

Mekanisme Produksi Hidrogen dari Berbagai Jenis Biomassa Melalui Proses Pirolisis

Widya Wijayanti^{a,1}, Mega Nur Sasongko^a, Lilis Yulianti^a, Musyaroh^b, Bagus Putra Pratama^c

^aDepartemen Teknik Mesin, Universitas Brawijaya, Malang, 65145

^bJurusan Teknik Mesin, UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

^cDepartemen Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 16424

¹ewidya_dinata@ub.ac.id

ABSTRACT

The continuously increasing energy demand and concerns about the environmental impact of fossil fuel usage have driven the search for cleaner alternative energy sources. Hydrogen, as one of the clean energy options, is gaining increasing attention. One promising method for hydrogen production is biomass pyrolysis. Biomass pyrolysis is the process of heating biomass in the absence of oxygen, resulting in the production of liquid, solid, and gas products that contain hydrogen. This study aims to deepen the understanding of the mechanisms that occur during the biomass pyrolysis process as well as the factors that influence hydrogen production. The research findings indicate that the heating temperature, the residence time of biomass particles in the reactor, and the type of biomass used are key factors affecting hydrogen yield. High temperatures accelerate chemical reactions and enhance hydrogen formation, while sufficient residence time allows for optimal secondary reactions. Additionally, the chemical composition of biomass, particularly the cellulose and lignin content, plays a crucial role. Biomass that is rich in cellulose generally produces higher amounts of hydrogen. The research was conducted in a fixed-bed pyrolysis reactor, varying the pyrolysis temperature between 250°C and 800°C, with residence times up to 150 minutes, and utilizing different types of biomass, including bamboo, mahogany wood, and bark. This study not only explains the reaction mechanisms occurring during biomass pyrolysis, but also predicts the outcomes and compares them with previous research. Therefore, this research is expected to contribute to the development of more efficient and sustainable hydrogen production technologies from biomass, thus supporting the transition towards clean energy.

Keywords: mechanism, Hydrogen, biomass, pyrolysis

Received 2 September 2024; **Presented** 2 Oktober 2024; **Publication** 20 Januari 2025

DOI: 10.71452/590654

PENDAHULUAN

Lanskap energi global mengalami transformasi yang signifikan yang disebabkan oleh kebutuhan untuk mengatasi keterbatasan cadangan bahan bakar fosil. Situasi ini menimbulkan kekhawatiran lingkungan mengenai ketersediaannya. Akibatnya, ada peningkatan permintaan secara global untuk inovasi dan penggunaan sumber energi alternatif, dengan perhatian khusus pada opsi energi terbarukan dan berkelanjutan, yang dapat memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat sembari meminimalkan dampak lingkungan.

Hidrogen telah diakui secara luas sebagai sumber energi yang menjanjikan karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, serta pembakaran yang bersih dan efisien. Selain itu, Hidrogen memiliki potensi untuk diproduksi dari sumber terbarukan seperti biomassa, energi surya, dan tenaga angin. Ketertarikan yang terus berkembang terhadap Hidrogen ini didorong oleh kebutuhan untuk mengembangkan solusi energi berkelanjutan yang dapat mengatasi tantangan perubahan iklim, menjaga keamanan energi, serta mengatasi penurunan cadangan bahan bakar fosil (Turner et al., 2008).

Salah satu metode untuk memproduksi Hidrogen yang terbarukan adalah dengan pirolisis biomassa. Biomassa, yang diperoleh dari berbagai bahan organik seperti residu pertanian, limbah kehutanan, dan limbah padat perkotaan, menawarkan bahan baku yang berkelanjutan dan tersedia secara luas untuk produksi Hidrogen ini (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Proses pirolisis melibatkan dekomposisi termal biomassa tanpa kehadiran oksigen, menghasilkan berbagai produk berharga termasuk hidrogen, syngas, dan bio-oil.

Penelitian ini bertujuan memberikan pemahaman dalam pengembangan teknologi pirolisis biomassa untuk meningkatkan produksi Hidrogen secara efisien, sesuai dengan aplikasi energi berkelanjutan masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat membantu mendefinisikan ulang strategi optimum untuk produksi Hidrogen dari berbagai jenis biomassa, dan menghasilkan data empiris yang dapat digunakan sebagai dasar perbaikan sistem pirolisis di masa mendatang. Oleh karena itu, melalui penelitian ini akan dijelaskan eksplorasi mekanisme mendasar dalam produksi Hidrogen melalui proses pirolisis biomassa, serta menunjukkan faktor-faktor penting

yang dapat mempengaruhi efisiensi dan optimalisasi teknologi ini.

Secara keseluruhan, peningkatan produksi Hidrogen dari pirolisis biomassa memiliki potensi besar untuk menyumbang pada penyediaan energi terbarukan yang berkelanjutan. Ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil tetapi juga memberikan solusi praktis untuk pemanfaatan limbah organik dan biomassa berlimpah yang seringkali dianggap sebagai produk sampingan yang kurang dimanfaatkan. Dengan memanfaatkan sumber daya ini secara efisien, kita dapat mencapai manfaat lingkungan dan ekonomi yang signifikan, yang sesuai dengan tujuan global untuk keberlanjutan energi dan mitigasi perubahan iklim

REVIEW LITERATUR

Mekanisme Produksi Hidrogen dari Pirolisis Biomassa

Mekanisme produksi Hidrogen dari pirolisis biomassa adalah proses yang kompleks dan beragam, yang melibatkan serangkaian fenomena kimia dan fisika yang saling berhubungan. Metode untuk memproduksi Hidrogen pada penelitian ini adalah pirolisis, yaitu adanya proses dekomposisi termal dari bahan baku biomassa dalam kondisi tanpa Oksigen, yang mengarah pada pelepasan berbagai senyawa volatil dan pembentukan residu padat berupa arang (Andrew et al., 2016).

Langkah-langkah utama dalam mekanisme produksi hidrogen dari pirolisis biomassa dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dekomposisi termal biomassa selama pirolisis melibatkan pemecahan komponen utama biomassa, seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, menjadi fragmen molekul yang lebih kecil (Kalamaras & Efstathiou, 2013). Proses ini dipengaruhi oleh suhu, tekanan, dan residence time pirolisis, yang dapat dioptimalkan untuk memaksimalkan produksi Hidrogen.
2. Senyawa gas yang dilepaskan selama pirolisis, termasuk H₂, CO, CO₂, dan berbagai hidrokarbon, mengalami serangkaian reaksi sekunder, seperti steam reforming, pergeseran gas-air, dan reaksi metanasi. Reaksi-reaksi ini penting untuk meningkatkan H₂, karena dapat mengubah komponen non-Hidrogen menjadi Hidrogen tambahan.
3. Residu arang (char) yang tertinggal setelah pirolisis juga dapat menyumbang pada produksi gas Hidrogen melalui gasifikasi uap, di mana arang bereaksi dengan uap super panas untuk

menghasilkan syngas kaya Hidrogen (Turner et al., 2008) (Andrew et al., 2016).

4. Komposisi dan sifat dari bahan baku biomassa memegang peranan signifikan dalam mekanisme pirolisis dan hasil hidrogen yang dihasilkan. Sumber biomassa yang berbeda, seperti residu pertanian, biomassa kayu, dan tanaman energi, memiliki proporsi selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang bervariasi, yang dapat mempengaruhi distribusi produk volatil dan efisiensi keseluruhan produksi hidrogen.

Parameter-Parameter Proses dan Pengaruhnya Terhadap Produksi Hidrogen

Produk H₂ dari pirolisis biomassa sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter proses, termasuk temperatur, tekanan, waktu tinggal, dan karakteristik bahan baku biomassa (Turner et al., 2008) (Demirbas, 2006) (Anghel et al., 2010).

1. Temperatur pirolisis adalah parameter penting yang secara signifikan mempengaruhi hasil hidrogen. Suhu yang lebih tinggi, biasanya dalam kisaran 800°C hingga 900°C, mendukung produksi senyawa volatil kaya Hidrogen dan dapat meningkatkan gasifikasi uap dari residu arang (Turner et al., 2008) (Anghel et al., 2010) (Andrew et al., 2016).
2. Tekanan proses pirolisis juga dapat mempengaruhi produksi Hidrogen. Tekanan yang meningkat dapat mendorong pemecahan hidrokarbon yang lebih berat, sehingga meningkatkan produksi gas yang lebih ringan, termasuk hidrogen (Mibei et al., 2023).
3. Durasi proses pirolisis, atau waktu tinggal (residence time), adalah faktor penting lainnya. Waktu tinggal yang lebih lama dapat meningkatkan reaksi sekunder, seperti steam reforming dan pergeseran gas-air, yang dapat meningkatkan Hidrogen secara keseluruhan.
4. Komposisi dan sifat dari bahan baku biomassa; selulosa, hemiselulosa, dan lignin, dapat sangat mempengaruhi mekanisme pirolisis dan produksi hidrogen yang dihasilkan.

Optimisasi parameter proses ini sangat penting untuk memaksimalkan hasil hidrogen dari berbagai biomassa dalam pirolisis. Oleh karena itu, penelitian ini akan mengamati pengaruh berbagai jenis biomassa pada berbagai temperatur pirolisis dalam menghasilkan Hidrogen.

Kandungan Biomasa

Tabel 1 menunjukkan presentase komposisi kimia dari tiga jenis biomassa: bambu, kayu mahoni, dan kulit kayu (bark). Komponen kimia utama yang tercantum

adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Ketiga komponen ini merupakan polimer organik yang membentuk dinding sel tumbuhan dan berperan penting dalam struktur dan sifat biomassa.

Selulosa merupakan polimer linier glukosa yang memberikan kekuatan dan kekakuan pada dinding sel tumbuhan. Hemiselulosa merupakan polimer heterogen yang terdiri dari berbagai jenis gula sederhana. Hemiselulosa memberikan fleksibilitas pada dinding sel tumbuhan. Sedangkan lignin merupakan polimer kompleks yang memberikan kekakuan dan ketahanan terhadap degradasi biologis pada dinding sel tumbuhan. Lignin berperan penting dalam mengikat serat selulosa dan hemiselulosa.

Tabel 1. Kandungan biomassa

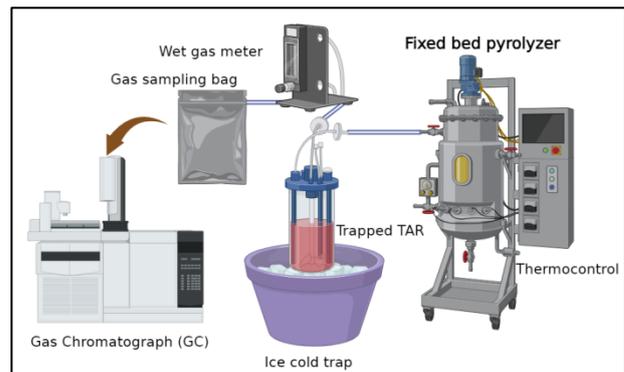
Biomassa	(% berat)			Sumber Referensi
	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	
Bambu	40-50	20-25	20-30	Scurlock et al., 2000; Li et al. 2007
Kayu Mahoni	38-45	15-22	25-30	Martawijaya et al., 2005; Chung et al., 2017
Bark	15-30	10-20	40-45	Fengel and Wegener, 1983; Côté, 1983

Pada tabel tersebut dapat dilihat bahwa bambu memiliki kandungan selulosa yang cukup tinggi, diikuti oleh lignin dan hemiselulosa. Kayu mahoni mempunyai kandungan selulosa yang sedikit lebih rendah dibandingkan bambu, namun masih cukup tinggi. Kandungan lignin pada kayu mahoni relatif tinggi, yang dapat mempengaruhi sifat pemrosesannya. Adapun bark memiliki kandungan lignin yang jauh lebih tinggi dibandingkan selulosa dan hemiselulosa. Kandungan lignin yang tinggi ini membuat dekomposisi kulit kayu lebih sulit terjadi dan sering digunakan sebagai bahan bakar atau sumber energi (kandungan C lebih tinggi)

METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk memahami dan menginvestigasi produksi hidrogen dari pirolisis biomassa menggunakan jenis piroliser fixed bed. Penelitian ini menerapkan pendekatan eksperimental dengan fokus pada analisis gas produk dari proses pirolisis biomassa pada berbagai kondisi pirolisis. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan piroliser tipe fixed bed. Fixed bed piroliser dipilih karena kelebihanannya dalam menampung beragam jenis feedstock dan kemampuannya menjaga distribusi suhu yang konsisten di seluruh material biomassa. Tiga jenis feedstock biomassa yang digunakan adalah bambu, kayu mahoni, dan kulit kayu (bark). Feedstock ini dipilih berdasarkan perbedaan komposisi kimianya, terutama dalam kandungan

selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang dapat mempengaruhi hasil pirolisis. Selanjutnya, proses pirolisis dilakukan pada rentang suhu 250°C hingga 800°C. Pemilihan rentang suhu ini didasarkan pada literatur sebelumnya yang menunjukkan bahwa temperatur yang lebih tinggi cenderung meningkatkan produksi Hidrogen melalui peningkatan reaksi sekunder seperti steam reforming dan pergeseran gas-air. Setiap eksperimen memiliki durasi pirolisis tetap selama 150 menit, yang memberikan kesempatan untuk mengeksplorasi bagaimana waktu tinggal dapat mempengaruhi hasil gas yang diproduksi.



Gambar 1. Skema alat penelitian

Feedstock biomassa, sebelum dimasukkan ke dalam piroliser, terlebih dahulu dikondisikan untuk memastikan kadar air yang konsisten melalui pengeringan pada suhu 105°C selama 24 jam. Selanjutnya, biomassa dimasukkan ke dalam reaktor fixed bed yang sudah terhubung dengan sistem pemanas yang dapat diatur untuk mencapai suhu yang diinginkan. Suhu reaktor dimonitor dan dikendalikan untuk memastikan kondisi pirolisis yang konsisten. Sistem piroliser dilengkapi dengan flow meter (gas wet meter) untuk mengukur laju alir gas yang keluar dari reaktor. Laju aliran ini dilakukan untuk menghitung volume gas yang dihasilkan selama eksperimen, sehingga konsentrasi gas Hidrogen dan gas penyerta lain terhadap konsentrasi total gas yang dihasilkan dapat dihitung.

Setelah proses pirolisis selesai, gas hasil yang keluar dari piroliser ditangkap dan dianalisis dengan menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). GC-MS memungkinkan identifikasi dan kuantifikasi komponen gas utama seperti Hidrogen (H₂), Karbon Dioksida (CO₂), Karbon Monoksida (CO), Nitrogen (N₂), dan Metana (CH₄). Analisis ini dapat memberikan profil komposisi gas yang dihasilkan, membantu dalam memahami efisiensi konversi dari biomassa menjadi produk gas.

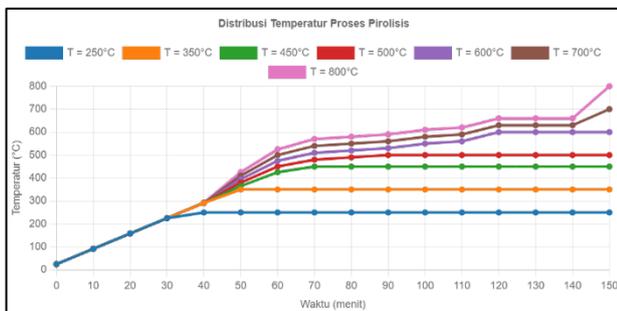
Perhitungan dan Analisis Data

Pengukuran untuk seluruh konsentrasi gas hasil dilakukan dengan mengacu pada prinsip gas ideal, untuk menghitung volumetrik setiap komponen gas berdasarkan temperatur yang diketahui. Gas ideal digunakan sebagai asumsi dasar karena kondisi eksperimental berada di bawah tekanan yang relatif rendah, sehingga persamaan gas ideal dapat dilakukan untuk perhitungan awal. Gas-gas yang dihasilkan, dihitung persentasenya terhadap total volume gas yang dihasilkan. Setiap gas yang terukur oleh GC-MS dikorelasikan dengan kondisi penelitian yang digunakan, memungkinkan analisis menyeluruh mengenai pengaruh setiap parameter proses terhadap hasil pirolisis.

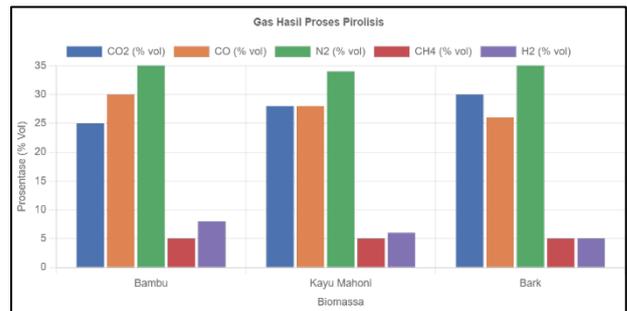
Hasil eksperimen kemudian dianalisis untuk menentukan pengaturan optimal dari suhu dan waktu pirolisis untuk memaksimalkan produksi Hidrogen yang menjadi fokus penelitian ini. Penelitian ini juga akan mengkaji perbedaan produk hasil pirolisis gas Hidrogen antara bambu, mahoni, dan kulit kayu, dan kontribusi masing-masing komponen biomassa dalam mengoptimalkan proses pirolisis

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dihasilkan grafik yang menunjukkan perubahan temperatur selama proses pirolisis, seperti terlihat pada Gambar 2. Selain itu, penelitian ini juga mengidentifikasi jenis-jenis gas yang dihasilkan dari pirolisis berbagai biomassa, yang ditampilkan pada Gambar 3. Karena fokus utamanya adalah gas Hidrogen, analisis lebih mendalam mengenai perolehan gas Hidrogen pada berbagai temperatur pirolisis akan dijelaskan pada Gambar 4.



Gambar 2. Perubahan temperatur pirolisis selama proses pada T = 250°C – 800°C



Gambar 3. Produk gas yang dihasilkan untuk jenis biomassa yang berbeda pada T = 800°C

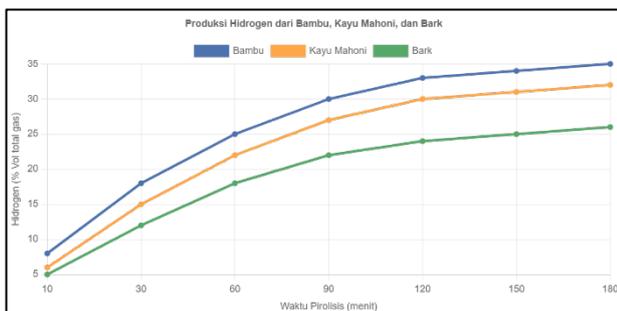
Gambar 2 menunjukkan perilaku termal biomassa selama proses pirolisis. Grafik tersebut menggambarkan profil temperatur selama proses pirolisis pada berbagai temperatur pirolisis, dengan tujuh kurva mewakili suhu akhir dari 250°C hingga 800°C. Temperatur meningkat secara bertahap hingga mencapai suhu akhir yang ditentukan. Pada awal proses (0-40 menit), terjadi peningkatan suhu yang lambat, menunjukkan tahap pemanasan awal dan kemungkinan reaksi endotermis dalam biomassa. Setelah titik tertentu, laju peningkatan temperatur meningkat, menunjukkan dominasi reaksi eksotermis. Setelah temperatur akhir tercapai, temperatur biomassa stabil atau sedikit menurun, menandakan sebagian besar reaksi pirolisis telah selesai. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur akhir, semakin cepat biomassa mencapai temperatur maksimum. Proses pirolisis dapat dibagi menjadi tahap pemanasan awal, reaksi aktif, dan pendinginan, dengan profil temperatur yang kompleks menandakan adanya berbagai reaksi kimia simultan selama pirolisis.

Gambar 3 menunjukkan hasil dari proses pirolisis pada tiga jenis bahan biomassa: Bambu, Kayu Mahoni, dan Bark. Bar chart tersebut menggambarkan komposisi persentase (% Vol) dari lima gas yang dihasilkan dari proses pirolisis, yaitu CO₂, CO, N₂, CH₄, dan H₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa prosentase CO₂ tertinggi didapatkan pada Bambu dan terendah pada Kayu Mahoni, dengan Bark menempati posisi tengah. Sedangkan untuk CO, prosentase hasilnya relatif sama di semua jenis biomassa, meskipun sedikit lebih tinggi pada Kayu Mahoni dan Bark dibandingkan dengan Bambu. Gas N₂ memiliki prosentase tertinggi di semua produk gas, terutama pada Bark, kemudian Bambu, dan Kayu Mahoni. Hal ini disebabkan input N₂ sebagai gas inert di awal proses pirolisis. Untuk CH₄, persentasenya jauh lebih rendah dibandingkan dengan CO₂, CO, dan N₂, dan besar produknya hampir sama di semua jenis biomassa. H₂ didapatkan dalam jumlah kecil dibanding produk gas lain, sementara itu, jumlah

prosentase H₂ sedikit lebih tinggi di kayu mahoni dibandingkan bambu dan bark.

Korelasi antara Distribusi Temperatur dan Komposisi Gas Hasil Pirolisis

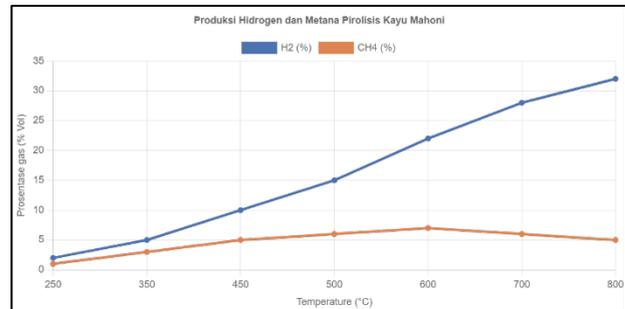
Korelasi antara distribusi temperatur dan komposisi gas hasil pirolisis menggambarkan bagaimana perubahan temperatur mempengaruhi hasil gas yang dihasilkan. Gambar 2 menunjukkan bahwa saat temperatur meningkat dan stabil pada berbagai temperatur pirolisis (250°C hingga 800°C), dekomposisi biomassa yang lebih dalam terjadi pada temperatur tinggi, menghasilkan gas dengan kandungan karbon yang lebih tinggi seperti CO dan CH₄, serta mengurangi CO₂ dan N₂. Gambar 3 membandingkan jenis gas yang dihasilkan (CO₂, CO, N₂, CH₄, H₂) dari tiga biomassa: bambu, kayu mahoni, dan bark, yang berbeda akibat temperatur, kondisi pirolisis, dan sifat biomassa. Pada temperatur rendah (250°C - 350°C), lebih banyak CO₂ dan N₂ yang dihasilkan, sedangkan pada temperatur tinggi (600°C - 700°C), produksi CO, CH₄, dan H₂ meningkat. Perbedaan ini juga terlihat di jenis biomassa; Bambu cenderung menghasilkan lebih banyak CO₂, sementara Kayu Mahoni dan Bark menunjukkan keseimbangan antara CO₂ dan CO. Pada temperatur stabil dan rendah, CO₂ dan N₂ dominan, sedangkan pada temperatur tinggi hingga 700°C, peningkatan CO, CH₄, dan H₂ terlihat, mengkonfirmasi bahwa peningkatan temperatur berkorelasi dengan perubahan jenis gas yang dihasilkan.



Gambar 4. Produksi gas H₂ pada T = 800°C

Grafik pada Gambar 4 menggambarkan produksi gas Hidrogen dari tiga sumber biomassa yang berbeda; bambu, kayu mahoni, dan kulit kayu yang menunjukkan produksi Hidrogen dalam prosentase total massa biomassa. Dari ketiga sumber biomassa yang diteliti, hasil perolehan H₂ menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam hasil hidrogen pada fase awal proses pirolisis, yang mengindikasikan bahwa sebagian besar Hidrogen dilepaskan secara cepat saat biomassa dipanaskan. Secara konsisten, bambu menghasilkan Hidrogen tertinggi sepanjang proses pirolisis yang menegaskan potensinya sebagai

sumber yang menjanjikan untuk perolehan bahan bakar. Sebaliknya, kayu mahoni dan kulit kayu menghasilkan Hidrogen dalam jumlah yang lebih rendah, yang mungkin disebabkan sulitnya penguraian H₂ dari biomassa. Seiring dengan bertambahnya waktu pirolisis, Hidrogen cenderung semakin meningkat. Berdasarkan data ini, bambu merupakan sumber biomassa yang paling efisien untuk produksi Hidrogen dibandingkan dengan kayu mahoni dan bark



Gambar 5. Produksi H₂ dan CH₄ pada Kayu Mahoni

Grafik pada Gambar 5 menunjukkan produksi Hidrogen (H₂) dan Metana (CH₄) dari kayu mahoni selama proses pirolisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan temperatur pirolisis, produksi hidrogen meningkat dengan cepat, dengan puncak tertinggi dicapai pada temperatur pirolisis maksimum. Sementara itu, produksi Metana mengalami peningkatan hingga mencapai tingkat tertinggi pada temperatur 600°C, setelah itu mengalami penurunan. Penurunan ini disebabkan oleh penguraian metana menjadi prekursor pembentukan hidrogen, yang menyebabkan peningkatan produksi Hidrogen pada temperatur tinggi. Oleh karena itu, diperlukan suhu tinggi untuk meningkatkan produksi hidrogen.

Mekanisme pembentukan Hidrogen pada biomassa yang berbeda

Berdasarkan hasil penelitian ini ada beberapa parameter yang sangat mempengaruhi pembentukan Hidrogen. Dari parameter-parameter tersebut dapat diprediksi bagaimana mekanisme pembentukan Hidrogen ini. Namun, masih diperlukan analisis dan penguatan mekanisme pembentukan ini dalam memvalidasi hasil yang diperoleh dalam penelitian ini yang melibatkan pertimbangan pengaruh panas dan penguraian/dekomposisi biomassa menjadi gas Hidrogen bahkan menjadi gas-gas penyerta lain.

Temperatur pirolisis adalah parameter paling signifikan dalam menentukan hasil produksi Hidrogen. Peningkatan temperatur, terutama dalam kisaran 700°C - 800°C, memiliki dampak yang substansial terhadap peningkatan hasil Hidrogen. Pada suhu 800°C, hasil hidrogen mencapai sekitar 20% - 35%

dari total komposisi gas, dibandingkan hanya 5% - 10% pada suhu 250°C. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme utama, yaitu:

1. Peningkatan laju reaksi

Pada temperatur tinggi, energi kinetik molekul meningkat secara signifikan. Hal ini menyebabkan molekul-molekul dalam biomassa menjadi lebih reaktif, mempercepat laju reaksi dekomposisi termal yang menghasilkan Hidrogen. Selama pirolisis, komponen utama biomassa seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin mengalami pemecahan struktur molekul yang cepat dan ekstensif.

2. Depolimerisasi termal lanjut

Pada temperatur tinggi, terjadi pemecahan lebih lanjut dari rantai polimer kompleks yang terdapat pada struktur selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Proses depolimerisasi ini melepaskan molekul-molekul yang lebih kecil, banyak diantaranya adalah prekursor Hidrogen atau dapat langsung berupa unsur Hidrogen. Dengan kata lain, semakin tinggi temperatur, semakin besar potensi biomassa untuk menghasilkan gas-gas volatil yang kaya Hidrogen.

3. Reaksi sekunder penghasil Hidrogen

Suhu tinggi juga mendorong terjadinya reaksi sekunder yang esensial untuk meningkatkan hasil hidrogen. Reaksi seperti steam reforming, pergeseran gas-air (water-gas shift), dan cracking termal dari senyawa hidrokarbon non-hidrogen secara efektif mengonversi senyawa volatil menjadi hidrogen. Reaksi ini memainkan peran penting dalam memaksimalkan produksi hidrogen, dengan memanfaatkan semua potensi senyawa karbon dan oksigen yang terkandung dalam biomassa.

Parameter yang lain adalah waktu tinggal atau residence time yang lebih lama dalam proses pirolisis juga ditemukan sebagai faktor kritis dalam meningkatkan hasil produksi hidrogen. Memperpanjang waktu tinggal dari 30 menit menjadi 180 menit berkontribusi terhadap peningkatan Hidrogen sebanyak 10%, karena durasi yang lebih lama memungkinkan reaksi sekunder menjadi lebih lengkap. Hal ini disebabkan:

1. Kesempurnaan reaksi sekunder

Residence time yang lebih lama memberikan kesempatan bagi reaksi sekunder seperti steam reforming untuk mencapai tingkat konversi yang lebih tinggi. Reaksi-reaksi tersebut membutuhkan waktu agar sistem mencapai kesetimbangan dan menghasilkan Hidrogen secara maksimal, yang

sulit dicapai dengan waktu pirolisis yang lebih pendek.

2. Minimasi reaksi penghambat

Dengan waktu tinggal yang optimal, terdapat pengurangan dalam potensi terjadinya reaksi penghambat seperti polimerisasi balik atau pembentukan senyawa karbon berat yang dapat mengikat Hidrogen. Pengurangan dalam reaksi penghambat ini memungkinkan H₂ yang lebih murni dan dalam jumlah yang lebih besar.

Parameter berikut yang tidak kalah penting adalah komposisi bahan baku biomassa, terutama kandungan selulosa, memiliki peran penting dalam menentukan produksi Hidrogen. Dalam studi ini, bambu menunjukkan hasil produksi hidrogen tertinggi dibandingkan dengan kayu mahoni dan bark. Beberapa faktor menjelaskan potensi bambu sebagai biomassa penghasil hidrogen yang unggul:

1. Kandungan selulosa tinggi dan lignin rendah

Bambu memiliki kandungan selulosa yang lebih tinggi dibandingkan mahoni dan bark. Selulosa merupakan komponen utama yang menghasilkan Hidrogen selama pirolisis karena struktur kimianya yang kaya akan atom Hidrogen. Kehadiran selulosa dalam jumlah besar meningkatkan potensi bambu untuk mengoptimalkan produksi hidrogen. Sedangkan kandungan lignin dalam biomassa, yang merupakan komponen kompleks dengan struktur yang kaku, cenderung menghasilkan lebih sedikit hidrogen dan lebih banyak produk sampingan seperti char (arang).

2. Anatomi struktur biomassa

Struktur anatomi bambu yang lebih sederhana dan seragam memungkinkan perpindahan panas yang lebih efisien selama proses pirolisis. Perpindahan panas yang efektif ini berkontribusi pada dekomposisi termal yang lebih cepat dan lebih lengkap, yang hasilnya adalah produksi hidrogen yang lebih tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan mengenai mekanisme pembentukan Hidrogen yang dipengaruhi oleh temperatur pirolisis dan jenis biomassa yang berbeda. Beberapa simpulan penting yang didapatkan adalah :

1. Peningkatan temperatur pirolisis, terutama dalam kisaran 700°C hingga 800°C, berkontribusi signifikan terhadap produksi H₂, yang dapat mencapai 20% hingga 35% dari total komposisi gas, di mana temperatur yang lebih tinggi juga menghasilkan lebih banyak gas dengan kandungan

karbon seperti CO dan CH₄, sekaligus mengurangi proporsi CO₂ dan N₂.

2. Bambu terbukti sebagai sumber biomassa paling efisien untuk produksi H₂. Kandungan selulosa yang tinggi dan rendahnya kandungan lignin pada bambu mendukung produksi H₂ yang optimal selama proses pirolisis.
3. Perpanjangan residence time dalam proses pirolisis berkontribusi pada peningkatan produksi H₂, karena residence time yang lebih lama memungkinkan reaksi sekunder, seperti steam reforming, untuk mencapai tingkat konversi yang lebih tinggi.
4. Peningkatan temperatur mendorong laju reaksi dan depolimerisasi termal, yang menghasilkan molekul-molekul lebih kecil sebagai prekursor H₂, sementara terjadinya reaksi sekunder pada temperatur tinggi meningkatkan konversi senyawa menjadi H₂.
5. Optimasi kondisi pirolisis, termasuk pemilihan biomassa yang tepat, kontrol temperatur, dan penetapan waktu, dapat memaksimalkan produksi H₂, yang menunjukkan potensi signifikan untuk pengembangan sumber energi terbarukan yang berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Universitas Brawijaya melalui Fakultas Teknik atas dukungan dana penelitian yang diberikan melalui Hibah Profesor, Nomor: 09/UN10.F07/PN/2024. Kami juga ingin menyampaikan penghargaan kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengambilan data selama penelitian ini yang sangat bernilai bagi keberhasilan penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Widya Wijayanti: Memimpin perancangan dan perencanaan penelitian, mengawasi eksperimen pirolisis, serta menyusun dan menulis bagian utama manuskrip.

Mega Nur Sasongko: Menganalisis data eksperimen terkait produksi Hidrogen, menganalisis dan membahas hasil, serta bertanggung jawab atas revisi dan penyuntingan manuskrip akhir.

Lilis Yuliati: Mengumpulkan dan mengolah data awal, aktif dalam eksperimen laboratorium dan pencatatan hasil, serta membantu penyusunan metodologi penelitian.

Musyaroh dan Bagus Putra Pratama: Mengelola aspek teknis penggunaan peralatan laboratorium,

menganalisis komposisi gas menggunakan GC-MS, dan menyediakan dukungan teknis serta logistik selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Andrew, D. Gokak, P. K. Sharma, and S. Gupta, "Practical achievements on biomass steam gasification in a rotary tubular coiled-downdraft reactor," SAGE Publishing, vol. 34, no. 12, pp. 1268-1274, Aug. 2016. doi: 10.1177/0734242x16659352.
- [2] M. Anghel, V. Niculescu, I. Ștefănescu, and R. Tamaian, "Green technologies for sustainable hydrogen production. An impact study," Nov. 2010. doi: 10.1109/icbee.2010.5649239.
- [3] M. F. Demirbas, "Technological Options for Producing Hydrogen from Renewable Resources," Taylor & Francis, vol. 28, no. 13, pp. 1215-1223, Sep. 2006. doi: 10.1080/009083190910488.
- [4] P. Giudicianni, G. Cardone, and R. Ragucci, "Cellulose, hemicellulose and lignin slow steam pyrolysis: Thermal decomposition of biomass components mixtures," Elsevier BV, vol. 100, pp. 213-222, Mar. 2013. doi: 10.1016/j.jaap.2012.12.026.
- [5] C. M. Kalamaras and A. M. Efstathiou, "Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments," Hindawi Publishing Corporation, vol. 2013, pp. 1-9, Jun. 2013. doi: 10.1155/2013/690627.
- [6] Z. C. Mibei, A. Kumar, and S. M. Talai, "Catalytic Pyrolysis of Plastic Waste to Liquid Fuel Using Local Clay Catalyst," Hindawi Publishing Corporation, vol. 2023, pp. 1-11, Jun. 2023. doi: 10.1155/2023/7862293.
- [7] J. A. Turner, G. Sverdrup, M. Mann, P. Maness, B. Kroposki, M. L. Ghirardi, R. J. Evans, and D. Blake, "Renewable hydrogen production," Wiley, vol. 32, no. 5, pp. 379-407, Jan. 2008. doi: 10.1002/er.1372.
- [8] J. M. O. Scurlock, G. P. Asner, and S. T. Gower, "Global Leaf Area Index Data from Field Measurements, 1932–2000," ORNL Distributed Active Archive Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, USA, 2000.
- [9] X. Li, Z. Zhang, J. C. Ritchie, and G. W. McCarty, "Automated segmentation and object-based

classification for land-cover mapping and change analysis," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007.

- [10] Martawijaya, K. Kadir, S. A. Prawira, and Y. I. Mandang, *Atlas Kayu Indonesia, Forest Research and Development Center, Indonesia*, 2005.
- [11] H. Chung, H. Muraoka, M. Nakamura, and S. Han, "The effects of global climate change on cold regions ecosystems," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017.
- [12] D. Fengel and G. Wegener, *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*, Berlin: Walter de Gruyter, 1983.
- [13] W. A. Côté, *Tree Chemistry and Wood Technology: Pulp & Paper Manufacture, U.S.A.: Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI and CPPA*, 1983