

ANALISIS KARAKTERISRIK KARBON TONGKOL JAGUNG SEBAGAI PENDUKUNG KATALIS FUEL CELL DENGAN MENGGUNAKAN REAKTOR PIROLISIS TIPE FIXED BED

1,2,3,4,5) Program Studi Teknik
Mesin, Universitas Tidar,
Kota Magelang, Indonesia

Danu Prasetyo^{1*}, Lutfi Dwi H²), Raka Mahendra S³),
M. Fendy Kusuma H.S⁴), Sigit Mujiarto⁵)

Corresponding email^{1*)} :
danuprasetya110@gmail.com

Received: 08-05-2025
Accepted: 20-06-2025
Published: 28-12-2025

©2025 Politala Press.
All Rights Reserved.

Abstrak. Energi merupakan kebutuhan dasar yang dapat mendukung banyak hal. Energi fosil menyumbang 80% kebutuhan dunia, energi ini menimbulkan dampak lingkungan. Salah satu energi baru terbarukan (EBT) yaitu fuel cell, dalam pengembangannya memiliki hambatan dimana katalisnya berharga mahal. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik karbon aktif hasil pirolisis sebagai karbon pendukung katalis fuel cell. limbah tongkol jagung dipirolysi menjadi karbon aktif dengan dipengaruhi oleh suhu dan waktu penahanan. Variasi suhu penelitian yaitu 400°C dan 500°C dengan waktu tinggal selama 60 menit. Karbon yang dihasilkan diuji proximate untuk mengetahui kadar air, kadar abu, zat volatil, dan kadar karbon terikatnya. Berdasarkan pengujian proximate, variasi suhu 400°C menghasilkan kadar air tertinggi diangka 8,8 % namun masih memenuhi SNI No.06-3730-1995. Variasi suhu 500°C menghasilkan karbon terikat tertinggi di angka 74,35% memenuhi SNI No.06-3730-1995 sehingga berpotensi sebagai pendukung katalis fuel cell. Kata Kunci: Katalis fuel cell, pirolisis, karbon aktif, proximate, SNI No.06-3730-1995.

Abstract. Energy is a basic need that can support many things. Fossil energy accounts for 80% of the world's needs, this energy causes environmental impacts. One of the new renewable energies (EBT) is fuel cell, in its development has an obstacle where the catalyst is expensive. The purpose of this study is to determine the characteristics of activated carbon from pyrolysis as carbon supporting fuel cell catalysts. Corn cob waste is pyrolyzed into activated carbon by being influenced by temperature and holding time. The temperature variations were 400 °C and 500 °C with a residence time of 60 minutes. The carbon produced was tested proximate to determine the water content, ash content, volatile substances, and bound carbon content. Based on proximate testing, the 400°C-temperature variation produces the highest moisture content at 8.8% but still meets SNI No.06-3730-1995. The temperature variation of 500 °C produces the highest bound carbon at 74.35% which meets SNI No.06-3730-1995 so that it has the potential to support fuel cell catalysts.

Keywords: Fuel cell catalyst, pyrolysis, activated carbon, proximate, SNI No.06-3730-1995.

To cite this article: <https://doi.org/10.34128/je.v12i2.366>

1. Pendahuluan

Silakan Energi merupakan salah satu kebutuhan dasar yang dapat mendukung banyak hal yang dapat dilakukan oleh masyarakat Indonesia bahkan di seluruh dunia. Bertentangan dengan keterbatasan sumber energi fosil yang semakin menipis, kebutuhan energi akan terus meningkat setiap tahunnya. Energi fosil (batubara, gas bumi, dan minyak bumi) masih menjadi sumber utama energi di Indonesia. Saat ini bahan bakar fosil menyumbang kurang lebih 80% kebutuhan dunia, penggunaan yang terus menerus ini menghasilkan emisi gas

berbahaya ke atmosfer yang akan mempengaruhi kondisi bumi [1]. Dampak lingkungan dari penggunaan bahan bakar fosil inilah yang mendorong untuk pengembangan energi baru terbarukan. Energi baru dan terbarukan (EBT) masih menjadi energi alternatif. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia mengatakan bahwa Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar, termasuk mini/micro hydro 450 MW, biomassa 50 GW, energi surya 4,80 kilowatt jam per hari, energi angin 3-6 meter per detik, dan energi nuklir 3 GW. Dari berbagai jenis sumber energi baru terbarukan, limbah biomassa memiliki potensi paling besar yaitu 79% dan masih kurang dimanfaatkan [2].

Biomassa merupakan bahan yang didapatkan dari limbah, seperti limbah pertanian, limbah rumah tangga, limbah organik, limbah industri, dan lainnya. Salah satu potensi yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan dari biomassa adalah limbah pertanian jagung. Tanaman jagung (*Zea mays L.*) adalah jenis tumbuhan terpenting kedua di dunia selain gandum dan padi karena produksi dan pemanfaatan jagung yang besar [3]. Pertanian jagung banyak ditemukan hampir diseluruh wilayah daratan Indonesia, tidak terkecuali di Magelang. Menurut data dari Dinas Pertanian dan Pangan Kabupaten Magelang, luas keseluruhan lahan pertanian jagung tahun 2021 sampai dengan 2023 mencapai 11.981 Ha dengan jumlah produksi jagung sebesar 81,727 ton dan memposisikan jagung sebagai tanaman palawija terluas dan hasil yang produksi terbanyak di Magelang. Budidaya pertanian akan menghasilkan limbah, begitu juga budidaya jagung akan menghasilkan limbah berupa tongkol jagung, daun, batang, dan kelobot [4].

Salah satu teknologi yang efektif dalam proses pembakaran biomassa adalah pirolisis [5]. Proses konversi energi secara termokimia (*thermal decomposition*) namun tanpa adanya oksigen merupakan prinsip dari proses pirolisis, hasil akhir yang diperoleh dari proses pirolisis adalah tar, *char* dan gas [6]. Pembakaran pirolisis menghasilkan tiga hasil utama, yaitu berupa arang (*char*), asap cair (*bio-oil*), dan gas. Arang ini adalah bahan bakar dengan kalori tinggi yang bisa digunakan untuk dijadikan karbon aktif [7].

Karbon yang dihasilkan akan digunakan sebagai lapisan partikel katalis pada komponen *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). *Fuel Cell* merupakan alat konversi energi elektrokimia yang dapat digunakan untuk merubah hidrogen dan oksigen menjadi air, ketika bekerja bersamaan akan menghasilkan listrik dan panas [8]. Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah perangkat energi elektrokimia yang mengubah energi kimia bahan bakar (hidrogen) secara langsung menjadi listrik dan panas, dengan air sebagai produk sampingan dari reaksi. Tidak seperti mesin konvensional, sel bahan bakar tidak membakar bahan bakar dan tidak menjalankan piston atau poros, sehingga memiliki lebih sedikit kehilangan efisiensi, emisi rendah, dan tidak memiliki bagian yang bergerak. Sebagai sumber energi terbarukan, sel bahan bakar secara luas dianggap sebagai salah satu sumber energi yang paling menjanjikan karena efisiensi energinya yang tinggi, emisi oksida nitrogen dan sulfur yang sangat rendah, kebisingan yang sangat rendah, serta produksi energinya yang bersih [9]. Sistem ini memiliki kelemahan pada biaya produksi yang mahal, terutama penggunaan logam platina sebagai katalis.

Katalis berbasis karbon yang berasal dari biomassa menunjukkan aktivitas tinggi dan stabilitas awal yang menjanjikan. Karbon yang berasal dari biomassa dinilai efektif untuk mengantikan elektrokatalis tradisional dalam proses elektrooksidasi dan reaksi evolusi hidrogen dan oksigen [10]. Karbon yang dihasilkan dari biomassa ini dapat digunakan sebagai penyangga platinum *fuel cell* dengan tujuan meningkatkan kinerja dan efisiensi reaksi elektrokimia. Pengolahan limbah tongkol jagung melalui pirolisis lambat adalah jenis penelitian yang akan meningkatkan nilai ekonomis limbah tongkol jagung. Berdasarkan uraian-uraian tersebut, maka penelitian ini dilakukan untuk menganalisis bagaimana pengaruh variasi suhu dan pengaruh waktu penahanan terhadap karakteristik karbon aktif yang dihasilkan dari limbah tongkol jagung. Diharapkan hasil penelitian ini dapat digunakan untuk mengoptimalkan pembuatan karbon aktif menggunakan reaktor pirolisis tipe *fixed bed* dengan efisien dan mendukung pengembangan *fuel cell*.

2. Tinjauan Pustaka

Penelitian ini difokuskan pada variasi ukuran bahan dan variasi suhu pirolisis, dan waktu penahanan pada reactor pirolisis tipe *fixed bed* menggunakan spesimen uji limbah tongkol jagung. Metode penelitian dilakukan dengan *eksperimental* melalui pirolisis lambat tipe *reactor fixed bed*. Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah tongkol jagung yang dikeringkan selama 24 jam melalui *drying* dengan suhu 105°C untuk mengurangi kadar air. Dalam setiap pengujian, bahan penelitian sebanyak 50 gram dimasukkan kedalam reaktor pirolisis dengan variasi waktu penahanan 30 menit, 60 menit, dan 90 menit. Variasi suhu yang digunakan yaitu 400°C, 500°C, dan 600°C, serta variasi ukuran antara 1-4 mm. Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan hasil *fixed* karbon tertinggi didapat dari variasi suhu 600°C dengan waktu penahanan 60 menit, sedangkan *fixed* karbon terendah berasal dari variasi suhu 300°C. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, suhu pirolisis dan ukuran sangat berpengaruh terhadap hasil *fixed* karbon yang dihasilkan [11].

Penelitian yang dilakukan oleh [12], menganalisis *thermogravimetry* pada pirolisis limbah pertanian dengan bahan limbah pertanian yang dicampur, yaitu tongkol jagung-grajen, grajen-singkong, tongkol jagung-jerami, singkong-jerami, grajen-sekam, tongkol jagung-sekam, singkong-sekam, jerami-sekam. Menggunakan pirolisis tipe *fixed bed* didapatkan hasil kadar zat terbang/volatile matter pada bahan campuran berkisar antara 44-

64%, semakin banyak arang yang terbentuk maka *volatile matter* yang dihasilkan semakin sedikit dan semakin tinggi kandungan *volatile matter* maka semakin mudah arang menyala.

Penelitian yang dilakukan oleh [13] mengenai pembuatan karbon aktif dengan preparasi bahan tongkol jagung dicuci terlebih dulu untuk menghilangkan kotoran kemudian dikeringkan dibawah sinar matahari selama 8 jam untuk mengurangi kadar air. Tongkol jagung kemudian dipirolysis pada suhu 400°C selama 150 menit lalu di dinginkan pada desikator kemudian diaktivasi menggunakan aktivator belimbing wuluh dengan konsentrasi yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan analisis *proximate*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar air dan kadar abu semakin turun ketika konsentrasi aktivator semakin besar. Hal ini disebabkan konsentrasi aktivator mempengaruhi luas permukaan pori.

3. Metodologi

Proses penelitian dilakukan di laboratorium Program Studi Teknik Mesin (S1), Fakultas Teknik, Universitas Tidar. Pengujian *proximate* dilakukan di laboratorium terpadu Universitas Tidar. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental. Bahan penelitian yaitu limbah tongkol jagung yang dipotong dengan ukuran 5 cm dapat dilihat pada Gambar 1. Proses pirolysis menggunakan variasi temperatur 400°C dan 500°C serta waktu penahanan 60 menit. Bahan penelitian dipirolysis untuk menghasilkan karbon. Karbon yang dihasilkan diuji *proximate* untuk mengetahui jumlah kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon terikatnya menggunakan alat oven dan *furnace*. Standar yang digunakan pada pengujian proximate limbah tongkol jagung adalah SNI No.06-3730-1995, alasan menggunakan standar ini yaitu di indonesia syarat karbon aktif mengacu pada SNI No.06-3730-1995 dengan parameter pengujian sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter standar SNI No.06-3730-1995

Parameter	Nilai
Kadar air/ <i>moisture content</i>	Maksimal 15 %
Zat Volatil/ <i>volatile matter</i>	Maksimal 10%
Kadar abu/ <i>ash content</i>	Maksimal 25%
Karbon terikat/ <i>fixed carbon</i>	Minimal 65%

Standar karbon aktif untuk katalis *fuel cell* menggunakan SNI No.06-3730-1995. Pengujian *proximate* limbah tongkol jagung berujuan untuk mengetahui kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon terikat untuk bisa disebut sebagai karbon aktif. Temperatur pirolysis yang semakin tinggi maka kadar air pada arang aktif semakin sedikit sehingga menghasilkan pori arang yang semakin besar. Kadar air yang rendah menunjukkan semakin banyak rongga dalam pori-pori karbon aktif [14][15][2]. Kandungan ash sangat mempengaruhi kualitas karbon aktif. Kadar ash yang tinggi dapat menutupi pori-pori karbon aktif sehingga akan mengurangi kemampuan penyerapannya [16]. Semakin kecil ukuran pori mengakibatkan luas permukaan karbon aktif berkurang, hal ini berdampak pada kinerja *fuel cell* yang memerlukan luas permukaan karbon yang luas.



Gambar 1. Bentuk dan ukuran bahan

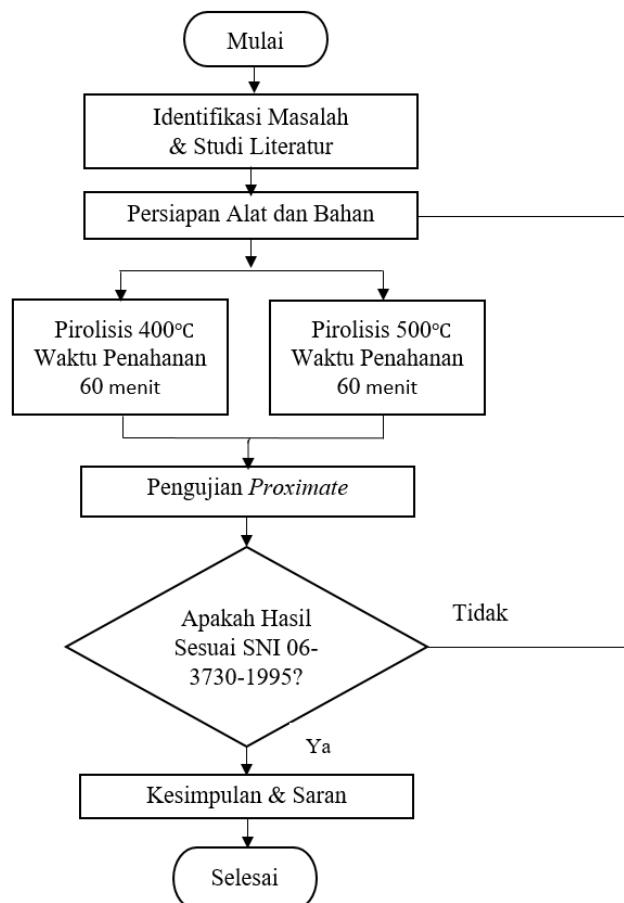
Variabel Penelitian

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian yaitu suhu pirolysis dengan variasi 400°C dan 500°C dengan waktu penahanan selama 60 menit. Variabel terikat dalam penelitian yaitu karbon terikat/*fixed carbon*, *ash content*/kadar abu, *volatile matter*/zat volatil, dan *moisture content*/kadar air. Variabel kontrol penelitian antara lain, bahan penelitian yaitu tongkol jagung dengan ukuran +- 5 cm, gas Nitrogen sebagai gas inert, dan pirolysis yang digunakan merupakan jenis pirolysis *fixed bed*.

Tahap Penelitian

Tahap pertama dalam penelitian yaitu preparasi bahan, tongkol jagung sebelum dipirolysis dipotong-potong dengan ukuran 5 cm kemudian dikeringkan didalam *furnace* dengan suhu 130°C selama 4 jam untuk mengurangi kadar air tongkol jagung sebelum dipirolysis. Tahapan yang kedua yaitu proses pirolysis, proses pirolysis meliputi semua proses yang dilakukan menggunakan alat pirolysis, yaitu memasukkan material biomassa tongkol jagung ke

dalam reaktor, mengalirkan gas nitrogen dengan tekanan 1 Psi ke dalam reaktor sebagai gas *inert*, dan mengoperasikan alat pirolisis dengan variasi suhu 400°C dan 500°C serta waktu penahanan 60 menit. Setelah proses pirolisis selesai, hasil char/arang dikeluarkan dari reaktor dan dimasukkan ke dalam plastik *ziplock* dan di *vacum* agar menjadi hampa udara. Tahap selanjutnya yaitu pengujian *proximate*, pengujian char/arang dilakukan menggunakan uji *proximate* untuk mengetahui kadar air/*moisture content*, zat volatil/*volatile matter*, kadar abu/*ash content*, dan karbon terikat/*fixed carbon*. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Tidar. Lebih lanjut, tahapan penelitian ini disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

Setelah mengetahui hasil pengujian *proximate* maka dilakukan analisis pembahasan hasil yang didapatkan untuk disesuaikan dengan teori-teori yang ada. Hasil pengujian *proximate* disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Proximate*

No.	Variasi	Kadar Air	Kadar Abu	Zat Volatile	Karbon Terikat
1.	400°C 60 mnt	8,8	8,12	13,5	69,58
2.	500°C 60 mnt	7,35	11,8	6,5	74,35

Pengaruh Temperatur Pirolisis dan Waktu Penahanan terhadap Kadar Air Karbon Tongkol Jagung

Karbon aktif cenderung menurun seiring dengan meningkatnya suhu pirolisis, hal ini menunjukkan suhu pirolisis sangat mempengaruhi kadar air. Waktu penahanan berbanding terbalik dengan kadar air. Hal ini terjadi karena dengan semakin meningkatnya waktu penahanan (*holding time*) maka gas *humadity* yang dihasilkan dan panas penguapan gas akan menjadi berkurang sehingga laju pengeringan meningkat. Suhu yang semakin tinggi mengakibatkan kadar air yang menguap semakin banyak ketika proses pirolisis berlangsung sehingga menyisakan sedikit kadar air pada *biochar*, keadaan ini sejalan dengan penelitian [17], penurunan kadar air dipegaruhi suhu pirolisis.

Pengaruh Temperatur Pirolisis dan Waktu Penahanan terhadap Kadar Abu Karbon Tongkol Jagung

Nilai kadar abu dipengaruhi suhu pirolisis dan waktu penahanan. Semakin tinggi waktu pirolisis kadar abu tongkol jagung cenderung naik, hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh [18] dimana nilai kadar abu berbanding lurus dengan waktu penahanan dan temperatur pirolisis. Hal tersebut disebabkan adanya zat yang terdekomposisi pada biomassa tapi tidak bisa menguap karena komponennya berupa oksida-oksida logam.

Kadar abu tongkol jagung berdasarkan penelitian yaitu 8,12 % sampai dengan 11,8%. Kadar abu tinggi membuat kualitas karbon aktif menurun karena adanya pengotor yang bisa menyumbat pada pori karbon aktif sehingga memberi berdampak pada ukuran pori yang semakin kecil [2]. Semakin kecil ukuran pori mengakibatkan luas permukaan karbon aktif berkurang, hal ini berdampak pada kinerja *fuel cell* yang memerlukan luas permukaan karbon 100 meter persegi per gram. Variasi lama penahanan (*holding time*) selama proses aktivasi menunjukkan bahwa semakin lama waktu penahanan, semakin rendah luas permukaan pori dan *volume* pori. Semakin tinggi luas permukaan pori menghasilkan volume pori yang semakin tinggi sehingga variasi waktu penahanan 30 menit memberikan hasil yang baik [2].

Pengaruh Temperatur Pirolisis dan Waktu Penahanan terhadap Kadar Zat Volatile Tongkol Jagung

Pirolisis biomassa tidak hanya menghasilkan kadang abu saja tetapi juga menghasilkan zat terbang. Penentuan kadar zat volatil mempunyai tujuan untuk mengukur kandungan senyawa yang belum menguap ketika proses aktivasi [19]. Suhu pirolisis yang meningkat cenderung menghasilkan kadar zat terbang yang semakin menurun. Penurunan ini terjadi karena saat biomassa mengalami pirolisis, selulosa yang terdapat dalam biomassa akan terdekomposisi terlebih dahulu pada rentang suhu 200°C - 400°C, diikuti oleh hemiselulosa pada suhu 300°C - 450°C, dan lignin pada suhu 450°C [20]. Dalam konteks ini, semakin tinggi suhu pirolisis, semakin banyak jumlah selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang terdekomposisi dari bahan baku. Kadar zat volatil adalah gambaran pemutusan ikatan terhadap atom seperti C, H, O, dan N yang terikat pada gugus yang terbentuk karena pemanasan [21].

Lignin selulosa, dan hemiselulosa yang terdekomposisi akan menguap dari biomassa. Oleh karena itu, dengan meningkatnya suhu pirolisis, kadar zat volatil cenderung menurun. Kadar zat volatil pada jagung berkisar antara 6,50% hingga 13,50%. Jenis biomassa memiliki pengaruh signifikan terhadap kadar zat volatil, karena kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin bervariasi, yang menyebabkan perbedaan dalam jumlah yang terdekomposisi. Penurunan kadar zat volatil dapat menghilangkan kontaminan/pengotor, sehingga meningkatkan diameter pori [21].

Pengaruh Temperatur Pirolisis dan Waktu Penahanan terhadap Kadar Karbon Terikat Karbon Tongkol Jagung

Hasil *fixed carbon* dipengaruhi oleh suhu pirolisis. Kenaikan suhu pirolisis berbanding lurus dengan peningkatan *fixed carbon*. Hal ini disebabkan oleh dekomposisi selulosa yang terjadi pada suhu 200°C, diikuti oleh hemiselulosa pada suhu 300°C, dan lignin pada suhu 450°C. Dengan demikian, semakin tinggi suhu pirolisis maka semakin banyak selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang terdekomposisi dari bahan baku. Proses dekomposisi ini akan menguap dari biomassa, sehingga meningkatkan kadar *fixed carbon* dalam *biochar*. Kadar *fixed carbon* tongkol jagung berkisar antara 69,58% - 74,35% dengan *fixed carbon* tertinggi didapatkan sebesar 74,35% pada suhu 500°C dengan waktu penahanan 60 menit.

Hubungan Karakteristik Karbon Aktif dengan Katalis Fuel Cell

Pengujian proximate limbah tongkol jagung berujuan untuk mengetahui kadar air, kadar abu, zat terbang, dan karbon terikat untuk bisa disebut sebagai karbon aktif. Berdasarkan hasil pengujian kadar air/*moisture content* untuk semua variasi memenuhi standar SNI No.06-3730-1995 yang barada dibawah 10%, hasil pengujian kadar abu/*ash content* dengan variasi suhu 400°C waktu penahanan 60 menit memenuhi standar SNI No.06-3730-1995 dibawah 10%, sedangkan variasi yang lain tidak memenuhi standar karena nilainya diatas 10%. Hasil pengujian zat terbang/*volatile matter* untuk semua variasi memenuhi SNI No.06-3730-1995 dengan angka dibawah 25%, dan untuk hasil karbon terikat untuk semua variasi memenuhi SNI No.06-3730-1995 dengan angka diatas 65%.

Karbon aktif memiliki potensi untuk dijadikan karbon penyanga katalis didalam *fuel cell*, dengan kadar air yang rendah maka akan memperluas diameter pori hal ini dipengaruhi oleh suhu dan waktu penahanan yang semakin lama akan meningkatkan diameter pori dimana hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [16] tentang efek waktu penahanan terhadap struktur pori karbon. Ukuran pori yang semakin besar akan meningkatkan luas permukaan karbon sehingga akan membantu reaksi kimia *fuel cell*. Kadar abu yang berada dibawah angka 10% memenuhi standar karbon aktif SNI No.06-3730-1995, kadar abu yang banyak berakibat pada penyumbatan pori karbon sehingga berakibat pada luas permukaan karbon yang menyempit [2]. Hasil pengujian zat terbang/*volatile matter* limbah tongkol jagung memenuhi SNI No.06-3730-1995 dengan angka dibawah 25%, zat terbang yang semakin sedikit akan meningkatkan jumlah *fixed carbon*.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pirolisis limbah tongkol jagung yang memvariasikan suhu pirolisis 400°C dan 500°C dengan waktu penahanan 60 menit didapatkan kesimpulan yaitu naiknya variasi suhu pirolisis berbanding lurus dengan kenaikan kadar *fixed* karbon yang dihasilkan, karbon terikat dipengaruhi oleh kadar air, zat terbang, dan kadar abu. Apabila ketiga kadar tersebut semakin sedikit maka jumlah karbon terikat akan semakin tinggi, begitu juga sebaliknya. Variasi suhu 400°C memberikan hasil pengujian yang memenuhi standar SNI No.06-3730-1995 dengan suhu pirolisis paling optimum pada suhu 500°C menghasilkan kadar *fixed* karbon yang paling tinggi.

Saran

Berdasarkan penelitian penulis menyarankan sebagai berikut:

1. Memperhatikan alat pelindung diri seperti sarung tangan dan alas kaki untuk keselamatan mengingat pirolisis mencapai suhu 500°C dan daya listrik yang tinggi.
2. Menyiapkan tempat *vakum* yang baik untuk karbon hasil pirolisis supaya tidak bereaksi dengan udara karena berpotensi adanya peningkatan kadar air.
3. Dilakukan pengujian BET (*Brunauer Emmett Teller*) untuk mengukur luas permukaan spesifik karbon dan menentukan distribusi ukuran pori. SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengamati struktur permukaan dan komposisi karbon. Selain itu perlu untuk mengetahui konduktivitas elektrik, dan lain sebagainya yang tentu dapat dijadikan acuan dalam pembuatan katalis *membrane fuel cell*.

Daftar Pustaka

- [1] C. Setter, F. T. M. Silva, M. R. Assis, C. H. Ataíde, P. F. Trugilho, and T. J. P. Oliveira, “Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions,” *Fuel*, vol. 261, no. September 2019, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116420.
- [2] Z. Darajat, M. Munira, M. Septiani, and A. Aladin, “Pengaruh Ukuran Partikel Bahan dan Waktu Penahanan Pada Pirolisis Lambat Limbah Tongkol Jagung Menjadi Bioarang,” *J. Chem. Process Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 96–102, 2021, doi: 10.33536/jcpe.v6i2.933.
- [3] T. Handayani, D. Xyzquolyna, and S. Eke, “Karakteristik Asap Cair Tongkol Jagung dengan Pemurnian Menggunakan Arang Aktif,” *J. Entropi*, vol. 13, no. 2, pp. 121–126, 2018.
- [4] B. N. Widarti, P. Sihotang, and E. Sarwono, “Penggunaan Tongkol Jagung Akan Meningkatkan Nilai Kalor Pada Briket,” *J. Integr. Proses*, vol. 6, no. 1, pp. 16–21, 2016.
- [5] K. Wang, H. Zhang, S. Chu, and Z. Zha, “Pyrolysis of single large biomass particle: Simulation and experiments,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 29, pp. 375–382, 2021, doi: 10.1016/j.cjche.2020.09.032.
- [6] K. Ridhuan, D. Irawan, and R. Inthifawzi, “Proses Pembakaran Pirolisis dengan Jenis Biomassa dan Karakteristik Asap Cair yang Dihasilkan,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 69–78, 2019, doi: 10.24127/trb.v8i1.924.
- [7] M. Syahrir and M. Mahyati, “Pengolahan Limbah Tongkol Jagung Menjadi Asap Cair dengan Metode Pirolisis Lambat,” *INTEK J. Penelit.*, vol. 6, no. 1, pp. 69–74, 2019, doi: 10.31963/intek.v6i1.1209.
- [8] L. Fan, Z. Tu, and S. H. Chan, “Recent development of hydrogen and fuel cell technologies: A review,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 8421–8446, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.08.003.
- [9] D. Sukowati, T. A. Yuwono, and A. D. Nurhayati, “Analisis Perbandingan Kualitas Briket Arang Bonggol Jagung dengan Arang Daun Jati,” *PENDIPA J. Sci. Educ.*, vol. 3, no. 3, pp. 142–145, 2019, doi: 10.33369/pendipa.3.3.142–145.
- [10] D. N. Buckley and M. Ibrahim, “Brief Review,” *Obstet. Anesth. Dig.*, vol. 35, no. 2, pp. 57–58, 2015, doi: 10.1097/01.aoa.0000463611.66221.63.
- [11] X. Liu, Y. Zhang, Z. Li, R. Feng, and Y. Zhang, “Characterization of corncob-derived biochar and pyrolysis kinetics in comparison with corn stalk and sawdust,” *Bioresour. Technol.*, vol. 170, pp. 76–82, 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.07.077.
- [12] B. Setiawan, D. A. Himawanto, E. P. Budiana, and P. Joko, “Analisa thermogravimetric pada Limbah pertanian,” *J. Penelit. dan Pengabd. Masy.*, vol. 4, pp. 49–56, 2016.
- [13] R. W. Hatibie, A. Aladin, and L. Ifa, “Pembuatan Karbon Aktif Hasil Pirolisis Tongkol Jagung (*Zea Mays* Var. *Ceratina L.*) Menggunakan Aktivator Asam Dari Buah Belimbing Wuluh,” *J. Technol. Process*, vol. 2, no. 1, pp. 38–49, 2022.
- [14] M. I. Sari, M. G. Markasiwi, and R. W. Putri, “U UJI KARAKTERISTIK FISIK PEMBUATAN KARBON AKTIF DARI LIMBAH DAUN NANAS (*Ananas comosus*) MENGGUNAKAN AKTIVATOR H_3PO_4 ,” *J. Tek. Patra Akad.*, vol. 12, no. 02, pp. 4–11, 2021, doi: 10.52506/jtpa.v12i02.129.
- [15] R. F. Indriyanto, M. Kabib, and R. Winarso, “Rancang Bangun Sistem Pengepresan Dengan Penggerak Pneumatik Pada Mesin Press Dan Potong Untuk Pembuatan Kantong Plastik Ukuran 400 X 550 Mm,”

- [16] *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 9, no. 2, pp. 1053–1060, 2018, doi: 10.24176/simet.v9i2.2538.
- [16] D. P. N. Dewa, I. M. W. Made, T. G. T. N. Tjokorda, and A. S. F. Ferdinand, “Efek Holding Time Proses Aktivasi Terhadap Struktur Pori Karbon Aktif Dari Ampas Kopi Seduh,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 2, pp. 599–607, 2022, doi: 10.21776/jrm.v13i2.1137.
- [17] M. Nitsae, L. A. Lano, and M. E. Ledo, “Pembuatan Arang Aktif dari Tempurung Siwalan (Borassus flabellifer L.) yang Diaktivasi dengan Kalium Hidroksida (KOH),” *Biota J. Ilm. Ilmu-Ilmu Hayati*, vol. 5, no. 1, pp. 8–15, 2020, doi: 10.24002/biota.v5i1.2948.
- [18] Hainur Aini, Puspita Rahayu, Alizar Ulianah, Egi Agustian, and Anny Sulawatty, “Pengaruh Temperatur Pirolisis Terhadap Karakteristik Biochar dari Limbah Padat Agroindustri Teh,” *INSOLOGI J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 6, pp. 1173–1183, 2023, doi: 10.55123/insologi.v2i6.3059.
- [19] M. S. Hanavia, C. I. A. Meliati, and L. Rubianto, “PENGARUH SUHU PIROLISIS DAN KONSENTRASI AKTIVATOR NaCl TERHADAP KUALITAS ADSORBEN ARANG AKTIF BERBAHAN DASAR LIMBAH TEMPURUNG KELAPA,” *DISTILAT J. Teknol. Separasi*, vol. 8, no. 1, pp. 202–212, 2023, doi: 10.33795/distilat.v8i1.325.
- [20] I. Rosyadi, H. Wahyudi, D. Satria, Y. Yusvardi, and ..., “Analisis Hasil Pyrolysis Pada Limbah Biomassa Tongkol Jagung Dengan Kayu Akasia,” *Pros. ...*, pp. 229–234, 2018, [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/seninati/article/download/788/711>
- [21] Y. Nopiani, E. Rossi, and N. Arnas, “Karakterisasi Arang Aktif dari Tongkol Jagung dengan Variasi Konsentrasi Aktivator Natrium Klorida,” *J. Teknotan*, vol. 18, no. 2, pp. 149–156, 2024, doi: 10.24198/jt.vol18n2.9.