

Pirolisis Campuran Biji Jarak Dan Biji Kapuk Dengan Katalis Zeolit Menjadi Syngas Dan Biochar

Syahputri Aprellia¹⁾, Irawan Rusnadi¹⁾, Ida Febriana^{1*)}

¹⁾Program Studi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang

*Corresponding email: ida.febriana@polsri.ac.id

Abstrak

Sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dapat berasal dari biji jarak dan biji kapuk, dimana nilai kalor masing-masing sebesar 8498 kal/gr dan 5758 kal/gr. Dalam hal ini, dilakukan penelitian dengan metode pirolisis yang bertujuan untuk menentukan pengaruh penggunaan jumlah katalis serta perbedaan rasio bahan baku biji jarak dan biji kapuk terhadap *syngas* untuk dilakukan perbandingan penelitian ini dengan penelitian sejenis dan *biochar* dengan mengacu pada standar mutu SNI 1683:2021. Metode yang digunakan dalam penelitian ini berupa metode eksperimental dari variabel bebas dan terikat yang tergolong kedalam data primer. Variabel bebas diantaranya variasi rasio biji jarak dan biji kapuk serta jumlah katalis zeolit, sedangkan variabel terikat yaitu massa bahan baku dan temperatur operasi. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari hasil penelusuran kepustakaan. Produk *syngas* yang diperoleh dianalisis komposisi *syngas* dengan *multi gas detector analyzer*, sedangkan pada produk *biochar* dilakukan analisis proksimat dan nilai kalor. Pada penelitian ini diketahui bahwa, perbedaan rasio bahan baku serta peningkatan jumlah katalis dari 3% menjadi 5% berpengaruh terhadap produk hasil pirolisis. Pada produk *biochar*, diperoleh nilai kalor tertinggi sebesar 6513,46 kal/gr di variasi komposisi 50% biji jarak, 50% biji kapuk, dan 5% katalis. Hasil tersebut telah memenuhi standar arang kayu SNI 1683:2021. Pada *syngas*, diperoleh persentase CH₄ tertinggi di variasi komposisi 75% biji jarak, 25% biji kapuk, dan 5% katalis yaitu 45%.

Kata Kunci: Biji Jarak, Biji Kapuk, Katalis Zeolit Alam, Pirolisis

PENDAHULUAN

Kebutuhan bahan bakar di masa mendatang semakin meningkat dengan berkembangnya industrialisasi dan bertambahnya populasi manusia. Energi fosil masih menjadi energi utama yang digunakan saat ini ketimbang energi baru terbarukan. Emisi gas rumah kaca, pencemaran udara, dan perubahan iklim global merupakan dampak buruk bagi lingkungan akibat penggunaan bahan bakar fosil (Balogh dan Mizik, 2023). Dengan adanya dampak buruk tersebut, maka perlu adanya transisi ke energi terbarukan yang ramah lingkungan agar ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dapat dikurangi misalnya dengan pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif (Adrian dkk., 2023). Biomassa seperti biji jarak dan biji kapuk merupakan sumber energi terbarukan yang baik, karena tidak berkontribusi terhadap efek rumah kaca (Kumar dan Strezov, 2021). *Biofuel* yang merupakan bahan bakar pembakaran dapat diperoleh dari biomassa biji jarak dan biji kapuk. Sebab biomassa tersebut memiliki nilai kalor yang cukup tinggi, namun biomassa tersebut belum termanfaatkan secara optimal. *Biofuel* dapat diaplikasikan ke turbin gas dan mesin diesel, bahan baku produksi resin dan produk memasak/farmasi, serta dapat digunakan untuk memproduksi bahan kimia seperti metanol, asam asetat, aseton, dan fenol (Tawalbeh dkk., 2021). Nilai kalor pada biji kapuk sebesar 5758 kal/gr (Suleman dan Paputungan, 2019). Sementara biji jarak memiliki nilai kalor yang lebih tinggi sebesar 8498 kal/gr dan memenuhi kriteria sebagai bahan bakar, yaitu titik nyala 290°C, densitas 0,0181 g/cm³, serta viskositas 50,80 cSt (Rabie, Mohammed dan Negm, 2020).

Berdasarkan penelitian terdahulu, metode yang digunakan untuk memanfaatkan biomassa biji jarak dan biji kapuk menjadi sumber energi diantaranya yaitu pirolisis dan transesterifikasi. Pada penelitian yang dilakukan oleh Satria (2017) digunakan bahan baku biji jarak dengan menggunakan prekursor zeolit berbasis silika sekam padi sebagai katalis dengan proses pirolisis. Prekursor zeolit dibuat dari sol silika dan logam aluminium menggunakan metode elektrokimia dengan variasi potensial: 8, 10, dan 12 volt, serta variasi waktu: 1, 2, dan 3 jam, lalu dikalsinasi pada suhu 600°C. *Liquid fuel* yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengetahui kandungan hidrokarbon. Hasil menunjukkan bahwa semakin tinggi nisbah Si/Al rendemen *liquid fuel* yang diperoleh semakin besar. Rendemen tertinggi diperoleh di katalis Pre-ZeO_{12:1} yaitu 63,62%. Sementara itu, kandungan hidrokarbon tertinggi diperoleh menggunakan katalis Pre-ZeO_{8:1} yang dikalsinasi pada suhu 800°C dengan kandungan hidrokarbon sebesar 85,97%. Berdasarkan penelitian terdahulu mengenai konversi penggunaan biji kapuk menjadi sumber energi sebagian besar menggunakan metode transesterifikasi dan esterifikasi, sedangkan metode pirolisis belum dilakukan. Penelitian terdahulu mengenai biji kapuk dilakukan oleh Mirzayanti (2022) dengan menggunakan metode transesterifikasi dan digunakan CaO/HTC sebagai katalis. Minyak biji kapuk ditransesterifikasi selama 2 jam di temperatur 65°C. Rasio molar minyak dan metanol yang digunakan dalam penelitian tersebut yaitu 1:5, 1:10, 1:15, 1:20, dan 1:25 (%w). Komposisi katalis yang digunakan yaitu 3,0977 gr CaO dan 30,9023 gr HTC. Katalis kemudian dipreparasi menggunakan metode *incipient wetness impregnation* (IWI). Hasil menunjukkan bahwa seiring dengan adanya penambahan massa katalis dan rasio molar minyak : metanol akan mengakibatkan meningkatnya jumlah *yield* biodiesel. Berdasarkan variasi tersebut diperoleh *yield* tertinggi sebesar 66% pada massa katalis 1,5% w/w dan massa ratio minyak : metanol adalah 1:15. Selain metode tersebut, metode yang dapat digunakan untuk mengolah biji jarak dan biji kapuk menjadi produk bahan bakar yaitu biokimia, konversi agrokimia, termokimia, dan fisik. Pendekatan termokimia merupakan teknik yang efisien dan ekonomis untuk produksi *biofuel* yang hemat energi seperti *biochar* dan *syngas* (I dkk., 2012).

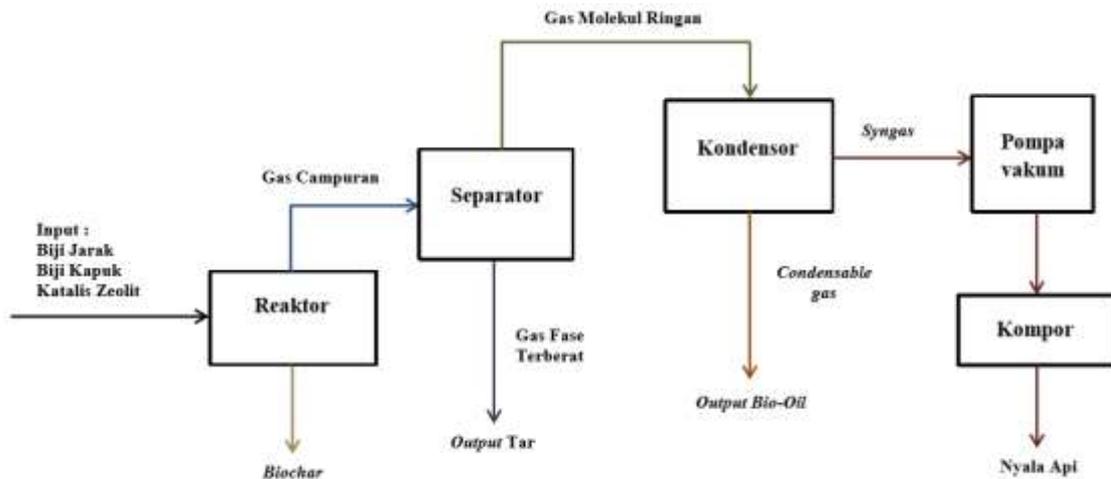
Konversi biomassa berbasis termokimia terdiri dari beberapa metode, seperti pembakaran, gasifikasi, dan pirolisis (Liu dkk., 2021). Pembakaran adalah metode konversi biomassa yang paling sederhana, tetapi tidak ramah lingkungan, terutama karena emisi karbon dan bahan bakar serta kesulitan teknis seperti penanganan abu (Pavel dkk., 2023). Sementara gasifikasi merupakan metode konversi bioenergi yang lebih efisien dibandingkan dengan pembakaran. Namun, penerapannya terbatas karena memerlukan investasi modal yang tinggi dan menyebabkan produksi gas harus segera digunakan untuk meminimalkan biaya penyimpanan dan transportasi (Sajjad dkk., 2021). Pirolisis adalah teknik efektif untuk konversi biomassa dan bahan limbah berbasis termokimia menjadi produk energi seperti *biochar* dan *syngas* (Muzyka dkk., 2023). Diantara banyak jenis proses termokimia, pirolisis memiliki beberapa keunggulan, yaitu menggunakan teknologi yang relatif sederhana, tidak menghasilkan limbah selama proses berlangsung, sehingga lebih ramah lingkungan (Bansal dkk., 2016). Proses pirolisis untuk menghasilkan *biochar* bisa menjadi metode untuk mengurangi emisi karbon. Sebagai bahan bakar, *biochar* dapat menggantikan bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon lebih tinggi. Penggunaan *biochar* dalam pertanian dapat meningkatkan kesuburan tanah, menyimpan nutrisi, dan meningkatkan retensi air (Herrera dkk., 2022). Produk pirolisis *syngas* adalah bahan bakar yang ramah lingkungan dan dapat menghasilkan listrik melalui penggunaan turbin gas, sehingga *syngas* di masa depan dapat menjadi sumber energi utama (Iswanto dkk., 2021).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Wang dkk (2022) pirolisis dengan katalis salah satunya zeolit secara signifikan meningkatkan jumlah hidrokarbon aromatik dan nilai kalor. Sehingga penggunaan katalis pada proses pirolisis sangat penting agar produk hasil pirolisis yang dihasilkan berkualitas (Gift dkk., 2022). Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, belum ada penelitian mengenai pirolisis dari campuran biji jarak dan biji kapuk menggunakan katalis zeolit. Oleh karena itu,

peneliti ingin mengkaji pirolisis campuran biji jarak dan biji kapuk dengan katalis zeolit menjadi *biochar* dan *syngas* yang bermutu sesuai dengan acuan standar SNI 1683:2021 sebagai sumber energi alternatif.

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini berupa metode eksperimental dari variabel bebas dan terikat yang tergolong kedalam data primer. Variabel bebas diantaranya variasi rasio biji jarak dan biji kapuk serta jumlah katalis zeolit, sedangkan variabel terikat yaitu massa bahan baku 1,5 kg dan temperatur operasi 350°C. Sementara itu, data sekunder diperoleh dari hasil penelusuran kepustakaan berupa referensi hasil penelitian sebelumnya. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia dan Teknik Energi Politeknik Negeri Sriwijaya yang terdiri dari beberapa langkah. Langkah pertama yaitu preparasi biji jarak dan biji kapuk dengan pengeringan di bawah sinar matahari dan dilanjutkan dengan analisa proksimat bahan baku. Karakteristik katalis yang digunakan yaitu zeolit alam *active* berbentuk granul dengan ukuran 2-5 mm yang bisa langsung digunakan karena sudah diaktivasi dan tidak memerlukan tahap preparasi. Selanjutnya dilakukan proses pirolisis dengan variasi rasio bahan baku biji jarak dan biji kapuk (100:0, 75:25; 50:50, 25:75, 0:100) serta jumlah katalis (3% dan % katalis). Kondisi operasi di reaktor yaitu temperatur 350°C, tekanan 15-20 kPa dan waktu tinggal ± 1 jam; kondensor 15 – 20°C ; dan separator 200 - 300°C. Tahap terakhir yaitu analisa produk pirolisis diantaranya analisa proksimat dan nilai kalor untuk produk *biochar*, sedangkan untuk produk *syngas* dianalisis komposisi *syngas* dengan *multi gas detector analyzer*. Berikut blok diagram proses pirolisis yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Proses Pirolisis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Proksimat Bahan Baku Biji Jarak dan Biji Kapuk

Tabel 2. Hasil Analisis Proksimat Bahan Baku

Bahan Baku	Metode Uji	Analisa Proksimat			
		Kadar Air (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Zat Terbang (%)	Kadar Karbon Terikat (%)
Biji Jarak	SNI	9,94%	4,40%	37,72%	47,93%
Biji Kapuk	1683:2021	3,62%	4,46%	39,86%	52,06%

a) Kadar Air

Setelah dilakukan analisa, diperoleh kadar air pada biji jarak dan biji kapuk masing-masing sebesar 9,94% dan 3,62%. Persentase kadar air yang ideal untuk pirolisis yaitu kurang dari 10% (Eke, Onwudili dan Bridgwater, 2020). Sehingga biji jarak dan biji kapuk sudah memenuhi kriteria karena sebelumnya telah dilakukan tahap *pre-treatment* berupa pengeringan bahan baku. Pada biji jarak, kadar airnya cukup tinggi karena pada saat pengiriman dan penyimpanan kurang baik sehingga biji jarak yang diterima dalam keadaan lembab yang berakibat pada tingginya kadar air pada biji jarak. Kadar air sangat penting dalam proses pirolisis karena air dapat menghambat reaksi kimia (Rosyadi dkk., 2021). Senyawa kimia dapat terikat oleh air sehingga mengurangi kualitas produk dan nilai kalor yang dihasilkan (Lestari dkk., 2020). Untuk memperoleh nilai kalor yang tinggi pada *biochar*, maka kadar air dalam bahan harus seminimal mungkin (Ridhuan dan Suranto, 2019).

b) Kadar Abu

Kadar abu merupakan sisa-sisa bahan dalam biomassa yang tidak dapat terbakar dalam proses pembakaran misalnya silika. Silika merupakan suatu penyusun abu yang berpengaruh buruk terhadap nilai kalor (Ridhuan dan Suranto, 2019). Kadar abu yang sesuai untuk proses pirolisis yaitu berkisar antara 2% -10%, dimana pada kadar tersebut retensi karbon meningkat hingga 35%, yang berdampak pada stabilitas *biochar* (Hagemann dkk., 2023). Sementara itu, kadar abu yang terlalu tinggi dapat menghambat proses pembakaran sehingga mengurangi efisiensi dari pembakaran itu sendiri (Sa`diyah dan Juliastuti, 2017; Pratiwi, 2015). Berdasarkan hasil analisis, diperoleh kadar abu pada biji jarak dan biji kapuk masing-masing sebesar 4,40% dan 4,46%. Sehingga kedua biomassa tersebut sudah memenuhi syarat sebagai bahan baku pirolisis.

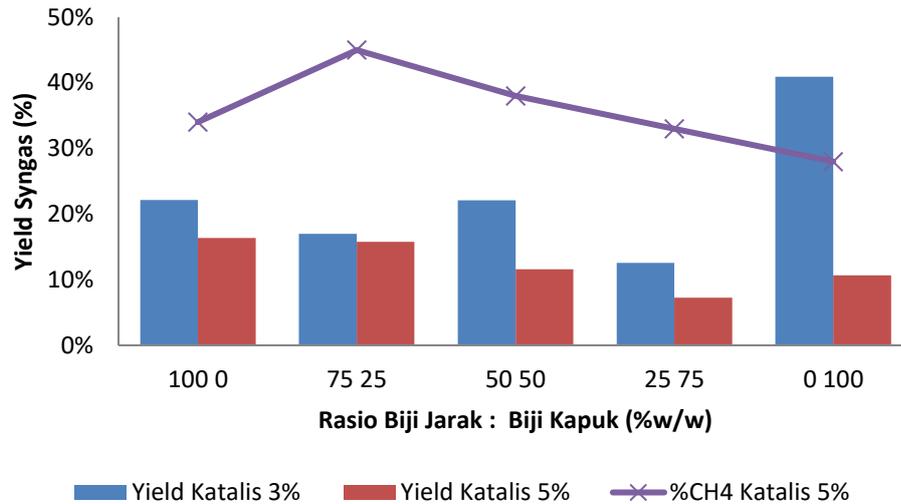
c) Kadar Zat Terbang

Kadar zat terbang adalah komponen yang mudah menguap ketika biomassa dipanaskan yang kemudian menghasilkan uap air. Untuk proses pirolisis biomassa, kadar zat terbang yang sesuai yaitu berkisar 21% sesuai dengan studi tentang produksi *biochar* dari biomassa yang dilakukan oleh B. dkk (2022). Sementara pada penelitian Shariff dkk (2016) dari bahan baku biomassa tongkol jagung dengan kadar zat terbang 87,76% cocok untuk proses pirolisis karena persentase bahan volatilnya yang tinggi efektif untuk proses pirolisis lambat. Sehingga kadar zat terbang biji jarak dan biji kapuk masing-masing sebesar 37,72% dan 39,86% dapat dikatakan cocok untuk proses pirolisis. Karena masih berkisar antara 21% - 87,76%.

d) Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat yaitu persentase berat karbon yang terkandung dalam suatu bahan baik yang terikat dalam molekul organik seperti lemak, karbohidrat, dan protein maupun molekul non-organik misalnya air dan mineral. Kadar karbon terikat yang sesuai untuk pirolisis dengan bahan baku biomassa yaitu dalam kisaran 40% - 80% (Karlina dkk., 2022). Berdasarkan hasil analisis, diperoleh kadar karbon terikat biji jarak dan biji kapuk masing-masing sebesar 47,93% dan 52,06%.

Pengaruh Variasi Rasio Biji Jarak dan Biji Kapuk serta Jumlah Katalis Terhadap Produk Syngas



Gambar 2. Grafik Pengaruh Variasi Rasio Biji Jarak dan Biji Kapuk serta Jumlah Katalis Terhadap *Yield Syngas* dan %CH₄

a. *Yield Syngas*

Pada produk *syngas*, jumlah katalis dan variasi rasio biji jarak dan biji kapuk dapat mempengaruhi hasil *yield syngas*. *Syngas* terdiri dari gas metana, etilen, karbon dioksida, dan etana yang berasal dari *non-condensable gas* dan tergolong ke dalam gas dengan berat molekul rendah. Pada gambar 2, terlihat bahwa *yield syngas* tertinggi terdapat pada rasio bahan baku 100% biji kapuk dan 3% katalis zeolit. Hal tersebut dapat terjadi karena pengaruh kadar zat terbang dan jumlah katalis zeolit (Harlivia dkk, 2022). Kadar zat terbang merupakan komponen organik dari biomassa yang mudah menguap sehingga semakin banyak zat terbang di dalam biomassa, semakin mudah biomassa tersebut untuk terdekomposisi menjadi gas seperti CO dan CH₄. Kadar zat terbang pada biji jarak dan biji kapuk masing-masing sebesar 37,72% dan 39,86%. Semakin tinggi kadar zat terbang, maka gas mampu bakar yang dihasilkanpun akan semakin meningkat (Huseini, Solihin dan Pramusanto, 2018).

Itu sebabnya, *yield syngas* tertinggi ada pada rasio 100% biji kapuk. Karena kadar zat terbang pada biji kapuk lebih besar daripada biji jarak. Sehingga dihasilkan *yield syngas* tertinggi pada rasio yang dominan biji kapuk ketimbang rasio yang lainnya. Namun, peningkatan jumlah katalis menjadi 5% berpengaruh dalam pengurangan reaksi perengkakan yang disebabkan oleh penurunan luas permukaan katalis dan tingkat keasaman zeolit. Secara umum, semakin rendah luas permukaan katalis, semakin sedikit aktivitas perengkakannya yang berakibat pada penurunan *yield syngas* dan peningkatan *biochar* (Miskolczi dan Eller, 2020).

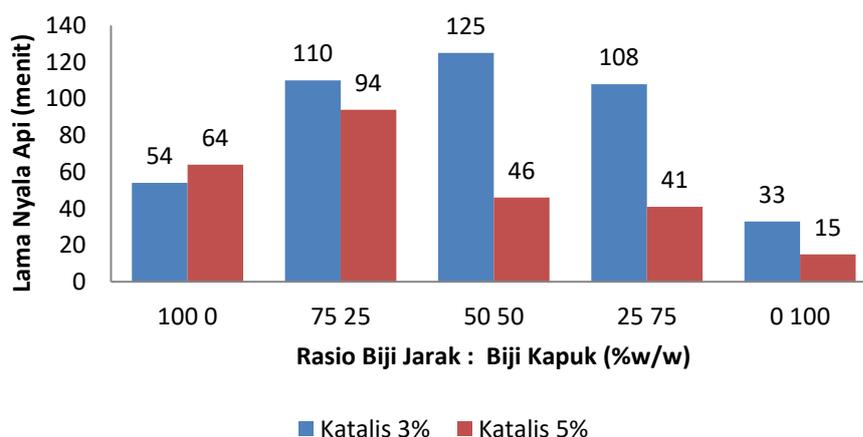
b. Persentase CH₄

Berdasarkan gambar 2, terlihat bahwa variasi rasio biji jarak dan biji kapuk menghasilkan gas CH₄ tertinggi sebesar 45% pada variasi rasio 75% biji jarak dan 25% biji kapuk. Namun, persentase CH₄ yang diperoleh cenderung fluktuatif, yang disebabkan oleh sampel *syngas* terkadang diukur sudah sedikit karena faktor penyimpanan *syngas* dalam *bag* yang tidak bisa langsung dianalisa. Akibatnya, *bag* tersebut mengandung gas dengan kandungan CH₄ yang cukup rendah. Selain itu, terdapatnya senyawa yang tidak diinginkan seperti CO, etana, dan N₂ yang tidak terbaca oleh *multi gas detector analyzer* menyebabkan komposisi CH₄ juga ikut menurun (Susanti, Rusnadi dan Manggala, 2023). Jenis bahan yang digunakan juga merupakan faktor yang paling berpengaruh dalam pembentukan CH₄ dalam *syngas* ini, terlepas dari kondisi operasinya seperti waktu dan suhu

operasi. Biji jarak dan biji kapuk memiliki komposisi yang berbeda, sehingga dihasilkan *syngas* dengan kandungan gas yang berbeda pula. Biji kapuk memiliki kandungan karbon dan *volatile matter* yang lebih tinggi. Biomassa dengan kadar karbon tinggi memungkinkan lebih banyak karbon yang tersedia untuk bereaksi dengan H_2 dan menghasilkan CH_4 (Husna dan Syarif, 2023). Kadar volatil tinggi memungkinkan zat-zat yang terkandung dalam biomassa tersebut mudah menguap menjadi CH_4 . Sedangkan, penguraian bagian hemiselulosa pada biomassa menghasilkan gas CO (Khasanah dkk., 2023). Kemudian CO akan bereaksi dengan H_2 membentuk CH_4 . Pada penelitian yang dilakukan oleh Aktawan dan Maryudi (2018) diketahui bahwa jika ingin menghasilkan lebih banyak *syngas*, maka jumlah biomassa yang digunakan harus semakin banyak agar jumlah selulosa yang terakumulasi menjadi lebih tinggi. Selain karena faktor kandungan dari biomassa, katalis zeolit juga berperan dalam peningkatan persentase CH_4 . Katalis zeolit mempercepat reaksi dekomposisi termal sehingga meningkatkan produksi CH_4 selama proses pirolisis (Wijayanti, 2021). Katalis zeolit dapat memisahkan molekul zat berdasarkan kepolaran dan ukurannya, yang membuat penggunaan katalis zeolit dapat meningkatkan rasio *combustible gas* atau gas mampu bakar seperti CH_4 karena pori-porinya yang besar dan permukaannya yang luas (Kumara dkk., 2015). Kandungan CH_4 pada *syngas* juga dipengaruhi oleh seberapa banyak katalis yang digunakan. Peningkatan jumlah katalis dari 3% menjadi 5% memungkinkan semakin banyak situs aktif yang tersedia dari katalis untuk bereaksi membentuk CH_4 (Khasanah dkk., 2023). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Narega dkk (2022) dengan bahan baku tempurung kelapa sawit, diketahui bahwa kondisi *syngas* yang paling optimum yaitu di menit ke-90 dengan kandungan CH_4 sebesar 15,53%. Dengan persentase CH_4 sebesar 15,53%, *syngas* tersebut dapat diaplikasikan pada motor bakar empat tak dengan stabilitas nyala *engine syngas* terbaik dibandingkan hasil lainnya. Maka dari itu, dengan persentase CH_4 yang lebih tinggi pada penelitian ini yaitu sebesar 45%, *syngas* dari campuran biji jarak dan biji kapuk ini juga dapat digunakan sebagai gas bakar untuk motor bakar empat tak karena nyala *syngas* lebih stabil dibandingkan dengan persentase CH_4 sebesar 15,53%.

c. Lama Nyala Api

Grafik pengaruh variasi rasio biji jarak dan biji kapuk terhadap lama nyala api dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Variasi Rasio Biji Jarak dan Biji Kapuk serta Jumlah Katalis Terhadap Lama Nyala Api

Berdasarkan gambar 3, terlihat bahwa lama nyala api yang paling lama terdapat pada variasi bahan baku 50% biji jarak dan 50% biji kapuk di 3% katalis zeolit yaitu 125 menit. Sementara itu, di variasi komposisi 75% biji jarak, 25% biji kapuk, dan 5% katalis dihasilkan persentase CH_4 tertinggi yaitu 45%.

namun lama nyala api di variasi tersebut lebih cepat dibandingkan dengan variasi komposisi 50% biji jarak, 50% biji kapuk, dan 3% katalis yang persentase CH₄- nya lebih rendah yaitu 30% nyala apinya ternyata lebih lama. Warna api saat pertama kali muncul di variasi komposisi 50% biji jarak, 50% biji kapuk, dan 3% katalis yaitu merah yang disertai asap. Asap tersebut disebabkan oleh kadar air pada biji jarak yang masih cukup tinggi sebesar 9,94% sehingga pembakaran tersebut tergolong pembakaran tidak sempurna dan banyak mengandung CO. Sehingga kadar CH₄ yang dihasilkan tidak setinggi variasi komposisi 75% biji jarak, 25% biji kapuk, dan 5% katalis. Sementara itu, di variasi komposisi 75% biji jarak, 25% biji kapuk, dan 5% katalis warna api stabilnya yaitu biru yang menandakan bahwa pembakaran tersebut banyak mengandung gas CH₄ dan tergolong pembakaran sempurna. Namun, lama nyala apinya lebih cepat padam yaitu 94 menit ketimbang variasi bahan baku 50% biji jarak dan 50% biji kapuk di 3% katalis zeolit lama nyala apinya yaitu 125 menit. Hal tersebut terjadi karena pengaruh dari katalis zeolit dan kandungan selulosa dari biomassa (Wahyuni dan Ningsih, 2016). Dimana masing-masing selulosa antara biji jarak dan biji kapuk yaitu 20,3% dan 21,83% (Wahyuningsih, 2015). Ketika kedua biomassa tersebut bergabung, maka terdapat akumulasi selulosa yang lebih tinggi dan diubah menjadi gas mampu bakar (CO, H₂, CH₄) sehingga nyala apinya lebih lama di variasi komposisi 50% biji jarak dan 50% biji kapuk. Hasil ini lebih baik, jika dibandingkan dengan hanya salah satu rasio biomassa saja yang dominan.

Baik pada katalis 3% maupun 5%, lama nyala api maksimal bergantung pada banyaknya rasio biji jarak. Dimana pada katalis 3%, lama nyala api maksimal yaitu di rasio 50% biji jarak dan 50% biji kapuk selama 125 menit. Sedangkan, pada katalis 5% lama nyala api maksimal yaitu di rasio 75% biji jarak dan 25% biji kapuk selama 94 menit. Hal ini berarti, katalis zeolit yang digunakan ikut berperan dalam lama atau tidaknya api tersebut menyala. Karena katalis zeolit dapat meningkatkan aktivitas katalitik yang dapat memungkinkan api untuk menyala lebih lama. Namun, penting untuk diperhatikan bahwa penggunaan katalis zeolit perlu mempertimbangkan seberapa banyak jumlah penggunaannya agar dihasilkan kualitas bahan bakar yang optimum dan mengurangi produksi asap (Dongoran dkk., 2021). Pada penelitian yang dilakukan oleh Narega dkk (2022) diketahui bahwa biomassa yang memiliki nilai kalor tinggi dan kadar *moisture* yang rendah dihasilkan lama nyala api yang lebih lama. Nilai kalor berpengaruh terhadap kualitas pembakaran biomassa sedangkan kadar air berpengaruh terhadap lama nyala api. Proses pembakaran dapat menjadi terhambat akibat tingginya kadar air, sehingga diharapkan kadar air serendah mungkin (Fachrizal dkk., 2008). Pada biji jarak dan biji kapuk nilai kalor masing-masing yaitu 8498 kal/gr dan 5758 kal/gr (Rabie dkk., 2020; Suleman dan Papatungan, 2019).

Pengaruh Variasi Rasio Biji Jarak dan Biji Kapuk serta Jumlah Katalis Terhadap Produk Biochar

Tabel 3. Hasil Analisis Proksimat dan Nilai Kalor Biochar serta Acuan Mutu

Parameter	Katalis						Standar Arang Kayu SNI 1683:2021
	3%			5%			
	1	2	3	1	2	3	
Kadar Air	3,75%	2,64%	4,17%	0,85%	4,28%	0,19%	≤10%
Kadar Zat Terbang	9,56%	14,76%	13,04%	17,48%	10,69%	15,42%	10 – 17%
Kadar Abu	10,71%	16,68%	13,27%	18,02%	13,29%	12,13%	≤4%
Kadar Karbon Terikat	75,98%	65,92%	69,53%	63,64%	71,74%	72,27%	≥79%
Nilai Kalor	4022 kal/gr	4579 kal/gr	5136 kal/gr	4201 kal/gr	6513 kal/gr	5378 kal/gr	6000 - 6500 kal/gr

Keterangan :

- Sampel 1: 100% biji jarak
- Sampel 2: 50% biji jarak 50% biji kapuk
- Sampel 3: 100% biji kapuk

a. Kadar Air

Kadar air *biochar* menunjukkan seberapa banyak air yang terkandung di dalam *biochar*. Jika kadar air dalam biomassa sedikit, maka dihasilkan *biochar* dengan kadar air yang rendah. Nilai kalor *biochar* dapat dipengaruhi oleh jumlah air yang ada di dalamnya. Kadar air dapat menurunkan nilai kalor *biochar*, yang menunjukkan bahwa *biochar* tersebut kurang efisien dalam menghasilkan panas. (Khaledi dkk., 2023). Pada biji kapuk, kadar airnya sebesar 3,62% sehingga dihasilkan *biochar* dengan kadar air 0,19% pada variasi komposisi 100% biji kapuk dan 5% zeolit. Sementara pada biji jarak, kadar airnya masih cukup tinggi yaitu 9,94% sehingga dihasilkan *biochar* dengan kadar air 3,75% pada variasi komposisi 100% jarak dan 3% zeolit. Sementara jika kedua biomassa tersebut digabungkan yaitu pada komposisi 50% biji jarak dan 50% biji kapuk dihasilkan *biochar* dengan kadar air 2,64% (katalis zeolit 3%) dan 4,28% (katalis zeolit 5%). Hal ini berarti penggunaan katalis zeolit berkontribusi pada kadar air yang ada pada *biochar*. Katalis zeolit mempunyai sifat dehidrasi yang baik sehingga kadar air di dalam biomassa berkurang dengan cara pelepasan molekul air dari dalam rongga di permukaan biomassa (Putra, 2017). Selain itu, katalis zeolit efektif dalam penurunan energi yang diperlukan untuk memulai reaksi atau yang biasa disebut energi aktivasi (Rasul dan Tangasari, 2024). Artinya semakin cepat reaksi itu terjadi, maka pelepasan gas yang ada pada biomassa akan semakin cepat. Gas yang terlepas misalnya CO₂, H₂, dan CH₄ yang berhubungan dengan degradasi komponen biomassa seperti selulosa dan lignin serta penguapan air (Khasanah dkk., 2023). Pada penelitian yang dilakukan oleh Wijayanti (2021) zeolit dapat berfungsi sebagai media perambat panas dimana pemerataan panas dari *band heater* menuju biomassa menjadi semakin merata karena kandungan alumina yang dimiliki oleh zeolit. Akibatnya semakin banyak biomassa yang terdekomposisi menjadi gas sehingga kadar air berkurang dan massa biomassa juga ikut berkurang. Namun, pada 5% katalis terdapat kenaikan kadar air pada *biochar*. Hal ini disebabkan oleh penggunaan jumlah katalis zeolit yang lebih tinggi, sehingga dapat mengganggu proses dekomposisi biomassa. Katalis yang lebih tinggi yaitu 5% dapat menyerap kembali molekul air yang dihasilkan dari dekomposisi biomassa, sehingga terjadi peningkatan kadar air di *biochar* dan akibatnya efisiensi dekomposisi berkurang (Yildiz dkk., 2012). Selain itu juga, di beberapa sampel *biochar* ditemukan peningkatan kadar air karena saat pendinginan *biochar* tidak tersisolasi dari lingkungan. Akibatnya, *biochar* menyerap humiditas yang ada di lingkungan. Kadar air pada *biochar* yang diperoleh sesuai dengan standar SNI 1683:2021 mengenai mutu arang kayu dimana persyaratan kadar airnya yaitu $\leq 10\%$.

b. Kadar Zat Terbang

Kadar zat terbang adalah ukuran seberapa banyak massa bahan yang dapat dilepaskan berupa komponen yang mudah menguap ketika *biochar* dipanaskan di dalam reaktor. Bahan volatil (komponen yang mudah menguap) diantaranya gas, air, dan senyawa organik lain. Kadar zat terbang akan mempercepat proses pembakaran dan menghasilkan energi pada saat terbakar (Herlambang dkk., 2020). Secara teori, *biochar* yang memiliki kadar zat terbang yang rendah memiliki sedikit komponen yang mudah menguap sehingga lebih efisien dan stabil dalam menghasilkan panas pada proses pembakaran (Hagemann dkk., 2023). Berdasarkan tabel 3, dapat dilihat bahwa kadar zat terbang berbeda di setiap variasi rasio biji jarak dan biji kapuk serta jumlah katalis. Hal tersebut bergantung pada keberadaan zat-zat yang mudah menguap pada biomassa. Kadar zat terbang pada

biji kapuk lebih besar dibandingkan biji jarak yaitu 39,86%. Sehingga di 3% katalis, pada biji kapuk dihasilkan pula kadar zat terbang yang lebih tinggi yaitu 13,04%. Sementara pada biji jarak, kadar zat terbang *biochar*-nya lebih rendah yaitu 9,56%, dikarenakan biomassa biji jarak zat volatilnya sebesar 37,72% lebih rendah daripada biji kapuk. Pada sampel 2 di 5% katalis terjadi penurunan kadar zat terbang. Penambahan jumlah katalis dapat mempengaruhi distribusi produk yang mudah menguap (volatil) selama proses pirolisis akibat luas permukaan pori-pori zeolit (Bani, 2023). Katalis zeolit memiliki sifat adsorpsi sehingga dihasilkan produk yang lebih ringan dan lebih mudah untuk menguap dengan cara mengikat dan mengubah molekul – molekul biomassa tersebut (Anggono dkk., 2020). Penggunaan katalis zeolit membuat pemerataan panas menuju biomassa akan semakin baik, sehingga dekomposisi biomassa menjadi lebih baik dan dihasilkan lebih banyak gas (Wijayanti, 2021). Berarti kadar zat volatil juga ikut berkurang seiring dengan berkurangnya massa biomassa. Namun di samping itu, faktor kadar zat terbang dari biomassa itu sendiri juga mempengaruhi kadar volatil *biochar* yang dihasilkan meskipun telah dibantu dengan katalis zeolit (Rahmi dkk., 2023). Saat biji jarak dan biji kapuk digabungkan, dihasilkan kadar zat terbang berkisar antara 10 - 14%. Penggabungan kedua biomassa tersebut memberikan pengaruh peningkatan kadar volatil di *biochar*, sebab zat-zat yang mudah menguap dari biomassa meningkat. Nilai kalor dan kadar zat terbang memiliki hubungan berbanding terbalik, jika nilai kalor pada *biochar* rendah yang ditandai dengan timbulnya asap saat pembakaran, maka kadar zat terbang yang terdapat dalam *biochar* tersebut tinggi (Khasanah dkk., 2023). Untuk mengurangi kadar volatil tersebut, diperlukan suhu pirolisis yang lebih tinggi berkisar 450°C. Sebab pada suhu tersebut selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam biomassa sudah terdekomposisi lebih baik menjadi *condensable gas* dan *non-condensable gas* sehingga kadar zat terbang di dalam *biochar* cenderung menurun (Rosyadi dkk., 2018; Mokodompit, 2012). Kadar zat terbang pada *biochar* yang diperoleh sesuai dengan standar SNI 1683:2021 mengenai mutu arang kayu dimana persyaratan kadar zat terbangnya yaitu 10 - 17%.

c. Kadar Abu

Kadar abu adalah sisa pembakaran yang mengandung silika dan termasuk kedalam bahan anorganik yang tidak dapat terbakar karena tidak adanya karbon. Persentase kadar abu bergantung pada biomassa yang digunakan di proses pirolisis serta variabel yang mempengaruhi dalam proses pirolisis seperti temperatur dan waktu tinggal. Dari tabel 3, diperoleh bahwa kadar abu melebihi standar SNI 1683:2021 untuk mutu arang kayu yang ditetapkan yaitu $\leq 4\%$. Tingginya kadar abu pada *biochar* disebabkan oleh pengotor yang ada di dalam biji kapuk dan biji jarak sehingga mineral-mineral dalam *biochar* yang dihasilkan cukup tinggi dan ketika dibakar banyak menyisakan abu sebagai sisa pembakaran (Chen, Gao dan Wu, 2022). Selain itu juga saat analisa kadar abu, katalis zeolit yang sudah dipakai tidak dipisahkan terlebih dahulu, hal ini juga mempengaruhi kadar abu yang dihasilkan. Karakteristik bahan baku berupa kandungan lignin yang tinggi pada biji kapuk (10,37%) dan biji jarak (24,61%) mempengaruhi proses pembakaran. Akibatnya, proses pembakaran menjadi tidak sempurna dan menghasilkan abu yang lebih tinggi (Wahyuni and Ningsih, 2016; Rasul dan Tanggasari, 2024).

Kadar abu yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor *biochar* dan akibatnya kadar karbon terikat juga ikut turun (Taraba dan Grundel, 2022). Kandungan abu dapat menyumbat pori-pori *biochar* sehingga luas permukaan *biochar* akan menurun dan nilai kalor juga akan ikut turun (Herlambang dkk., 2019). Untuk mengurangi kadar abu, maka variabel operasi berupa temperatur dan waktu tinggal pada proses pirolisis harus ditingkatkan. Semakin tinggi temperatur yang digunakan dalam proses pirolisis, maka kadar abu *biochar* akan semakin menurun (Hasibuan dan Pardede, 2023).

Selain karena faktor kadar abu pada biomassa dan variabel operasi, penambahan katalis sebanyak 5% menunjukkan bahwa nilai kadar abu cenderung mengalami penurunan dibandingkan dengan katalis 3%. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wijayanti (2021) penambahan katalis zeolit pada

proses pirolisis membuat perpindahan panas menjadi lebih efektif karena katalis zeolit membuat distribusi panas di dalam reaktor menjadi lebih merata. Sehingga mengurangi abu yang dihasilkan karena banyaknya energi panas yang tersedia untuk dekomposisi biomassa tersebut menjadi produk pirolisis. Katalis zeolit dapat menyerap molekul-molekul non-polar secara lebih efektif karena sifat kristalinitasnya (Pratiwi, 2015).

d. Kadar Karbon Terikat

Kadar karbon terikat yaitu ukuran seberapa banyak karbon yang ada di *biochar*. Berdasarkan tabel 3, dapat diketahui bahwa kadar *fixed carbon* pada *biochar* mengalami kenaikan dan penurunan. Kadar *fixed carbon* paling besar ada pada variasi komposisi 100% biji jarak dan 3% katalis yaitu sebesar 75,98%. Besarnya kadar karbon terikat biomassa mempengaruhi seberapa banyak kadar karbon terikat pada *biochar* yang dihasilkan. Katalis zeolit juga berpengaruh terhadap besarnya kadar karbon terikat. Peningkatan jumlah katalis zeolit dari 3% menjadi 5% memberikan hasil peningkatan kadar karbon terikat di *biochar* (Budianto dkk., 2016). Pada katalis 5%, kadar karbon terikat cenderung mengalami peningkatan dibandingkan dengan katalis 3%. Zeolit dapat mempercepat reaksi dekomposisi *selulosa*, *hemiselulosa*, dan *lignin* serta membuat distribusi panas antara *band heater* menuju biomassa menjadi lebih merata. Sehingga semakin banyak molekul biomassa yang terdekomposisi menjadi gas (Wijayanti, 2021). Besarnya kadar karbon terikat bergantung pada analisa proksimat lainnya. Kadar karbon terikat meningkat seiring dengan penurunan kadar *moisture*, volatil, dan abu (Ramadha dkk., 2023). Untuk itu, peningkatan jumlah katalis zeolit yang sesuai, bisa meningkatkan kualitas *biochar* hasil pirolisis (Rosyadi dkk., 2018).

Agar proses adsorpsi atau penyerapan semakin baik, maka kadar karbon terikat haruslah setinggi mungkin (Rahman dkk., 2020). Produk *biochar* yang bermutu memiliki kadar karbon tetap tinggi namun kadar abunya rendah serta nilai kalor yang tinggi (Iskandar dan Rofiatin, 2017). Jika kadar karbon terikat >60%, maka dapat dianggap bahwa *biochar* tersebut memiliki kadar karbon terikat yang tinggi. Berdasarkan standar SNI 1683:2021 mengenai mutu arang kayu, kadar karbon terikat yang dihasilkan mendekati standar yaitu $\geq 79\%$.

e. Nilai Kalor *Biochar*

Nilai kalor menunjukkan berapa banyak panas atau kalor yang dihasilkan ketika *biochar* dibakar dalam jumlah tertentu. Nilai kalor menunjukkan seberapa efisien *biochar* dalam menghasilkan sejumlah panas saat terbakar. Semakin besar nilai kalor, maka semakin baik kualitas *biochar* tersebut. Berdasarkan tabel 3, diketahui bahwa peningkatan jumlah katalis dari 3% menjadi 5% meningkatkan nilai kalor *biochar*. Nilai kalor terendah ada pada variasi komposisi 100% biji jarak dan 3% katalis zeolit sebesar 4022 kal/gr. Sementara itu, nilai kalor tertinggi ada pada variasi komposisi 50% biji jarak, 50% biji kapuk, dan 5% katalis zeolit yaitu sebesar 6513 kal/gr. Ditemukan bahwa kadar *fixed carbon* mempengaruhi nilai kalor *biochar*. Kadar *fixed carbon* dalam *biochar* akan meningkatkan nilai kalor dan panas yang dihasilkan dari pembakaran (Amalina dkk., 2022). Selain itu juga, analisa proksimat lain juga mempengaruhi nilai kalor *biochar*. Dimana Semakin rendah kadar volatil, moisture, dan abu, semakin tinggi nilai kalor (Briyartendra dan Widayat, 2019). Katalis zeolit berperan dalam peningkatan nilai kalor. Zeolit dapat meningkatkan reaksi pemutusan ikatan kimia pada biji jarak dan biji kapuk, sehingga dihasilkan lebih banyak senyawa hidrokarbon yang memiliki nilai kalor tinggi (Khasanah dkk., 2023). Peningkatan jumlah katalis zeolit dari 3% menjadi 5% sejalan dengan peningkatan nilai kalor. Jika ditinjau dari standar SNI 1683:2021, maka *biochar* tersebut dapat dimanfaatkan sebagai arang kayu dimana persyaratan minimum nilai kalornya yaitu 6000 kal/gr.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh campuran biji jarak dan biji kapuk serta jumlah katalis zeolit maka dapat ditarik suatu kesimpulan diantaranya pada penggunaan jumlah katalis sebanyak 5% dihasilkan produk hasil pirolisis dengan kualitas terbaik dan memenuhi standar arang kayu SNI 1683:2021. Dimana pada *biochar* diperoleh nilai kalor sebesar 6513,46 kal/gr dan *syngas* dihasilkan gas CH₄ tertinggi yaitu 45%. Perbedaan rasio bahan baku berpengaruh terhadap produk hasil pirolisis. Dimana pada *biochar*, sudah memenuhi standar arang kayu SNI 1683:2021 di rasio bahan baku 50% biji jarak 50% biji kapuk. Sementara pada *syngas* diperoleh gas CH₄ tertinggi pada 75% biji jarak dan 25% biji kapuk yaitu sebesar 45%. Saran untuk penelitian selanjutnya yaitu sebaiknya biomassa yang digunakan dipastikan bersih dari kotoran agar kadar abu pada *biochar* yang diperoleh serendah mungkin. Serta gunakan temperatur yang lebih tinggi dari 350°C, agar kadar abu pada *biochar* menurun.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, M. M., Purnomo, E. P., Enrici, A., & Khairunnisa, T. (2023). Energy transition towards renewable energy in Indonesia. *Heritage and Sustainable Development*, 5(1), 107–118. <https://doi.org/10.37868/hsd.v5i1.108>
- Aktawan, A., & Maryudi. (2018). *Produksi Bahan Bakar Gas dari Gasifikasi Limbah Kayu Sengon*. 10–16.
- Amalina, F., Syukor, A., Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Journal of Hazardous Materials Advances Biochar production techniques utilizing biomass waste-derived materials and environmental applications – A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7(July), 100134. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100134>
- Anggono, Y. P., Ilminnafik, N., Adib Rosyadi, A., & Jatisukamto, G. (2020). Pengaruh katalis zeolit alam pada pirolisis plastik polyethylene terephthalate dan polypropylene. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 13(1), 22. <https://doi.org/10.24843/jem.2020.v13.i01.p04>
- Balogh, J. M., & Mizik, T. (2023). Global Impacts of Climate Policy and Trade Agreements on Greenhouse Gas Emissions. *Agriculture (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/agriculture13020424>
- Bani, G. A. (2023). Pemanfaatan Zeolit Alam Ende Sebagai Katalis dalam Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik. *Jurnal Riset Kimia*, 14(2), 178–187. <https://doi.org/10.25077/jrk.v14i2.607>
- Bansal, P., Choudhary, S., Taneja, T., Sangwan, S., Gupta, B., Goyal, S., Kumar, R., & Sharma, P. (2016). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 % . *Intech, i(tourism)*, 15. <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- Briyartendra, E. I., & Widayat, W. (2019). Pengaruh Ukuran Partikel Dan Tekanan Kompaksi Terhadap Karakteristik Briket Kayu Jati. *Jurnal Inovasi Mesin*, 1(2), 18–29. <https://doi.org/10.15294/jim.v1i2.40242>
- Budianto, A., Kusdarini, E., Amrullah, N. H., & Aidawiyah, A. (2016). *KELAPA SAWIT SEBAGAI BASIS INDONESIA PENGHASIL UTAMA BIOFUEL DAN KARBON AKTIF*. 0, 1–23.
- Candra Kumara, D., Wijayanti, W., & Widhiyanuriyawan, D. (2015). Pengaruh Penggunaan Katalis (Zeolit) Terhadap Kinetic Rate Tar Hasil Pirolisis Serbuk Kayu Mahoni (Switenia Macrophylla). *Jurnal Rekayasa Mesin*, 6(1), 19–25. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2015.006.01.3>
- Chen, X., Gao, X., & Wu, H. (2022). Characterization of Ashes from Co-Firing Biochar with Coal under Pulverized-Fuel Conditions. *ACS Engineering Au*, 2(5), 397–405. <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.2c00012>
- Dongoran, J., Sulistiawati, P., Simangunsong, S. Y., Paksi, P. G. R., & Pasaribu, M. H. (2021). Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial. *Jurnal Jejaring Matematika Dan Sains*, 3(2), 28–39.
- Doti, B., Nyaanga, D., Nyakach, S., & Nyaanga, J. (2022). Effect of Selected Pyrolysis Parameters on the Production and Quality of Biochar and Pyrolygneous Acid From Biomass. *Journal of*

- Engineering in Agriculture and the Environment*, 8(2), 23. <https://doi.org/10.37017/jeae.v8i2.85>
- Eke, J., Onwudili, J. A., & Bridgwater, A. V. (2020). Influence of Moisture Contents on the Fast Pyrolysis of Trommel Fines in a Bubbling Fluidized Bed Reactor. *Waste and Biomass Valorization*, 11(7), 3711–3722. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00560-2>
- Fachrizal, N., Heruhadi, B., Mustafa, R., Sumarsono, M., & Pranoto, S. (2008). Pembuatan Arang Briket Ampas. *Jurnal Ilmu Teknologi Energi*, 1(7), 24–36.
- Gift, M. D. M., Verma, S., Prasad, K., & Prasad, R. (2022). Journal of Nanomaterials - 2022 - Gift - Green Catalytic Pyrolysis An Eco-Friendly Route for the Production of Fuels and.pdf. *Nanomaterials*.
- Hagemann, N., Conte, P., Leifeld, J., Giger, R., Bucheli, T. D., Schmidt, H.-P., & Grafmüller, J. (2023). Impact of biomass ash content on biochar carbon speciation and stability. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, EGU-17040.
- Harlivia, R., Tahdid, T., & A., S. E. (2022). Pengaruh Persen Katalis Zeolit Alam Terhadap Yield Bahan Bakar Cair Proses Pirolisis dari Limbah Plastik Polypropylene. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 2(11), 453–459. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.241>
- Hasibuan, R., & Pardede, H. M. (2023). Pengaruh Suhu dan Waktu Pirolisis terhadap Karakteristik Arang dari Tempurung Kelapa. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 12(1), 46–53. <https://doi.org/10.32734/jtk.v12i1.8534>
- Herlambang, S., Santoso, A. Z., Gomareuzzaman, M., & Wibowo, A. W. A. (2020). *Biochar salah satu alternatif untuk perbaikan lahan dan lingkungan*. http://eprints.upnyk.ac.id/28261/%0Ahttp://eprints.upnyk.ac.id/28261/1/Buku_Ajar_Biochar_susila_herlambang.pdf
- Herlambang, S., Yudhiantoro, D., Gomareuzzaman, M., & Lestari, I. (2019). Buku Ajar Biochar Amandemen Tanah Dan Mitigasi Lingkungan. *Lembaga Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat UPN Veteran Yogyakarta*, 88.
- Herrera, K., Morales, L. F., Tarazona, N. A., Aguado, R., & Saldarriaga, J. F. (2022). Use of Biochar from Rice Husk Pyrolysis: Part A: Recovery as an Adsorbent in the Removal of Emerging Compounds. *ACS Omega*, 7(9), 7625–7637. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06147>
- Huseini, F., Solihin, & Pramusanto. (2018). Kajian Kualitas Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat, Total Sulfur dan Nilai Kalor Untuk Pembakaran Bahan Baku Semen di PT Semen Padang Kelurahan Batu Gadang, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang Provinsi Sumatera Barat. *Prosiding Teknik Pertambangan*, 4(2), 668–677.
- 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.
- I, Yu, C., Chen, R., Li, J. J., Li, J. J., Drahsansky, M., Paridah, M. ., Moradbak, A., Mohamed, A. ., Owolabi, FolaLi, H. abdulwahab taiwo, Asniza, M., Abdul Khalid, S. H. ., Sharma, T., Dohare, N., Kumari, M., Singh, U. K., Khan, A. B., Borse, M. S., Patel, R., ... Reading, F. (2012). We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %. *Intech, i(tourism)*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2011.12.014>
- Iskandar, T., & Rofiatin, U. (2017). Biochar Characteristics Based on Biomass Type and Pyrolysis Process Parameters Biochar Characteristics Based on Biomass Type and Pyrolysis Process Parameters. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(1), 28–34.
- Iswanto, T., Rahmawati, Y., Susianto, & Rifa'i Muhammad. (2021). Desain Pabrik Synthetic Gas (Syngas) dari Gasifikasi Batu Bara Kualitas Rendah sebagai Pasokan Gas PT. Pupuk Sriwidjaja. *Jurnal Teknik Its*, 4(2), 2–5.
- Karlina, D., Fatoni, F. C., Hidayatullah, F., Akil, E., Manggala, A., & Ridwan, K. . (2022). Biopellet dari Eceng Gondok, Sekam, Dedak, Serbuk Gergaji dan Tongkol Jagung Ditinjau dari Komposisi Terhadap Kualitas Biopellet. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 2(2), 583–588. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.135>
- Khaledi, S., Delbari, M., Galavi, H., Bagheri, H., & Chari, M. M. (2023). Effects of biochar particle size, biochar application rate, and moisture content on thermal properties of an unsaturated sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, 226(October 2022), 105579. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105579>

- Khasanah, U., Ladini, T., Rusnadi, I., & Yunanto, I. (2023). Pirolisis Biji Karet Sebagai Energi Alternatif Berdasarkan Pengaruh Temperatur dan Jumlah Katalis Zeolit. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3), 21852–21860.
- Kumar, R., & Strezov, V. (2021). Thermochemical production of bio-oil : A review of downstream processing technologies for bio-oil upgrading , production of hydrogen and high value-added products Oil in Water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(July 2020), 110152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110152>
- Lestari, S. P., Aswan, A., Effendy, S., Febriana, I., S, S. E. R., Safitri, W., & Shaskia, B. A. (2020). Katalis Zeolit dengan Metode Pirolisis Liquid Fuel Production from Beef Tallow using the Zeolite Catalyst with Pyrolysis Method. *Jurnal Kinetika*, 11(02), 1–9.
- Liu, C., Ren, L., Yan, B., Luo, L., Zhang, J., & Kumar, M. (2021). Bioresource Technology Electron transfer and mechanism of energy production among syntrophic bacteria during acidogenic fermentation : A review. *Bioresource Technology*, 323(December 2020), 124637. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124637>
- Mirzayanti, Y. W., Udyani, K., Cahyaningsih, R., & Darmawan, M. P. (2022). KONVERSI MINYAK BIJI KAPUK MENJADI BIODIESEL MENGGUNAKAN KATALIS CaO/HTC. *Rekayasa Mesin*, 13(3), 443–450.
- Miskolczi, N., & Eller, Z. (2020). Pyrolysis-gasi fi cation of wastes plastics for syngas production using metal modi fi ed zeolite catalysts under different ratio of nitrogen / oxygen. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122186>
- Mokodompit, M. (2012). Pengujian Karakteristik Briket (Kadar Abu, Volatile Matter, Laju Pembakaran) Berbahan Dasar Limbah Bambu Dengan Menggunakan Perekat Limbah Nasi. *Universitas Islam Indonesia*, 5, 1–14.
- Muzyka, R., Sobek, S., Dudziak, M., Ouadi, M., & Sajdak, M. (2023). A Comparative Analysis of Waste Biomass Pyrolysis in Py-GC-MS and Fixed-Bed Reactors. *Energies*, 16(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/en16083528>
- Narega, S. O., Ysf, R. A., Aswan, A., Fatria, Erlinawati, & Hilwatullisan. (2022). *Produksi Syngas Dari Proses Gasifikasi Biomassa Menggunakan Downdraft Gasifier Sebagai Gas Bakar Pada Motor Bakar Empat Tak Production Syngas from Biomass Gasification Process Using Downdraft Gasifier As Fuel Gas In Four Stock Combustion Motors*. 2(11), 469–474.
- Pavel, I., Rădoi, R. I., Matache, G., Popescu, A. M. C., & Pavel, K. (2023). Experimental Research to Increase the Combustion Efficiency in the Top-Lit Updraft Principle Based Gasifier. *Energies*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/en16041912>
- Pratiwi, D. (2015). Pengaruh Penggunaan Katalis Zeolit Alam Dalam Pirolisis Limbah Plastik Jenis HDPE menjadi Bahan Bakar Cair Setara Bensin. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta*, November, 1–5.
- Putra, A. A. (2017). Efek Katalis Alam Dalam Proses Pirolisis Non Jurusan Teknik Mesin. *Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung*.
- Rabie, A. M., Mohammed, E. A., & Negm, N. A. (2020). *Feasibility of modi fi ed bentonite as acidic heterogeneous catalyst in low temperature catalytic cracking process of biofuel production from nonedible vegetable oils*. 254(2018), 260–266.
- Rahman, A., Aziz, R., Indrawati, A., & Usman, M. (2020). Pemanfaatan beberapa jenis arang aktif sebagai bahan absorben logam berat cadmium (Cd) pada tanah sedimen drainase kota medan sebagai media tanam. *Jurnal Agroteknologi Dan Ilmu Pertanian*, 1(1), 42–54.
- Rahmi, E., Marlina, M., Fahmi, R., Yamani, S. Z., & Mariana, M. (2023). EFEKTIFITAS PENGGUNAAN HUMIC SUBSTANCE DENGAN CARRIER ZEOLIT DAN BIOCHAR TERHADAP PENINGKATAN PERTUMBUHAN TANAMAN JAGUNG (*Zea Mays*). *Jurnal Agrotek Tropika*, 11(4), 731. <https://doi.org/10.23960/jat.v11i4.7889>
- Ramadha, N. S., Azizah, R. R. N., & Mufid, M. (2023). Pengaruh Waktu Dan Suhu Pirolisis Terhadap Mutu Briket Dari Limbah Padat Gondorukem. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 9(4), 352–361. <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i4.4180>
- Rasul, & Tanggasari, D. (2024). *Uji karakteristik briket kulit biji jarak pagar (*Jatropha curcas l*) dan batok kelapa (*cocos nucifera*) dengan perekat tepung kanji*. 3(5), 1–23.
- Ridhuan, K., & Suranto, J. (2019). *Perbandingan pembakaran pirolisis dan karbonisasi pada biomassa*

- kulit durian terhadap nilai kalori*. 5(1), 50–56.
- Rosyadi, I., Caturwati, N. K., & Fauzi, A. (2021). Effect Of Water Content On Characteristics Fuel From The Municipal Solid Waste Through The Pyrolysis Process. *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 5(2), 9–16. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v5i2.974>
- 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>
- Sa`diyah, K., & Juliastuti, S. R. (2017). Pengaruh Jumlah Katalis Zeolit Alam Pada Produk Proses Pirolisis Limbah Jurnal Bahan Alam Terbarukan Pengaruh Jumlah Katalis Zeolit Alam Pada Produk Proses Pirolisis Limbah. *Bahan Alam Terbarukan*, 2(January 2015). <https://doi.org/10.15294/jbat.v4i2.4171>
- Sajjad, M., Liu, C., Nawaz, M., Tawab, A., Shen, X., Shen, B., & Aamer, M. (2021). Bioresource Technology Elucidating the pyrolysis reaction mechanism of Calotropis procera and analysis of pyrolysis products to evaluate its potential for bioenergy and chemicals. *Bioresource Technology*, 322(December 2020), 124545. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124545>
- Satria, Y. A. (2017). STUDI PIROLISIS MINYAK BIJI JARAK KALIKI MENGGUNAKAN PREKURSOR ZEOLIT BERBASIS SILIKA SEKAM PADI SEBAGAI KATALIS. *Occupational Medicine*, 53(4), 130.
- Shariff, A., Aziz, N. S. M., Ismail, N. I., & Abdullah, N. (2016). Corn cob as a potential feedstock for slow pyrolysis of biomass. *Journal of Physical Science*, 27(2), 123–137. <https://doi.org/10.21315/jps2016.27.2.9>
- Suleman, N., & Papatungan, M. (2019). Esterifikasi dan Transesterifikasi Stearin Sawit untuk Pembuatan Biodiesel. 17(1), 66–77.
- Susanti, A., Rusnadi, I., & Manggala, A. (2023). Pirolisis Tatal Kayu Karet sebagai Potensi Bahan Bakar Berdasarkan Analisis Temperatur dan Katalis Zeolit. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 7(3), 21067–21076.
- Taraba, B., & Grundel, P. (2022). Combustion effectivity of high ash coal in adiabatic calorimeter. *Paliva*, 14(2), 97–100. <https://doi.org/10.35933/paliva.2022.02.05>
- Tawalbeh, M., Al-othman, A., Salamah, T., Alkasrawi, M., Martis, R., & El-rub, Z. A. (2021). A critical review on metal-based catalysts used in the pyrolysis of lignocellulosic biomass materials. *Journal of Environmental Management*, 299(July), 113597. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113597>
- Wahyuni, S., & Ningsih, P. (2016). PEMANFAATAN ARANG AKTIF BIJI KAPUK (*Ceiba pentandra L.*) SEBAGAI ADSORBEN LOGAM TIMBAL (*Pb*) The Use of Activated Charcoal of Cotton Seeds (*Ceiba pentandra L.*) as an Adsorbent for Lead (*Pb*). 5(November), 191–196.
- Wahyuningsih, S. (2015). Dekomposisi Karbohidrat Bungkil Biji Jarak Pagar Oleh Enzim Ekstarselluler *Aspergillus niger*. 1–65.
- Wang, Y., Akbarzadeh, A., Chong, L., Du, J., & Tahir, N. (2022). Chemosphere Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production : A review. *Chemosphere*, 297(March), 134181. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134181>
- Wijayanti, W. (2021). Efek Zeolit untuk Produksi Tar dan Char pada Pirolisis Rotary Kiln. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(1), 51. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.01.6>
- Yildiz, G., Ronsse, F., Prins, W., Rosso-Vasic, M., Van Duren, R., & Janbroers, S. (2012). Catalytic fast pyrolysis of biomass. In *Communications in agricultural and applied biological sciences* (Vol. 77, Issue 1).