

PENGARUH PENAMBAHAN KATALIS Fe_3O_4 TERHADAP PIROLISIS KAYU AKASIA MENGGUNAKAN VARIASI SUHU PADA PIROLISIS ELEKTROMAGNETIK INDUKSI

Wildanun Mukhalladun Eka Firmansyah¹, Ena Marlina², Riswan Sepriyatno³

¹program studi Teknik Mesin, Universitas Islam Malang,

e-mail: wildanun143@gmail.com

²Agro-Renew Centre for Energi Water, and Environment Technologies, Universitas Islam Malang,

e-mail: enamarlina@unisma.ac.id

³program studi Teknik Mesin, Universitas Islam Malang,

e-mail: riswansepriyatno@unisma.ac.id

Jl. MT. Haryono 193 Malang 65144, Indonesia

Abstrak

Kelangkaan energi fosil mendorong pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan, salah satunya melalui proses pirolisis. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan katalis Fe_3O_4 dan variasi suhu terhadap hasil pirolisis serbuk kayu akasia menggunakan metode *Electromagnetic Induction Pyrolysis*. Penelitian dilakukan secara eksperimen dengan variasi suhu 400°C dan 600°C serta penambahan Fe_3O_4 sebesar 0%, 5%, 10%. Parameter yang dianalisis meliputi rendemen *bio-oil*, rendemen *char*, densitas, *heating rate*, dan karakteristik visual *bio-oil*. Penelitian ini menunjukkan hasil rendemen *bio-oil* tertinggi sebesar 24,94% diperoleh pada suhu 400°C tanpa katalis, sedangkan terendah sebesar 16,22% pada suhu 600°C dengan Fe_3O_4 10%. Rendemen *char* menurun dari 29,42% menjadi 21,31%, sementara densitas *bio-oil* berada pada rentang 0,77-0,82 g/mL, penambahan katalis Fe_3O_4 mempercepat kenaikan suhu, tetapi cenderung menurunkan rendemen produk cair. Penurunan *bio-oil* pada suhu tinggi diduga berkaitan dengan *secondary cracking* yang memecah senyawa volatil menjadi komponen yang lebih ringan, serta menghasilkan *bio-oil* yang secara visual relatif lebih jernih.

Kata Kunci: Fe_3O_4 , kayu akasia, pirolisis, elektromagnetik induksi, *bio-oil*.

Abstract

The scarcity of fossil fuels is driving the use of biomass as a renewable energy source, one of which is through the pyrolysis process. This study aims to analyse the effect of adding Fe_3O_4 catalyst and varying the temperature on the pyrolysis yield of acacia wood powder using the *Electromagnetic Induction Pyrolysis* method. The study was conducted experimentally with temperature variations of 400°C and 600°C and Fe_3O_4 additions of 0%, 5% and 10%. The parameters analysed included *bio-oil* yield, *char* yield, density, *heating rate* and the visual characteristics of the *bio-oil*. The results showed that the highest *bio-oil* yield of 24.94% was obtained at 400°C without a catalyst, whilst the lowest yield of 16.22% was recorded at 600°C with 10% Fe_3O_4 . The *char* yield decreased from 29.42% to 21.31%, whilst the density of the *bio-oil* ranged from 0.77 to 0.82 g/mL. The addition of Fe_3O_4 accelerated the temperature rise but tended to reduce the yield of the liquid product. The reduction in *bio-oil* yield at high temperatures is thought to be related to *secondary cracking*, which breaks down volatile compounds into lighter components, resulting in *bio-oil* that is visually relatively clearer.

Keywords: Fe_3O_4 , acacia wood, pyrolysis, electromagnetic induction, *bio-oil*.

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi yang terus meningkat menjadi salah satu tantangan dalam penyediaan energi berkelanjutan. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil masih menjadi permasalahan karena sumber energi tersebut bersifat terbatas dan penggunaannya dapat memberikan dampak terhadap lingkungan. Pengembangan energi alternatif berbasis sumber daya terbarukan diperlukan untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil dan meningkatkan pemanfaatan sumber energi yang lebih ramah lingkungan [1]-[2].

Biomassa menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan karena berasal dari material organik yang dapat diperbarui. Limbah biomassa seperti serbuk gergaji kayu memiliki kandungan organik yang dapat dikonversi menjadi produk bernilai energi melalui proses termokimia. Pemanfaatan limbah biomassa juga menjadi salah satu upaya untuk meningkatkan nilai guna limbah dari sektor kehutanan dan industri pengolahan kayu [3]-[4].

Pirolisis merupakan salah satu metode konversi termokimia yang banyak digunakan untuk mengolah biomassa menjadi produk energi [5]. Proses pirolisis berlangsung melalui proses dekomposisi material organik pada kondisi oksigen terbatas. Sehingga menghasilkan produk utama berupa *bio-oil*, *biochar*, dan gas. Karakteristik produk hasil pirolisis dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti temperatur, waktu tinggal, ukuran partikel, serta laju pemanasan (*heating rate*) selama proses berlangsung [6]-[7].

Parameter temperatur dan *heating rate* memiliki peranan penting dalam menentukan mekanisme degradasi komponen biomassa selama proses pirolisis. Perubahan temperatur dapat memengaruhi proses pemecahan struktur selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga menyebabkan perubahan terhadap jumlah dan karakteristik produk yang dihasilkan. Pranoto *et al.* menunjukkan bahwa variasi temperatur akhir dan *heating rate* memberikan pengaruh terhadap distribusi produk hasil pirolisis limbah kayu akasia [7].

Kayu akasia (*Acacia Mangium*) merupakan salah satu biomassa lignoselulosa yang memiliki potensi sebagai bahan baku proses pirolisis. Kayu akasia banyak dimanfaatkan dalam industri pengolahan kayu sehingga menghasilkan limbah berupa serbuk gergaji dan sisa potongan kayu. Kandungan lignoselulosa pada kayu akasia menjadikan material tersebut berpotensi dikonversi menjadi produk energi alternatif melalui proses pirolisis [8]-[9].

Penelitian mengenai pirolisis kayu Akasia telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Meliagustin *et al.* menunjukkan bahwa kayu akasia dapat dikonversi menjadi *bio-oil* melalui proses pirolisis dengan bantuan katalis tertentu [10]. Saputra *et al.* juga melaporkan bahwa penggunaan katalis pada proses pirolisis kayu akasia memberikan pengaruh terhadap karakteristik produk cair yang dihasilkan [11]. Togarotop *et al.* menjelaskan bahwa variasi temperatur memberikan pengaruh terhadap karakteristik minyak hasil pirolisis berbahan dasar serbuk kayu akasia [8].

Penggunaan katalis menjadi salah satu metode yang dapat diterapkan untuk meningkatkan efektivitas proses pirolisis biomassa. Katalis mampu memengaruhi jalur reaksi selama proses dekomposisi sehingga dapat mengubah distribusi produk hasil pirolisis. Mustapha *et al.* menjelaskan bahwa penggunaan katalis pada proses pirolisis dapat meningkatkan kualitas produk cair melalui perubahan mekanisme reaksi selama proses konversi biomassa [12].

Fe_3O_4 merupakan salah satu material yang memiliki potensi digunakan sebagai katalis dalam proses pirolisis biomassa. Fe_3O_4 memiliki sifat magnetik yang memungkinkan material tersebut memberikan respons terhadap medan elektromagnetik. Jamilaton *et al.* menunjukkan bahwa penggunaan katalis Fe_3O_4 pada proses

pirolisis biomassa memberikan pengaruh terhadap karakteristik produk yang dihasilkan dikarenakan Fe_3O_4 memiliki karakteristik magnetik dan mengandung ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} yang dapat mendukung berlangsungnya proses perpindahan panas dan reaksi selama pirolisis [13]. Karakteristik magnetik Fe_3O_4 juga menjadikan material tersebut berpotensi diduga dalam sistem pemanasan berbasis induksi elektromagnetik [14].

Teknologi *electromagnetic induction pyrolysis* (EMIP) menjadi salah satu metode pemanasan yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi proses pirolisis. Metode pemanasan ini menghasilkan panas melalui interaksi medan elektromagnetik dengan material tertentu sehingga proses pemanasan dapat berlangsung lebih cepat dan terarah. Xue *et al.* membandingkan proses pirolisis menggunakan pemanasan induksi elektromagnetik dengan tungku resistensi listrik dan menunjukkan bahwa penggunaan induksi elektromagnetik memiliki potensi meningkatkan efisiensi proses pemanasan serta karakteristik produk yang dihasilkan dan melaporkan bahwa peningkatan temperatur dari 300°C menjadi 400°C pada metode elektromagnetik induksi juga diikuti peningkatan *yield bio-oil* dari 20,3% menjadi 23,5% [15]. Makmur *et al.* juga menunjukkan bahwa sistem pemanas induksi memiliki potensi digunakan sebagai sumber panas alat pada alat pirolisis [16].

Penelitian mengenai pirolisis biomassa kayu akasia, penggunaan katalis, dan pemanasan induksi elektromagnetik induksi telah dilakukan secara terpisah, penggunaan serbuk kayu akasia dalam proses pirolisis berbasis elektromagnetik induksi dengan penambahan katalis Fe_3O_4 masih belum banyak dikaji. Penelitian terdahulu mengenai kayu akasia lebih banyak berfokus pada pengaruh temperatur dan laju pemanasan menggunakan sistem reaktor konvensional, sedangkan penelitian mengenai Fe_3O_4 telah menunjukkan potensinya sebagai katalis pada jenis biomassa lain. Teknologi elektromagnetik induksi telah menunjukkan kemampuan dalam mempercepat proses pemanasan, oleh karena itu, penelitian ini memadukan ketiga aspek tersebut, yaitu pemanfaatan biomassa serbuk kayu akasia, penggunaan Fe_3O_4 sebagai katalis sekaligus material magnetik, serta teknologi pemanasan elektromagnetik induksi.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan katalis Fe_3O_4 dan variasi temperatur terhadap hasil pirolisis serbuk kayu akasia menggunakan metode *electromagnetic induction pyrolysis*, variasi temperatur yang digunakan adalah 400°C dan 600°C , sedangkan Fe_3O_4 diberikan pada variasi tanpa katalis, 5% (7,5 gram), dan 10% (15 gram). Penelitian difokuskan pada produk utama berupa *bio-oil* dan *biochar*, serta karakteristik hasil yang meliputi rendemen, densitas, dan *heating rate*, serta karakteristik hasil yang meliputi *heating rate*. Penelitian ini diharapkan

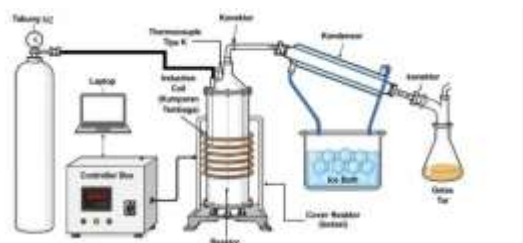
dapat memberikan informasi mengenai karakteristik temperatur dan penambahan katalis Fe_3O_4 terhadap karakteristik produk pirolisis kayu akasia menggunakan teknologi pemanasan elektromagnetik induksi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pengambilan data secara langsung melalui proses pirolisis biomassa serbuk kayu akasia menggunakan sistem *Electromagnetic Induction Pyrolysis* (EMIP). Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Islam Malang dan Laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang. Parameter yang diamati meliputi produk hasil pirolisis, perubahan temperatur selama proses, rendemen produk, densitas *bio-oil*, *heating rate*, serta visualisasi produk cair yang dihasilkan.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah temperatur pirolisis sebesar 400°C dan 600°C serta variasi penambahan katalis Fe_3O_4 sebesar 0% (tanpa katalis), 5% atau 7,5 gram, dan 10% atau 15 gram, pada rancangan metodologi penelitian, massa biomassa serbuk kayu akasia ditetapkan sebesar 150 gram. Variabel terikat yang diamati meliputi rendemen, densitas, dan *heating rate*, sedangkan waktu proses pirolisis dikendalikan selama 15 menit dengan interval pengamatan setiap 3 menit.

SKEMA INSTALASI PENELITIAN



Gambar 1. Skema instalasi alat *Electromagnetic Induction Pyrolysis*

ANALISIS DATA

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengetahui pengaruh variasi suhu serta penambahan katalis Fe_3O_4 terhadap proses pirolisis serbuk kayu akasia. Parameter yang dianalisis meliputi rendemen *bio-oil*, rendemen *char*, rendemen gas, laju pemanasan (*heating rate*), densitas *bio-oil* hasil rendemen di hitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Bio-oil}\% = \frac{m_{\text{bio-oil}}}{m_{\text{bahan baku}}} \times 100\% \dots\dots[17]$$

$$\text{Char}\% = \frac{m_{\text{char}}}{m_{\text{bahan baku}}} \times 100\% \dots\dots[18]$$

$$\text{Gas}\% = \frac{m_{\text{gas}}}{m_{\text{bahan baku}}} \times 100\% \dots\dots[19]$$

Kemudian densitas *bio-oil* dicari menggunakan persamaan

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots[20]$$

Keterangan:

ρ : massa jenis benda (g/ml)

m : massa benda (g)

V : volume benda (ml)

Heating rate dihitung untuk mengetahui laju kenaikan suhu selama proses pirolisis menggunakan persamaan

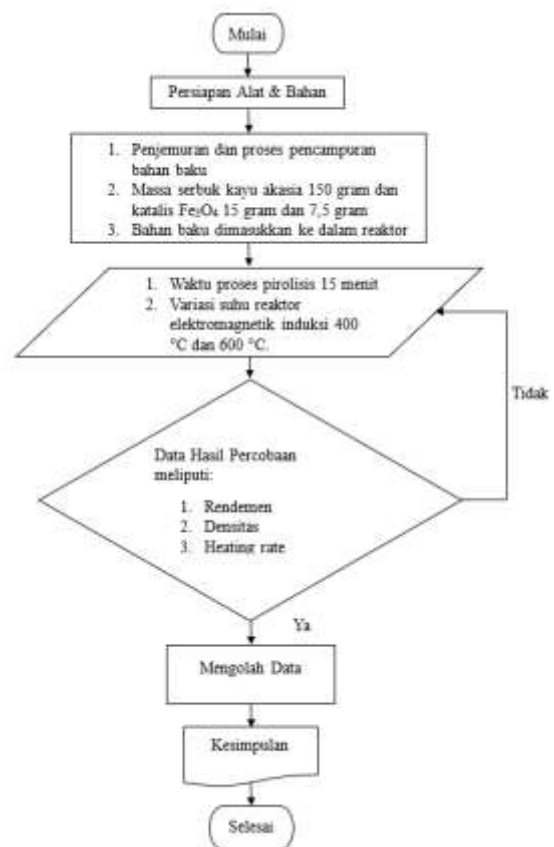
$$\text{Heating rate} = \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots[21]$$

Keterangan:

dT : Perubahan suhu ($^\circ\text{C}$)

dt : Perubahan waktu (menit)

DIAGRAM ALIR PENELITIAN



HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Hasil Penelitian Pirolisis

Penelitian pirolisis elektromagnetik induksi dilakukan menggunakan variasi suhu serta penambahan katalis Fe_3O_4 . Data hasil penelitian meliputi massa dan rendemen *bio-oil* serta *char*.

Tabel 1. Data hasil pirolisis

Katalis Fe ₃ O ₄	Suhu (°C)	Waktu (menit)	Bahan Baku (gr)	Bio-oil (gr)	Char (gr)	Gas (gr)	Bio-oil (%)	Char (%)	Gas (%)
0%	400	15	150	37,41	44,13	68,46	24,94	29,42	45,64
	600	15	150	29,83	35,27	84,90	19,89	23,51	56,60
5%	400	15	150	35,58	43,29	71,13	23,72	28,86	47,42
	600	15	150	27,68	33,84	88,48	18,45	22,56	58,99
10%	400	15	150	31,39	41,82	76,79	20,93	27,88	51,19
	600	15	150	24,33	31,96	93,71	16,22	21,31	62,47



Gambar 2. Persentase hasil produk biomassa serbuk kayu akasia

Gambar 2 menunjukkan persentase produk pirolisis biomassa serbuk kayu akasia yang terdiri atas *bio-oil*, *char* dan gas pada variasi suhu 400 °C dan 600 °C serta penambahan katalis Fe₃O₄ sebesar 0%, 5%, dan 10%. Rendemen *bio-oil* pada suhu 400°C menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan katalis Fe₃O₄, yaitu dari 24,94% tanpa katalis menjadi 23,72% pada penambahan katalis 5% dan 20,93% pada penambahan katalis 10%, sedangkan rendemen *char* menurun dari 29,42% menjadi 28,86% dan 27,88%. Rendemen *bio-oil* pada suhu 600°C juga menunjukkan penurunan dari 19,89% tanpa katalis menjadi 18,45% pada katalis 5% dan 16,22% pada katalis 10%, sedangkan rendemen *char* menurun dari 23,51% menjadi 22,56% dan 21,31%. Penurunan *bio-oil* pada suhu yang lebih tinggi diduga terjadi akibat meningkatnya reaksi *secondary cracking* yang mengubah sebagian uap pirolisis menjadi gas nonkondensabel, sedangkan penurunan *char* menunjukkan bahwa kenaikan suhu mempercepat proses dekomposisi biomassa sehingga residu padat yang tersisa semakin sedikit. Rendemen gas dihitung untuk melengkapi distribusi produk hasil pirolisis dan tidak menjadi fokus utama penelitian. Rendemen gas pada suhu 400°C meningkat dari 45,64% tanpa katalis menjadi 47,42% dengan Fe₃O₄ 5% dan 51,19% dengan Fe₃O₄ 10%, sedangkan pada suhu 600°C meningkat dari 56,60% menjadi 58,99% dan 62,47%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan katalis Fe₃O₄ dalam penelitian ini lebih berperan terhadap proses pemanasan dibandingkan peningkatan rendemen *bio-oil* dan *char*.

2. Pengaruh suhu terhadap *bio-oil*

Tabel 2. Hasil biomassa *bio-oil* dan rendemen *bio-oil*

Tabel hasil Rendemen Bio-oil			
Campuran	suhu	Massa Bio-oil (gr)	Rendemen Bio-oil (%)
0%	400	37,41	24,94
	600	29,83	19,89
5%	400	35,58	23,72
	600	27,68	18,45
10%	400	31,39	20,93
	600	24,33	16,22

Tabel 2, menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis dari 400°C menjadi 600°C menyebabkan penurunan massa dan rendemen *bio-oil* pada seluruh variasi katalis Fe₃O₄. Kondisi tanpa katalis menghasilkan *bio-oil* sebesar 37,41 gram (24,94%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 29,83 gram (19,89%) pada suhu 600°C. Penambahan katalis Fe₃O₄ 5% menghasilkan *bio-oil* sebesar 35,58 gram (23,72%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 27,68 gram (18,45%) pada suhu 600°C. Penambahan katalis Fe₃O₄ 10% menghasilkan *bio-oil* sebesar 31,39 gram (20,93%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 24,33 gram (16,22%) pada suhu 600°C. Hasil *bio-oil* tertinggi diperoleh pada suhu 400°C tanpa katalis, sedangkan hasil terendah diperoleh pada suhu 600°C dengan penambahan Fe₃O₄ 10%. Peningkatan suhu diduga memperbesar terjadinya reaksi *secondary cracking* sehingga sebagian uap hasil pirolisis terurai menjadi senyawa dengan berat molekul yang lebih rendah dan berubah menjadi gas yang tidak dapat dikondensasikan.

3. Pengaruh suhu terhadap *char*

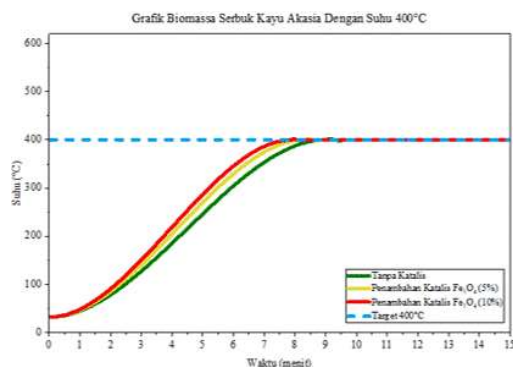
Tabel 3. Hasil biomassa *char* dan rendemen *char*

Tabel hasil Rendemen Char			
Campuran	suhu	Massa Char (gr)	Rendemen Char (%)
0%	400	44,13	29,42
	600	35,27	23,51
5%	400	43,29	28,86
	600	33,84	22,56
10%	400	41,82	27,88
	600	31,96	21,31

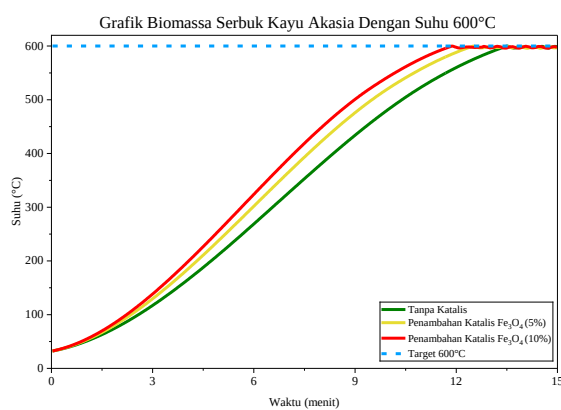
Tabel 3, menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 400°C menjadi 600°C menyebabkan penurunan massa dan rendemen *char* pada seluruh variasi katalis Fe₃O₄. Kondisi tanpa katalis menghasilkan *char* sebesar 44,13 gram (29,42%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 35,27 gram (23,51%) pada suhu 600°C. Penambahan katalis Fe₃O₄ 5% menghasilkan *char* sebesar 43,29 gram (28,86%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 33,84 gram (22,56%) pada suhu 600°C. penambahan katalis Fe₃O₄ 10% menghasilkan *char* sebesar 41,82 gram (27,88%) pada suhu 400°C dan menurun menjadi 31,96 gram (21,31%) pada suhu 600°C. Rendemen

char tertinggi diperoleh pada suhu 400°C tanpa katalis, sedangkan rendemen terendah diperoleh pada suhu 600°C dengan Fe₃O₄ 10%. Peningkatan suhu mempercepat proses dekomposisi termal dan devolatilisasi biomassa sehingga lebih banyak komponen padat terurai menjadi senyawa volatil dan residu *char* yang tersisa semakin sedikit. Senyawa volatil yang terbentuk pada suhu lebih tinggi juga dapat mengalami reaksi lanjutan berupa *secondary cracking*, yaitu pemecahan senyawa menjadi molekul yang lebih ringan yang tidak dapat terkondensasi. Proses tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suhu tidak hanya menurunkan jumlah *char*, tetapi juga mengubah distribusi produk pirolisis ke arah pembentukan komponen volatil dan gas. Penambahan Fe₃O₄ juga cenderung menurunkan rendemen *char*, yang diduga berkaitan dengan meningkatnya reaktivitas termal biomassa selama proses pirolisis.

4. Heating rate



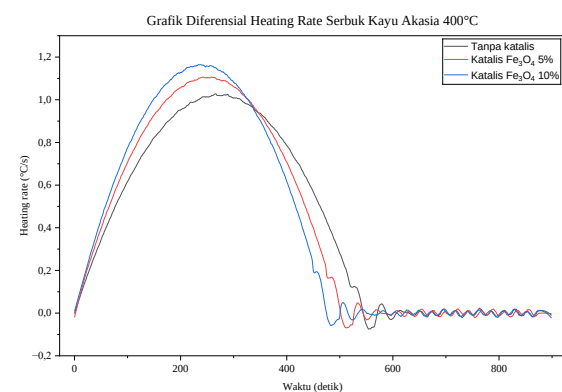
Gambar 3. Grafik *heating rate* pada suhu 400°C



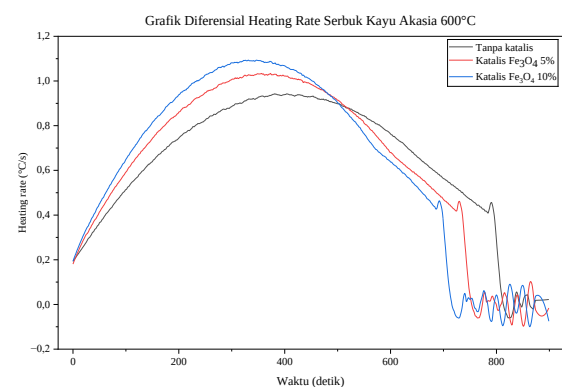
Gambar 4. Grafik *heating rate* pada suhu 600°C

Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu penambahan katalis Fe₃O₄ mempercepat kenaikan suhu selama proses pirolisis elektromagnetik induksi. Perlakuan Fe₃O₄ 10% pada suhu target 400°C menunjukkan kenaikan suhu paling cepat dan mencapai suhu target sekitar menit ke-8. Perlakuan Fe₃O₄ 5% mencapai suhu target pada kisaran menit ke-8 hingga ke-9, sedangkan perlakuan tanpa katalis

mencapai suhu target mendekati menit ke-9. Ketiga kurva cenderung mendatar setelah mencapai suhu 400°C karena temperatur mulai berada dalam kondisi stabil. Perlakuan pada suhu target 600°C menunjukkan perbedaan laju pemanasan yang lebih jelas. Perlakuan tanpa katalis mencapai sekitar 560°C pada menit ke-12, sedangkan Fe₃O₄ 5% mencapai 588,30°C dan Fe₃O₄ 10% mencapai 597,72°C. Perlakuan Fe₃O₄ 10% mendekati suhu target sekitar menit ke-12, diikuti oleh Fe₃O₄ 5% sekitar menit ke-13, sedangkan perlakuan tanpa katalis membutuhkan waktu hingga mendekati menit ke-15. Pencapaian suhu target 600°C membutuhkan waktu pemanasan lebih lama daripada suhu target 400°C karena temperatur yang harus dicapai lebih tinggi. Peningkatan konsentrasi Fe₃O₄ secara keseluruhan mempercepat kenaikan suhu dan memperpendek waktu pencapaian suhu target. Perlakuan Fe₃O₄ 10% menunjukkan proses pemanasan paling cepat pada kedua variasi suhu.



Gambar 5. Grafik diferensial *heating rate* serbuk kayu akasia 400°C



Gambar 6. Grafik diferensial *heating rate* serbuk kayu akasia 600°C

Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan perubahan laju pemanasan diferensial serbuk kayu akasia pada suhu 400 °C dan 600 °C terhadap waktu pemanasan pada variasi tanpa katalis, katalis Fe₃O₄ 5%, dan katalis Fe₃O₄ 10%. Kurva diferensial *heating rate* menunjukkan bahwa seluruh perlakuan mengalami peningkatan laju pemanasan pada tahap

awal proses hingga mencapai nilai maksimum, kemudian Mengalami penurunan ketika temperatur mendekati suhu target. Perlakuan Fe_3O_4 10% menghasilkan nilai *heating rate* diferensial tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya. Nilai *heating rate* maksimum pada penelitian ini diperoleh sebesar $65,06\text{ }^\circ\text{C}/\text{menit}$ atau setara dengan $1,08\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$. Berdasarkan klasifikasi laju pemanasan pada penelitian [6], nilai tersebut berada pada rentang $0,4$ sampai $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ sehingga proses pirolisis pada penelitian ini termasuk dalam kategori *intermediate pyrolysis*. Perlakuan Fe_3O_4 10% pada suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan nilai maksimum sekitar $1,16\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$, sedangkan Fe_3O_4 5% menghasilkan nilai sekitar $1,10\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ dan tanpa katalis menghasilkan nilai sekitar $1,02\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$. Penambahan Fe_3O_4 meningkatkan laju perpindahan panas karena Fe_3O_4 memiliki sifat magnetik dan kemampuan menyerap energi panas sehingga membantu proses pemanasan biomassa berlangsung lebih cepat [12]. Kurva diferensial *heating rate* mengalami penurunan setelah mencapai nilai maksimum karena temperatur sistem mulai mendekati suhu operasi yang ditetapkan. Sistem pemanas menurunkan laju perubahan temperatur ketika suhu telah mendekati kondisi stabil sehingga nilai mendekati nol. [15] menjelaskan bahwa pemanasan induksi mampu menghasilkan peningkatan temperatur yang cepat pada tahap awal, sedangkan laju kenaikan suhu menurun ketika temperatur mendekati kondisi operasi yang telah ditentukan. [7] juga menyatakan bahwa laju pemanasan dan suhu akhir proses pirolisis berpengaruh terhadap proses penguraian biomassa serta distribusi produk hasil pirolisis.

5. Densitas *bio-oil*

Tabel 4. Densitas *bio-oil*

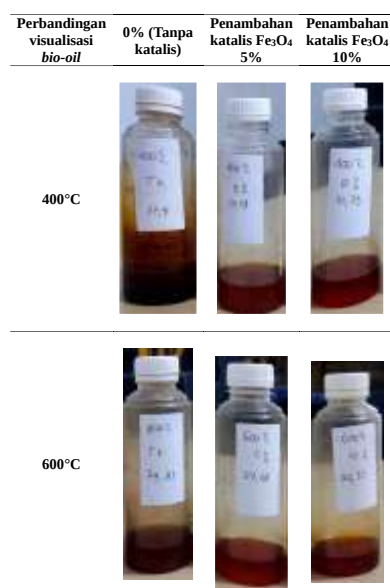
Densitas				
Campuran	Massa biomassa	Suhu	Bio-oil (ml)	Bio-oil (gr/ml)
0%	150	400	45,62	0,82
	150	600	43,93	0,81
5%	150	400	39,73	0,79
	150	600	37,29	0,80
10%	150	400	35,04	0,79
	150	600	31,60	0,77



Gambar 7. Persentase densitas *bio-oil*

Tabel 4 dan Gambar 7 menunjukkan bahwa densitas *bio-oil* yang dihasilkan berada pada kisaran $0,77\text{--}0,82\text{ g/mL}$. Perlakuan tanpa katalis menghasilkan densitas *bio-oil* sebesar $0,82\text{ g/mL}$ pada suhu 400°C dan menurun menjadi $0,81\text{ g/mL}$ pada suhu 600°C . Penambahan katalis Fe_3O_4 5% menghasilkan densitas sebesar $0,79\text{ g/mL}$ pada suhu 400°C sedikit meningkat menjadi $0,80\text{ g/mL}$ pada suhu 600°C . Penambahan katalis Fe_3O_4 10% menghasilkan densitas sebesar $0,79\text{ g/mL}$ pada suhu 400°C dan menurun menjadi $0,77\text{ g/mL}$ pada suhu 600°C . Nilai densitas tertinggi diperoleh pada suhu 400°C tanpa katalis, sedangkan nilai terendah diperoleh pada suhu 600°C dengan penambahan katalis Fe_3O_4 10%. Peningkatan suhu dan konsentrasi Fe_3O_4 secara umum menunjukkan kecenderungan menurunkan densitas *bio-oil*, meskipun perlakuan Fe_3O_4 5% menunjukkan sedikit peningkatan pada suhu 600°C . Perbedaan densitas tersebut diduga berkaitan dengan perubahan komposisi senyawa dalam *bio-oil* selama proses pirolisis. Peningkatan suhu dapat mempercepat proses dekomposisi dan *secondary cracking* sehingga sebagian senyawa berat terurai menjadi senyawa dengan berat molekul yang lebih rendah dan semakin sulit terkondensasi. Perubahan komposisi senyawa tersebut dapat memengaruhi massa jenis produk cair yang dihasilkan. Variasi suhu dan konsentrasi Fe_3O_4 menunjukkan bahwa perubahan densitas *bio-oil* tidak membentuk pola yang sepenuhnya linier pada setiap perlakuan.

6. Visualisasi *bio-oil*



Gambar 8. Perbandingan visualisasi *bio-oil*

Gambar 8 menunjukkan adanya perbedaan warna, tingkat kejernihan dan pembentukan endapan pada *bio-oil* akibat variasi suhu serta konsentrasi katalis Fe₃O₄. *Bio-oil* tanpa katalis pada suhu 400°C tampak lebih gelap dan relatif keruh, sedangkan penambahan katalis Fe₃O₄ 5% dan 10% menghasilkan warna yang cenderung merah kecokelatan dengan tampilan lebih jernih. *Bio-oil* pada suhu 600°C menunjukkan kecenderungan serupa, yaitu perlakuan tanpa katalis menghasilkan warna yang lebih gelap dibandingkan dengan perlakuan katalis Fe₃O₄. Penambahan Fe₃O₄ 5% menghasilkan produk cair yang terlihat lebih merah kecokelatan, sedangkan penambahan Fe₃O₄ 10% menunjukkan adanya endapan pada bagian bawah yang diduga berasal dari partikel halus biomassa, sisa katalis, atau senyawa berat yang terbawa selama proses kondensasi. Peningkatan suhu dari 400°C menjadi 600°C dapat menyebabkan perubahan komposisi produk cair karena proses dekomposisi berlangsung lebih lanjut. Senyawa volatil pada suhu yang lebih tinggi dapat mengalami *secondary cracking* menjadi senyawa yang lebih ringan dan gas nonkondensabel sehingga tidak seluruhnya dapat dikondensasikan menjadi *bio-oil*. Variasi suhu dan penambahan Fe₃O₄ tidak hanya memengaruhi jumlah *bio-oil* yang dihasilkan, tetapi juga memberikan perubahan terhadap karakteristik visualnya. Perbedaan warna, kejernihan, dan endapan tersebut hanya dapat digunakan sebagai pengamatan fisik dan belum dapat menunjukkan peningkatan kualitas kimia *bio-oil* tanpa adanya pengujian lebih lanjut.

KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pirolisis serbuk kayu akasia menggunakan pemanasan elektromagnetik induksi dengan variasi suhu 400°C dan 600°C serta penambahan katalis Fe₃O₄ 0%, 5%, dan 10% menghasilkan peningkatan suhu dan penambahan katalis Fe₃O₄ menurunkan rendemen *bio-oil* dan *biochar*, tetapi mempercepat proses pemanasan. Produk *bio-oil* dan *biochar* paling tinggi dihasilkan pada kondisi tanpa katalis dengan suhu 400°C, sedangkan penambahan katalis Fe₃O₄ sebanyak 10% memberikan pencapaian suhu target paling cepat. *Bio-oil* yang mengalami penurunan pada suhu yang lebih tinggi diduga berkaitan dengan meningkatnya dekomposisi dan *secondary cracking*. Penambahan katalis Fe₃O₄ bisa dikatakan lebih berperan dalam mempercepat pemanasan daripada meningkatkan jumlah produk pirolisis. Variasi suhu dan penambahan katalis Fe₃O₄ juga mengubah karakteristik produk pirolisis. *Bio-oil* mengalami perubahan densitas, warna, kejernihan, dan pembentukan endapan, sedangkan pada *biochar* peningkatan suhu dan penambahan katalis menyebabkan jumlah residu padat semakin berkurang akibat proses dekomposisi dan devolatilisasi yang lebih intensif. Karakteristik kimia produk belum dapat disimpulkan karena penelitian ini tidak mencakup pengujian kimia lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. A. Rizal *et al.*, "Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Kayu Campuran: Parameter Proses dan Analisis Produk Asap Cair," *J. Ris. Teknol. Ind.*, vol. 14, no. 2, p. 353, 2020, doi: 10.26578/jrti.v14i2.6606.
- [2] M. Muzdalifah, T. Syarif, and A. Aladin, "POTENSI PEMANFATAN LIMBAH BIOMASSA SERBUK GERGAJI KAYU BESI (Eusideroxylon zwageri) MENJADI ASAP CAIR MELALUI PROSES PIROLISIS," *ILTEK J. Teknol.*, vol. 15, no. 02, pp. 78–81, 2020, doi: 10.47398/iltek.v15i02.28.
- [3] P. Sakulkit, A. Palamanit, R. Dejchanchaiwong, and P. Reubroycharoen, "Journal of Environmental Chemical Engineering Characteristics of pyrolysis products from pyrolysis and co-pyrolysis of rubber wood and oil palm trunk biomass for biofuel and value-added applications," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 6, p. 104561, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.104561.
- [4] A. Habibi *et al.*, "Pengaruh Berat Biomassa Serbuk Kayu Terhadap Produksi Asap Cair Pada Reaktor Pirolisis Berbahan Bakar Oli Bekas," *Tek. Mesin*, 2021.

- [5] E. Marlina, A. Faruq, M. Siyamuddin, and R. Aniza, "Enhancing the combustion characteristics of plastic pyrolytic oils by doping nanocarbon additives for alternative energy," *Energy*, vol. 322, no. February, p. 135355, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.135355.
- [6] W. Jerzak, E. Acha, and B. Li, "Comprehensive Review of Biomass Pyrolysis: Conventional and Advanced Technologies, Reactor Designs, Product Compositions and Yields, and Techno-Economic Analysis," *Energies*, vol. 17, no. 20, 2024, doi: 10.3390/en17205082.
- [7] P. Pranoto, K. D. Nugrahaningtyas, and R. N. O. Putri, "Study of final temperature and heating rate variation to pyrolysis of Acacia (*Acacia mangium* W.) wood waste," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 959, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/959/1/012012.
- [8] E. Togatorop, E. Erdawati, and S. Priyanto, "Karakterisasi Minyak Hasil Pirolisis Berbahan Dasar Serut Gergaji Kayu Akasia (*Acacia mangium*) dengan Variasi Suhu pada Pirolisis," *JRSKT - J. Ris. Sains dan Kim. Terap.*, vol. 9, no. 1, pp. 11–18, 2023, doi: 10.21009/jrskt.091.02.
- [9] S. Kinanti, A. Haryanto, S. Kuncoro, and S. Suharyatun, "Kajian Industri Arang dari Kayu Akasia (*Acacia mangium*) di Kecamatan Bumi Nabung Kabupaten Lampung Tengah," 2022, doi: 10.23960.
- [10] A. Meliagustin, S. Bahri, and A. Amun, "Konversi Termal Kayu Akasia (*Acacia mangium*) menjadi Bio-oil dengan Teknologi Pirolisis Menggunakan Katalis Mo/NZA," *Acta Univ. Agric. Silvic. Mendelianae Brun.*, vol. 16, no. 2, pp. 39–55, 2015.
- [11] A. Saputra, S. Bahri, and A. Amri, "Pirolisis Kayu Akasia menjadi Bio-Oil Menggunakan Katalis NiMo/NZA dengan Variasi Jumlah Pengembangan Logam dan Rasio Berat Katalis terhadap Biomassa," *Oktober*, vol. 2, no. 2, pp. 1–7, 2015, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/205804/pirolisis-kayu-akasia-acacia-mangium-menjadi-bio-oil-menggunakan-katalis-ni-nza#cite>
- [12] S. I. Mustapha, I. Rawat, F. Bux, and Y. M. Isa, "Catalytic pyrolysis of nutrient-stressed *Scenedesmus obliquus* microalgae for high-quality bio-oil production," *Renew. Energy*, vol. 179, pp. 2036–2047, 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.08.043.
- [13] S. Jamilatun, L. M. Shitophyta, H. O. Nisa, and M. E. Nurhidayah, "A Pyrolysis of 80 Mesh *Spirulina platensis* Residue (SPR) With Fe₃O₄ Catalyst," *Elkawanie*, vol. 7, no. 2, p. 252, 2022, doi: 10.22373/ekw.v7i2.8950.
- [14] R. Prasetyowati, D. Widiawati, and P. E. Swastika, "SINTESIS DAN KARAKTERISASI NANOPARTIKEL MAGNETIT (Fe₃O₄) BERBASIS PASIR BESI PANTAI GLAGAH KULON PROGO DENGAN METODE KOPRESIPITASI PADA BERBAGAI VARIASI KONSENTRASI NH₄OH," *J. Sains Dasar*, vol. 10, no. 2, pp. 57–61, 2021.
- [15] Y. Xue, Y. Zhou, J. Liu, Y. Xiao, and T. Wang, "Comparative analysis for pyrolysis of sewage sludge in tube reactor heated by electromagnetic induction and electrical resistance furnace," *Waste Manag.*, vol. 120, no. xxxx, pp. 513–521, 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.10.015.
- [16] S. Makmur, M. Daud, and A. Setiawan, "Desain dan Evaluasi Unjuk Kerja Pemanas Induksi sebagai Sumber Panas pada Alat Pirolisis," *J. Serambi Eng.*, vol. IX, no. 4, pp. 10512–10519, 2024.
- [17] N. Izza, A. Putra, and Z. Amalia, "Pembuatan Asap Cair (Liquid Smoke) dari Limbah Serbuk Kayu Jati dan Kayu Pinus secara Pirolisis sebagai Pengawet Alami," *J. Teknol.*, vol. 22, no. 2, p. 104, 2022, doi: 10.30811/teknologi.v22i2.3130.
- [18] W. Charusiri, N. Phowan, and T. Vitidsant, "Pyrolysis of lignocellulosic biomass with high-density polyethylene to produce chemicals and bio-oil with high liquid yields," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 25, no. March 2021, p. 100567, 2022, doi: 10.1016/j.scp.2021.100567.
- [19] T. F. Widawati, M. F. Refki, A. Budiman, U. G. Mada, U. G. Mada, and U. G. Mada, "Exploring Microwave-Assisted Pyrolysis of *Sargassum* sp. for Optimal Process Parameters and Product Insights," vol. 24, no. 2, pp. 210–228, 2024, doi: 10.22146/ajche.12871.
- [20] J. L. Chukwuneke, H. O. Orugba, H. C. Olisakwe, and P. O. Chikelu, "South African Journal of Chemical Engineering Pyrolysis of pig-hair in a fixed bed reactor : Physico-chemical parameters of," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 38, no. October, pp. 115–120, 2021, doi: 10.1016/j.sajce.2021.09.003.
- [21] A. Volford, T. Redko, E. J. Marek, Z. W. M. Bond, and A. N. Hayhurst, "Using a flame ionisation detector to measure the rate and duration of pyrolysis of a biomass particle," *Combust. Flame*, vol. 230, p. 111438, 2021, doi: 10.1016/j.combustflame.2021.111438.