

Optimalisasi Ko-Pirolisis Campuran Eceng Gondok dan Batubara Muda Terhadap Produksi Bio-Oil, Gas, dan Char

A'yan Sabitah^{1*}, Ichwan Noor Ardiyat², Misbachudin³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banjarmasin

^{1,2,3}Jln. Brigjen H. Hasan Basri (Komplek Unlam) Kayutangi, Banjarmasin 70123, Indonesia

E-mail: ayansabitah@poliban.ac.id¹, ichwannoorardiyat@poliban.ac.id², misbach.mt@poliban.ac.id³

Info Naskah:

Naskah masuk: 17 September 2024

Direvisi: 6 November 2024

Diterima: 3 Desember 2024

Abstrak

Salah satu biomassa yang melimpah di Indonesia adalah eceng gondok, yang dapat diubah menjadi energi melalui pirolisis. Penelitian ini mengeksplorasi pengaruh suhu pada proses ko-pirolisis campuran eceng gondok dan batubara muda untuk menghasilkan produk bio-oil, gas, dan char. Metode yang digunakan adalah pirolisis dengan variasi suhu pada campuran eceng gondok dan batubara muda dalam reaktor batch. Pengujian dilakukan pada suhu 400°C dengan berbagai komposisi campuran eceng gondok dan batubara, dan produk yang dihasilkan berupa bio-oil, gas, dan char kemudian diukur untuk menentukan hasilnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada pirolisis eceng gondok murni, produksi gas mencapai 120 gram, bio-oil 108 gram, dan char 72 gram. Penambahan batubara hingga 30% meningkatkan produksi char menjadi 113 gram, tetapi menurunkan produksi gas menjadi 94 gram dan bio-oil menjadi 87 gram. Gas yang dihasilkan didominasi oleh metana (67,315%) pada campuran 70% eceng gondok dan 30% batubara, sedangkan hidrogen mencapai 33,721% pada eceng gondok murni.

Keywords:

water hyacinth;

young coal;

pyrolysis.

Abstract

One of the abundant biomass resources in Indonesia is water hyacinth, which can be converted into energy through pyrolysis. This research explores the effect of temperature on the co-pyrolysis process of a mixture of water hyacinth and young coal to produce bio-oil, gas, and char. The method used is pyrolysis with temperature variations on the mixture of water hyacinth and young coal in a batch reactor. The testing was conducted at a temperature of 400°C with various compositions of water hyacinth and coal mixtures, and the resulting products in the form of bio-oil, gas, and char were then measured to determine the yield. The research results show that in the pyrolysis of pure water hyacinth, gas production reaches 120 grams, bio-oil 108 grams, and char 72 grams. The addition of coal up to 30% increases char production to 113 grams, but decreases gas production to 94 grams and bio-oil to 87 grams. The gas produced is dominated by methane (67.315%) in a mixture of 70% water hyacinth and 30% coal, while hydrogen reaches 33.721% in pure water hyacinth.

*Penulis korespondensi:

A'yan Sabitah

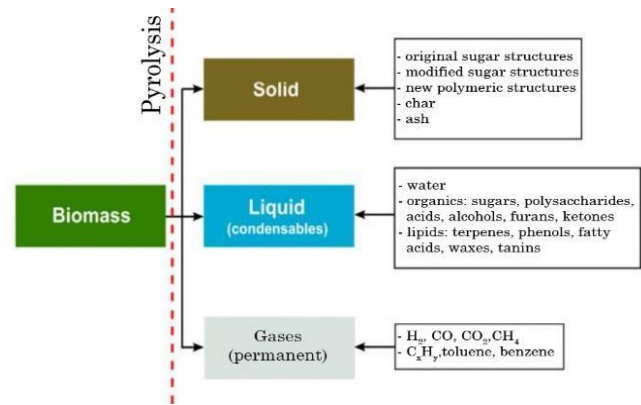
E-mail: ayansabitah@poliban.ac.id

1. Pendahuluan

Biomassa sebagai salah satu sumber energi berkelanjutan terbesar di dunia, memiliki banyak sumber daya energi alternatif yang ada dalam berbagai bentuk di seluruh dunia dan dapat digunakan untuk menggantikan bahan bakar fosil konvensional karena ketersediaannya, manfaat ekonomi dan lingkungan yang tak terhitung banyaknya karena merupakan sumber karbon dengan netralitas CO₂ [1]. Sumber biomassa bervariasi dari satu negara ke negara lain dengan tingkat akumulasi yang bervariasi, sebagai akibat dari beberapa faktor yang meliputi, antara lain, kondisi dan lokasi geografis, tingkat populasi, tingkat pembangunan ekonomi, pembangunan pertanian, pembangunan hutan, pertumbuhan industri, permintaan pangan, teknologi produksi dan pemrosesan, dan gaya hidup.

Menurut Shen et al. [2], biomassa dikenal sebagai sistem energi terbesar keempat setelah batu bara, minyak dan gas, yang saat ini memasok sekitar 14% dari konsumsi energi tahunan dunia. Oleh karena itu, pengembangan dan pemanfaatan biomassa telah menarik perhatian dunia [3]. Indonesia merupakan wilayah kepulauan yang luas dan memiliki sumber biomassa yang melimpah, salah satu tumbuhan yang mudah berkembang biak dan dianggap gulma bagi masyarakat adalah eceng gondok. Eceng gondok dapat diolah menjadi energi terbarukan dengan metode konversi biolimia atau termokimia seperti proses pirolisis[4].

Umumnya, metode konversi biokimia atau termokimia biasanya digunakan dalam mengubah biomassa menjadi energi yang berguna. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi konversi termal seperti pembakaran langsung, gasifikasi, pirolisis, dan pencairan hidrotermal baru-baru ini semakin mendapat perhatian karena jauh lebih cepat dari pada proses biologis (misalnya, pencernaan anaerobik, fermentasi)[3]. Selain itu, teknologi termokimia dapat diterapkan dalam produksi energi dari limbah tertentu, seperti plastik, yang tidak dapat diurai oleh aktivitas mikroba [5]. Di antara proses konversi termal, pirolisis merupakan metode yang paling efisien dan menjanjikan yang menghasilkan energi dengan rasio bahan bakar terhadap umpan yang tinggi [6]. Oleh karena itu, pirolisis telah menarik perhatian besar sebagai salah satu cara yang layak dan menjanjikan untuk mengekstraksi energi dari biomassa, khususnya minyak pirolisis. Minyak pirolisis (*bio-oil*) adalah produk cair dari proses pirolisis yang berpotensi untuk digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku untuk banyak bahan kimia komoditas. Namun, kandungan oksigen dalam minyak pirolisis tinggi (sekitar 35–60 wt%)[7], [8], dan telah diidentifikasi ada dalam beberapa bentuk senyawa teroksidasi (misalnya, asam, alkohol, aldehida, ester, keton, fenol, oligomer turunan lignin, dll.), dan sebagian besar ditemukan sebagai air [9]. Distribusi produk ini sangat dipengaruhi oleh parameter proses, antara lain suhu pirolisis dan durasi tinggal, pembagian ini dapat digambarkan pada gambar 1[8].



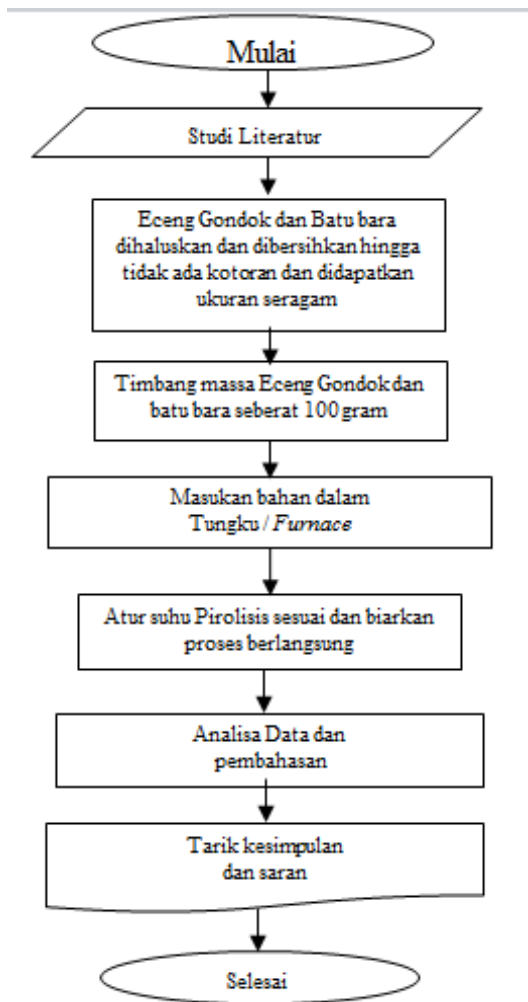
Gambar 1. Komposisi produk reaksi pirolisis [8]

Penelitian terkini telah menunjukkan bahwa ko-pirolisis biomassa dengan bahan berbasis polimer dapat meningkatkan hasil dan kualitas produk melalui efek sinergis. Misalnya, interaksi antara senyawa volatil dari biomassa dan spesies radikal dari polimer dapat meningkatkan produksi hidrokarbon aromatik, yang sangat bernilai dalam berbagai aplikasi industri [10]. Lebih jauh, peran suhu dalam pirolisis sangat penting karena mempengaruhi kinetika reaksi kimia dan stabilitas senyawa yang dihasilkan. Perubahan suhu selama pirolisis secara signifikan mempengaruhi hasil. Misalnya, penelitian telah menyoroti peran penting suhu dalam menentukan hasil dan komposisi *bio-oil* dalam pirolisis kayu dan biomassa [9]. Pengaruh suhu operasi terhadap hasil dan komposisi *bio-oil* telah dieksplorasi dalam penelitian yang melibatkan selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang menunjukkan bahwa desain dan suhu operasi reaktor secara signifikan mempengaruhi hasil dan komposisi *bio-oil* secara keseluruhan [11][12]. Selain itu, penelitian yang membandingkan pirolisis gelombang mikro dan pirolisis konvensional menunjukkan bahwa hasil *bio-oil* meningkat seiring dengan suhu pirolisis yang lebih tinggi [13]. Penelitian tentang produksi bio-oil dari jerami jagung dan sumber biomassa lainnya telah menggarisbawahi pengaruh suhu terhadap produksi bio-oil, arang, dan syngas [14].

Meskipun penelitian tentang pirolisis telah dilakukan secara *ekstensif*, interaksi dan kondisi optimal untuk ko-pirolisis eceng gondok dan batu bara muda, khususnya yang berkaitan dengan suhu, belum dieksplorasi secara menyeluruh. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan yang ada dengan memeriksa secara sistematis bagaimana variasi campuran bahan eceng gondok dengan batubara muda mempengaruhi reaksi kimia dan hasil produk selama proses ko-pirolisis pada temperatur 400 °C. Penelitian ini mengeksplorasi efek sinergis dari penggabungan dua bahan limbah yang berbeda pada berbagai suhu, suatu area yang belum pernah dipelajari secara komprehensif sebelumnya. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter proses untuk memaksimalkan hasil produk bernilai tinggi sambil meminimalkan dampak lingkungan. Upaya ini berkontribusi secara signifikan terhadap pengembangan strategi pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

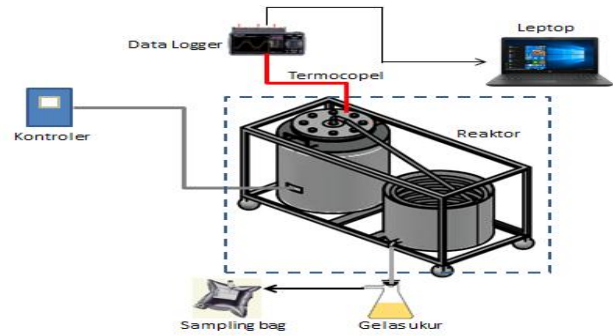
2. Metode

Bahan baku utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah eceng gondok dan batu bara muda, yang bersumber dari wilayah Kalimantan Selatan, Indonesia. Eceng gondok berasal dari sungai Barito, sedangkan batu bara muda berasal dari sisa perusahaan tambang sekitar, dikumpulkan untuk memastikan sampel yang representatif. Kedua bahan tersebut dipilih karena kelimpahannya dan potensinya untuk ko-pirolisis.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Percobaan ko-pirolisis dilakukan menggunakan reaktor *batch* tabung baja tahan karat (SS304), dapat dilihat pada gambar 2. Reaktor tersebut memiliki diameter dalam 5 cm, diameter luar 5,6 cm, dan panjang 40 cm. Instrumen utama meliputi: 1) gelas ukur berfungsi untuk mengukur cairan yang dihasilkan proses pirolisis; 2) Data logger berfungsi sebagai alat ukur temperatur selama proses; 3) timbangan berfungsi sebagai alat ukur berat bahan baku dan sisa hasil proses pirolisis yang berbentuk padat; dan 4) komputer berfungsi sebagai alat perekam data.



Gambar 3. Instalasi penelitian

Prosedur pertama menyiapkan tumbuhan eceng gondok dan batubara muda, kemudian keduanya dikeringkan. Eceng gondok dan batu bara yang sudah dikeringkan diperkecil ukurannya hingga menjadi serbuk dengan ukuran 1-2mm menggunakan blender sebelum diuji kadar airnya menggunakan alat *moisture analyzer* yang bertujuan untuk memastikan kadar air 10%. Timbang eceng gondok yang sudah dikeringkan dan diperkecil ukurannya menjadi serbuk sebanyak 300 gram untuk dimasukkan ke dalam reaktor *batch*. Hidupkan reaktor dengan mencolokkan ke listrik untuk menyalakan heater yang menjadi sumber panas reaktor *batch* serta atur temperatur yang sudah ditentukan 400 °C.

Proses pirolisis dilakukan selama 90 menit, setelah proses pirolisis selesai ukur *volume* dan massa *bio oil* dan *char*. Ulangi proses pirolisis dengan variasi campuran lainnya. *Bio oil* dan *char* hasil pirolisis kemudian diukur menggunakan gelas ukur dan timbangan. Selain *bio oil* dan *char* terdapat gas yang diperoleh selama proses berlangsung. Gas yang diperoleh ditampung dilakukan pengujian kandungan menggunakan alat *Gas Chromatography* untuk mengetahui kandungan senyawa yang terbentuk dari proses pirolisis.

Hasil produk gas dihitung menggunakan rumus tertentu yang memperhitungkan *volume* gas yang diproduksi dan kondisi saat pirolisis dilakukan. Pendekatan sistematis ini memastikan kuantifikasi yang tepat dari semua hasil pirolisis, yang sangat penting untuk mengevaluasi efisiensi dan efektivitas proses.

$$\text{Oil (\%)} = \frac{\text{Massa produk Oil}}{\text{Massa total bahan baku}} \times 100 \quad (1)$$

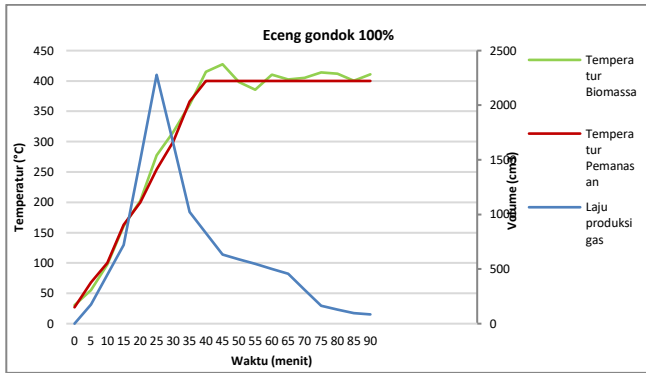
$$\text{Char (\%)} = \frac{\text{Massa Produk Char}}{\text{Massa total bahan baku}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Gas (\%)} = 100 - (\text{Produk Oil} + \text{Produk Char}) \quad (3)$$

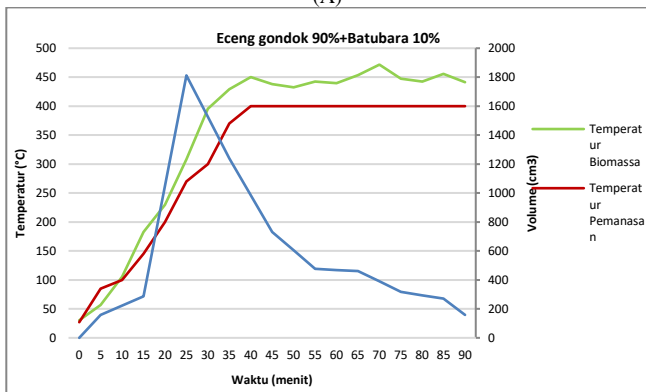
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh Temperatur Terhadap Laju Produksi Gas

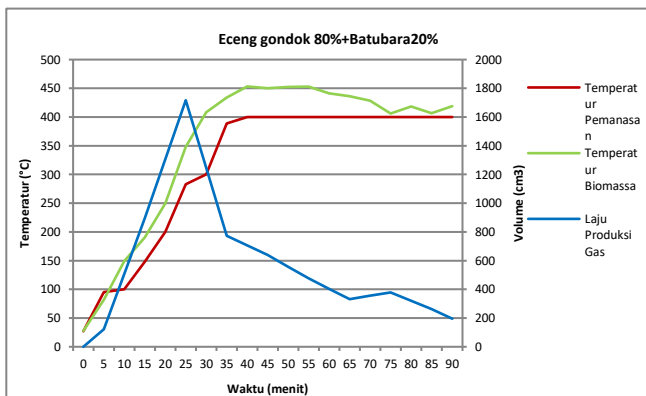
Proses pirolisis yang dilakukan pada berbagai komposisi campuran antara eceng gondok dan batubara menghasilkan perbedaan signifikan dalam laju produksi gas dan kenaikan suhu pemanasan. Hasil dapat dilihat pada gambar 3



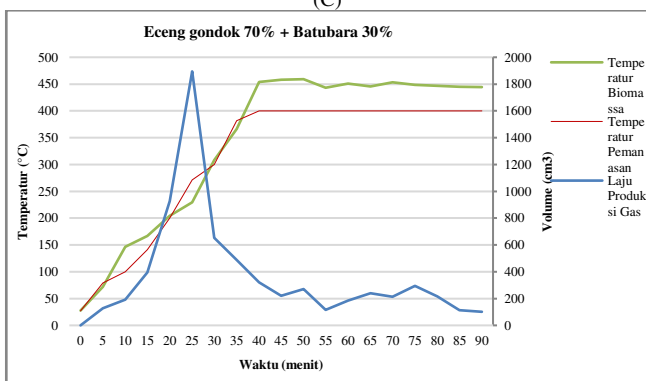
(A)



(B)



(C)



(D)

Gambar 4. Hubungan Temperatur dengan Laju Produksi Gas{(A) Eceng Gondok 100% ; (B) Eceng Gondok 90% - Batubara 10% ; (C) Eceng Gondok 80% - Batubara 20% ; (D) Eceng Gondok 70% - Batubara 30% }

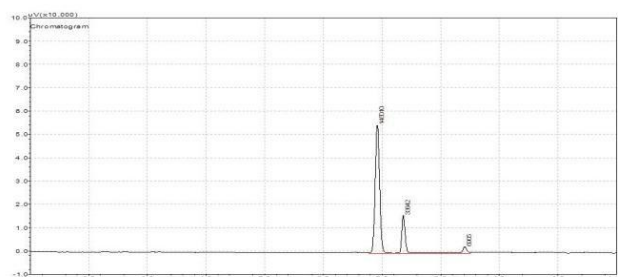
Pada campuran 80% eceng gondok dan 20% batubara, suhu pemanasan mencapai puncak sekitar 400°C dalam waktu 30 menit, dengan laju produksi gas juga mencapai puncaknya pada titik waktu yang sama, sebelum menurun drastis. Tren serupa juga terlihat pada komposisi 90% eceng gondok dan 30% batubara, meskipun dalam hal ini, suhu pemanasan mencapai 450°C, sementara produksi gas menurun lebih cepat setelah mencapai puncaknya [15]. Pada pirolisis eceng gondok 100%, suhu pemanasan tetap pada angka 400°C, tetapi volume gas yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang melibatkan batubara [16]. Secara umum, semakin tinggi persentase batubara, suhu pemanasan cenderung lebih cepat naik, namun produksi gas menurun lebih cepat, seperti terlihat pada komposisi 90% eceng gondok dan 10% batubara [17].

Efektivitas pirolisis sangat dipengaruhi oleh suhu pemanasan dan komposisi biomassa serta batubara yang digunakan. Menurut studi oleh Jamin E, *et. al*, suhu optimal pirolisis berkisar antara 350°C hingga 500°C, yang sesuai dengan hasil penelitian ini dimana puncak suhu berada pada rentang tersebut untuk semua komposisi yang diuji [18]. Sebuah kajian menyebutkan bahwa komposisi material yang digunakan dalam pirolisis memiliki pengaruh signifikan terhadap laju produksi gas dan *yield bio-oil* yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, laju produksi gas tertinggi terjadi pada eceng gondok 100%, sementara campuran dengan batubara menunjukkan penurunan lebih cepat.

Studi lain menunjukkan bahwa laju produksi gas pada pirolisis biomassa cenderung menurun setelah suhu stabil, yang juga diamati pada penelitian ini setelah menit ke-30 untuk semua komposisi [19]. Penggunaan batubara dalam campuran dengan biomassa dapat mempengaruhi komposisi gas yang dihasilkan, karena batubara cenderung meningkatkan produksi tar dan mengurangi gas sintesis seperti CO dan H₂, yang mungkin juga menjelaskan mengapa campuran dengan batubara menunjukkan laju penurunan gas yang lebih cepat dibandingkan dengan 100% eceng gondok [20].

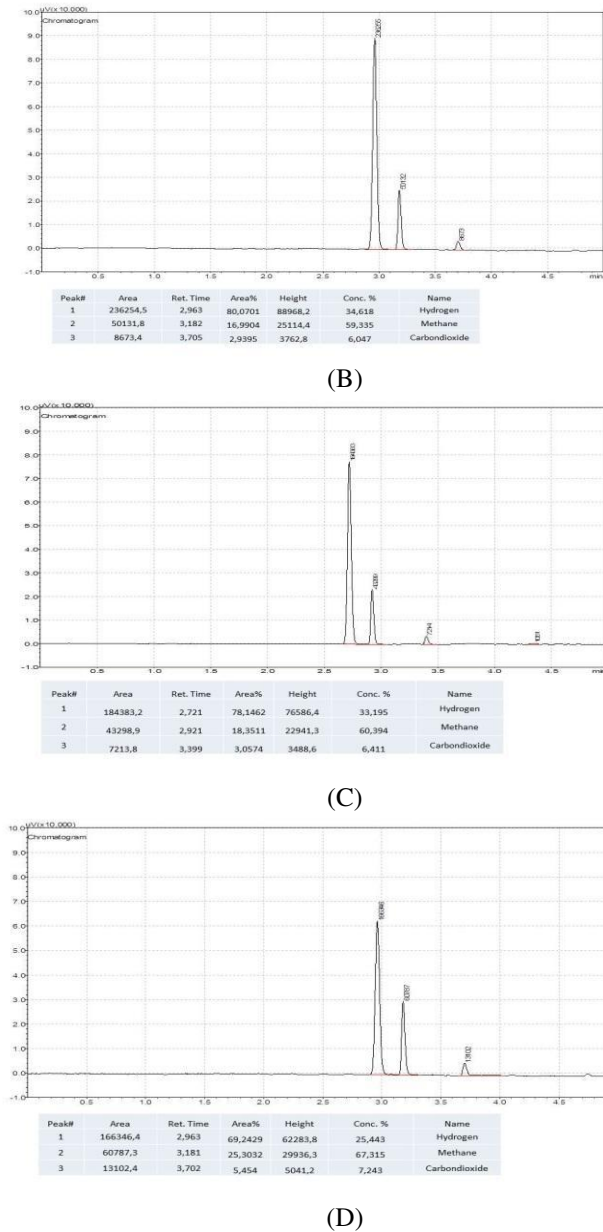
3.2 Hasil persentase kandungan gas

Hasil percobaan pirolisis campuran eceng gondok dan batu bara dengan berbagai komposisi, selanjutnya dilakukan pengujian kandungan gas yang diperoleh menunjukkan data hasil kromatogram yang bervariasi tergantung pada rasio campuran eceng gondok dan batu bara, serta proses pirolisis pada suhu 400°C.



| Peak# | Area | Ret. Time | Area% | Height | Conc. % | Name |
|-------|----------|-----------|---------|---------|---------|----------------|
| 1 | 145010.2 | 2,96 | 78,1484 | 54257,5 | 33,721 | Hydrogen |
| 2 | 33641,8 | 3,18 | 18,1302 | 16089,4 | 58,704 | Methane |
| 3 | 6905,3 | 3,704 | 3,7214 | 2743 | 7,575 | Carbon dioxide |

(A)



Gambar 5. Persentase Kandungan Gas { (A) Eceng Gondok 100% ; (B) Eceng Gondok 90% - Batu Bara 10% ; (C) Eceng Gondok 80% - Batu Bara 20% ; (D) Eceng Gondok 70% - Batu Bara 30% }

Pirolisis campuran eceng gondok dan batu bara pada suhu 400°C menghasilkan gas-gas utama berupa metana, hidrogen, dan karbon dioksida. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari berbagai komposisi campuran, gas metana dominan pada komposisi yang mengandung batu bara lebih tinggi, sedangkan hidrogen meningkat seiring dengan meningkatnya proporsi eceng gondok. Pirolisis campuran biomassa dan batu bara menghasilkan gas metana sebagai komponen utama ketika batu bara menjadi salah satu bahan baku utama [21].

Pada campuran eceng gondok 70% dan batu bara 30%, metana menyumbang sekitar 67,315% dari total gas yang dihasilkan, yang menunjukkan dominasi batu bara dalam pembentukan hidrokarbon ringan. Batu bara, yang kaya akan

karbon, diketahui menghasilkan hidrokarbon seperti metana selama pirolisis, terutama pada suhu tinggi [22]. Di sisi lain, hidrogen dan karbon dioksida juga dihasilkan dalam jumlah signifikan, masing-masing 25,443% dan 7,243%. Hidrogen terutama dihasilkan dari dekomposisi lignin dan hemiselulosa dalam eceng gondok.

Pada campuran eceng gondok 100% (tanpa batu bara), hidrogen mencapai 33,721%, menunjukkan bahwa biomassa eceng gondok kaya akan senyawa volatil yang mampu diubah menjadi hidrogen pada kondisi pirolisis. Hal ini menekankan potensi tinggi biomassa lignoselulosa dalam menghasilkan hidrogen melalui pirolisis pada suhu tinggi [23].

Pirolisis campuran biomassa dan batu bara juga menawarkan keuntungan dalam hal pengurangan emisi karbon. Penggunaan biomassa seperti eceng gondok dalam campuran dengan batu bara tidak hanya membantu mengurangi jejak karbon secara keseluruhan tetapi juga meningkatkan efisiensi energi dengan menghasilkan hidrogen sebagai bahan bakar bersih. Ini diperkuat oleh hasil penelitian yang menemukan bahwa pirolisis biomassa-batu bara dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan meningkatkan kualitas gas yang dihasilkan [24].

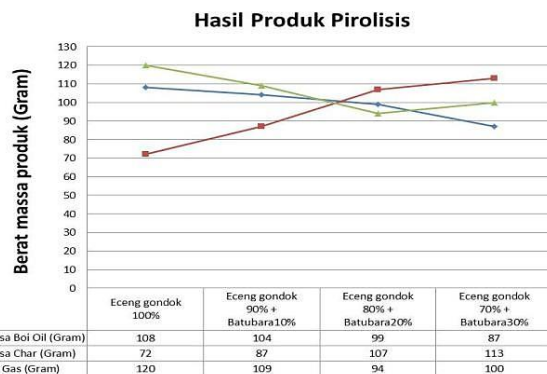
Pirolisis biomassa memberikan gas dengan kandungan hidrogen yang lebih tinggi dibandingkan batu bara, karena biomassa cenderung mengandung senyawa oksigen dan hidrogen dalam jumlah yang lebih besar [25]. Hidrogen yang dihasilkan memiliki potensi besar sebagai sumber energi bersih, pirolisis dapat menjadi salah satu solusi untuk krisis energi global di masa depan.

Secara keseluruhan, pirolisis campuran eceng gondok dan batu bara pada suhu 400°C menghasilkan gas yang berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif, dengan metana dan hidrogen sebagai komponen utama. Proses ini tidak hanya memanfaatkan biomassa yang berlimpah tetapi juga mengurangi ketergantungan pada batu bara, yang merupakan bahan bakar fosil. Teknologi ini juga mendukung upaya pengurangan emisi karbon dan meningkatkan efisiensi energi [26].

3.3 Hasil Produk Akhir Tar, Char dan Gas

Proses pirolisis biomassa seperti eceng gondok dengan campuran batubara menghasilkan tiga produk utama, yaitu bio-oil, char, dan gas. Berdasarkan hasil penelitian, penambahan batubara dalam campuran cenderung menurunkan produksi bio-oil dan gas, sementara produksi char meningkat. Pada pirolisis eceng gondok murni (100%), massa bio-oil yang dihasilkan mencapai 108 gram, namun saat batubara ditambahkan hingga 30%, massa bio-oil turun menjadi 87 gram. Hal ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa biomassa cenderung menghasilkan lebih banyak bio-oil karena kandungan oksigen yang tinggi, sementara batubara menghasilkan lebih banyak char akibat komposisi karbonnya yang dominan [27]. Massa char, sebagai residu padat hasil pirolisis, meningkat seiring bertambahnya proporsi batubara dalam campuran. Pada eceng gondok 100%, massa char sebesar 72 gram, namun pada campuran 70% eceng gondok dan 30% batubara, massa char mencapai 113 gram. Hal ini sejalan dengan studi yang menyebutkan bahwa batubara

menghasilkan lebih banyak residu padat dibandingkan biomassa yang lebih reaktif dan volatil [28]. Hasil ini dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 6. Persentase Kandungan Gas{ (A) Eceng Gondok 100% ; (B) Eceng Gondok 90% - Batu Bara 10% ; (C) Eceng Gondok 80% - Batu Bara 20% ; (D) Eceng Gondok 70% - Batu Bara 30% }

Dari grafik yang ada pada gambar 5 dapat dilihat produksi gas mengalami penurunan dengan meningkatnya kandungan batubara, meskipun ada sedikit peningkatan pada komposisi batubara 30%. Pada pirolisis eceng gondok murni, massa gas yang dihasilkan mencapai 120 gram, namun turun menjadi 94 gram pada campuran 80% eceng gondok dan 20% batubara. Studi oleh Bridgwater (2003) juga menunjukkan bahwa biomassa cenderung menghasilkan lebih banyak gas dibandingkan batubara karena sifatnya yang lebih volatil [27]. Dalam proses pirolisis, perubahan produk ini dapat dijelaskan oleh perbedaan komposisi kimia antara biomassa dan batubara, di mana biomassa memiliki lebih banyak senyawa volatil yang mudah terurai menjadi gas dan cairan, sementara batubara lebih stabil dan menghasilkan lebih banyak produk padat seperti char.

Secara keseluruhan, penambahan batubara dalam pirolisis eceng gondok menunjukkan penurunan produksi bio-oil dan gas, serta peningkatan char, yang sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya. Perbedaan ini dapat dimanfaatkan untuk aplikasi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan, seperti bio-oil untuk bahan bakar cair dan char untuk bahan karbon padat.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian mengenai pirolisis campuran eceng gondok dan batubara menunjukkan bahwa suhu puncak pirolisis berada di sekitar 400°C. Laju peningkatan suhu menjadi lebih cepat dengan meningkatnya persentase batubara dalam campuran, namun produksi gas cenderung lebih cepat menurun. Campuran yang terdiri dari 100% eceng gondok menghasilkan volume gas yang lebih tinggi dibandingkan dengan campuran yang mengandung batubara. Dari segi kandungan gas, campuran dengan proporsi batubara yang lebih tinggi menghasilkan metana dalam jumlah lebih besar, sedangkan eceng gondok murni lebih dominan dalam menghasilkan hidrogen. Pada produk akhir, penambahan batubara berdampak pada peningkatan produksi char dan penurunan hasil gas serta bio-oil,

sementara pirolisis eceng gondok murni memberikan hasil yang lebih tinggi dalam bentuk gas dan bio-oil.

Ucapan Terima

Ucapan terimakasih kepada Politeknik Negeri Banjarmasin dan Jurusan Teknik Mesin yang telah menyediakan sarana dan prasarana yang mendukung penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. Ellersdorfer, "Hydrothermal co-liquefaction of chlorella vulgaris with food processing residues, green waste and sewage sludge," *Biomass and Bioenergy*, vol. 142, p. 105796, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105796.
- [2] D. K. Shen, S. Gu, K. H. Luo, A. V. Bridgwater, and M. X. Fang, "Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment," *Fuel*, vol. 88, no. 6, pp. 1024–1030, Jun. 2009, doi: 10.1016/J.FUEL.2008.10.034.
- [3] A. Amrullah *et al.*, "Catalytic pyrolysis of Padina sp. with ZSM-5 and Amberlyst-15 catalysts to produce aromatic-rich bio-oil," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 28, p. 101974, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.BITEB.2024.101974.
- [4] N. Hamidi, A. Firmansyah, and H. Kusumaningsih, "Pengaruh Variasi Temperatur Reaktor terhadap Hasil Produk Pirolisis Eceng Gondok Secara Ex-Situ dengan Katalis Bentonit dan Penambahan Uap Air," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 511–520, 2020, doi: 10.21776/ub.jrm.2020.011.03.23.
- [5] P. Temperatur, D. A. N. Waktu, R. Dalam, and U. Daur, "Waste : the Effect of Temperature and Reaction Time in," vol. 9, no. 1, pp. 98–106, 2024, doi: 10.20527/sjmekinematika.v9i1.318.
- [6] yan Sabitah, I. Noor Ardiyat, I. Urwatul Wusko, R. Pitria Ningsih, J. Teknik Mesin, and P. Negeri Banjarmasin, "ANALISIS PROSES PIROLISIS LIMBAH PLASTIK HDPE DAN PET: PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKTU REAKSI DALAM UPAYA DAUR ULANG PLASTIK," *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 9, no. 1, pp. 98–106, Jun. 2024, doi: 10.20527/SJMEKINEMATIKA.V9I1.318.
- [7] M. Guillain, K. Fairouz, S. R. Mar, F. Monique, and L. Jacques, "Attrition-free pyrolysis to produce bio-oil and char," *Bioresour. Technol.*, vol. 100, no. 23, pp. 6069–6075, 2009, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2009.06.085.
- [8] "Production of Solid Fuel by Torrefaction Using Coconut Leaves As Renewable Biomass | Pestaño | International Journal of Renewable Energy Development." <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijred/article/view/11389> (accessed Sep. 12, 2024).
- [9] I. Masfuri *et al.*, "Temperature effects on chemical reactions and product yields in the Co-pyrolysis of wood sawdust and waste tires: An experimental investigation," *Results Eng.*, vol. 23, p. 102638, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.RINENG.2024.102638.
- [10] Y. D. Seo, T. C. Seo, and S. Y. Oh, "Co-pyrolysis of rice straw with industrial wastes: Waste disposal and environmental remediation," *Waste Manag. Res.*, vol. 40, no. 3, pp. 339–348, Mar. 2022, doi: 10.1177/0734242X211027066.
- [11] O. Farobie *et al.*, "Simultaneous production of nutritional compounds and hydrochar from *Chlorella pyrenoidosa* via hydrothermal process," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 20, p. 101245, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.BITEB.2022.101245.
- [12] K. B. Ansari, J. S. Arora, J. W. Chew, P. J. Dauenhauer, and S. H. Mushrif, "Fast Pyrolysis of Cellulose, Hemicellulose, and Lignin: Effect of Operating Temperature on Bio-oil Yield

- and Composition and Insights into the Intrinsic Pyrolysis Chemistry,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, no. 35, pp. 15838–15852, Sep. 2019, doi: 10.1021/ACS.IECR.9B00920/SUPPL_FILE/IE9B00920_SI_001.PDF.
- [13] J. Lin *et al.*, “Comparison of microwave pyrolysis and conventional pyrolysis of *Eupatorium adenophorum*,” *EPSE*, vol. 42, no. 2, p. e13978, Mar. 2023, doi: 10.1002/EP.13978.
- [14] N. S. Rathore, A. S. Paul, and N. L. Panwar, “Experimental investigation on the production of bio-oil from maize straw at a pilot scale,” *Environ. Eng. Res.*, vol. 27, no. 1, Feb. 2022, doi: 10.4491/EER.2020.592.
- [15] J. Lehmann and S. Joseph, *Biochar for environmental management*. 2024. doi: 10.4324/9781003297673-1.
- [16] P. Basu, “Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory,” *Biomass Gasification, Pyrolysis Torrefaction Pract. Des. Theory*, pp. 1–530, 2013, doi: 10.1016/C2011-0-07564-6.
- [17] M. P. Shah and P. Kaur, *Biomass Energy for Sustainable Development*, no. March. 2024. doi: 10.1201/9781003406501.
- [18] J. Escalante *et al.*, “Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 169, p. 112914, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112914.
- [19] D. Mohan, C. U. Pittman, and P. H. Steele, “Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review,” *Energy and Fuels*, vol. 20, no. 3, pp. 848–889, May 2006, doi: 10.1021/EF0502397.
- [20] “Gasifikasi Biomassa Limbah Kelapa Sawit Dan Batubara Dengan Katalis Bentonit - Brawijaya Knowledge Garden.” <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/176132/> (accessed Nov. 01, 2024).
- [21] M. Bhattacharyya, K. P. Shadangi, R. Purkayastha, P. Mahanta, and K. Mohanty, “Co-pyrolysis of coal and biomass blends: Impact of pyrolysis temperature and biomass blending on thermal stability of coal, and composition of pyrolysis products,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 187, pp. 1010–1021, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.PSEP.2024.05.037.
- [22] A. Y. Sabitah, “Gasifikasi Biomassa Limbah Kelapa Sawit Dan Batubara Dengan Katalis Bentonit,” Jun. 2018.
- [23] N. K. Obiora, C. O. Ujah, C. O. Asadu, F. O. Kolawole, and B. N. Ekwueme, “Production of hydrogen energy from biomass: Prospects and challenges,” *Green Technol. Sustain.*, vol. 2, no. 3, p. 100100, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.GRETS.2024.100100.
- [24] S. Mariyam, M. Shahbaz, T. Al-Ansari, H. R. Mackey, and G. McKay, “A critical review on co-gasification and co-pyrolysis for gas production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 161, p. 112349, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112349.
- [25] Y. Zhang *et al.*, “A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades,” *Fuel*, vol. 347, p. 128461, Sep. 2023, doi: 10.1016/J.FUEL.2023.128461.
- [26] S. M. Gouws, M. Carrier, J. R. Bunt, and H. W. J. P. Neomagus, “Co-pyrolysis of coal and raw/torrefied biomass: A review on chemistry, kinetics and implementation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, p. 110189, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2020.110189.
- [27] A. V. Bridgwater, “Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass,” *Chem. Eng. J.*, vol. 91, no. 2–3, pp. 87–102, Mar. 2003, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00142-0.
- [28] Qurat-ul-Ain, M. Shafiq, S. C. Capareda, and Firdaus-e-Bareen, “Effect of different temperatures on the properties of pyrolysis products of *Parthenium hysterophorus*,” *J. Saudi Chem. Soc.*, vol. 25, no. 3, p. 101197, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.JSCS.2021.101197.