

Pirolisis Ampas Tebu (*Saccharum officinarum* Linn): Pengaruh Suhu terhadap Yield dan Karakteristik Produk

Siti Jamilatun^{1,*}, Joko Pitoyo², Zulia Arifah³, Shinta Amelia⁴, Alfian Maarif⁵

^{1,2,3,4,5}Department of Chemical Engineering, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Kragilan, Tamanan, Kec. Banguntapan, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta 55191

sitijamilatun@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Potensi pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi dan senyawa kimia yang bernilai tinggi terus dikembangkan. Ampas tebu adalah biomassa dari residu pengolahan tanaman tebu (*Saccharum officinarum* Linn) yang pemanfaatannya belum maksimal. Pengolahan ampas tebu dengan pirolisis akan menghasilkan produk cair (*organic phase* dan *water phase*), padat (*biochar*) dan gas. Pirolisis dilakukan pada suhu 300, 400, 500, 550 dan 600°C didalam reactor fixed-bed. Produk cair berupa *organic* dan *water phase* dengan *yield* maksimum diperoleh masing-masing pada 500°C dan 550°C. Hasil uji *Gas Chromatography and Mass Spectroscopy* (GC-MS) untuk *water phase* diperoleh senyawa levoglukosan (78 % area) yang sangat potensial diolah menjadi ethanol. Potensi *biochar* dapat dikembangkan untuk material maju dan banyak keperluan dengan *surface area* dengan kisaran 180,3-198,0 m²/g, *average pore size* pada kisaran 1,217-4,230 nm, *total pore volume* pada kisaran 0,001-0,122 cc/g. Kandungan gas hasil pirolisis ampas tebu adalah CO₂ dan CH₄. Pada suhu 300°C hanya terbentuk CO₂, selanjutnya pada 400 ke 600°C CH₄ meningkat tajam pada kisaran 95,04 ke 98,10%.

Kata kunci: Pirolisis; ampas tebu, *organic phase*; *water phase*, *biochar*

ABSTRACT

The potential for using biomass as a source of energy and high-value chemical compounds continues to be developed. Bagasse is biomass from sugarcane (*Saccharum officinarum* Linn) processing residue which has not been fully utilized. Processing bagasse by pyrolysis will produce liquid products (*organic and water phases*), solid (*biochar*), and gas. Pyrolysis was carried out at temperatures of 300, 400, 500, 550, and 600°C in a fixed-bed reactor. In the *organic and water phases*, liquid products obtained maximum yield at 500°C and 550°C, respectively. The results of the *Gas Chromatography and Mass Spectroscopy* (GC-MS) test for the *water phase* obtained levoglucosan compounds (78% area) which have the potential to be processed into ethanol. *Biochar* potential can be developed for advanced materials and many purposes with a *surface area* of 180.3-198.0 m²/g, *average pore size* in the field of 1.217-4.230 nm, and *total pore volume* in the range of 0.001-0.122 cc/g. The gas content resulting from the pyrolysis of bagasse is CO₂ and CH₄. At 300°C, only CO₂ is formed; then at 400 to 600°C CH₄ increases sharply in the range of 95.04 to 98.10%.

Keywords: *Pyrolysis*; bagasse, *organic phase*; *water phase*, *biochar*

1. PENDAHULUAN

Kekhawatiran menipisnya bahan bakar fosil dan peningkatan emisi gas rumah kaca mendorong penelitian untuk menghasilkan bahan bakar alternatif dan bersih (Ordenez-Loza *et al.*, 2021). Pelepasan gas rumah kaca yang disebabkan penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi dan gas alam menimbulkan berbagai masalah ekonomi dan lingkungan (Dhyani, V. &

Bhaskar, T., 2018). Energi terbarukan dari biomassa dianggap sebagai sumber daya yang unik dan solusi dari permasalahan lingkungan karena menyediakan energi terbarukan yang netral CO₂ dan melampaui banyak sumber energi terbarukan lainnya dalam hal ketersediaan bahan, nilai energi, keserbagunaannya dan tidak mengeluarkan gas berbahaya ke atmosfer (Dhyani, V. & Bhaskar, T., 2018;

Kapatel & Rotliwala, 2022; McKendry, 2002; Nilsen *et al.*, 2007).

Tebu (*Saccharum officinarum* Linn) merupakan tanaman pertanian terbesar di dunia (Islam *et al.*, 2010). Brasil adalah produsen tebu terbesar di dunia (753 juta ton pada 2019, 39% dari produksi dunia). Di belakang Brasil adalah India (405 juta ton), Thailand (131 juta ton), Cina (109 juta ton), dan Pakistan (67 juta ton). Produksi tebu di Indonesia menempati posisi ke sembilan dengan total 28,9 juta ton pada 2020 (Food & Agriculture, FAO).

Salah satu residu hasil pengolahan tebu berupa ampas tebu yang terdiri dari 40–50% selulosa, 20–30% hemiselulosa, 20–25% lignin dan 1,5–3% abu. *Levoglucosan* 1,6-*anhydro-β-D-glukopiranososa* dikenal sebagai produk penting dalam pirolisis selulosa, dibentuk dengan hasil tinggi (hingga 60%). Senyawa ini dapat diubah menjadi etanol, juga dapat berfungsi sebagai prekursor bahan kimia, surfaktan, makanan, dan bahan tambahan farmasi (David *et al.*, 2018; Ordonez *et al.*, 2021)

Pirolisis adalah proses konversi termokimia untuk konversi biomassa menjadi biofuel (Gao *et al.*, 2013) (Jamilatun *et al.*, 2019), hasilnya adalah produk cair (*bio-oil*), padat (*biochar*) dan gas tidak terkondensasi (*non-condensable gas*) (Bridgwater *et al.*, 2008). Pirolisis lambat menghasilkan arang yang dominan karena waktu tinggal yang lama dengan suhu rendah (200–400°C) dan laju pemanasan yang rendah (5–10°C/menit) dan dapat menggunakan berbagai ukuran partikel (5–50 mm) (Bridgwater *et al.*, 2008). Pirolisis cepat pada suhu sedang (450–650°C), laju pemanasan yang tinggi (10–200°C/s) untuk ukuran partikel kurang dari 2 mm dan waktu tinggal yang singkat 0,5–10 detik (Demirbas & Arin, 2002; Savou *et al.*, 2019).

Komposisi dan hasil produk pirolisis dipengaruhi oleh sifat bahan baku, suhu, laju pemanasan, jenis reaktor dan parameter lainnya. Produk cair yang dihasilkan selama pirolisis disebut sebagai *bio-oil/pyrolysis-oil/bio-crude/wood-oil* (Kan *et al.*, 2016). Produk cair adalah campuran cairan organik dengan warna kecoklatan gelap, biasanya mengandung

air (15–35% berat) dan ratusan senyawa organik (Rezaei *et al.*, 2014). Umumnya, *bio-oil* memiliki nilai kalori berkisar antara 15–38 MJ/kg (Asadullah *et al.*, 2007). Arang padat disebut juga *biochar/coke/biocharcoal* memiliki kandungan karbon tinggi dengan nilai kalori berkisar antara 17–36 MJ/kg dan dapat dimanfaatkan untuk produksi material maju (Miranda *et al.*, 2021), sebagai pupuk bila dicampur dengan tanah (Rodier *et al.*, 2019) dan dapat meningkatkan kualitas tanah melalui peningkatan retensi dan ketersediaan air dan nutrisi dalam tanah, serta meningkatkan pertumbuhan tanaman (Varma & Mondar, 2017). Produk gas pirolisis mengandung CO₂, CO, CH₄ dan H₂ dengan nilai kalori kotor 6,4–9,8 MJ/kg, dapat digunakan untuk pengeringan biomassa dalam proses pirolisis (Islam *et al.*, 2010). Pengolahan ampas tebu menjadi biofuel dengan konversi termokimia pirolisis perlu dikembangkan, mengingat teknologi ini hemat energi dan hemat biaya.

Tabel 1 merangkum pirolisis lambat dan cepat ampas tebu. Sedangkan Tabel 2 berisi hasil analisis ultimate, proksimate, nilai kalor ampas tebu.

Tujuan penelitian ini adalah pirolisis ampas tebu dalam reactor fixed-bed pada suhu 300–600°C. Produk cair diuji dengan *Gas Chromatography and Mass Spectroscopy* (GC-MS), *biochar* dengan *Brunnaeur-Emmet-Teller* (BET) dan gas dengan *Gas Chromatography* (GC).

2. METODE PENELITIAN

2.1. Reaktor fixed bed

Penelitian dilakukan dengan reaktor *fixed-bed* yang dilengkapi dengan unit pendingin. Reaktor *fixed-bed* berbentuk silinder vertikal yang terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 40 mm, diameter luar 44 mm, dan tinggi 600 mm. Reaktor dilengkapi dengan selongsong silinder yang terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 29 mm, diameter luar 32 mm, dan tinggi 400 mm yang digunakan sebagai tempat menaruh sampel. Pemanas listrik dari kawat nikelin yang dililitkan pada bagian silinder luar reaktor.

Unit pendingin terdiri dari 3 buah kondensor, kondensor pertama terbuat dari *stainless steel* dengan diameter dalam 6 mm dan panjang 150 mm, kondensor

kedua dan ketiga berupa kondensor *liebig* dengan panjang 400 mm. Skema unit pirolisis dapat dilihat pada Gambar 1.

Tabel 1. Studi tentang pirolisis ampas tebu (Varma & Mondal, 2017)

Pyrolysis type	Reactor type	Temperature (°C)	Heating rate (°C/min)	Key results	Reference
Slow	Fixed bed tubular	400–550	25	Products <i>yields</i> ; properties of bio-oil	Parihar et al. (2007)
Slow	Fixed bed	600 & 800	10	Biochar <i>yield</i> ; properties of biochar	Bonelli et al. (2007)
Fast	Fluidized bed	400–500	100	Products <i>yields</i> ; properties of bio-oil	Islam et al. (2010)
Slow	Fixed bed	500	10	Products <i>yields</i> ; properties of biochar	Lee et al. (2013)
Slow	Batch	400–600	–	Products <i>yields</i> ; properties of bio-oil	Mantilla et al. (2014)
Fast	Fluidized bed	500 & 550	–	Products <i>yields</i>	Montoya et al. (2015)
Slow	Fixed bed tubular	350–550	–	Products <i>yields</i> ; Analysis of gaseous products (2015)	Parthasarathy and Narayanan (2015)

Tabel 2. Hasil uji Proximate, ultimate dari ampas tebu (Varma & Mondal, 2017)

Karakteristik Ampas Tebu	
Proximate analysis, %	
Moisture	5,4
Volatile matter	80,2
Fixed carbon	11,3
Ash content	3,1
Ultimate analysis, %	
Carbon (C)	44,86
Hydrogen (H)	5,87
Nitrogen (N)	0,24
Sulfur (S)	0,06
Oxygen (O)	48,97
O/C molar ratio	0,82
H/C molar ratio	1,57
HHV (MJ/kg)	18,0
Lignocellulosic composition, %	
Cellulose	47,6
Hemicellulose	39
Lignin	11,2
Extractives	2,2

2.2. Cara kerja

Ampas tebu sebanyak 15 gr dimasukkan ke dalam selongsong reaktor.

Selanjutnya, selongsong dimasukkan ke dalam reaktor *fixed-bed* kemudian reaktor ditutup dengan rapat. Selanjutnya dilakukan pemanasan dengan kecepatan pemanasan 10-12°C/menit, setelah suhu reaktor mencapai suhu yang diinginkan (300, 400, 500, 550, dan 600°C) panas dijaga secara isothermal selama 60 menit atau sampai tidak terdapat tetesan lagi (Jamilatun *et al.*, 2019).

2.3. Pengumpulan produk

Produk cair didekantasi selama 24 jam untuk memisahkan 2 lapisan (*organic phase* dan *water phase*), kemudian ditimbang beratnya. Hasil *biochar* diambil kemudian ditimbang, sedangkan hasil gas diukur dengan menghitung selisih cairan dan arang dari berat awalnya.

Hasil *bio-oil*, arang, dan gas dihitung dengan persamaan (1) - (3) (Jamilatun *et al.*, 2019).

$$Y_b = \frac{W_b}{W_m} \times 100\% \quad (1)$$

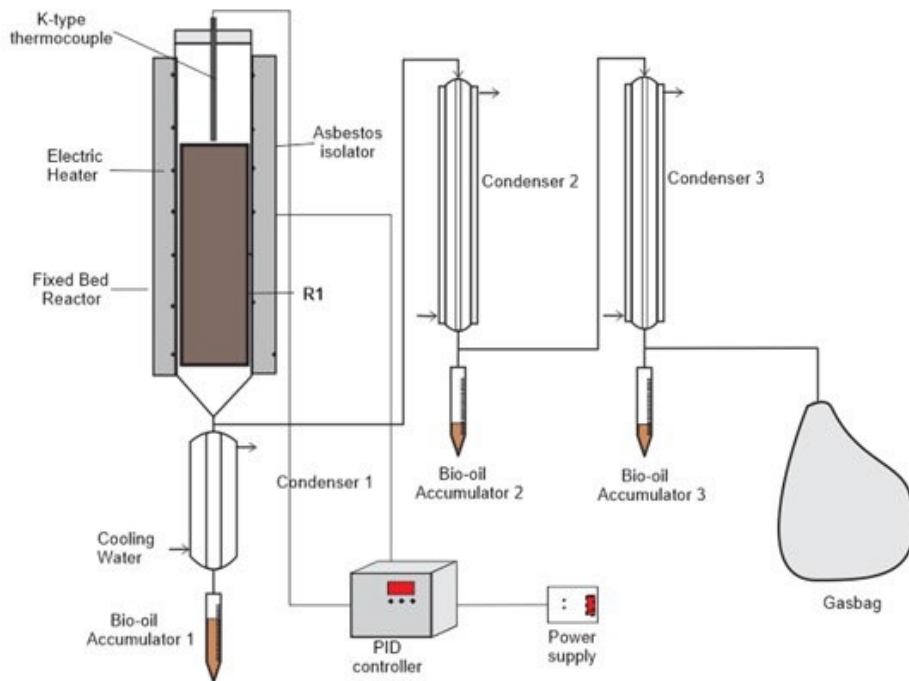
$$Y_c = \frac{W_c}{W_m} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y_g = \frac{W_g}{W_m} \times 100\% \quad (3)$$

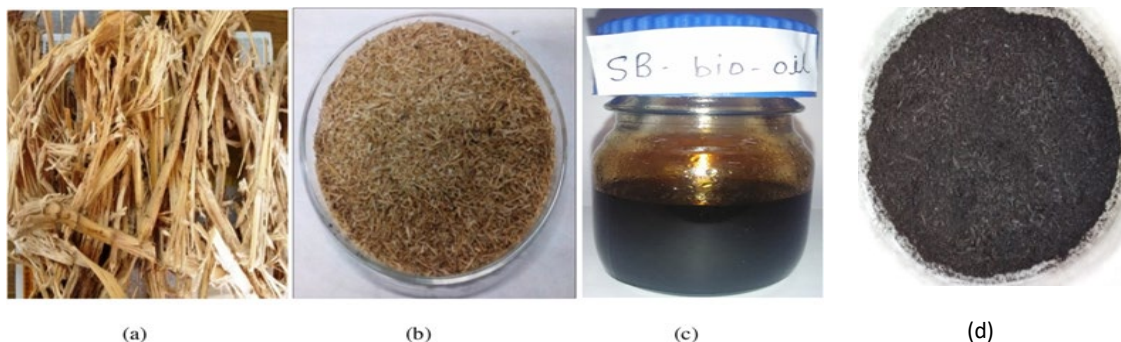
Dengan Y_b , Y_c , dan Y_g adalah *yield* dari *bio-oil* (wt.%), *biochar* (wt.%), dan gas (wt.%). W_m , W_b dan W_c adalah berat dari sampel ampas tebu (gram), produk cair (gram), dan *biochar* (gram).

2.4. Uji produk pirolisis

Produk cair diuji dengan GC-MS dilakukan di Laboratorium Penelitian Terpadu (LPT) Farmasi Universitas Ahmad Dahlan, *biochar* dengan BET di Laoratorium Terpadu Universitas Islam Indonesia dan gas dengan GC di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada.



Gambar 1. Unit pirolisis ampas tebu



Gambar 2. (a) ampas tebu, (b) serbuk ampas tebu, (c) *bio-oil*, (d) *biochar*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh suhu terhadap *yield* produk.

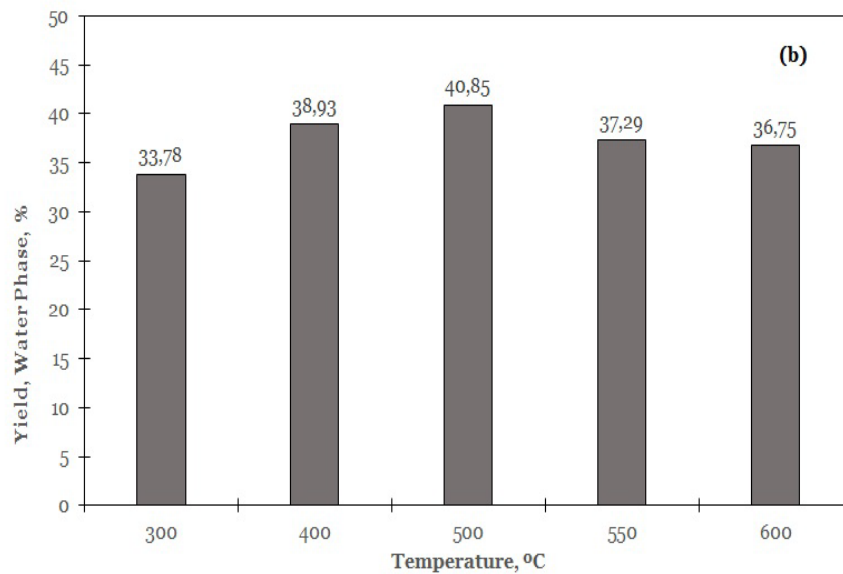
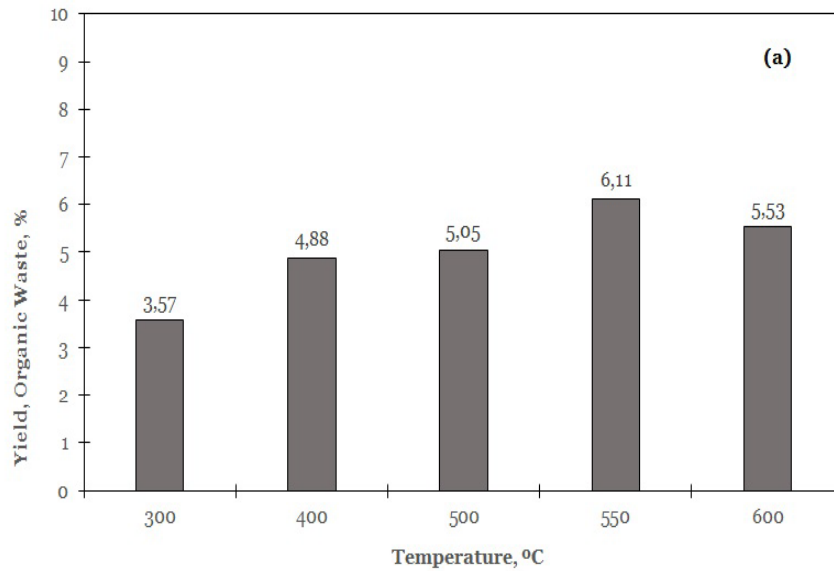
Pirolisis ampas tebu dilakukan pada suhu 300, 400, 500, 550 dan 600°C,

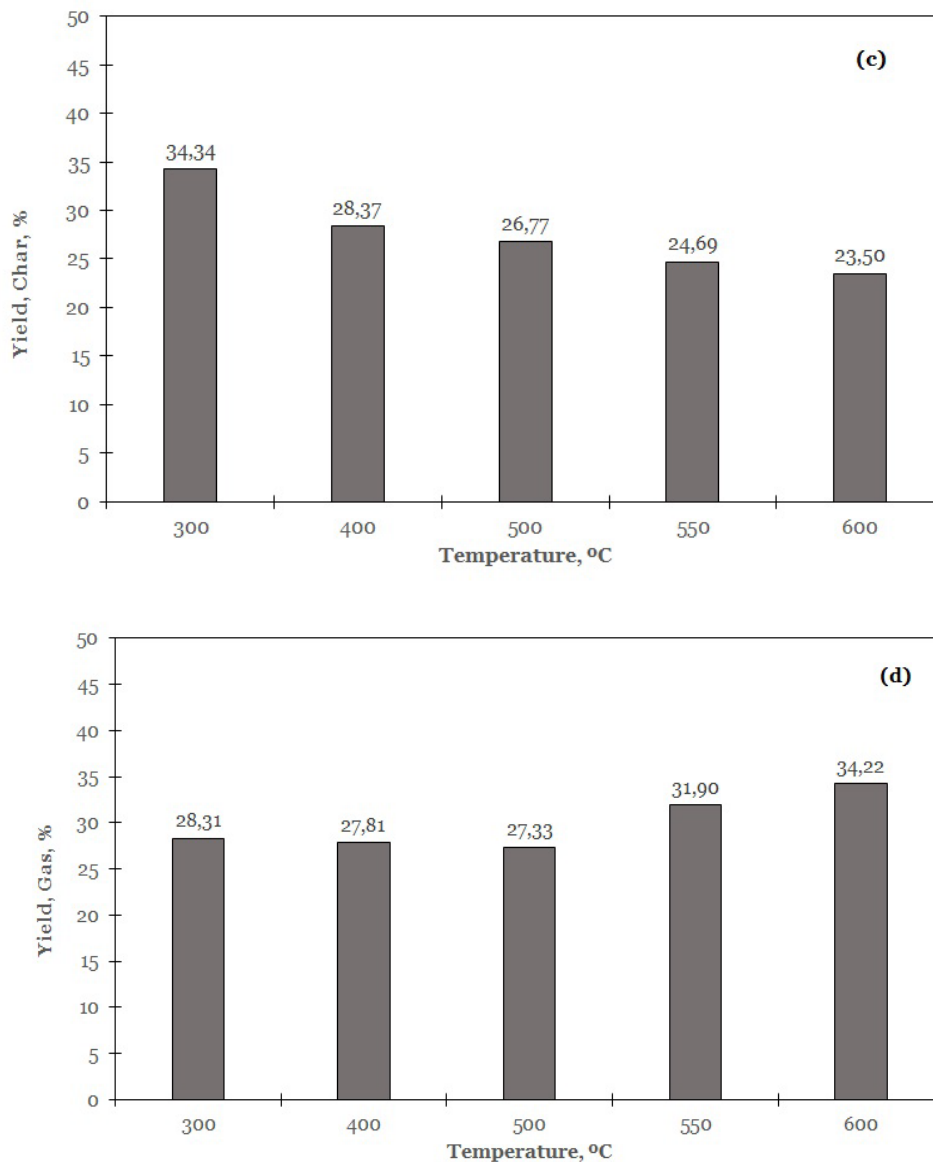
hasilnya dapat dilihat pada Gambar 3, *yield organic phase* Gambar 3(a), *water phase* Gambar 3(b), *biochar* Gambar 3(c)

dan gas (*non condensable gas*) Gambar 3(d).

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat semakin tinggi suhu pirolisis semakin tinggi *organic phase* yang dihasilkan (Varma and Mondal, 2017), optimum pada 550°C dengan *yield* sebesar 6.11%. Meningkatnya suhu dari 300°C menjadi

550°C menyebabkan kenaikan *yield organic phase* dari 3.57% menjadi 6.11%. Selanjutnya pada 600°C turun menjadi 5.53%, hal ini disebabkan terjadinya reaksi *secondary cracking* dimana *organic phase* yang terbentuk pada *primary cracking* akan terdekomposisi.





Gambar 3. Yield produk pirolisis, (a) *organic phase*, (b) *water phase*, (c) *biochar*, (d) *gas*

Organic phase diperoleh dari lapisan atas produk cair pirolisis, cairan yang kental berwarna coklat gelap dan berbau *smoke* (Kapatel & Rotliwala, 2022). Kenaikan *organic phase* pada kisaran 300-550°C disebabkan meningkatnya dekomposisi biomassa karena dekomposisi hemiselulosa dari biomassa terjadi pada kisaran suhu 250-350°C, dekomposisi selulosa terjadi pada kisaran 325-400°C, dan dekomposisi lignin terjadi pada suhu 300-550°C (Kan

et al., 2016; Kapatel & Rotliwala, 2022). Secara umum diatas suhu 550°C dekomposisi selulosa, hemiselulosa dan lignin berhenti, akan tetapi dekomposisi juga dipengaruhi jenis biomassa yang digunakan.

Water phase diperoleh optimum pada suhu 400°C (40.85%), besar *yield* ini dipengaruhi oleh kadar air ampas tebu sampel dan hasil reaksi dehidrasi. Reaksi pirolisis adalah reaksi kompleks dan tidak sepenuhnya dapat dipahami komposisi

hasil yang kompleks. Pada umumnya reaksi pirolisis diklasifikasikan sebagai campuran simultan dehidrasi, depolimerisasi, repolimerisasi, fragmentasi, penataan ulang, dan kondensasi (De Wild *et al.*, 2011).

Gas mengalami kenaikan dengan kenaikan suhu pirolisis, hal ini disebabkan terjadinya *secondary cracking* dimana *organic phase* akan terurai menjadi gas dan karbon. Suhu optimum gas pada 600°C, yakni terbentuk 34.22%.

Biochar semakin menurun dengan kenaikan suhu pirolisis, hal ini disebabkan dekomposisi semakin aktif pada suhu tinggi. Pada suhu 300°C *yield biochar* 34.34%, selanjutnya pada 600°C *yield biochar* 23.50%. *Biochar* adalah bahan padat yang berpori dan merupakan hasil pembakaran dari bahan yang mengandung unsur karbon.

3.2. Konversi

Semakin tinggi suhu pirolisis maka ampas tebu yang terdekomposisi semakin besar, tren ini dapat dilihat pada Gambar 4. Kisaran konversi untuk pirolisis dari 300-600°C adalah 65,66-76,50%. Kenaikan suhu akan memotong ikatan-ikatan C-C, C-O, C-H dan lainnya pada selulosa, hemiselulosa dan lignin semakin cepat, hal ini akan membuat biomassa ampas tebu semakin menyusut jumlahnya

berubah menjadi produk cair, *biochar* dan gas.

3.3. Karakteristik *water phase* pada 600°C

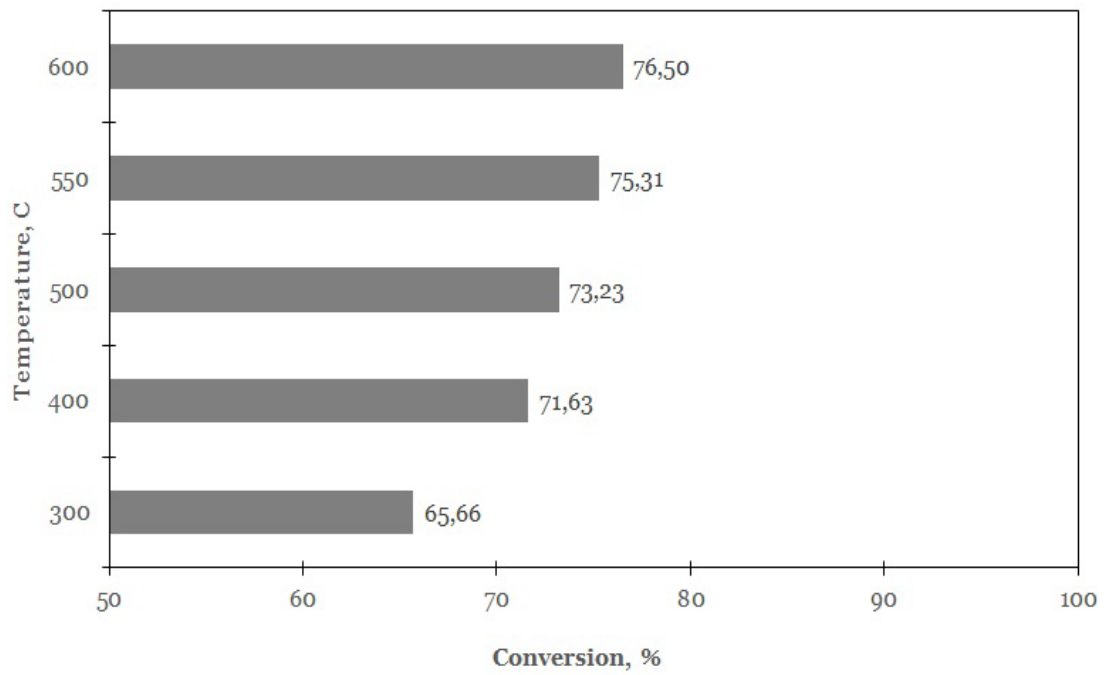
Water phase hasil pirolisis pada 600°C diuji GC-MS, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5. Dari gambar terlihat luas area tertinggi pada senyawa *levoglucosan* (75 % area). Hal ini dapat diartikan bahwa produk cair hasil pirolisis ampas tebu dengan kandungan yang kaya *levoglucosan* sangat potensial untuk diolah lebih lanjut menjadi etanol.

3.4. Karakteristik produk *biochar*

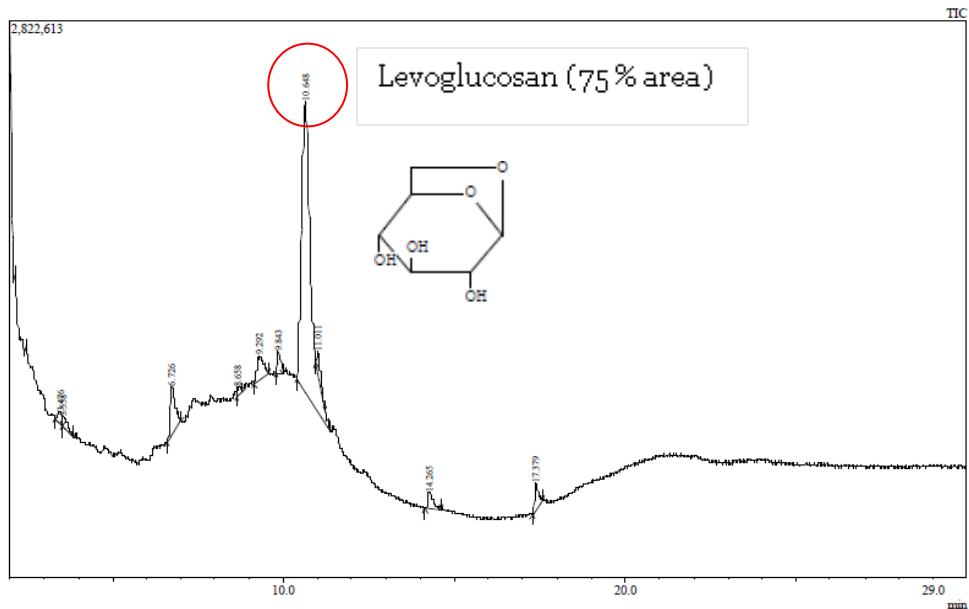
Biochar yang dihasilkan pada pirolisis 300-600°C dianalisis *surface area*, *total pore volume* dan *average pore size*, hasilnya ditampilkan pada Tabel 3. Uji BET *biochar* dengan variasi suhu diperoleh semakin tinggi suhu pirolisis semakin besar *surface area* dengan kisaran 180,3-198,0 m²/g, *average pore size* pada kisaran 1,217-4,230 nm, *total pore volume* pada kisaran 0,001-0,122 cc/g). Luas permukaan dan porositas adalah sifat fisik penting yang mempengaruhi kualitas dan kegunaan banyak bahan dan produk. Sangat penting bahwa karakteristik ini ditentukan dan dikendalikan secara akurat.

Tabel 3. Uji BET *biochar* ampas tebu

Temp. (°C)	300	400	500	600
Surface area (m ² /g)	0,614	0,815	193,8	180,2
Average pore size (nm)	1,238	4,230	1,254	1,217
Total pore volume (cc/g)	0,001	0,002	0,122	0,110



Gambar 4. Hubungan antara suhu (°) dan konversi pirolisis ampas tebu (%)



Gambar 5. Hasil GC-MS produk cair pirolisis ampas tebu

3.5. Karakteristik produk gas

Gas hasil pirolisis ampas tebu mengandung CH₄ dan CO₂, hasilnya ditampilkan pada Gambar 6. Gas CO₂ pada pirolisis 300°C mempunyai kadar 100%, kemudian jumlahnya menurun tajam dari 400 ke 600°C yakni 4.96 ke 1.90 wt.%. Sedangkan CH₄ di suhu 300°C mempunyai kadar 0%, pada 400 ke 600°C meningkat tajam pada kisaran 95.04 ke 98.10%. Kondisi ini menandakan bahwa pirolisis ampas tebu sangat potensial menghasilkan gas untuk bahan bakar atau dapat dikatakan bahwa hampir 100% gas hasil pembakaran ampas tebu berisi CH₄.

Hal ini bertolak belakang dengan penelitian Varma & Mondal, (2017), hasil pirolisis ampas tebu produk gas pada 500°C, terdiri dari 45.6 mol% CO, 36.8 mol% CO₂, 5.7 mol% H₂, dan 11.9 mol% CH₄. Perbedaan komposisi gas hasil pirolisis ini disebabkan oleh karakteristik bahan ampas tebu dan Gas Chromatography (GC) yang digunakan.

Tabel 4. Komposisi gas pada berbagai suhu pirolisis

Temperature (°C)	300	400	500	600
CH ₄	0	95,04	97,25	98,10
CO ₂	100	4,96	2,75	1,90

4. KESIMPULAN

Produk pirolisis ampas tebu mempunyai potensi besar untuk dikembangkan menjadi berbagai produk yang berguna. Produk cair untuk biofuel, dan levoglucosan dengan kadar yang sangat tinggi sebagai bahan pembuatan bioetanol. Produk gas untuk bahan bakar dengan kandungan CH₄ tinggi. Produk biochar dapat diolah lebih lanjut untuk adsorben limbah industri, katalis untuk proses kimia dan banyak keperluan. Biochar mengandung banyak karbon (C) dan surface area yang cukup besar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas bantuan dana penelitian melalui Skema Dana Penelitian Direktorat Riset, Teknologi, Dan Pengabdian Pada Masyarakat Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, Dan Teknologi Tahun Anggaran 2022, No: 001/PB.PDKN/BRIn.LPPM/VI 2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Asadullah, M., Rahman, M.A., Ali, M.M., Rahman, M.S., Motin, M.A., Sultan, M.B., Alam, M.R. (2007). Production of *bio-oil* from fixed bed pyrolysis of bagasse. *Fuel* 86, 2514–2520.
- Bonelli, P.R., Buonomo, E.L., Cukierman, A.L. (2007). Pyrolysis of sugarcane bagasse and co-pyrolysis with an Argentinean subbituminous coal. *Energy Sources Part A*. 29, 731–740.
- Bridgwater, A.V., Czernik, S., Piskorz, J. (2008). The status of biomass fast pyrolysis. In: Bridgwater, A.V. (Ed.), *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*, 2. CPL Press Liberty House, Newbury, UK, pp. 1–22.
- Demirbas, A., Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy Sources* 24, 471–482.
- De Wild, P.J., Reith, H., and Heeres, H.J. (2011). Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels*, 2 (2), 185 – 208.
- Dhyani, V. & Bhaskar, T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*. 129 (2018) 695–716.
- David, G.F., Justo, O.R., Perez, V.H., Garcia-Perez, M. (2018). Thermochemical conversion of sugarcane bagasse by fast pyrolysis: High *yield* of levoglucosan production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 133(2018). 246–253.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO Global

- Statistical Yearbook, FAO Regional Statistical Yearbooks. FAO; 2021.
- Gao, W., Chen, K., Xiang, Z., Yang, F., Zeng, J., Li, J., Yang, R., Rao, G., Tao, H. (2013). Kinetic study on pyrolysis of tobacco residues from the cigarette industry. *Ind. Crops Prod.* 44, 152–157.
- Islam, M.R., Haniu, H., Islam, M.N., Uddin, M.S. (2010). Thermochemical conversion of sugarcane bagasse into bio-crude oils by fluidized-bed pyrolysis technology. *J. Therm. Sci. Technol.* 5, 11–23.
- Jamilatun, S., Budiman, A., Anggorowati, H., Yuliestyan, A., Pradana, YS, Budhijanto, Rochmadi. (2019). Ex-Situ Catalytic Upgrading of *Spirulina platensis* Oil Residue Using Silica Alumina Catalyst. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9(4), 1733-1740, 2019.
- Kan, T., Strezov, V., Evans, T.J., 2016. Lignocellulosic biomass pyrolysis: a review of product properties and effects of pyrolysis parameters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57, 1126–1140.
- Kapatel, D.V., Rotliwala, Y.C. (2022). Influence of sugarcane bagasse addition in co-pyrolysis with sewage sludge on the thermogravimetric characteristics and study of kinetic. *Materials Today: Proceedings*. 57 (2022) 1776–1780.
- Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K.S., Yang, W., Park, Y.K., Jung, J., Hyun, S. (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500 °C. *Bioresour. Technol.* 148, 196–201.
- Mc.Kendry, P., 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresour. Technol.* 83, 37–46.
- Mantilla, S.V., Gauthier-Maradei, P., Gil, P.Á., Cárdenas, S.T. (2014). Comparative study of bio-oil production from sugarcane bagasse and palm empty fruit bunch: yield optimization and bio-oil characterization. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 108, 284–294.
- Montoya, J.I., Valdés, C., Chejne, F., Gómez, C.A., Blanco, A., Marrugo, G., Osorio, J., Castillo, E., Aristóbulo, J., Acero, J. (2015). Bio-oil production from Colombian bagasse by fast pyrolysis in a fluidized bed: an experimental study. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 112, 379–387.
- Miranda, N.T., Motta, I.L., Filho, R.M., Wolf Maciel, M.R. (2021). Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 149 (2021) 111394.
- Ordóñez-Loza, J., Chejne, F., Abdul Jameel, A.G., Telalovic, S., Arrieta, A.A., Sarathy, A. (2021). An investigation into the pyrolysis and oxidation of bio-oil from sugarcane bagasse: Kinetics and evolved gases using TGA-FTIR. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2021) 106144
- Parihar, M.F., Kamil, M., Goyal, H.B., Gupta, A.K., Bhatnagar, A.K., 2007. An experimental study on pyrolysis of biomass. *Process Saf. Environ. Prot.* 85, 458–465.
- Parthasarathy, P., Narayanan, S. (2015). Effect of combined slow pyrolysis and steam gasification of sugarcane bagasse on hydrogen generation. *Korean J. Chem. Eng.* 32, 2236–2246.
- Rezaei, P.S., Shafaghat, H., Daud, W.M.A.W., 2014. Production of green aromatics and olefins by catalytic cracking of oxygenate compounds derived from biomass pyrolysis: a review. *Appl. Catal. A* 469, 490–511.
- Rodier, L. Bilba, K., Onésippe, C., Arsène, M.A. (2019). Utilization of bio-biochars from sugarcane bagasse pyrolysis in cement-based composites. *Industrial Crops & Products*. 141(2019)111731.
- Savou, V., Grause, Kumagai, S., Saito, Y., Kameda, T., Yoshioka, T. (2019). Pyrolysis of sugarcane bagasse

- pretreated with sulfuric acid. *Journal of the Energy Institute*. 92 (2019) 1149-1157
- Varma, A.K. & Mondal. P. (2017). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*. 95 (2017) 704-717.