

PENGARUH MASSA ABSORBER KOH DAN MASSA KATALIS ZEOLIT ALAM TERHADAP PRODUK PIROLISIS TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT DENGAN REAKTOR MICROWAVE

Bayu Megaprastio^{1*}, Harwin Saptoadi², Robertus Dhimas Dhewangga Putra³

^{1,2,3} Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
e-mail:¹bayumegaprastio@mail.ugm.ac.id,²harwins@ugm.ac.id,³robertus.dhimas.p@ugm.ac.id,

ABSTRACT

This research aims to explore the effects of varying the mass of the KOH absorber and natural zeolite catalyst on the pyrolysis yield of empty palm fruit bunches (EFB) using a microwave reactor. EFB was chosen as the feedstock due to its abundant availability and potential as a renewable energy source. The use of a microwave reactor enables faster heating of EFB and improved temperature control. The pyrolysis process was carried out with a configuration of two separate reactors: a microwave reactor to pyrolyze EFB with KOH as an absorber to absorb microwaves and convert them into heat, and a catalyst reactor with heating provided by an oven. The operating temperature for the microwave reactor was set at 450°C, and for the catalyst reactor at 400°C. The methodology involved varying the mass of KOH (0%, 50%, 100%) and zeolite (0%, 10%, 20%, 30%) to evaluate their effects on pyrolysis product distribution. The results showed that adding KOH as an absorber improved heating efficiency, with a higher KOH mass (100%) tending to increase gas production. The addition of zeolite also proved to enhance bio-oil yield, especially under conditions of 50% absorber and 30% zeolite, which achieved the highest yield of 34.8%. The optimal combination of KOH absorber and zeolite catalyst shows great potential in increasing bio-oil yield, thus supporting the use of EFB as a sustainable alternative energy source.

Keywords: catalyst, empty palm fruit bunch, KOH absorber, microwave pyrolysis, product yield

INTISARI

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi efek variasi massa *absorber* KOH dan massa katalis zeolit alam pada hasil pirolisis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan reaktor *microwave*. TKKS dipilih sebagai bahan baku karena ketersediaannya yang melimpah dan potensinya sebagai sumber energi terbarukan. Penggunaan reaktor *microwave* memungkinkan pemanasan yang lebih cepat pada TKKS dan sistem kontrol suhu yang lebih baik. Proses pirolisis dilakukan dengan konfigurasi 2 reaktor terpisah yaitu reaktor *microwave* untuk mempirolisis TKKS bersama KOH sebagai *absorber* untuk menyerap gelombang mikro dan mengkonversi menjadi panas, serta reaktor katalis dengan sistem pemanas menggunakan oven. Suhu operasi pada reaktor *microwave* adalah 450°C dan pada reaktor katalis adalah 400°C. Metodologi yang digunakan melibatkan variasi massa KOH (0%, 50%, 100%) dan massa zeolit (0%, 10%, 20%, 30%) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap distribusi produk pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan KOH sebagai *absorber* meningkatkan proses pemanasan, massa KOH yang lebih tinggi (100%) cenderung meningkatkan produksi gas. Penambahan zeolit juga terbukti meningkatkan *bio-oil*, terutama pada kondisi 50% *absorber* dan 30% zeolit yang mencapai hasil tertinggi sebesar 34,8%. Kombinasi optimal antara *absorber* KOH dan katalis zeolit berpotensi besar dalam pemanfaatan TKKS sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan.

Kata kunci: *Absorber* KOH, katalis zeolit, pirolisis *microwave*, produk pirolisis, tandan kosong kelapa sawit

1. PENDAHULUAN

Energi memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung aktivitas manusia, baik dalam sektor industri, transportasi, dan rumah tangga. Sumber energi utama yang dominan digunakan sampai saat ini adalah bahan bakar fosil seperti minyak bumi, gas alam dan batu bara yang menyediakan lebih dari 80% kebutuhan energi global (British Petroleum, 2023). Meskipun bahan bakar fosil berkontribusi terhadap pertumbuhan ekonomi dan pembangunan, penggunaan dalam jangka panjang menimbulkan tantangan serius terutama dalam peningkatan emisi gas rumah kaca yang berakibat pada perubahan iklim global. Oleh karena itu, pengembangan sumber energi alternatif yang lebih bersih dan terbarukan semakin penting. Sumber energi terbarukan seperti biomassa memiliki keunggulan yang dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi seperti panas, bahan bakar cair dan gas. Biomassa juga berasal dari material organik yang dapat diperbaharui dalam siklus yang relatif singkat serta berpotensi untuk dimanfaatkan dari limbah pertanian dan industri, sehingga dapat menyediakan sumber energi terbarukan sekaligus membantu mengurangi masalah sampah.

Di Indonesia, industri kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan jumlah 20-30% dari setiap pengolahan tandan buah segar (Salmina, 2017). TKKS memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan karena jumlahnya yang melimpah sehingga bisa menjadi bahan bakar alternatif. Pemanfaatan TKKS sebagai bahan bakar dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang digunakan dalam proses pengolahan kelapa sawit. Berdasarkan uji proksimat dalam TKKS menghasilkan kandungan 9.55% air, 17.31% abu, 58.96% zat volatil dan 14.8 *fixed carbon* (Febriyanti dkk., 2019). Penelitian Chantanumat dkk., (2023) mengeksplorasi pirolisis lambat limbah kelapa sawit seperti *palm frond* (PF), *palm trunk* (PT), *palm mesocarp fiber* (PMF), *empty fruit bunches* (EFB), dan *palm kernel shell* (PKS). Proses dilakukan pada suhu 600°C selama 60 menit dalam atmosfer inert. PF menghasilkan bio-oil tertinggi, sedangkan PMF menghasilkan biochar tertinggi. EFB dan PMF menghasilkan bio-oil kaya senyawa organik dengan rantai karbon yang panjang, sedangkan PKS, PF, dan PT menghasilkan bio-oil dengan kandungan aromatik lebih tinggi. PKS juga menghasilkan biochar dengan struktur pori dan luas permukaan terbaik. TKKS berpotensi untuk diolah menjadi produk bahan bakar dan bahan kimia bernilai tinggi melalui proses pirolisis.

Penelitian oleh Azni dkk., (2019) tentang biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) melalui proses pirolisis *microwave* untuk menghasilkan *biochar*. Proses ini menggunakan TKKS sebanyak 1 kg pada suhu 253°C dengan daya *microwave* 2,6 kW selama 90 menit, disertai aliran gas *inert* sebesar 2,0 L/menit. *Biochar* yang dihasilkan kemudian dianalisis melalui uji proksimat, uji ultimate, dan uji komposisi abu serta uji emisi pembakarannya. Hasil menunjukkan bahwa *biochar* TKKS memiliki nilai kalor tinggi sebesar 6.317,99 kkal/kg, rasio O/C lebih tinggi dibanding batubara sub-bituminus (SBC), dan menghasilkan emisi CO₂, CO, serta NO_x lebih rendah, sehingga berpotensi mengurangi emisi gas rumah kaca dibandingkan dengan SBC.

Penelitian oleh Md Said dkk., (2022) tentang pirolisis *microwave* dalam memproduksi *biochar* dari FEFB (EFB *short fiber*) dan PEFB (EFB pelet) dengan penggunaan *susceptor* alumina untuk meningkatkan efisiensi proses sehingga menghemat energi dan waktu produksi. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 200 sampai 400°C pada reaktor dengan kapasitas 14 L. Analisis dilakukan dengan mengukur nilai kalor, uji proksimat dan pengukuran efisiensi energi dengan *energy output-input* (EOI) rasio. Hasil menunjukkan bahwa pirolisis dengan suhu 300°C menghasilkan kondisi yang ideal dalam produksi *biochar*. Pirolisis FEFB menghasilkan rendemen *biochar* yang lebih tinggi dibanding dengan PEFB yaitu 50,0% serta waktu tinggal akhir yang lebih singkat yaitu 30 menit sehingga menghemat waktu sebesar 62,4%. *Biochar* dari FEFB menghasilkan kualitas yang lebih baik dengan PEFB karena menghasilkan HHV lebih tinggi (25,19 MJ/kg).

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal dengan bahan organik yang dikonversi menjadi padatan yang kaya akan karbon (*biochar*), cairan yang dapat terkondensasi (*bio-oil*) dan zat yang tidak terkondensasi dalam wujud gas dengan menggunakan penerapan panas pada lingkungan bebas oksigen (Amenaghawon dkk., 2021). Salah satu metode inovatif dalam pirolisis adalah pirolisis *microwave*, yang memanfaatkan radiasi *microwave* untuk menghasilkan panas secara langsung di dalam material. Penggunaan pirolisis *microwave* menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode pirolisis konvensional, termasuk pemanasan yang lebih cepat, efisiensi energi yang lebih tinggi, dan pemanasan yang dapat terkendali, dimulai segera saat energi diaktifkan dan berhenti langsung ketika daya dimatikan. Namun, pemanfaatan pirolisis *microwave* juga menghadapi tantangan dalam hal efisiensi pemanasan, yang sangat dipengaruhi oleh kemampuan material menyerap radiasi *microwave*. tanpa adanya *absorber* dalam proses menyebabkan tidak tercapainya temperatur operasi sehingga perlu ditambahkan *absorber* untuk menyerap gelombang mikro sehingga temperatur operasi dapat tercapai (Mohamed dkk., 2019). *Absorber* seperti KOH (Kalium Hidroksida) memiliki kemampuan dalam menyerap energi gelombang mikro secara efektif mengkonversikannya menjadi panas.

Katalis adalah zat yang mempercepat reaksi kimia dengan menyediakan jalur alternatif yang menurunkan energi aktivasi tanpa ikut habis terpakai. Penurunan energi aktivasi memungkinkan molekul reaktan bereaksi lebih mudah pada suhu lebih rendah. Pada pirolisis biomassa, katalis diperlukan untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas dari bio-oil yang dihasilkan karena minyak ini mengandung kadar oksigen dan kadar air yang tinggi serta kurang stabil, sehingga kurang cocok sebagai bahan bakar, oleh karenanya diperlukan katalis dalam proses katalitik selama proses berlangsung untuk meningkatkan produk pirolisis (Ren dkk., 2022).

Penggunaan metode pemisahan katalis pada reaktor sekunder akan memaksimalkan kontak uap pirolisis dengan katalis. Pemisahan ini juga memungkinkan pengaturan suhu pirolisis dan suhu katalitik secara independen. Selain itu arang (*biochar*) yang terbentuk tidak kontak langsung dengan katalis karena terbentuk di tempat terpisah sehingga lebih mudah diambil tanpa harus memisahkan *biochar* dengan katalis (Fan dkk., 2018).

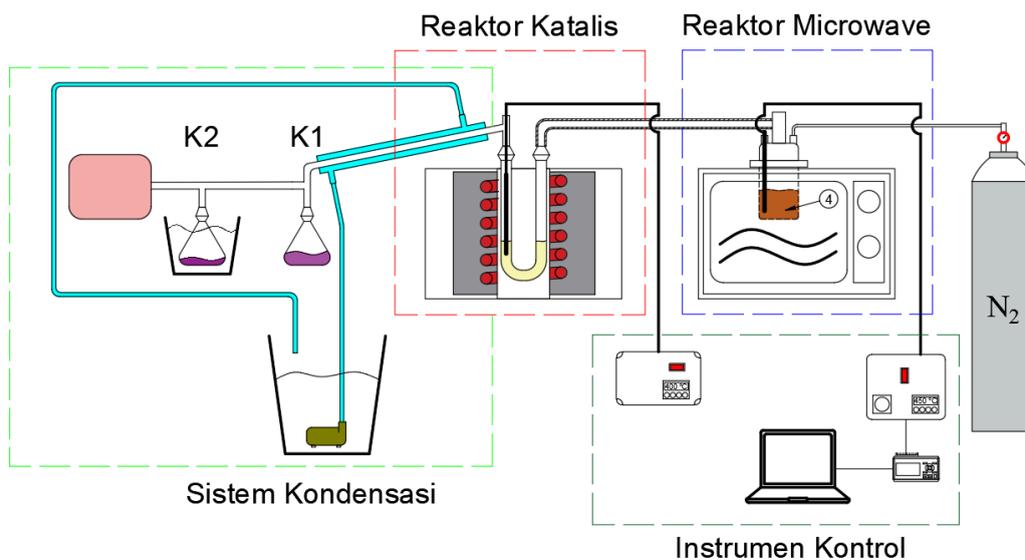
Dengan demikian, teknologi pirolisis *microwave* yang memanfaatkan variasi massa dari *absorber* KOH serta massa dari katalis Zeolit Alam memiliki potensi besar dalam mengoptimalkan pengolahan limbah TKKS. Penelitian ini akan mengeksplorasi kombinasi optimal dari *absorber* dan massa katalis untuk meningkatkan hasil produk pirolisis, sehingga dapat memberikan solusi yang lebih efisien dan berkelanjutan untuk pengolahan

limbah TKKS. Teknologi ini tidak hanya berkontribusi pada pengurangan limbah pada industri kelapa sawit, tetapi juga pada pemanfaatan limbah sebagai sumber daya sebagai bahan bakar yang bernilai tinggi dan dapat mendukung pengembangan ekonomi dan pengolahan lingkungan yang lebih baik.

2. METODE PENELITIAN

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) diperoleh dari limbah PTPN Kecamatan Rumbu Bujang Provinsi Jambi dengan kondisi masih berupa tandan dengan ukuran berdiameter ± 30 cm. Selanjutnya TKKS dirajang sampai ukuran *mesh* 18-35, kemudian dikeringkan dalam *vacuum oven* selama satu jam pada temperatur 80°C dan tekanan 0.386 bar untuk menghilangkan kadar air pada TKKS. Kalium Hidroksida (KOH) digunakan sebagai *absorber* gelombang mikro. Zeolit alam digunakan sebagai katalis pada proses pirolisis. Zeolit alam didapatkan dari Klaten, Jawa Tengah. Gas nitrogen, gas ini digunakan untuk menciptakan kondisi *inert* selama proses pirolisis, sehingga mencegah terjadinya oksidasi bahan baku, aliran gas *inert* yang digunakan adalah 0,1 L/menit.

Proses pirolisis *microwave* menggunakan TKKS sebanyak 100 gram pada setiap proses pirolisis yang dimasukkan dalam reaktor *microwave* yang terbuat dari bahan jenis kaca *Pyrex*. Rangkaian pirolisis dilengkapi dengan satu set *microwave* oven sebagai penyuplai gelombang mikro untuk menghasilkan pemanasan, satu set oven untuk memanaskan katalis agar terjadi reaksi pada fase gas produk pirolisis, serta dua set kondensator dengan media pendingin air mengalir (K1) dan media pendingin air es (K2). Rangkaian peralatan pirolisis ditunjukkan pada gambar 1. Proses eksperimen dilakukan pada temperatur 450°C untuk reaktor *microwave* dan 400°C untuk reaktor katalis dengan waktu tahan 15 menit. Massa *absorber* yang digunakan adalah KOH dengan perbandingan bahan baku terhadap *absorber* adalah 0%, 50% dan 100%. Variasi massa katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0%, 10%, 20%, dan 30%.



Gambar 1. Rangkaian Peralatan Pirolisis *Microwave*

Kontrol kenaikan suhu pada reaktor *microwave* dilakukan secara bertahap dengan cara menahan suhu pada tahap awal di suhu 200°C selama 2 menit, tahap selanjutnya ditahan pada setiap kenaikan suhu 100°C dalam waktu yang sama sampai mencapai suhu target pirolisis pada 450°C .

Proses pirolisis akan menghasilkan produk berupa *bio-oil*, gas, dan *biochar*. Produk *bio-oil* adalah gas hasil pirolisis yang terkondensasi melewati kondensator dengan media air yang mengalir. Sisa gas yang tidak terkondensasi dari kondensator kemudian ditangkap dengan *tedlar bag* untuk mencegah gas agar tidak terbuang ke lingkungan. Sedangkan untuk *biochar* akan tersisa di dalam reaktor dan ditimbang.

Rendemen atau produk pirolisis dihitung berdasarkan prinsip neraca massa. Produk ini merupakan persentase yang membandingkan massa produk yang dihasilkan (seperti *bio-oil*, gas, dan *biochar*) dengan massa bahan baku yang digunakan.

$$\text{Distribusi biochar (wt\%)} = \frac{\text{Mass of biochar (carbon+ash)}}{\text{mass of dried raw material}} \times 100\% \dots\dots\dots(1)$$

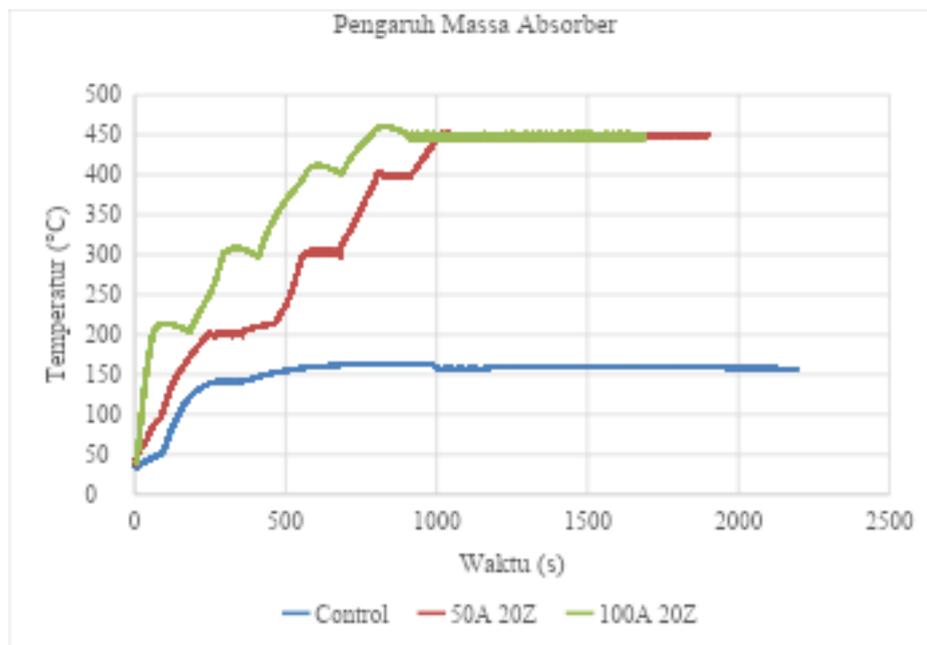
$$\text{Distribusi bio_oil(wt\%)} = \frac{\text{Mass of bio-oil}}{\text{mass of dried raw material}} \times 100\% \dots\dots\dots(2)$$

$$\text{Distribusi syngas (wt\%)} = 100\% - \{\text{biochar(\%)} + \text{bio oil(\%)}\} \dots\dots\dots(3)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Eksperimen pirolisis *microwave* dilakukan dengan berbagai variasi kondisi operasi untuk mengeksplorasi pengaruh massa bahan dan jenis katalis terhadap hasil pirolisis. Setiap kondisi operasi diberikan kode kombinasi antara angka dan huruf, yang menggambarkan variasi massa *absorber* dan massa katalis yang digunakan. Angka dalam kode menunjukkan variasi massa, sedangkan huruf menunjukkan *absorber* dan katalis, huruf 'A' untuk *absorber* dan 'Z' untuk zeolit. Pendekatan ini memfasilitasi analisis komparatif yang sistematis terhadap hasil pirolisis berdasarkan perbedaan kondisi operasi yang telah ditentukan.

3.1. Pengaruh Massa *Absorber* terhadap Kenaikan Temperatur



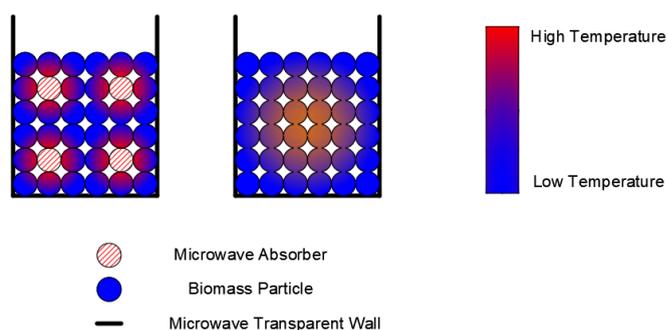
Gambar 2. Pengaruh Massa *Absorber* terhadap Kenaikan Temperatur

Gambar 2 merupakan grafik pengaruh massa *absorber* terhadap kenaikan temperatur, dapat terlihat dari pola kenaikan yang cenderung linier diikuti dengan garis datar atau landai. Setiap garis landai pada kurva merupakan suhu ditahan pada waktu tertentu sebelum naik ke tahap berikutnya. Sistem kontrol suhu bertahap memastikan kenaikan suhu tidak terjadi secara tiba-tiba, tetapi ditahan pada setiap kenaikan suhu tertentu (seperti pada 200°C, 300°C, dan seterusnya) selama 2 menit.

Hasil eksperimen pirolisis *microwave* dengan TKKS sebagai bahan utama dan variasi massa *absorber* (KOH) untuk mempelajari pengaruhnya terhadap peningkatan temperatur. Penambahan massa *absorber* akan mempercepat kenaikan suhu secara signifikan selama pirolisis. Pada kondisi *Control*, TKKS tidak menggunakan *absorber* maupun katalis atau kondisi 0% *absorber* dan 0% katalis. Temperatur maksimal pada kondisi tanpa *absorber* hanya mencapai 160°C dan stabil pada nilai ini sepanjang proses, ini menunjukkan bahwa TKKS memiliki sifat yang lemah dalam menyerap gelombang mikro dan mengkonversinya menjadi panas (Mohamed dkk., 2019). Pada kondisi 50A temperatur meningkat lebih cepat dibandingkan dengan *Control* dan mencapai suhu 450°C, ini menunjukkan bahwa penambahan 50% *absorber* cukup untuk mencapai suhu pirolisis karena KOH berperan sebagai *absorber* yang meningkatkan proses pemanasan biomassa, sedangkan pada kondisi 100A temperatur pada awal proses pirolisis sangat cepat dalam mencapai suhu lebih dari 200°C dan terus berlanjut cepat hingga temperatur 450°C, ini menunjukkan bahwa *absorber* secara signifikan dalam menyerap gelombang mikro dan mengkonversikan menjadi panas.

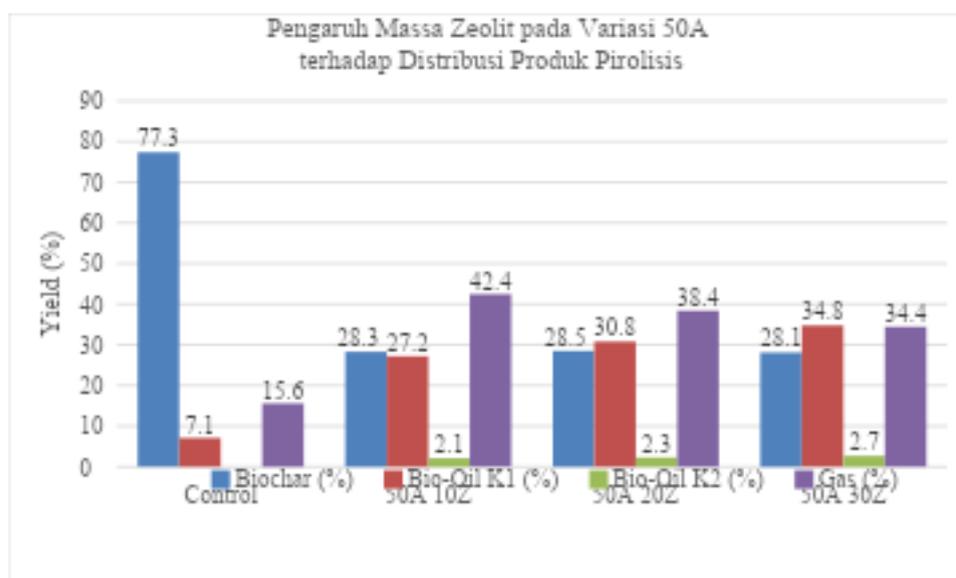
Waktu yang diperlukan pada pirolisis dengan *absorber* 100% menghasilkan kenaikan temperatur lebih cepat dibandingkan dengan 50% *absorber*. Hal ini dikarenakan dengan massa KOH yang lebih besar maka semakin besar pula penyerapan gelombang mikro dan mendistribusikan panas pada TKKS, oleh karena itu, grafik yang

dihasilkan dari 100A akan lebih curam dibandingkan dengan 50A, laju kenaikan suhu dan target suhu pirolisis menjadi lebih cepat. Hal ini sejalan dengan kelebihan dari pirolisis menggunakan *microwave* yang menghasilkan *hot spots* pada efek dari medan gelombang mikro dan sifat dielektrik dalam suatu material mengakibatkan suhu lokal dalam material jauh lebih tinggi daripada permukaan (Zhang dkk., 2017). Proses pemanasan dengan penambahan *absorber* yang memunculkan *hotspot* pada biomassa ditunjukkan pada gambar 3. Tahap penahanan pada waktu 2 menit, grafik yang dihasilkan pada 100A menunjukkan kontrol suhu yang kurang baik, karena suhu yang terjadi pada penahanan waktu 2 menit melampaui suhu kontrol sehingga *microwave oven* harus mati terlebih dahulu, baru kemudian setelah 2 menit *microwave oven* bekerja kembali menghasilkan gelombang mikro untuk melanjutkan proses pirolisis. Kondisi pada 50A menghasilkan kendali kontrol suhu yang baik karena proses kenaikan suhu lebih lambat dari 100A, sehingga tidak ada panas yang melampaui suhu kontrol dan *microwave oven* dapat dikontrol dengan baik.



Gambar 3. Hot Spots pada Proses Pirolisis Microwave

3.2. Pengaruh Massa Zeolit pada Variasi 50A Terhadap Distribusi Produk Pirolisis



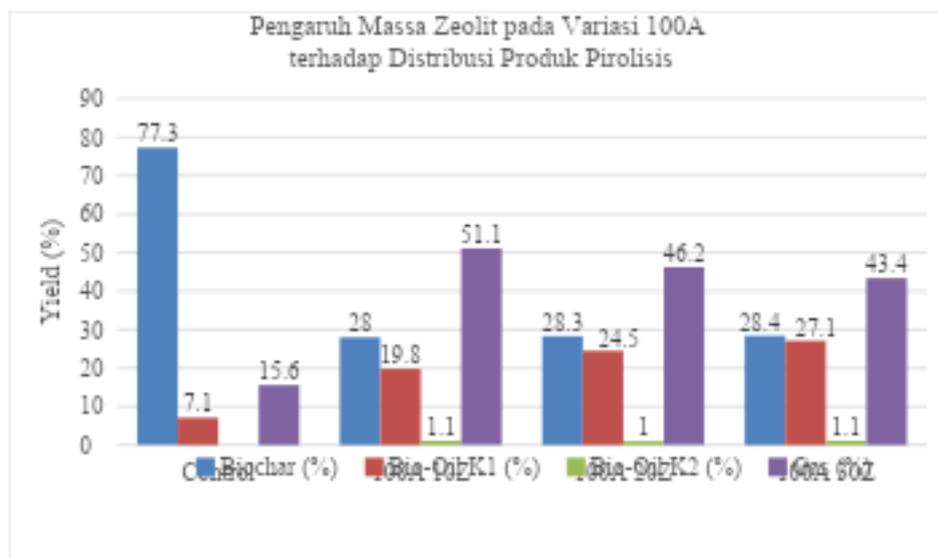
Gambar 4. Pengaruh Massa Zeolit pada Variasi 50A terhadap Distribusi Produk Pirolisis

Distribusi produk pirolisis terbagi menjadi 3 yaitu *biochar*, *bio-oil* dan gas. *Bio-oil* terdapat dua yaitu K1 sebagai penampungan *bio-oil* pada kondensor dengan media pendingin air mengalir, dan K2 adalah *bio-oil* yang tertampung pada kondensor 2 dengan media air es. Gambar 4 menunjukkan variasi 50% *absorber* KOH produk *bio-oil* meningkat seiring dengan meningkatnya persentase massa zeolit.

Seiring dengan peningkatan massa zeolit (dari 10Z hingga 30Z), terlihat adanya kenaikan pada *yield* Bio-oil K1 serta munculnya *bio-oil* K2 dengan peningkatan massa yang tidak signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan massa zeolit memberikan pengaruh pada produksi *bio-oil*, terutama dalam tahap awal kondensasi (K1). Produksi *bio-oil* K1 mengalami peningkatan dari *control* (tanpa katalis) hingga mencapai angka tertinggi pada variasi 50A 30Z yaitu sebanyak 34,8%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan massa katalis zeolit

berkontribusi pada pembentukan fraksi *bio-oil* pada tahap awal. Sedangkan untuk rendemen gas pirolisis menunjukkan penurunan seiring dengan bertambahnya katalis, hal ini dikarenakan sebagian volatil dari produk gas pirolisis berhasil terkondensasi menjadi *bio-oil*.

3.3. Pengaruh Massa Zeolit pada Variasi 100A terhadap Distribusi Produk Pirolisis



Gambar 5. Pengaruh Massa Zeolit pada Variasi 100A terhadap Distribusi Produk Pirolisis

Gambar 5 menunjukkan *bio-oil* K1 hanya muncul pada kondisi dengan penggunaan zeolit, sedangkan pada kondisi *control*, *bio-oil* K1 memiliki jumlah yang paling sedikit, hal ini berkaitan dengan kondisi operasi pirolisis. Pada kondisi *control*, suhu yang dicapai pada reaktor pirolisis hanya mencapai suhu maksimal 160°C. Karena suhu pada kondisi *control* tidak cukup tinggi untuk menghasilkan komponen volatil yang dibutuhkan untuk menghasilkan *bio-oil*. Tren ini serupa dengan variasi massa *absorber* 50A tetapi yang berbeda adalah jumlah *bio-oil* yang dihasilkan. Variasi massa *absorber* 100A jumlah massa dari KOH terbanyak dibandingkan dengan variasi lain. *Absorber* KOH akan memperbanyak proses penyerapan gelombang mikro dan mengonversi lebih banyak panas sehingga proses pirolisis akan semakin cepat dan akan menghasilkan produk gas yang cepat, dengan cepatnya produksi gas dari proses pirolisis, gas yang terproduksi akan secara cepat melewati reaktor sekunder sehingga tidak cukup waktu dalam proses katalitik yang menyebabkan kurangnya kontribusi katalis dalam pembentukan *bio-oil*. Aliran gas pirolisis yang cepat akibat dari produksi gas yang tinggi di reaktor *microwave* juga mempengaruhi kondensasi di kondensor. Gas yang cepat mengalir dapat terdorong tanpa sempat terkondensasi secara optimal menjadi *bio-oil*, sehingga pada proses pirolisis dengan variasi 100A lebih banyak menghasilkan produk gas. Gas produk pirolisis dapat digunakan sebagai bahan bakar mesin pembakaran dan turbin gas untuk menghasilkan tenaga dan sebagai bahan bakar alternatif pengganti gas untuk proses pembakaran (Amenaghawon dkk., 2021).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tentang pengaruh variasi massa *absorber* dan massa katalis pada pirolisis *microwave* tandan kosong kelapa sawit dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Massa *absorber* KOH berpengaruh signifikan terhadap kenaikan suhu dan distribusi produk pirolisis.
- Pada variasi 50A 30Z, *bio-oil* yang dihasilkan mencapai nilai tertinggi, yaitu 38,4 % pada kondensor 1 dan 2,7% pada kondensor 2 (K2). Ini mendukung bahwa kondisi massa *absorber* yang lebih rendah dapat meningkatkan *yield bio-oil* tanpa menyebabkan produksi gas pirolisis secara berlebihan.
- Massa katalis lebih tinggi (100A) menghasilkan gas lebih banyak karena efek massa *absorber* KOH yang tinggi sehingga mempercepat proses pirolisis, akibatnya menghasilkan laju produk gas yang tinggi sehingga mengurangi kondensasi uap menjadi *bio-oil*.

DAFTAR PUSTAKA

Amenaghawon, A. N., Anyalewechi, C. L., Okieimen, C. O., & Kusuma, H. S. (2021). Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. *Environment, Development and*

- Sustainability*, 23(10), 14324–14378. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5>
- Azni, A. A., Ghani, W. A. W. A. K., Idris, A., Ja'afar, M. F. Z., Salleh, M. A. M., & Ishak, N. S. (2019). Microwave-assisted pyrolysis of EFB-derived biochar as potential renewable solid fuel for power generation: Biochar versus sub-bituminous coal. *Renewable Energy*, 142, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.035>
- British Petroleum. (2023). bp Energy Outlook 2023 edition 2023 explores the key trends and uncertainties. *Statistical Review of World Energy, July*, 1–53.
- Chantanumat, Y., Phetwarotai, W., Sangthong, S., Palamanit, A., Abu Bakar, M. S., Cheirsilp, B., & Phusunti, N. (2023). Characterization of bio-oil and biochar from slow pyrolysis of oil palm plantation and palm oil mill wastes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(15), 13813–13825. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02291-2>
- Fan, L., Chen, P., Zhou, N., Liu, S., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, Y., Omar, M. M., Peng, P., Addy, M., Cheng, Y., & Ruan, R. (2018). In-situ and ex-situ catalytic upgrading of vapors from microwave-assisted pyrolysis of lignin. *Bioresource Technology*, 247(September 2017), 851–858. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.200>
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., Bindar, Y., & Irawan, A. (2019). Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menjadi Bio-Char, Bio-Oil Dan Gas Dengan Metode Pirolisis. *Jurnal Chemurgy*, 3(2), 12. <https://doi.org/10.30872/cmg.v3i2.3578>
- Md Said, M. S., Azni, A. A., Wan Ab Karim Ghani, W. A., Idris, A., Ja'afar, M. F. Z., & Mohd Salleh, M. A. (2022). Production of biochar from microwave pyrolysis of empty fruit bunch in an alumina susceptor. *Energy*, 240, 122710. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122710>
- Mohamed, B. A., Ellis, N., Kim, C. S., & Bi, X. (2019). Microwave-assisted catalytic biomass pyrolysis: effects of catalyst mixtures. *Applied Catalysis B: Environmental*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337319303807>
- Ren, X., Shanb Ghazani, M., Zhu, H., Ao, W., Zhang, H., Moreside, E., Zhu, J., Yang, P., Zhong, N., & Bi, X. (2022). Challenges and opportunities in microwave-assisted catalytic pyrolysis of biomass: A review. *Applied Energy*, 315(March), 118970. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118970>
- Salmina, S. (2017). Studi Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Oleh Masyarakat Di Jorong Koto Sawah Nagari Ujung Gading Kecamatan Lembah Melintang. *Jurnal Spasial*, 3(2). <https://doi.org/10.22202/js.v3i2.1604>
- Zhang, X., Rajagopalan, K., Lei, H., Ruan, R., & ... (2017). An overview of a novel concept in biomass pyrolysis: microwave irradiation. *Sustainable Energy & ...* <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2017/se/c7se00254h>