541) adalah (1) kolektor *Compound Parabolic Concentrator* (CPC), (2) kolektor *Parabolic Trough Concentrator* (PTC), lihat gambar 1..



Gambar 1. Skema bentuk penampang melintang suatu (a) compound parabolic concentrator (CPC) dan (b) parabolic trough concentrator (PTC) (Prapas *et al*, 1987).

Perbandingan konsentrasi atau *Concentration Ratio* adalah faktor yang dapat meningkatkan fluks radiasi pada permukaan penyerapan energi. Definisi yang lebih umum dari *area concentration ratio* adalah perbandingan antara *aperture* (celah) dengan area penerima (*receiver*), yang dalam bentuk persamaan dituliskan (Duffie & Beckman, 1980: 286):

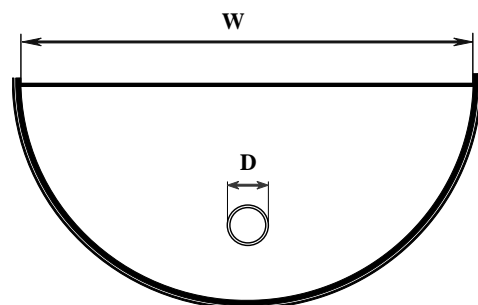
$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (2.5)$$

dengan A_a = luasan *aperture* dan A_r = luasan *receiver*.

Rapp (1981: 316) dalam bukunya menyatakan pada umumnya *effective concentration* (C_e) suatu kolektor surya didefinisikan sebagai perbandingan area *aperture* terhadap area dari *receiver* yang tidak diisolasi. Prapas *et al* (1987: 541) menyatakan dalam kenyataan aplikasi dengan *tubular absorber*, perbandingan

dengan konsentrasinya adalah $C = \frac{W}{\pi D}$.

Dalam hal ini W adalah lebar *aperture*, D adalah diameter pipa absorber, dan panjang *aperture* serta pipa absorber sama, seperti ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Lebar *aperture* dan diameter pipa absorber.

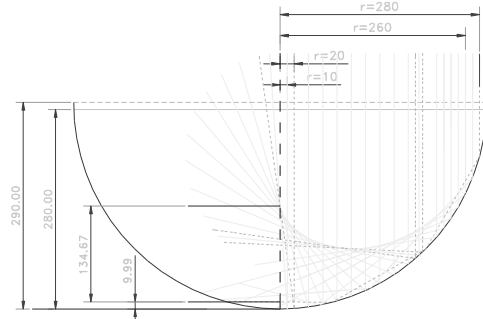
Sejalan dengan tujuan penelitian, kolektor palung setengah lingkaran ini dipilih antara lain karena merupakan kolektor yang bentuknya tidak rumit dan praktis pembuatannya serta bahan-bahannya mudah didapat. Penelitian ini untuk mendapatkan performansi kolektor yang paling optimum dari konfigurasi pipa absorber susunan seri dan paralel pada jenis dan *concentration ratio* yang sama. Sasaran dari rangkaian penelitian ini untuk mendapatkan desain praktis yang relatif murah untuk teknologi tepat guna dalam bidang pemanfaatan energi surya serta untuk dapat dikembangkan lebih lanjut.

Penelitian ini dilaksanakan di lingkungan kampus Jurusan Teknik Mesin FTI – ITS Surabaya, yang terletak pada posisi $7,3^\circ$ LS dan $112,8^\circ$ BT dengan ketinggian daerah ± 8 m di atas permukaan laut.

Kolektor palung silindris bila dilihat dari bentuknya dapat dikatakan kolektor sederhana yang mudah dibuat. Dasar teori jenis kolektor ini telah diuraikan pada bab II yaitu tentang *reflector spherical* dan penelitian yang dilakukan Tripagnagnostopoulos & Yianoulis (1996) tentang kolektor terpusat dengan *absorber multichannel*. Berdasarkan pemikiran dan pengamatan serta didasarkan pada teori dan hasil penelitian tersebut maka penulis melakukan studi untuk pemilihan dan penempatan pipa absorber.

Desain kolektor palung ini dirancang berdasarkan studi grafis dengan menggunakan *software AutoCAD R 13*. Studi grafis ini menghasilkan daerah pantulan yang terjadi pada garis sumbu simetri setengah lingkaran seperti terlihat pada gambar 3. Daerah pantulan pada sumbu tegak dari sumbu simetri setengah lingkaran terletak diantara $0,505R$ dengan $0,925R$. Batas tertinggi ($0,505R$)

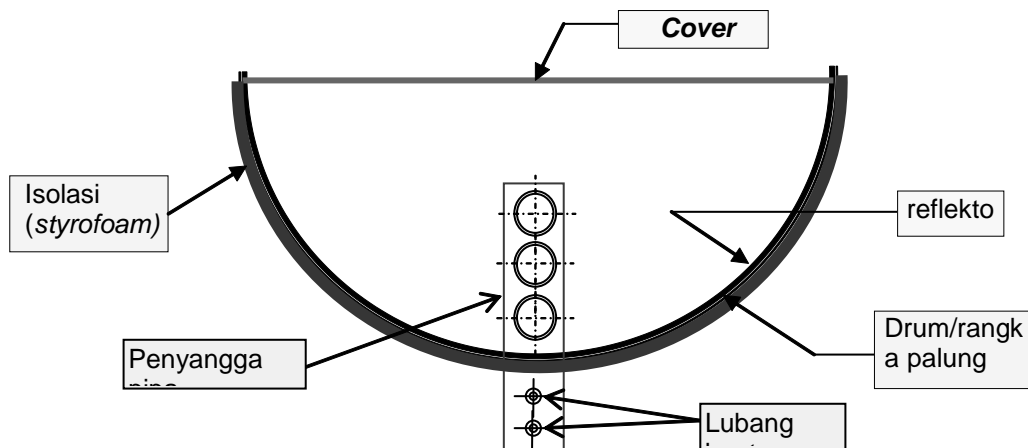
diperoleh dari pantulan sinar datang yang berjarak $R=20$ mm dari titik pusat pada sumbu datar.



Gambar 3. Daerah pantulan pada kolektor palung silindris berjari-jari 290 mm.

Berdasarkan studi grafis tersebut dilakukan pula pemilihan konfigurasi dan letak pipa-pipa absorber yaitu jarak penempatan susunan pipa absorber yang paling optimum. di daerah pantulan sinar pada garis sumbu palung setinggi 135 mm seperti terlihat pada gambar 3. Selanjutnya dilakukan pemilihan jumlah pipa dengan diameter yang berbeda-beda dengan didasarkan pada hasil perhitungan harga *concentration ratio* (C) dan berdasarkan ukuran pipa yang ada di pasaran, Akhirnya diperoleh konfigurasi 3 pipa $\varnothing 1''$, 4 pipa $\varnothing 3/4''$, dan 6 pipa $\varnothing 1/2''$ yang masing-masing mempunyai harga C yang sama yaitu 2,4.

Kolektor jenis palung ini terbuat dari drum berdiameter 580 mm dan panjang 880 mm yang dibelah dua secara simetris yang berfungsi sebagai rangka palung. Lembaran pelat *stainless steel* tebal 0,25 mm dilapiskan pada cekungan dalam rangka palung berfungsi sebagai reflektor, seperti terlihat pada gambar 4 berikut.

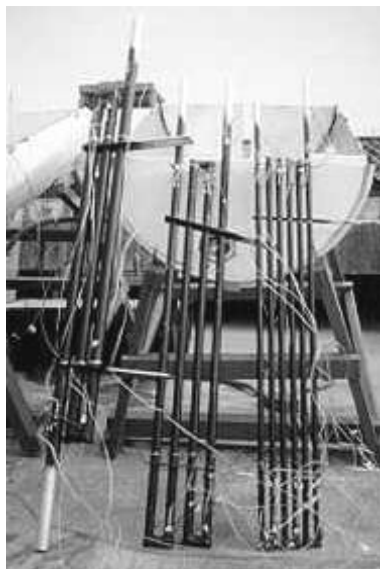


Gambar 4. Bagan kolektor palung silindris.

Untuk menangkap energi matahari digunakan pipa absorber dari bahan aluminium yang disusun vertikal., terdiri dari 3 pipa, 4 pipa, dan 6 pipa dengan diameter pipa berbeda-beda. Susunan pipa absorber disangga oleh plat setebal 2 mm dengan jarak susunan sesuai hasil studi grafis untuk masing-masing konfigurasi pipa. Pipa absorber diletakkan pada garis sumbu di dalam palung yang

berpenutup (*covered*) kaca bening dengan tebal 2 mm, seperti terlihat pada gambar 4.

Ketiga jenis konfigurasi pipa tersebut masing-masing diteliti pada susunan seri dan paralel. Bentuk susunan pipa seri dan paralel dengan masing-masing konfigurasi terlihat dalam foto pada gambar 5 di bawah ini.



(a)



(b)

Gambar 5. Foto konfigurasi pipa absorber, berturut-turut dari kiri ke kanan adalah: (a) pipa seri 3, 4, dan 6 pipa; (b) pipa paralel 3,4,dan 6 pipa.

Komponen bahan dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

a) Sistem Kolektor meliputi:

- Drum bekas (\varnothing 580 mm, panjang 880 mm); sebagai palung konsentrator.
- Lembaran pelat *stainless steel* tebal 0,25 mm; sebagai reflektor

- Pipa aluminium \varnothing 1, $\frac{3}{4}$, dan $\frac{1}{2}$ inch; untuk absorber
- Kaca putih tebal 2 mm; sebagai cover

b) Alat bantu meliputi:

- Pompa air
- Tandon air
- Kran air tipe bola
- Pipa dan sambungan PVC serta slang plastik
- Bak penampung air
- Kerangka penyangga tangki air
- Peralatan pengukur lain

Ketiga jenis konfigurasi pipa absorber masing-masing susunan (seri dan paralel) diuji dalam waktu yang bersamaan. Aliran air masuk pipa absorber berasal dari tandon air yang dialirkan melalui pipa bercabang, dan untuk mengatur debit aliran (akan diperoleh *mass flow rate*) masing-masing pipa dilakukan dengan *ball valve*. Air keluar dari kolektor ditampung dalam sebuah bak terbuka. Sirkulasi pengisian air dari bak ke tandon dilakukan dengan pompa dengan debit kecil. Sistem kolektor diletakkan membujur arah Utara - Selatan dan permukaan kolektor mengarah tegak lurus pada arah datang sinar matahari. Pengaturan arah atau *tracking* posisi kolektor dilakukan secara manual. Kolektor diputar kedudukannya pada penyangga setiap 15 menit atau 3,75 derajat untuk pengambilan data selang 30 menit. Pada pengambilan data selang 10 menit dilakukan pemutaran kolektor setiap 10 menit atau 2,5 de-

rajat. Agar diperoleh arah permukaan kolektor tegak lurus sinar matahari digunakan alat bantu lacak-sinar yang diletakkan di atas cover.

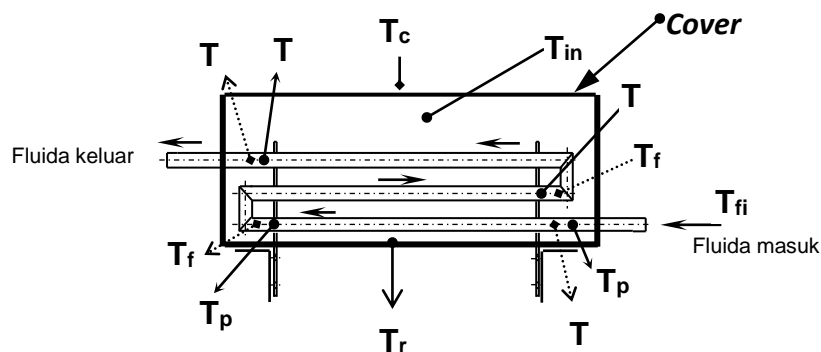
Parameter pokok yang akan diukur, selain *mass flow rate*, adalah temperatur pada bagian-bagian yang ditentukan. Pengukuran temperatur ini dilakukan dengan termometer air raksa maupun alat sensor termokopel tipe K yang dihubungkan dengan *display thermometer*. Adapun bagian-bagian yang akan dilakukan pengukuran temperatur adalah:

1. Udara luar.
2. Permukaan luar *cover glass*.
3. Bagian dalam palung.
4. Aliran air masuk dan keluar pipa absorber.
5. Permukaan pipa absorber.

Penempatan termokopel pada bagian-bagian kolektor untuk pengukuran temperatur ditunjukkan pada gambar 6

Untuk mengukur temperatur aliran, posisi ujung termokopel diletakkan pada daerah $\frac{1}{3} R$ dari dinding pipa agar diperoleh harga rata-rata temperatur optimum

Pengukuran temperatur pada susunan paralel dilakukan di tengah-tengah masing-masing pipa (diambil rata-ratanya) untuk mengetahui perbedaan masing-masing pipa. Hal ini sesuai dengan asumsi bahwa aliran pada masing-masing pipa adalah searah.



Gambar 6. Bagan penempatan alat ukur temperatur pada kolektor konfigurasi 3 pipa susunan seri

Tujuan akhir dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan jenis konfigurasi pipa absorber yang menghasilkan performansi kolektor paling optimum.

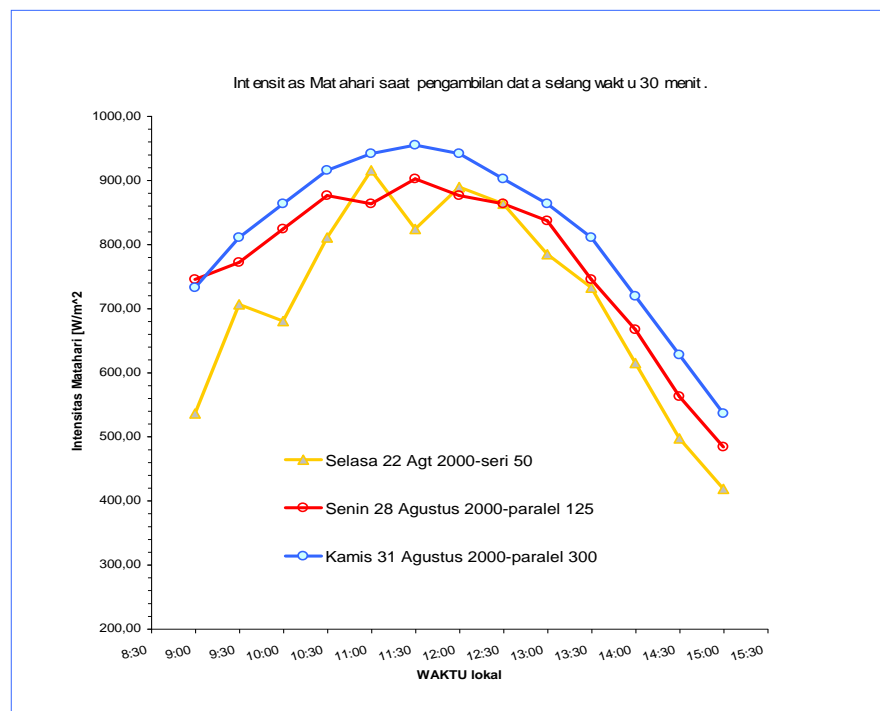
Performansi kolektor tersebut ditunjukkan oleh efisiensi kolektor yang merupakan perbandingan panas berguna dengan de-

ngan intensitas sinar matahari yang masuk ke kolektor.

Pengambilan data dilakukan pada 2 macam susunan pipa absorber, seri dan paralel, dan masing-masing dikenai perlakuan 4 macam aliran fluida kerja. Setiap eksperimen terdiri dari 3 macam pengambilan data (konfigurasi 3p, 4p, 6p) dilakukan dalam waktu bersamaan. Pengambilan data dilakukan secara berurutan antara pukul 9:00 – 15:00 untuk selang waktu 30 menit dan selang 10 menit antara pukul 11:20 – 12:40 tiap pengujian. Pengujian antara pukul 11:20 – 12:40 digunakan untuk menentukan atau menganalisa efisiensi kolektor, karena pada interval waktu tersebut diharapkan intensitas radiasi matahari mendekati harga konstan.

Hasil perhitungan secara aktual dan teoritis dinyatakan dalam bentuk tabel dan grafik, selanjutnya dilakukan analisa dengan memperhatikan nilai dari tabel maupun bentuk grafik tersebut.

Pengambilan data eksperimen kolektor surya ini dilakukan antara tanggal 21 sampai dengan 31 Agustus 2000. Pada saat itu cuaca relatif cerah namun kadang-kadang diliputi awan mendung tipis. Awan mendung yang melintas di atas lokasi penelitian tersebut menghalangi pancaran sinar matahari sehingga intensitas matahari yang sampai ke bumi berkurang. Kejadian tersebut berlangsung pada saat pengambilan data kolektor pada tanggal 22 Agustus 2000 dan tanggal 28 Agustus 2000. Untuk hari-hari lainnya, kondisi cuaca relatif sangat cerah, sebagai contoh pada tanggal 31 Agustus 2000 dimana tidak terjadi awan dan pada saat itu terjadi intensitas maksimum selama percobaan yaitu sebesar $954,25 \text{ W/m}^2$ (*Solarimeter* terbaca 7,3 mV) pada pukul 11:00. Variasi intensitas radiasi matahari yang terjadi pada tanggal 22, 28, dan 31 Agustus 2000 ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Grafik hubungan Intensitas matahari dengan waktu pengambilan data kolektor susunan *seri* dan *paralel*.

Pada gambar tersebut nampak jelas bahwa mendung yang terjadi pada

tanggal 22 lebih tebal dibanding tanggal 28.

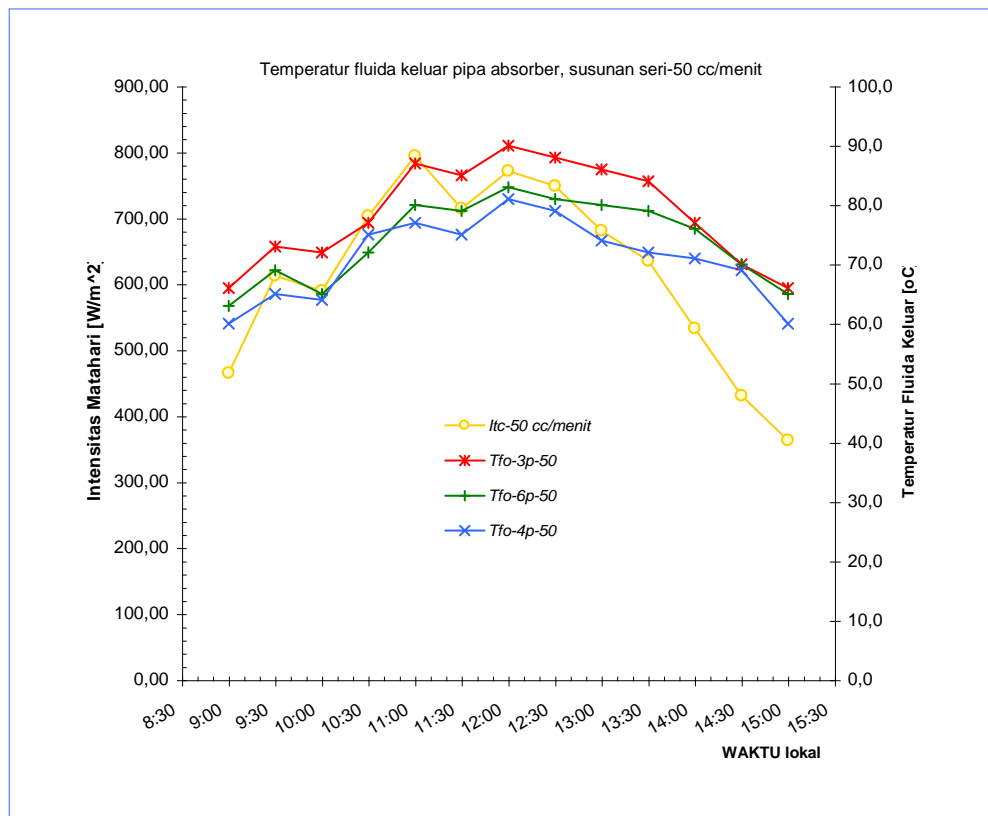
Gambar 8 memperlihatkan hubungan antara intensitas matahari dengan temperatur fluida keluar sistem kolektor susunan seri konfigurasi 3p dengan aliran 50 cc/menit, sedangkan untuk susunan paralel ditunjukkan pada Gambar 9.

Harga maksimum dari I (W/m^2) dan T_{fo} ($^{\circ}C$) untuk masing-masing susunan pipa seri dan paralel untuk masing-masing konfigurasi pipa (3p, 4p, dan 6p) pada berbagai variasi debit aliran ditunjukkan pada Tabel 1.

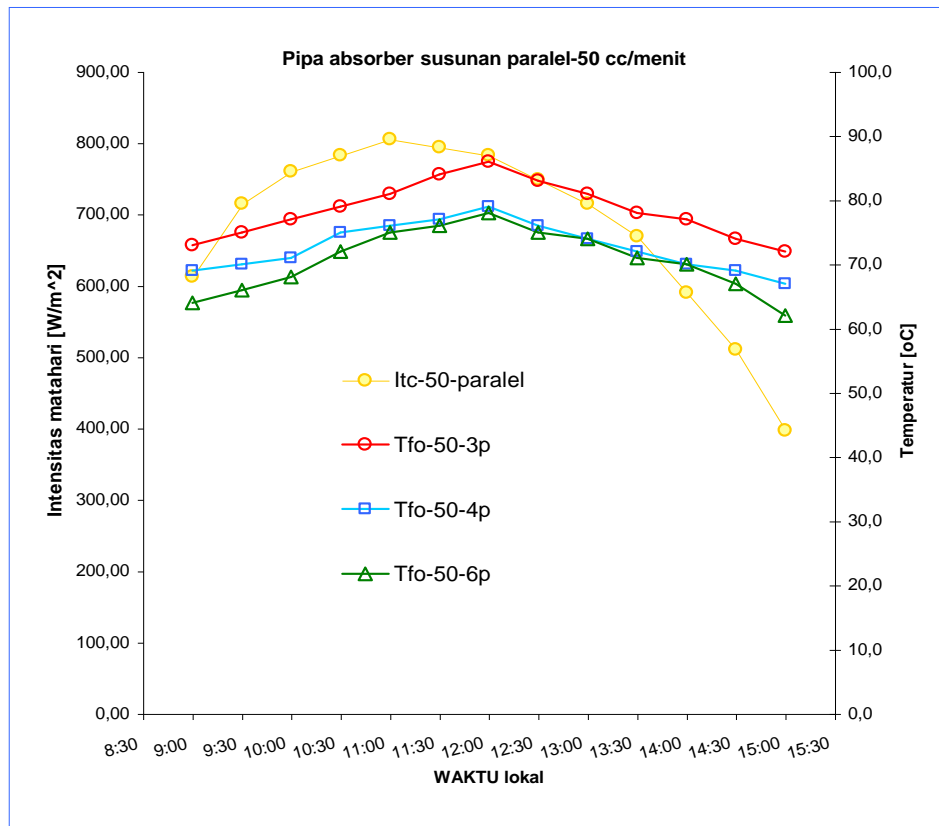
Temperatur fluida keluar tertinggi terjadi pada pipa absorber susunan seri dengan konfigurasi 3p pada debit aliran 50 cc/menit. Hal ini dapat dijelaskan bahwa kecepatan aliran pada konfigurasi 3p paling rendah dibandingkan dengan

kecepatan aliran pada variasi debit aliran yang lain. Akibat kondisi tersebut, fluida yang lain. Akibat kondisi tersebut, fluida kerja mendapat kesempatan lebih lama untuk menyerap kalor sehingga temperatur fluida keluar tinggi.

Dalam hal tinjauan susunan seri yang lebih baik dari susunan paralel, aliran fluida pada susunan seri mengalir teratur sehingga memperoleh pemanasan secara bertahap. Fluida masuk laluan pipa pertama dan berikutnya mendapatkan pemanasan awal dari pantulan reflektor, dan selanjutnya pipa terakhir langsung menerima panas radiasi matahari. Adapun pada pipa susunan paralel, aliran fluida diperkirakan tidak mengalir secara paralel seperti asumsi yang diambil



Gambar 8. Hubungan Intensitas matahari dan temperatur fluida keluar pipa absorber, susunan **seri** aliran **50 cc/menit**.



Gambar 9. Hubungan Intensitas matahari dan temperatur fluida keluar pipa absorber, susunan **paralel** aliran **50 cc/menit**.

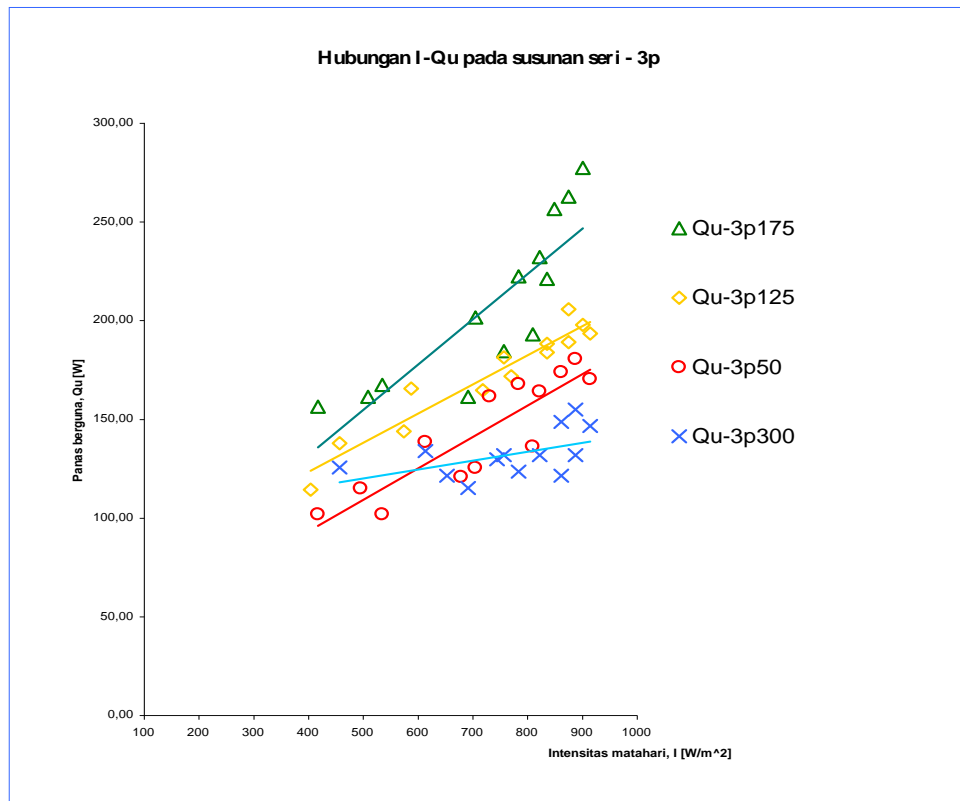
Tabel 1. Temperatur fluida keluar maksimum untuk 4 macam variasi debit aliran pada pipa absorber susunan seri dan paralel.

Debit cc/menit	Susunan SERI			Susunan PARALEL		
	I (W/m ²)	T _{fo} (°C)	Konf.	I (W/m ²)	T _{fo} (°C)	Konf.
50	888,89	90	3p	901,96	86	3p
125	875,82	62	3p	901,96	56	4p
175	901,86	63	3p	845,82	56	3p
300	915,03	48	3p	954,25	49	4p

Intensitas matahari selain berpengaruh panas berguna (Q_u) yang dapat ditangkap oleh absorber di dalam kolektor. Hubungan peningkatan panas berguna sebagai akibat peningkatan intensitas matahari untuk susunan seri konfigurasi 3p dengan variasi debit aliran fluida 50, 125, 175, dan 300 cc/menit ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada ketiga konfigurasi 3p, 4p, dan 6p susunan seri secara umum dapat dikatakan bahwa peningkatan intensitas matahari akan mengakibatkan kenaikan

energi berguna untuk berbagai debit aliran massa air. Kondisi khusus terjadi pada konfigurasi 4p dan 6p susunan seri pada debit 300 cc/menit, peningkatan intensitas radiasi matahari tidak diikuti dengan kenaikan energi berguna namun justru terjadi penurunan. Pada pipa absorber susunan paralel konfigurasi 3p, 4p, dan 6p untuk debit aliran 50, 125, dan 175 cc/menit, kenaikan intensitas radiasi matahari diikuti dengan kenaikan panas berguna.



Gambar 10. Grafik hubungan Intensitas matahari dengan Panas berguna pada susunan seri – 3p dengan variasi 4 macam debit aliran.

Khusus pada susunan paralel untuk debit aliran 300 cc/menit pada ketiga konfigurasi pipa, kenaikan intensitas radiasi matahari justru mengakibatkan penurunan panas berguna. Kondisi-kondisi pada susunan paralel ketiga konfigurasi tersebut.

Harga panas berguna dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

panas berguna yang merupakan fungsi temperatur fluida keluar. Data hasil perhitungan menunjukkan harga Q_u maksimum diperoleh pada T_{fo} maksimumnya. Hubungan T_{fo} dengan Q_u maksimum dari masing-masing pipa absorber ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Harga Q_u dan T_{fo} maksimum untuk pipa absorber susunan seri dan paralel pada variasi 4 macam debit aliran.

Debit cc/menit	Susunan SERI				Susunan PARALEL			
	I (W/m ²)	T _{fo} (°C)	Q _u (W)	Konf.	I (W/m ²)	T _{fo} (°C)	Q _u (W)	Konf.
50	888,89	90	180,22	3p	901,96	86	147,59	3p
125	875,82	62	205,49	3p	901,96	56	134,95	4p
175	901,86	63	277,11	3p	845,82	56	173,30	3p
300	915,03	48	154,62	3p	954,25	49	125,38	4p

Apabila diperhatikan, harga Q_u tertinggi pada Tabel 2 tersebut tidak dihasilkan pada harga T_{fo} tertinggi, dimana harga Q_u tertinggi diperoleh pada debit aliran 175 cc/menit. Hal ini menunjukkan

bahwa Q_u juga merupakan fungsi dari kecepatan aliran massa (\dot{m}). Selain itu dapat pula dilihat bahwa Q_u tertinggi diperoleh pada pipa absorber susunan

seri konfigurasi 3p. Apabila kondisi pada pipa absorber seri-3p pada aliran 50 cc/menit dibandingkan dengan aliran 175 cc/menit pada susunan dan konfigurasi pipa absorber yang sama maka akan diperoleh nilai penurunan T_{fo} sekitar 30 % dan kenaikan debit aliran sekitar 250 %. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terjadi penurunan T_{fo} namun kenaikan debit aliran tersebut dapat menghasilkan Q_u tertinggi dengan peningkatan sebesar sekitar 54 %.

Salah satu tujuan penelitian ini adalah untuk mencari performansi kolektor palung silindris dengan absorber multi-pipa yang disusun di dalam palung secara vertikal. Performansi yang dimaksud adalah efisiensi kolektor, baik aktual

maupun teoritisnya yang dihasilkan dari proses perhitungan. Efisiensi kolektor aktual yang mengandung nilai Q_u yang dihitung berdasar parameter-parameter yang telah ditentukan dari hasil pengujian.

Efisiensi kolektor maksimum pada masing-masing susunan pipa absorber diperoleh pada kondisi T_{fo} dan Q_u maksimum. Hal itu ditunjukkan pada Tabel 3 yang diambil dari hasil pengujian antara pukul 11:20 – 12:40 dengan selang waktu pengambilan 10 menit. Pada kedua susunan seri dan paralel efisiensi kolektor aktual sesaat tertinggi adalah sebesar 0,7627 yang terjadi pada susunan seri konfigurasi 3p dengan debit aliran 175 cc/menit.

Tabel 3. *Harga Efisiensi kolektor aktual yang berhubungan dengan T_{fo} dan Q_u untuk susunan pipa seri dan paralel.*

Debit cc/menit	Susunan SERI				Susunan PARALEL			
	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	η maks.	Konf.	T_{fo} (°C)	Q_u (W)	η maks.	Konf.
50	90	180,22	0,5033	3p	86	147,59	0,4062	3p
125	62	205,49	0,5825	3p	56	134,95	0,3714	4p
175	63	277,11	0,7627	3p	56	173,30	0,4912	3p
300	49	169,25	0,4318	3p	49	125,30	0,3262	4p

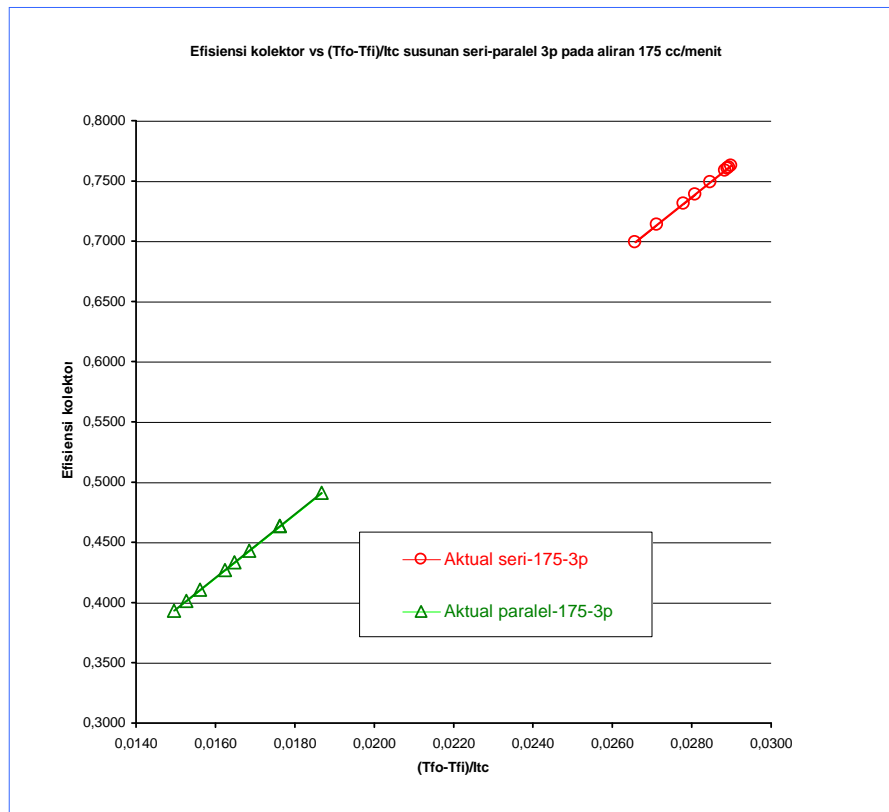
Efisiensi kolektor dipengaruhi temperatur fluida keluar dan panas berguna. Dalam hal temperatur fluida masuk relatif tidak banyak berubah, maka peningkatan temperatur fluida keluar akan menyebabkan peningkatan pada panas berguna dan efisiensi kolektor sesaat. Persamaan Efisiensi kolektor menunjukkan bahwa efisiensi berbanding lurus dengan harga panas berguna. Hal ini terbukti dengan harga efisiensi kolektor maksimum terjadi pada kondisi T_{fo} dan Q_u maksimumnya.

Karakteristik kolektor dapat ditunjukkan dengan grafik hubungan Efisiensi kolektor dengan $(T_{fo}-T_{fi})/I_{tc}$ pada Gambar 11 menunjukkan harga efisiensi kolektor pipa absorber susunan seri dan paralel untuk konfigurasi 3p pada debit aliran 175 cc/menit.

Pada Gambar 11 tersebut ditunjukkan kecenderungan efisiensi naik apabila harga $(T_{fo}-T_{fi})/I_{tc}$ naik. Hal ini disebabkan temperatur fluida masuk (T_{fi}) re-

latif konstan sedang T_{fo} dan I_{tc} terjadi perubahan. Selain itu dalam pengujian kolektor palung silindris yang telah dilakukan, perubahan T_{fo} tidak linier terhadap perubahan I_{tc} .

Faktor lain yang berpengaruh terhadap efisiensi selain panas berguna adalah aliran fluida kerja (debit atau *mass flow rate*). Ekperimen pada masing-masing susunan dan konfigurasi pipa absorber dengan variasi 4 macam aliran fluida kerja dilakukan untuk mencari laju aliran yang paling optimum. Hasil perolehan menunjukkan bahwa temperatur fluida kerja keluar tertinggi dihasilkan pada konfigurasi 3p baik pada susunan seri maupun paralel. Temperatur tertinggi sebesar $T_{fo}=90$ °C dan $T_{fo}=86$ °C yang dihasilkan dengan debit aliran 175 cc/menit untuk masing-masing susunan seri dan paralel yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 11. Hubungan Efisiensi kolektor dengan $(T_{fo}-T_{fi})/I_{tc}$ pipa susunan seri – 3p pada debit aliran 175 cc/menit.

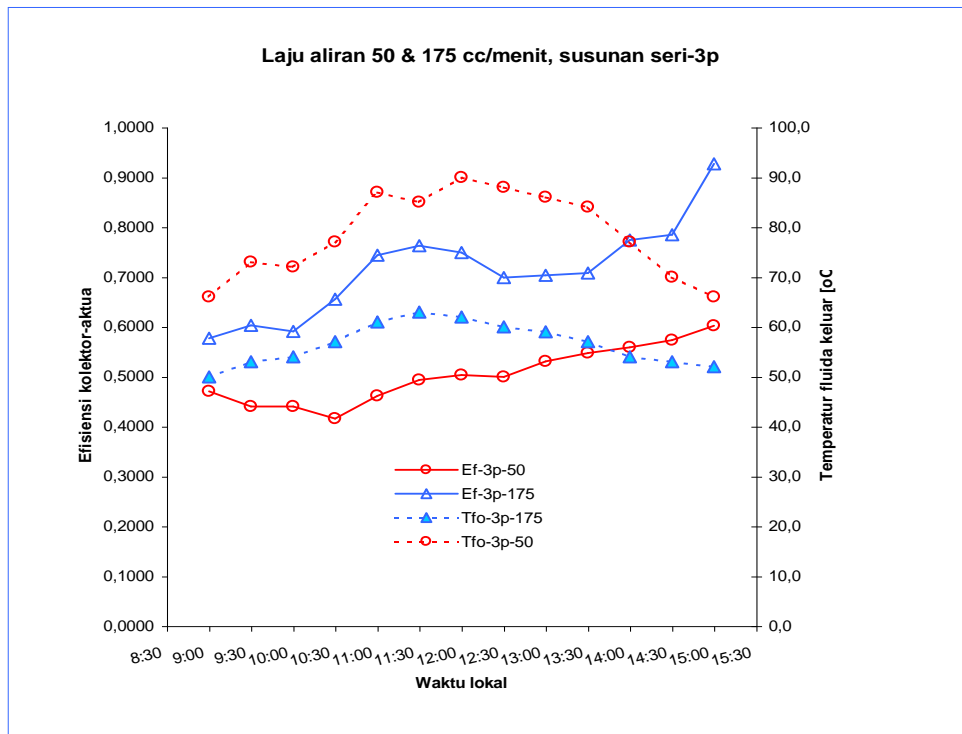
Gambar 12 berikut ini menunjukkan debit aliran fluida optimum yang menghasilkan temperatur fluida kerja keluar dan efisiensi kolektor tertinggi pada susunan seri. Laju aliran 50 cc/menit atau *mass flow rate* 0,00083 kg/detik menghasilkan temperatur tertinggi sebesar 90 °C. Efisiensi kolektor tertinggi sebesar 0,7627 dihasilkan oleh konfigurasi 3p pada aliran 175 cc/menit atau *mass flow rate* 0,00292 kg/detik.

Adapun debit aliran optimum pada susunan paralel yang menghasilkan temperatur fluida kerja keluar dan efisiensi kolektor tertinggi ditunjukkan pada Gambar 13.

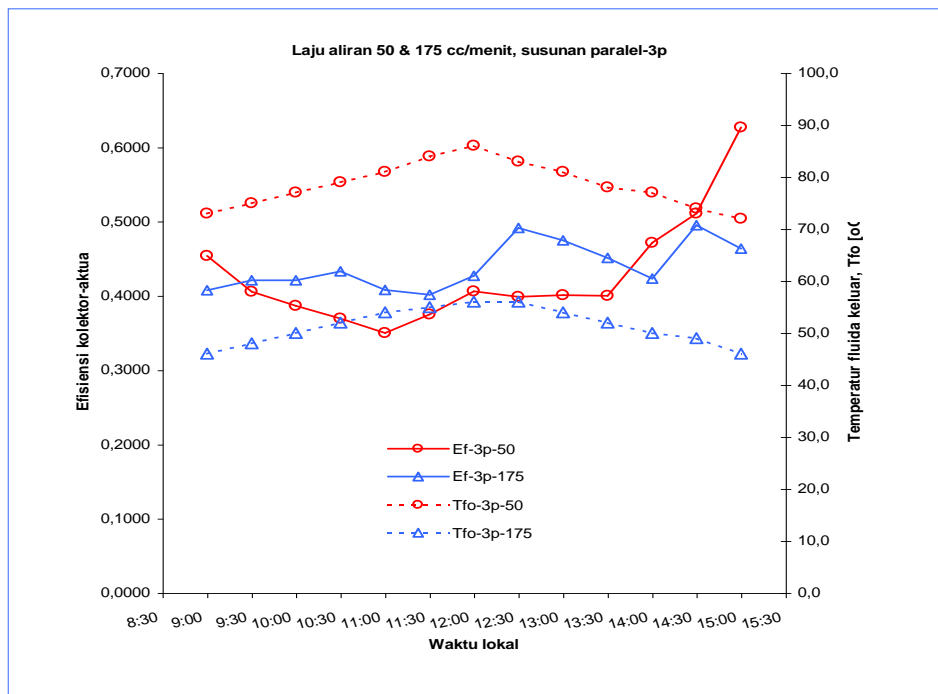
Hal yang dapat diambil dari pembahasan sebelumnya adalah adanya pengaruh debit aliran terhadap T_{fo} , Q_u dan Efisiensi kolektor. Selain itu secara aplikatif maka dapat dipilih kolektor dengan pipa absorber pada susunan dan kon-

figurasi sesuai kebutuhan. Untuk mendapatkan temperatur fluida keluar (T_{fo}) yang maksimum dipilih debit aliran 50 cc/menit pada pipa susunan seri konfigurasi 3p. Adapun untuk tujuan memperoleh efisiensi kolektor yang maksimum, dipilih kolektor dengan pipa absorber susunan seri konfigurasi 3p dengan debit aliran 175 cc/menit.

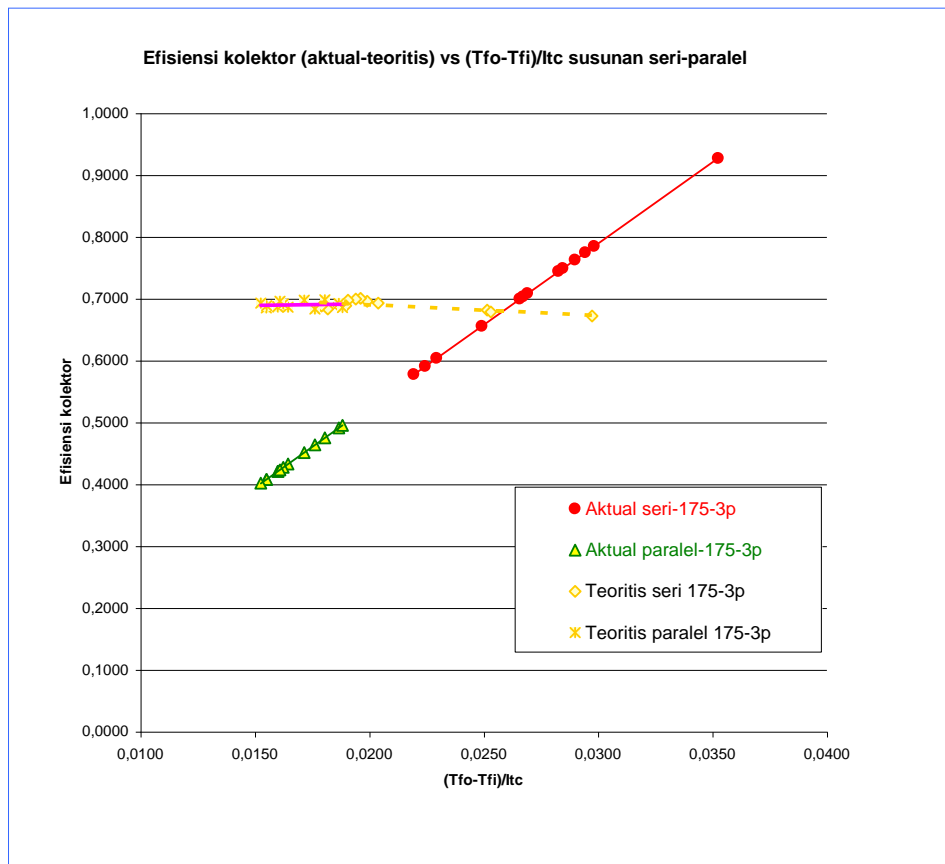
Perhitungan panas berguna dan efisiensi kolektor aktual dan teoritis menggunakan data hasil pengujian. Gabungan harga-harga intensitas matahari, panas berguna, dan efisiensi kolektor masing-masing susunan dan konfigurasi serta variasi 4 macam debit aliran ditampilkan dengan ilustrasi perbandingan efisiensi aktual dan teoritis ditunjukkan Gambar 14.



Gambar 12. Grafik debit aliran optimum yang menghasilkan temperatur fluida kerja keluar tertinggi pada susunan **seri**.



Gambar 13. Grafik laju aliran optimum yang menghasilkan temperatur fluida kerja keluar tertinggi pada susunan **paralel**.



Gambar 14. Grafik hubungan Efisiensi dengan $(T_{fo}-T_{fi})/l_{tc}$, aktual dan teoritis, susunan seri dan paralel untuk konfigurasi 3p dengan aliran 175 cc/menit pada pengambilan data pukul 9:00 – 15:00.

Efisiensi kolektor baik aktual maupun teoritisnya dihitung dengan persamaan yang mengandung harga Q_u . Panas berguna (Q_u) teoritis mengandung elemen-elemen empiris. Unsur yang berpengaruh dalam persamaan ini adalah harga F_R dan U_L yang masing-masing didapatkan dari penjabaran analitis dari sistem perpindahan panas dan rangkaian termal sistem kolektor yang diuji. Kerugian kalor keseluruhan (U_L) mengandung elemen-elemen empiris yaitu koefisien kerugian kalor dan bilangan Nusselt untuk konveksi bebas.

Berawal dari uraian tersebut di atas, dapat dikatakan bahwa hasil yang diperoleh pada perhitungan efisiensi kolektor teoritis dipengaruhi oleh:

- a. Kekurangtelitian pengambilan persamaan untuk kondisi atau daerah kerja penelitian yang dilakukan.

- b. Kurang tepatnya penjabaran perpindahan kalor dari alat penelitian yang dituangkan dalam bentuk bagan perpindahan kalor dan rangkaian termal serta persamaan-persamaan sehingga mempengaruhi harga F_R dan U_L .

KESIMPULAN

Temperatur fluida kerja keluar (T_{fo}) tertinggi terjadi pada pipa absorber susunan seri konfigurasi 3p yaitu sebesar 90 °C, lebih tinggi 4,65 % dibanding T_{fo} pada pipa susunan paralel konfigurasi 3p sebesar 86 °C.

Efisiensi kolektor aktual sesaat tertinggi sebesar 0,7627 diperoleh pipa absorber susunan seri konfigurasi 3p pada T_{fo} dan Q_u maksimumnya. Angka tersebut lebih tinggi 55,27 % dibandingkan

dengan efisiensi kolektor maksimum susunan paralel sebesar 0,4912.

Debit aliran untuk susunan seri maupun paralel yang menghasilkan temperatur fluida keluar (T_{fo}) tertinggi adalah aliran 50 cc/menit, sedangkan debit yang menghasilkan efisiensi kolektor aktual sesaat tertinggi adalah aliran 175 cc/menit.

Perbandingan tiga jenis konfigurasi pipa absorber menunjukkan bahwa susunan pipa absorber dan debit aliran fluida kerja berpengaruh pada performansi kolektor.

Susunan seri konfigurasi 3 pipa merupakan susunan dan konfigurasi pipa absorber terbaik untuk kolektor palung silindris dalam penelitian ini.

Efisiensi kolektor rata-rata tertinggi sebesar 0,7138 pada pengambilan data selang 30 sedangkan untuk selang 10 menit sebesar 0,7417 yang masing-masing dihasilkan pada susunan seri konfigurasi 3 pipa dengan aliran 175 cc/menit. Angka efisiensi tersebut berturut-turut lebih besar 62,26 % dan 69,96 % dibandingkan dengan efisiensi kolektor rata-rata untuk pipa absorber susunan paralel.

Untuk memperoleh hasil yang lebih memuaskan dengan memperhatikan hal-hal diantaranya: penggunaan alat *tracking* otomatis agar dihasilkan gerakan kolektor mengikuti arah sinar matahari secara kontinyu, pencatatan parameter ukur, terutama temperatur, perlu ditindaklanjuti dengan memanfaatkan sistem akuisisi data, Debit aliran fluida kerja dalam penelitian ini mempunyai harga bilangan Re angat rendah (dibawah angka 100). Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mempertimbangkan debit aliran fluida kerja yang menghasilkan bilangan Reynold tinggi untuk konveksi natural dan konveksi paksa.

DAFTAR PUSTAKA

Alit, I B, 2000, "Studi Eksperimental Kolektor Tubular dengan Memanfaatkan Lampu Neon Bekas sebagai Kaca Penutup Kolektor", Tesis program S-2, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

- Azis, M.M. A, 1980, "Thermal Analysis of Heat Exchanger of Solar Concentrator", *Solar Energy and Conservation*, Vol. 1, J. Nejat Veziroglu (Ed), Pergamon Press, New York, pp. 163-172.
- Bejan, A, 1993, *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Singapore.
- Chakraverty, S., Bansal, N.K., and Garg, H.P., 1987, "Transient Analysis of CPC Collector with Time Dependent Input Function", *Solar Energy*, Vol. 38, No. 3, pp. 179-185.
- Clerx, M., and Trezek, G.J., 1987, "Performance of An Aqua-Ammonia Absorption Solar Refrigerator at Sub-Freezing Evaporator Conditions", *Solar Energy*, Vol. 39, No. 5, pp. 379-389.
- Derrick, G.H., Basset, I.M., and Mills, D.R., 1986, "Comparison of Reflector Designs for Stationary Tubular Solar Collectors", Vol. 37, No. 3, pp. 195-203.
- Duffie, J A., and Beckman, W A., 1980, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Edenburn, M W., 1975, "Performance Analysis of A Cylindrical Parabolic Focusing Collector and Comparison with Experimental Results", *Solar Energy*, Vol. 18, pp. 437-444.
- Hamzah, N, 2000, "Kaji Teoritis dan Eksperimen Kolektor Palung Semi Silindris dengan Isolator-Reflektor pada Pipa Kaca Penutup Absorber", Tesis Program S-2, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Holman, J.P., 1984, *Perpindahan Kalor (Heat Transfer)*, diterjemahkan oleh: Ir. E. Jasjfi, M.Sc., Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Incropera, F P., and DeWitt, D P., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Singapore.
- Jansen, T J., 1995, *Teknologi Rekayasa Surya*, diindonesiakan oleh: Prof. Wiranto Arismunandar, P.T. Pradnya Paramita, Jakarta.

- Moran, M J., Shapiro, H N., 1993, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Singapore.
- Niemann, M., Kreuzburg, J., Schretmüller, R., and Peppers, L., 1997, "Solar Process Heat Generation Using An ETC Collector Field with External Parabolic Circle Concentrator (PCC) to Operate An Adsorption Refrigeration System", *Solar Energy*, Vol. 59, No. 1-3, pp. 67-73.
- Ortabasi, U, and Fehler, F P., 1980, "Cusp Mirror-Heat Pipe Evacuated Tubular Solar Thermal Collector", *Solar Energy*, Vol. 24, pp. 477-489.
- Prapas, D.E., Norton, B., and Probert, S.D., 1987, "Optics of Parabolic-Trough, Solar-Energy, Possessing Small Concentration Ratios", *Solar Energy*, Vol. 39, No. 6, pp. 541-550.
- Rapp, D, 1981, *Solar Energy*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632.
- Rifai, M, [1999], *Analisa Energi Panas Matahari yang Dapat Dimanfaatkan dengan Menggunakan Konsentrasi Palung Semi Silindris (Linear Parabolic Concentrator)*, Tesis Program S-2, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Rönnelid, M., Perers, B., and Karlsson, B., 1996, "Construction and Testing of A Large-Area CPC-Collector and Comparison with A Flat Plate Collector", *Solar Energy*, Vol. 57, No. 3, pp. 177-184.
- Tripapanagnostopoulos, Y., and Yianoulis, P., 1996, "CPC Solar Collectors with Multichannel Absorber", *Solar Energy*, Vol. 58, No. 1-3, pp. 49-61.
- Welty, J R., 1978, "*Engineering Heat Transfer*", SI Version, John Wiley & Sons, New York.