

Pengaruh Variasi Komposisi Batubara Dan Tatal Karet Terhadap Karakteristik *Bio-Oil* Dan *Biochar* Menggunakan Metode Co-Pirolisis

Aida Syarif^{1*)}, Sonia Rahma Putri¹⁾, Iin Sutarmi¹⁾, Jaksen¹⁾, Rima Daniar¹⁾

¹⁾Program Studi Teknik Energi, Fakultas Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya
Jl. Srijaya Negara, Palembang 30139, Indonesia

*) *Corresponding author:* aida_s@polsri.ac.id

Abstrak

Sebagian besar cadangan batubara di Indonesia terdiri dari batubara berkualitas rendah (34,4% dari total cadangan), yang tidak dapat dimanfaatkan secara langsung dan memiliki nilai jual rendah. Batubara jenis ini dapat diubah menjadi produk bahan bakar dengan nilai kalor lebih tinggi melalui metode co-pirolisis, yaitu proses dekomposisi termal tanpa oksigen yang melibatkan batubara dan biomassa, menghasilkan bahan bakar cair (*bio-oil*), padat (*biochar*), dan gas (*syngas*). Pada penelitian ini, limbah biomassa tatal kayu karet digunakan sebagai campuran batubara yang berpotensi sebagai sumber energi terbarukan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis pengaruh variasi rasio campuran batubara dan tatal kayu karet terhadap karakteristik produk *bio-oil* dan *biochar* yang dihasilkan, serta menentukan komposisi optimal untuk menghasilkan bahan bakar dengan kualitas terbaik. Variasi rasio komposisi bahan baku batubara : tatal kayu karet adalah 100%:0%, 75%:25%, 50%:50%, 25%:75%, 0%:100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rendemen *bio-oil* tertinggi diperoleh pada rasio 50%:50%, sedangkan rendemen *biochar* tertinggi diperoleh pada rasio 100% batubara. Karakteristik *bio-oil* paling optimal tercapai pada rasio 75% batubara : 25% tatal kayu karet dengan densitas 0,9660 g/ml dan titik nyala 88°C. Kualitas *biochar* paling optimal juga dicapai pada rasio 75% batubara : 25% tatal kayu karet, dengan nilai kalor 5609,5755 kal/g, kadar air 5,17%, kadar abu 4,17%, kadar zat terbang 5,68%, dan karbon tetap 84,98%. Temuan komposisi optimal (75:25) dapat diaplikasikan untuk memproduksi bahan bakar alternatif yang lebih berkualitas, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah biomassa sebagai bagian dari energi terbarukan yang berkelanjutan serta menjadi solusi dalam peningkatan nilai ekonomi batubara rendah kalori.

Kata Kunci: Batubara, Bio-oil, Biochar, Co-Pirolisis, Tatal Karet

PENDAHULUAN

Indonesia menjadi salah satu negara dengan konsumsi energi batubara yang cukup besar. Rencana kebutuhan batubara pada tahun 2024 mencapai 209, 9 juta ton (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022). Tingginya konsumsi batubara tidak jarang menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan dan ketersediannya yang semakin menipis setiap tahunnya. Meskipun Indonesia memiliki cadangan batubara yang cukup melimpah, namun, sebagian besar batubara di Indonesia memiliki kualitas rendah. Berdasarkan data dari Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, cadangan batubara Indonesia mencapai 38,8 miliar ton, dengan 34,4% di antaranya merupakan batubara berkalori rendah (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2021). Pembakaran batubara kalori rendah secara langsung dapat menurunkan efisiensi dan kualitas pembakaran. Selain itu, hasil pembakarannya akan banyak menimbulkan emisi gas CO₂ dan zat-zat *volatile* lainnya sehingga dapat berdampak buruk bagi lingkungan. Jika hal ini terus-menerus dilakukan, maka tidak sejalan dengan komitmen Indonesia dalam

mendukung tercapainya *Net Zero Emission* pada tahun 2060. Batubara kualitas rendah ini juga memiliki nilai ekonomi yang rendah karena masih tingginya kandungan air dan kandungan *volatile matter*.

Solusi yang dapat dilakukan untuk mengoptimalkan penggunaan batubara kalori rendah dan mengurangi emisi karbon adalah dengan metode *co-firing*. Melalui metode ini, batubara kalori rendah dapat digunakan secara bersamaan dengan biomassa sebagai bahan bakar. Teknik *co-firing* dapat menekan konsumsi batubara dan mengurangi emisi karbon. Berdasarkan hasil penelitian oleh Hendrik dkk (2024) terkait *co-firing* limbah biomassa *cocopeat* dengan batubara, didapatkan bahwa pencampuran rasio 10% biomassa *cocopeat* dengan batubara mampu meningkatkan nilai kalor menjadi 6689,0 kkal/kg dari 4704,6 kkal/kg pada biomassa *cocopeat* tanpa campuran dan menurunkan kadar sulfur menjadi 0,681% dari 0,802% pada batubara tanpa campuran. Salah satu pengembangan dari penerapan teknik ini, yaitu teknologi konversi co-pirolisis. Co-pirolisis ialah proses dekomposisi termal tanpa udara dengan menggunakan lebih dari satu bahan baku yang menghasilkan produk bahan bakar gas (*syngas*), cair (*bio-oil*), dan padat (*biochar*). Dalam hal ini dapat digunakan biomassa sebagai bahan baku campuran batubara untuk menghasilkan potensi bahan bakar alternatif. Ketersediaan biomassa sangat melimpah di alam dan dapat diperbaharui sehingga dapat dijadikan alternatif bahan bakar. Biomassa banyak diperoleh dari limbah perkebunan, salah satunya adalah perkebunan karet. Provinsi Sumatera Selatan sendiri memiliki perkebunan karet seluas 919.500 hektare (Badan Pusat Statistik, 2022). Salah satu limbah perkebunan karet yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan, yaitu tatal kayu karet. Tatal kayu karet mengandung *selulosa*, *hemiselulosa* dan *lignin* sehingga mampu dijadikan bahan bakar. Komponen kimia yang terkandung di dalam kayu karet, yaitu 37,41% *selulosa*, 39,97% *hemiselulosa*, 77,38% *holoselulosa*, dan 28,13% *lignin* (Ali dkk., 2022). Oleh karena itu, tatal kayu karet dapat menjadi bahan baku campuran batubara kalori rendah dalam penerapan metode co-pirolisis. Pada proses co-pirolisis, selama pemanasan akan terjadi penguapan air, *volatile matter*, dan kandungan sulfur. Dengan begitu, produk yang terbentuk sudah rendah emisi dan kaya karbon. Pencampuran biomassa yang telah dipirolisis dengan batubara menghasilkan nilai karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan pencampuran batubara dan biomassa tanpa pirolisis, dan semakin bertambahnya komposisi biomassa maka semakin menurunnya kandungan sulfur yang dihasilkan (Hendrik dkk., 2024).

Dalam proses co-pirolisis, terdapat banyak faktor yang mempengaruhi terbentuknya produk. Berdasarkan penelitian serupa, co-pirolisis dipengaruhi oleh komposisi bahan baku, rasio biomassa yang lebih banyak daripada batubara cenderung lebih banyak menghasilkan produk gas (Husna dkk., 2023). Selain itu, semakin rendah temperatur dan semakin lama waktu, maka semakin besar produk *biochar* terbentuk (Nurfaritsya dkk., 2023). Waktu tinggal yang lama pada proses pirolisis biomassa dapat menghasilkan produk *biochar* dengan kandungan air sedikit dan meningkatkan kandungan karbon terikat (Asmunandar dkk, 2023). Devolatilisasi akan menjadi lebih intensif pada pirolisis dengan temperatur tinggi sehingga menghasilkan gas tidak terkondensasi (CH_4 , CO_2 , CO , H_2) yang lebih banyak dan arang yang bernilai kalor tinggi dan rendah *volatile* dalam jumlah sedikit (Setiawan & Riskina, 2022). Proses co-pirolisis pada suhu rendah (200°C-300°C) dapat meningkatkan kalor dari biomassa dan mengimbangi pelepasan polutan sehingga menghasilkan bahan bakar campuran yang bersih dengan efisiensi energi tinggi (Li dkk., 2020). Pirolisis dapat diklasifikasikan menjadi pirolisis lambat (< 400°C), pirolisis cepat ($\pm 500^\circ\text{C}$), dan pirolisis kilat (450°C-1000°C). Pirolisis lambat cenderung menghasilkan *char* yang lebih banyak, sedangkan pirolisis cepat dan kilat dapat menghasilkan rendemen produk *bio-oil* yang lebih besar (Islami, 2022). Terdapat beberapa tahapan selama proses co-pirolisis berlangsung, yaitu tahap pengeringan (suhu 100-150°C, terjadi penguapan kadar air pada bahan), tahap pirolisis (suhu 250-500°C, terjadi proses perengkahan menghasilkan arang dan gas), tahap oksidasi (menghasilkan gas CO_2 dan gas mampu bakar dengan sempurna), dan tahap reduksi (800-1000°C, arang bereaksi dengan CO_2 dan uap air) (Ridhuan &

Irawan, 2020). Hasil dekomposisi molekul pada biomassa akan menguap seiring meningkatnya temperatur pirolisis yang akan menghasilkan produk gas dan *bio-oil*, dengan arang sebagai residu (Arini & Lovisia, 2020).

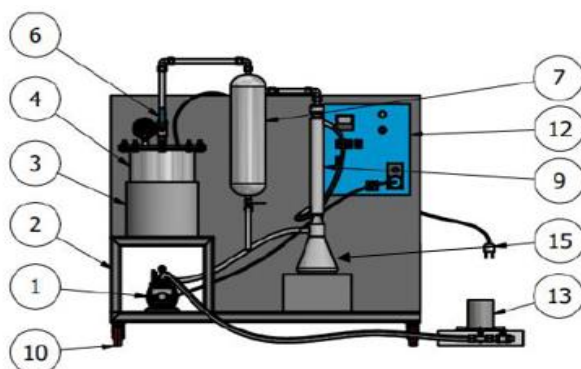
Produk co-pirolisis berupa *char*, *bio-oil*, dan *syngas* merupakan bahan mampu bakar sehingga dapat dijadikan sebagai alternatif bahan bakar. *Biochar* merupakan zat padat berwarna hitam berpori yang kaya karbon dan mengandung campuran kompleks karbon (C), oksigen, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan abu (Rathod dkk., 2023). Pada suhu pirolisis mencapai 250°C, *biochar* didominasi oleh oligosakarida, dan ketika suhu meningkat sampai 290°C akan terbentuk fenol dan furan, kemudian akan terbentuk alkil furan, benzenoid aromatik, dan kondensat aromatik pada *biochar* (Tomczyk dkk, 2020). *Bio-oil* merupakan produk cair yang didapatkan dari kondensasi gas hasil proses pirolisis. Komposisi *bio-oil* terdiri dari senyawa aromatik, keton, fenolik, glukosa, eter, alkohol, ester, dan furan (Zadeh dkk., 2020). Produk *bio-oil* dapat digunakan pada industri untuk mesin boiler, mesin diesel statis dan mesin pembakaran (Jati, 2022). *Syngas* merupakan produk gas hasil pirolisis yang terdiri dari gas tidak terkondensasi, yaitu H₂O, CO₂, CO, CH₄, NH₃, HCN, dan H₂S (Zadeh dkk., 2020). Pada penelitian yang dilakukan oleh Jamilatun dkk (2022) didapatkan produk *biochar* terbanyak sebesar 34,37% dengan temperatur 300°C dari proses pirolisis tandan kosong kelapa sawit tanpa katalis. Pirolisis dengan komposisi bahan baku 25% TKKS dan 75% batubara pada temperatur 400°C menghasilkan *syngas* optimal sebesar 63,81% (Ambarnita dkk., 2023). Sedangkan, pada pirolisis biji karet dengan tambahan katalis zeolit, dihasilkan produk maksimum *biochar* sebesar 55,75% pada suhu 200°C dengan katalis 4%, produk optimal *bio-oil* sebesar 23,55% pada temperatur 400°C dengan katalis 6%, dan produk *syngas* tertinggi sebesar 44,01% pada temperatur 400°C dengan katalis 6% , semakin tinggi konsentrasi katalis zeolit akan meningkatkan rendemen produk dan meningkatkan produksi CH₄ pada *syngas* (Khasanah dkk., 2023). Pencampuran batubara dan biomassa sebagai bahan baku pirolisis menjadi potensi untuk menghasilkan produk bahan bakar berkualitas. Sehingga dalam penelitian ini, co-pirolisis batubara dan tatal kayu karet ditinjau dari variasi komposisi diharapkan mampu menghasilkan produk *bio-oil* dan *biochar* dengan karakteristik yang baik sehingga dapat menjadi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan.

METODOLOGI PENELITIAN

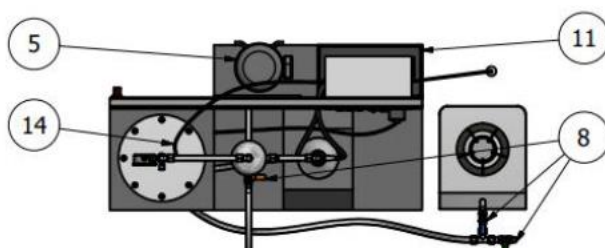
Objek pada penelitian ini adalah *bio-oil* dan *bio-char* yang diperoleh dari proses co-pirolisis batubara dan limbah tatal karet yang didapatkan dari perkebunan karet rakyat Prabumulih, Sumatera Selatan. Variabel yang diteliti yaitu rasio komposisi bahan baku batubara dan tatal karet yaitu 0:100, 25:75, 50:50, 75:25, 100:0 %w/w. Produk *bio-oil* dan *bio-char* akan dianalisis masing-masing karakteristiknya sebagai potensi bahan bakar alternatif.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain, seperangkat alat pirolisis, kertas saring, gelas ukur, corong, erlenmeyer, dan neraca analitik. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu batubara *lignite* (kalori rendah) dan tatal karet.



Gambar 1. Seperangkat Alat Pirolisis Tampak Depan



Gambar 2. Seperangkat Alat Pirolisis Tampak Atas

Keterangan:

- | | | |
|----------------------|------------------|-------------------|
| 1. Pompa Vakum | 6. Valve Reaktor | 11. Bejana Air |
| 2. Rangka | 7. Separator | 12. Control Panel |
| 3. Band Heater | 8. Valve | 13. Burner |
| 4. Reaktor Pirolisis | 9. Kondensor | 14. Termokopel |
| 5. Kompresor | 10. Roda | 15. Labu hisap |

Prosedur Penelitian

a. Preparasi bahan baku

Batubara dan tatal kayu karet dikeringkan terlebih dahulu dengan dijemur dibawah matahari, lalu dikeringkan didalam oven pada suhu 110°C untuk mengurangi kandungan air yang terdapat pada bahan baku. Kemudian dilakukan pengecilan ukuran tatal kayu karet dan batubara menggunakan *crusher*. Setelah itu, dilakukan pengayakan menggunakan jaring kawat dengan ukuran lubang 2 cm sebagai penyaring untuk mendapatkan ukuran bahanbaku sebesar ± 2 cm.

b. Analisa Bahan Baku

Sebelum dilakukan proses pirolisis, bahan baku dianalisa terlebih dahulu untuk mengetahui kadar air, kadar abu (*ash*), zat terbang (*volatile matter*), dan *fixed carbon* yang terkandung di dalamnya. Berikut prosedur analisa proksimat berdasarkan standar SNI.

a) Analisa Kadar Air (SNI-1683-2021)

1. Memanaskan *crucible*, lalu ditimbang beratnya (W)
2. Menimbang sampel sebanyak 1 gr
3. Memasukkan sampel yang telah ditimbang ke dalam *crucible* dan ditimbang beratnya (W1), lalu dipanaskan dalam oven dengan temperatur (105°C \pm 5°C) selama 3 jam
4. Mendinginkan sampel dalam desikator kemudian ditimbang (W2)
5. Kemudian dihitung kadar airnya.

$$\text{Kadar air (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_1 - W} \times 100$$

Dimana :

W = berat *crucible* (g)

W1 = berat sampel + *crucible* sebelum pemanasan (g)

W2 = berat sampel + *crucible* setelah pemanasan (g)

b) Analisa Kadar Abu (SNI-01-2891-1992)

1. Memanaskan cawan porselen
2. Menimbang sampel sebanyak 2 - 3 gr
3. Memasukkan sampel yang telah ditimbang ke dalam cawan porselen lalu dipanaskan dalam oven dengan temperatur (550°C) selama 3-4 jam
4. Mendinginkan sampel dalam desikator kemudian ditimbang kemudian dihitung kadar abunya.

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{w_1}{w_2} \times 100$$

Dimana :

W1 = berat abu (g)

W2 = berat sampel (g)

c) Analisa Kadar Zat Terbang (SNI-1683-2021)

1. Memanaskan cawan porselen
2. Menimbang sampel sebanyak 1 - 2 gr
3. Memasukkan sampel yang telah ditimbang ke dalam cawan porselen dan penutupnya yang telah diketahui beratnya, lalu mencatat beratnya (W1)
4. Dipanaskan dalam oven dengan temperatur (950°C) selama 7 menit
5. Mendinginkan sampel dalam desikator kemudian ditimbang (W2) kemudian dihitung zat terbangnya.

$$\text{Kadar zat terbang (\%)} = \frac{w_1 - w_2}{w_{1aa}} \times 100$$

Dimana :

W1 = berat sampel (g)

W2 = berat setelah pemanasan (g)

d) Analisa Fixed Carbon (SNI-1683-2021)

$$FC = 100\% - (\% M + \% \text{Ash} + \% \text{VM})$$

Dimana:

% Ash = Kadar Abu

% M = Kadar Air

% VM = *Volatile Matter*

c. Proses Pirolisis

Setelah proses preparasi, bahan baku dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis sebanyak 1,5 kg. Lalu menghidupkan pemanas dan *setting* suhu sebesar 350°C pada kontrol panel. *Stopwatch* dihidupkan hingga proses pirolisis selesai. Kemudian pompa vakum dihidupkan apabila temperatur sudah mencapai *set point*. Pembakaran bahan baku di dalam reaktor akan menghasilkan asap (*syngas*) yang mengalir menuju kondensor sehingga gas yang terkondensasi akan menghasilkan kondensat berupa *bio-oil*. Secara gravitasi, kondensat mengalir kebawah dan ditampung di dalam labu hisap. Kemudian, gas yang tidak terkondensasi (*syngas*) akan mengalir melalui selang menuju *burner* (kompor). Gas dapat ditampung dengan menutup katup aliran ke *burner* dan membuka katup yang sudah disambung dengan selang *urine bag*, sehingga *syngas* dapat ditampung dan selanjutnya dianalisis. Waktu proses dan volume kondensat dicatat setelah percobaan selesai. Setelah proses pirolisis selesai *heater* dan kontrol panel dimatikan.

d. Analisa *Bio-oil*

Analisa yang dilakukan pada produk *bio-oil* yaitu analisa rendemen, densitas, dan titik nyala. Analisa titik nyala (*flash point*) dilakukan dengan menggunakan alat *flash point tester (K16200 Closed Cup Flashpoint Tester- Koehler Instrument, standar ASTM D93)*. Sedangkan analisa densitas menggunakan piknometer (SNI 01-2891-1992) dengan prosedur sebagai berikut.

1. Membersihkan piknometer dengan cara membilas menggunakan aquades
2. Mengeringkan piknometer lalu menimbanganya (W1)
3. Memasukan aquades ke dalam piknometer, lalu ditimbang beratnya (W) dan mengeluarkan aquades dari piknometer
4. Memasukkan sampel *bio-oil* ke dalam piknometer kosong yang telah ditimbang kemudian tutup.
5. Lalu dicatat beratnya (W2)

$$Densitas = \frac{(W2-W1)}{(W-W1)} \times \rho_{air}$$

Keterangan:

- W = Berat piknometer beserta blanko/air (gram)
W1 = Berat piknometer kosong (gram)
W2 = Berat piknometer beserta sampel (gram)
 ρ_{air} = 1 gr/ml

e. Analisa *Bio-char*

Pada *bio-char* dilakukan analisa kadar abu, zat terbang, kadar air, dan kadar *fixed carbon* berdasarkan SNI dan nilai kalor *biochar* menggunakan *bomb* kalorimeter dengan metode ASTM D5865-11a.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses co-pirolisis melibatkan penggunaan bahan baku campuran batubara dan biomassa tatal kayu karet, menghasilkan produk berupa *syngas*, *bio-oil*, *biochar*, dan tar. Produk pirolisis yang dihasilkan mengandung gas NOx dan sulfur yang rendah sehingga menjadi energi yang ramah lingkungan (Novita dkk., 2021). Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi untuk produk *bio-oil* dan *biochar*. Kedua jenis produk ini dilakukan analisis karakteristik untuk mengetahui kualitas dan kelayakannya sebagai bahan bakar cair dan padat. Uji densitas dan *flash point* dilakukan untuk mengetahui karakteristik *bio-oil*. Kemudian, analisis proksimat berupa kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, *fixed carbon* dan nilai kalor dilakukan untuk mengetahui karakteristik *biochar*.

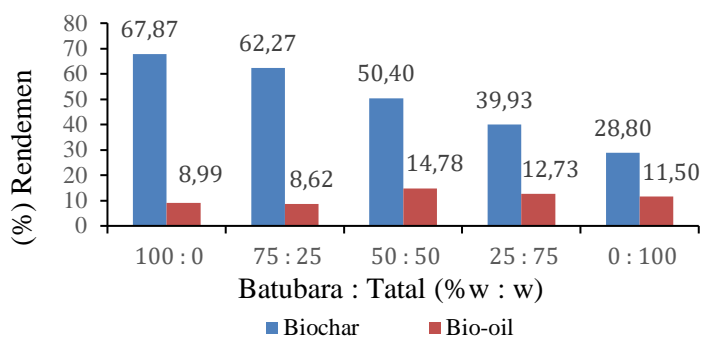
Selama proses co-pirolisis, terjadi reaksi dekomposisi termal seiring dengan meningkatnya temperatur co-pirolisis yang mengakibatkan perubahan struktur bahan baku sehingga terbentuknya produk. Dalam menganalisis perubahan karakteristik bahan baku terhadap produk yang dihasilkan dilakukan analisis proksimat dan nilai kalor bahan baku sebelum dilakukan proses co-pirolisis. Hasil analisa bahan baku dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisa Bahan Baku

Jenis Sampel	Kadar Air (%)	Ash (%)	VM (%)	Fixed Carbon (%)	Nilai Kalor (cal/g)
Batubara	10,29	7,04	42,85	39,82	4120,7486
Tatal Karet	10,14	17,84	42,09	29,93	3154,9686

Rendemen Produk Co-Pirolisis

Rendemen produk *bio-oil* dan *biochar* hasil co-pirolisis dengan variasi rasio komposisi batubara dan tatal kayu karet dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 3. Rendemen Produk *Bio-Oil* dan *Biochar*

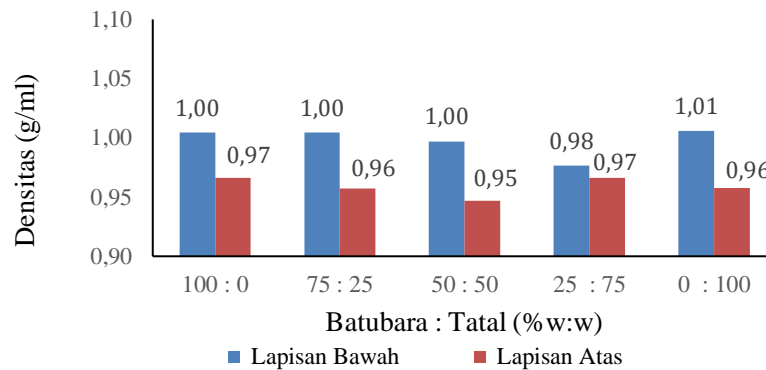
Pada Gambar 3 menunjukkan rendemen *biochar* lebih tinggi dari pada *bio-oil* karena proses co-pirolisis dilakukan pada temperatur rendah, yaitu 350°C. Pada temperatur ini terklasifikasi ke jenis pirolisis lambat. Pirolisis lambat dapat menghasilkan *char* berkualitas baik dengan rendemen berkisar antara 30-40% (Islami, 2022). Pada temperatur rendah, proses co-pirolisis cenderung menghasilkan lebih banyak *char*. Rendemen *biochar* tertinggi didapatkan pada variasi komposisi 100% batubara : 0% total kayu karet, yaitu sebesar 67,87%. Sedangkan rendemen *biochar* paling rendah didapatkan pada variasi komposisi 0% batubara : 100% total kayu karet, yaitu sebesar 28,80%. Hal ini menunjukkan bahwa rendemen *biochar* semakin menurun seiring dengan bertambahnya rasio komposisi biomassa. Batubara memiliki ikatan rantai kimia yang kompleks dan kandungan karbon yang tinggi sehingga batubara lebih sulit terdekomposisi dan menghasilkan lebih banyak arang. Kandungan selulosa dan hemiselulosa pada biomassa juga mempengaruhi rendemen produk co-pirolisis. *Hemiselulosa* dan *selulosa* lebih cepat terdekomposisi menjadi uap dan abu sehingga perolehan arang lebih sedikit (Rosyadi dkk., 2018).

Sedangkan rendemen *bio-oil* tertinggi diperoleh pada variasi komposisi 50% batubara : 50% total kayu karet, yaitu sebesar 14,78%. Rendemen *bio-oil* terendah diperoleh pada variasi komposisi 100% batubara : 0% total kayu karet, yaitu sebesar 8,99%. Hal ini menunjukkan bahwa *bio-oil* paling optimal dihasilkan pada rasio campuran 1:1 untuk batubara dan biomassa. Batubara lebih sulit dalam menghasilkan *bio-oil* selama proses pirolisis karena memiliki struktur kimia yang lebih kompleks sehingga membutuhkan temperatur co-pirolisis yang lebih tinggi untuk bisa menghasilkan *yield bio-oil* yang lebih banyak. Laju pemanasan yang tinggi akan mempercepat dekomposisi senyawa biomassa sehingga lebih banyak menghasilkan gas dan *bio-oil* (Hadi, 2021). Hasil yang didapatkan sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Lestari dkk., 2023), pada pirolisis berbahan baku biji karet, diperoleh *yield* produk *bio-oil* meningkat seiring meningkatnya rasio biomassa.

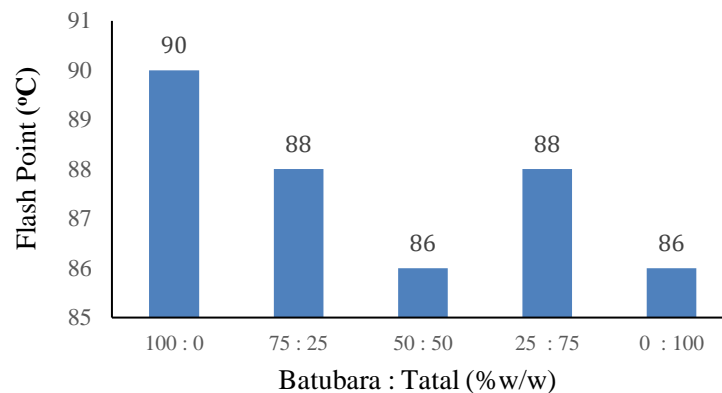
Karakteristik *Bio-oil*

Karakteristik *bio-oil* dianalisis berdasarkan uji densitas dan *flash point*. *Bio-oil* yang merupakan gas terkondensasi hasil pirolisis membentuk dua lapisan, dimana lapisan atas berwarna cokelat pekat dan lapisan bawah berwarna cokelat jernih. Kedua lapisan memiliki densitas yang berbeda. Hasil uji densitas *bio-oil* dapat dilihat pada Gambar 3. Berdasarkan gambar 3 menunjukkan nilai densitas lapisan bawah berkisar 0,9764 – 1,0059 g/ml dan lapisan atas berkisar 0,9469 – 0,9660 g/ml. Dari nilai densitas lapisan bawah menunjukkan kecenderungan bahwa terkandung senyawa H₂O (air) dengan nilai densitas mendekati 1 g/ml. Sedangkan lapisan atas diidentifikasi mengandung senyawa hidrokarbon berat yang dapat berpotensi menjadi bahan bakar apabila dilakukan proses distilasi fraksinasi lebih lanjut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin banyak komposisi batubara maka densitas *bio-oil* semakin meningkat. Densitas tertinggi diperoleh pada rasio komposisi 100% batubara. Banyaknya jumlah komposisi total kayu karet mengakibatkan penurunan densitas *bio-oil*. Pirolisis batubara menghasilkan *bio-oil* dengan molekul yang lebih kompleks karena terusun dari karbon dan senyawa

aromatik berat. Sedangkan pirolisis biomassa tatal kayu karet cenderung menghasilkan volatil dan senyawa ringan yang menurunkan densitas *bio-oil* (Fardhyanti, 2017). Nilai densitas *bio-oil* pada lapisan bawah yang diperoleh berada dalam standar spesifikasi *bio-oil* yaitu pada rentang 0,94 – 1,042 g/ml (Yu,2009).



Gambar 4. Densitas *Bio-oil*



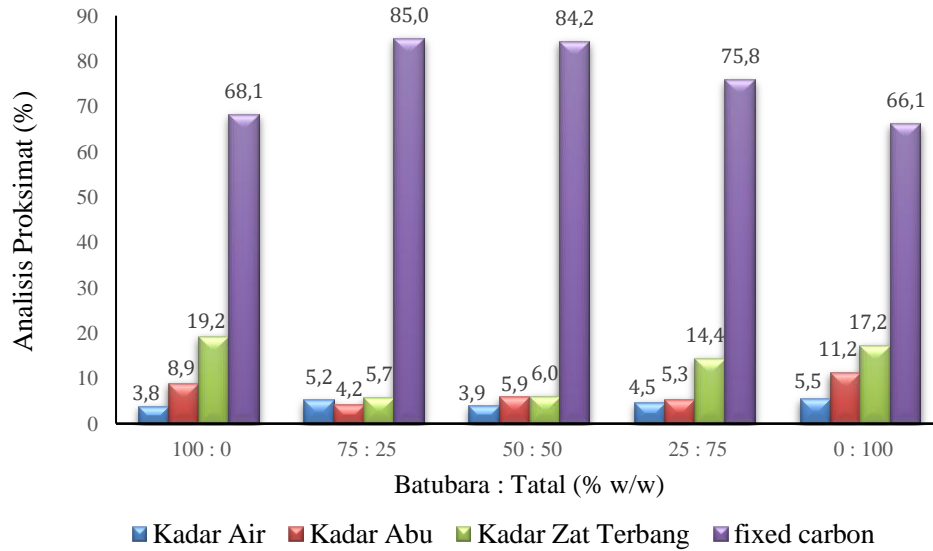
Gambar 5. *Flash Point Bio-Oil*

Hasil uji titik nyala dapat dilihat pada Gambar 5. Pengujian *flash point* atau titik nyala dilakukan untuk mengetahui temperatur suatu zat dapat menyala atau meledak sementara ketika ada api. Nilai titik nyala juga dapat dijadikan parameter dalam menentukan jenis senyawa suatu zat. Uji titik nyala dilakukan pada *bio-oil* lapisan atas karena mendekati spesifikasi *bio-oil*. Berdasarkan hasil titik nyala produk *bio-oil* dapat dilihat bahwa titik nyala paling rendah diperoleh pada komposisi 50% batubara : 50% tatal kayu karet, yaitu sebesar 86°C. Titik nyala tertinggi diperoleh pada rasio komposisi 100% batubara, yaitu sebesar 90°C. Nilai titik nyala produk *bio-oil* yang diperoleh sesuai dengan standar titik nyala *bio-oil*, yaitu pada suhu 48-100°C (Yu, 2009). Dapat dilihat dari hasil titik nyala *bio-oil* mendekati standar bahan bakar diesel yaitu titik nyala minimal 60°C (Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2017).

Karakteristik *Biochar*

Produk arang atau *biochar* hasil proses co-pirolisis batubara dan tatal kayu karet dapat berpotensi menjadi bahan bakar padat tinggi kalori dan ramah lingkungan karena sudah mengalami devolatilisasi selama proses pirolisis. Dilakukan analisa proksimat dan nilai kalor pada *biochar* untuk mengetahui karakteristiknya yang mengacu pada standar SNI. Selain itu, dianalisis pengaruh rasio komposisi batubara dan biomassa tatal kayu karet terhadap karakteristik *biochar* yang diperoleh. Dalam

analisis ini juga dapat dilihat peningkatan nilai kalor dari bahan baku selama proses co-pirolisis. Hasil analisa proksimat dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 6. Analisis Proksimat *Biochar*

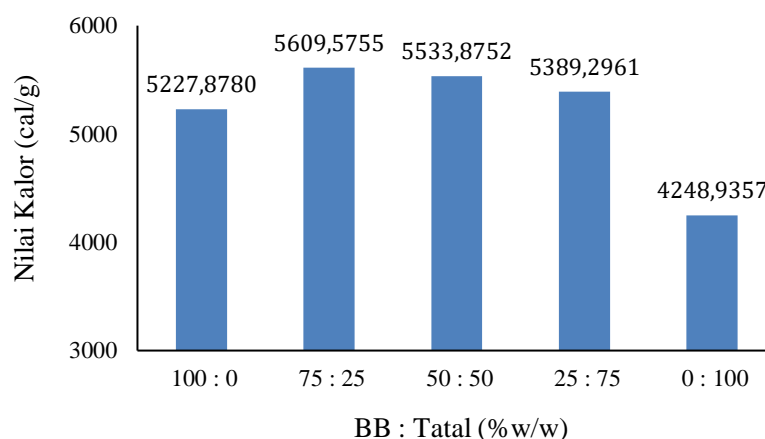
Berdasarkan gambar 6, nilai kadar air mengalami penurunan setelah dipirolisis. Kadar air produk *biochar* berkisar 3,81- 5,45%. Penurunan kadar air terjadi karena selama proses pirolisis mengalami tahap dehidrasi sehingga kandungan air teruapkan (Ridhuan & Irawan, 2020). *Biochar* pada rasio 100% tatal kayu karet menghasilkan kadar air paling tinggi dan rasio 100% batubara menghasilkan *biochar* dengan kadar air paling rendah. Kadar air pada *biochar* fluktuatif pada setiap variasi rasio komposisi bahan baku. Hasil kadar air tidak stabil dipengaruhi oleh *pretreatment* bahan baku yang memungkinkan adanya perbedaan kadar air pada bahan baku di setiap prosesnya. Selain itu, *biochar* yang bersifat higroskopis dapat emenyerap air di ketika berada di udara terbuka. Kadar air dari semua sampel variasi percobaan sesuai dengan standar baku mutu arang SNI 06-3730:1995 yaitu minimal sebesar 10%.

Kadar abu *biochar* tertinggi sebesar 11,22% yang diperoleh pada variasi rasio 100% tatal kayu karet dan pada rasio batubara 75% : tatal kayu karet 25% menghasilkan *biochar* dengan kadar abu terendah, yaitu 4,2% . *Biochar* yang dihasilkan dari pirolisis biomassa memiliki kadar abu yang lebih tinggi karena biomassa mengandung abu (logam alkali tanah) yang cukup tinggi (Li dkk., 2020). Kadar abu yang dihasilkan pada semua sampel sesuai dengan standar mutu arang SNI 06-3730:1995, yaitu kadar abu maksimal sebesar 15%.

Biochar dengan kadar zat terbang paling tinggi diperoleh pada rasio batubara 100% sebesar 19%. Sedangkan pada rasio komposisi 50% : 50% diperoleh *biochar* dengan zat terbang paling rendah sebesar 5,68%. Penurunan kadar zat terbang dapat terjadi selama proses co-pirolisis, dimana campuran batubara dan tatal kayu karet dipanaskan hingga mengalami devolatilisasi seiring dengan meningkatnya suhu. Selain itu, selama proses co-pirolisis terjadi interaksi antara hidrogen bebas yang terkandung pada biomassa dengan senyawa aromatik pada batubara yang kemudian mengalami dekomposisi menjadi produk gas (Li dkk., 2020). Biomassa cenderung menghasilkan produk *biochar* yang lebih rendah zat terbang karena memiliki kandungan selulosa lebih banyak daripada batubara yang memiliki struktur kimia lebih kompleks yang menyebabkan laju pemanasan lebih tinggi dan devolatilisasi biomassa lebih intensif (Asfar dkk., 2021). Kadar zat terbang *biochar* pada semua sampel sesuai dengan standar mutu arang SNI 06-3730:1995, yaitu zat terbang maksimal sebesar 25%.

Berdasarkan Gambar 5 menunjukkan nilai *fixed carbon biochar* paling tinggi yaitu sebesar 84,98% yang diperoleh pada rasio komposisi batubara : tatal kayu karet (75% : 25%). Sedangkan *fixed carbon* terendah sebesar 66,14% pada rasio komposisi 100% tatal kayu karet. Semakin tinggi nilai *fixed carbon* menunjukkan semakin baik kualitas *biochar*. Perolehan nilai *fixed carbon* pada produk *biochar* dipengaruhi dari akumulasi besarnya kadar abu, kadar zat terbang dan kadar abu yang berbanding terbalik dengan *fixed carbon*. Berdasarkan standar mutu arang SNI 06-3730:1995, nilai *fixed carbon* telah sesuai standar yaitu minimal 65%.

Kualitas *biochar* juga dilihat berdasarkan nilai kalor. Semakin tinggi nilai kalornya maka mengidentifikasi semakin baik kualitasnya karena *char* lebih efisien dalam menghasilkan energi. Nilai kalor *biochar* berdasarkan variasi komposisi bahan baku dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 7. Nilai Kalor *Biochar*

Berdasarkan Gambar 7, nilai kalor *biochar* tertinggi yaitu sebesar 5609,5755 kal/g yang diperoleh pada rasio komposisi 75% batubara : 25% tatal kayu karet. Sedangkan nilai kalor terendah sebesar 4248,9357 kal/g pada rasio komposisi 100% tatal kayu karet. Batubara dan tatal kayu karet mengalami peningkatan nilai kalor setelah proses co-pirolisis menjadi produk *biochar*. Proses co-pirolisis yang mencampurkan batubara dan tatal kayu karet mampu meningkatkan nilai kalor. Peningkatan nilai kalor dapat terjadi karena biomassa mengalami devolatilisasi yang kemudian mengalami pengkarbonan sehingga menghasilkan *biochar* rendah *volatile* dan kaya karbon (Li dkk., 2020). Perolehan nilai kalor *biochar* mendekati standar mutu arang SNI 1683: 2021, yaitu 6000-6500 kal/g.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian co-pirolisis tatal kayu karet dan batubara diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Rendemen *bio-oil* tertinggi diperoleh pada rasio komposisi batubara : tatal kayu karet (50 : 50), yaitu sebesar 14,78%. Sementara itu, rendemen *biochar* paling tinggi dicapai pada rasio komposisi 100% batubara, dengan nilai sebesar 67,87%.
2. Karakteristik *bio-oil* yang paling optimal diperoleh pada rasio komposisi batubara : tatal kayu karet (75:25), dengan densitas sebesar 0,9660 g/ml dan titik nyala 88°C, yang sesuai dengan standar bahan bakar diesel dan bio-oil.
3. Karakteristik *biochar* yang paling optimal yaitu pada rasio komposisi batubara : tatal kayu karet (75:25), dengan kadar air, zat terbang, abu, dan karbon tetap masing-masing sebesar 5,17%, 5,68%, 4,17%, dan 84,98%. Nilai kalor yang dihasilkan pada variasi ini yaitu sebesar 5609,5755 kal/g.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, M. R., et al. (2022). Physical Properties of Hydrothermally Treated Rubberwood. *Forests*, 13(7), 1–14. <https://doi.org/10.3390/f13071052>.
- Ambarnita, A.F., Syarif, A., & Febriana, I. (2023). Karakteristik Syngas Co-Pirolisis Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit dikaji dari Pengaruh Temperatur. Palembang: Tugas Akhir Politeknik Negeri Sriwijaya.
- Arini, W., & Lovisia, E. (2020). Pengembangan Alat Pirolisis Sampah Plastik Sebagai Media Belajar Berbasis Lingkungan Pada Materi Suhu Dan Kalor Di Smp Kabupaten Musi Rawas. *Jurnal Perspektif Pendidikan*, 14(1), 22–35. <https://doi.org/10.31540/jpp.v14i1.909>.
- Asfar, A.M.I.A., Asfar, A.M.I.T., Ridwan, Damayanti, J.D., Mukhsen, M.I. (2021). *Transformasi Sekam Padi (Pirolisis)*. Sukabumi: CV Jejak, anggota IKAPI.
- Asmunandar, A., Goembira, F., Raharjo, S., & Yuliarningsih, R. (2023). Evaluasi pengaruh suhu dan waktu pirolisis biochar bambu betung (*Dendrocalamus asper*). *Jurnal Serambi Engineering*, 8(1), 4760–4771.
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Luas Tanaman Perkebunan Menurut Provinsi (Ribuan Hektar)*. <https://www.bps.go.id/id/statistics=/luas-tanaman-perkebunan-menurut-provinsi.html>. Diakses pada 2 Februari 2024, jam 14.00.
- Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi. (2017). SK Dirjen Migas No. 0486.K/10/DJM.S/2017 tanggal 23 November 2017 tentang Standar dan Mutu (Spesifikasi) Bahan Bakar Minyak Jenis Bensin 90 yang Dipasarkan di Dalam Negeri.
- Fardhyanti, D.S., Astrilia, D., dan Amalia, L. (2017). Karakteristik Bio-oil dari Hasil Pirolisis terhadap Biomassa. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan" Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia, ISSN 1693- 4393.
- Hadi, Z. (2021). Pirolis biomassa dan hasil. *Program Studi Teknologi Hasil Pertanian Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Andalas, January*.
- Hendrik, H., Yani, S., & Yani, S. (2024). Co-Firing Limbah Biomassa dan Charcoal Cocopeat dengan Batubara Pada Industri Ferro Nikel. *INNOVATIVE: Journal Of Science Research*, 4(6), 5629-5643. <https://doi.org/10.31004/innovative.v4i6.17147>
- Husna, L. Al, & Syarif, A. (2023). Analisis Komposisi Syngas Co-Pirolisis Batubara dan Tandan Kosong Kelapa Sawit Berdasarkan Variasi Komposisi Bahan Baku. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7, 21077–21081. <https://doi.org/10.31004/jptam.v7i3.9847>
- Islami, A.P. (2022). *Upgrading Bio-Crude Oil Hasil Pirolisis Minyak Kelapa Sawit Menjadi*

Biogasoline Menggunakan Zeolit-Y Terprotonasi Sebagai Katalis. Skripsi Universitas Lampung, 8.5.2017, 2003-2005.

- Jamilatun, S., Pitoyo, J., Puspitasari, A., & Sarah, D. (2022). Pirolisis Tandan Kelapa Sawit Untuk Menghasilkan Bahan Bakar Cair, Gas, Water Fase Dan Charcoal. Seminar Nasional Penelitian LPPM UMJ, 1–7. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnaslit/article/view/14250>.
- Jati, A. K. (2022). Produksi Bio-Oil dari Limbah Serabut dan Pelepah Sawit dengan Proses Pirolisis. Tugas Akhir. Lampung: Politeknik Negeri Lampung.
- Khasanah, U., Ladini, T., & Rusnadi, I. (2023). Pirolisis Biji Karet Sebagai Energi Alternatif Berdasarkan Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3), 21852-21860. <https://doi.org/10.31004/jptam.v7i3.9792>
- Lestari, A., Yerizam, M., & Hasan, A. (2023). Characterization of Rubber Seed (*Havea Brasiliensis*) as Raw Material for The Production of Biofuel. *Journal of Applied Agricultural Science and Technology*, 7(3), 217-224. <https://doi.org/10.55043/jaast.v7i3.140>
- Li, L., Liu, G. K., Li, Y., Zhu, Z., Xu, H., Chen, J., & Ren, X. (2020). Release of sulfur and nitrogen during co-pyrolysis of coal and biomass under inert atmosphere. *ACS Omega*, 5(46), 30001–30010.
- Novita, S. A., Santosa, Nofialdi, Andasuryani, Fudholi, A. (2021). Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa. *Agroteknika*, 4(1), 53–67. <https://doi.org/10.32530/agroteknika.v4i1.105>
- Nurfaritsya, S. A., Rusnadi, I., & Daniar, R. (2023). Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Proses Pirolisis Tatal Kayu Karet untuk Pembuatan Bio-Char, Bio-Oil dan Syngas sebagai Bahan Bakar. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3), 24569–24576. <https://doi.org/10.31004/jptam.v7i3.10495>
- Rathod, N., Jain, S., & Patel, M. R. (2023). Thermodynamic analysis of biochar produced from groundnut shell through slow pyrolysis. *Energy Nexus*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023>.
- Ridhuan, K., & Irawan, D. (2020). *Energi Terbarukan Pirolisis*. Lampung : CV. Laduny Alifatama.
- Rosyadi, I., Wahyudi, H., Satria, D., Yusvardi, Y., & ... (2018). Analisis Hasil Pyrolysis Pada Limbah Biomassa Tongkol Jagung Dengan Kayu Akasia. *Prosiding ...*, 229–234. <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/seniati/article/download/788/711>
- Setiawan, A., & Riskina, S. (2022). Teknologi Konversi Biomassa Secara Termokimia: Pirolisis. Banda Aceh: Syiah Kuala University Press.
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Yu, F., Steele, P., Gajjela, S. K., Hassan, E. B., dan Mitchell, B. (2009). Production of Hydrocarbons from Biomass Fast Pyrolysis and Hydrodeoxygenation, Departement of Forest Products, Mississippi University, US.

Zadeh, Z. E., Abdulkhani, A., Aboelazayem, O., & Saha, B. (2020). Recent insights into lignocellulosic biomass pyrolysis: A critical review on pretreatment, characterization, and products upgrading. *Processes*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/pr8070799>