

PENGARUH SUHU TERHADAP YIELD VALUABLE CHEMICALS PADA FASE ORGANIK HASIL PIROLISIS CANGKANG KELAPA SAWIT

Joko Pitoyo¹, Totok Eka Suharto², Siti Jamilatun^{3,*}

^{1,2,3}Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Industri, Universitas Ahmad Dahlan
Jl. Ahmad Yani (Ringroad Selatan) Tamanan Banguntapan Bantul Yogyakarta 55166 Telp (01274)
563515

sitijamilatun@che.uad.ac.id

ABSTRAK

Pirolisis cangkang kelapa sawit dengan reaktor fixed bed menghasilkan fase organik, fase air, gas, dan char. Fase organik hasil pirolisis mempunyai kandungan *valuable chemicals* seperti phenol, guaiacol, syringol, creosol, p-ethylguaiacol, eugenol, o-cresol, dan xylenol. Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu terhadap yield *valuable chemicals* pada fase organik hasil pirolisis cangkang kelapa sawit. Pirolisis dilakukan pada suhu 300, 400, 500, dan 600 °C. Komposisi fase organik dianalisis menggunakan Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu mempunyai peranan penting terhadap yield *valuable chemicals*. Kandungan guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, o-cresol dan syringol tertinggi didapatkan pada suhu 400 °C dengan yield berturut-turut sebesar 2.88, 3.62, 3.86, 0.41, dan 5.03 wt.%. Kandungan phenol dan eugenol tertinggi didapatkan pada suhu 500 °C dengan yield sebesar 35.89 dan 1.83 wt.%. Kandungan xylenol tertinggi didapatkan pada suhu 600 °C dengan yield sebesar 0.21 wt.%.

Kata kunci: pirolisis, cangkang kelapa sawit, valuable chemicals, fase organik, phenol

ABSTRACT

Pyrolysis of oil palm shells with a fixed bed reactor produces an organic phase, a water phase, a gas, and a char. The organic phase resulting from pyrolysis contains valuable chemicals such as phenol, guaiacol, syringol, creosol, p-ethylguaiacol, eugenol, o-cresol, and xylenol. This research aims to study the effect of temperature on the yield valuable chemicals in the organic phase of the pyrolysis of oil palm shells. Pyrolysis was carried out at temperatures of 300, 400, 500, and 600 °C. The composition of the organic phase was analyzed using Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS). The results showed that temperature has an important role in yield valuable chemicals. The highest content of guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, o-cresol and syringol was found at 400 °C with yields of 2.88, 3.62, 3.86, 0.41, and 5.03 wt.%, respectively. The highest content of phenol and eugenol was obtained at a temperature of 500 °C with yields of 35.89 and 1.83 wt.%. The highest xylenol content was obtained at a temperature of 600 °C with a yield of 0.21 wt.%.

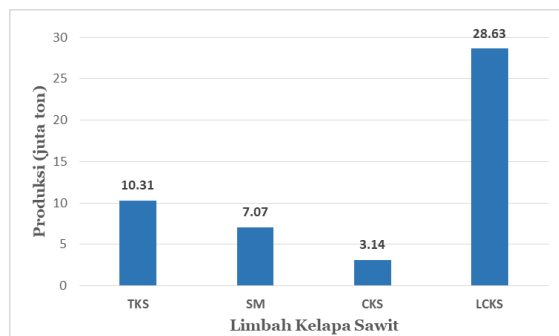
Keywords: pyrolysis, oil palm shell, valuable chemicals, organic phase, phenol

1. PENDAHULUAN

Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat bahwa produksi perkebunan kelapa sawit Indonesia meningkat selama lima tahun terakhir. Pada 2019, produksinya mencapai 48,42 juta ton atau meningkat 12,92% dari tahun sebelumnya yakni 42,88 juta ton (Direktorat Jendral Perkebunan, 2021). Meningkatnya produksi

perkebunan kelapa sawit di Indonesia menyebabkan meningkatnya produksi limbah biomassa dari kelapa sawit, diantaranya adalah tandan kosong sawit, cangkang kelapa sawit, lumpur sawit, serabut, dan limbah cair (Subiyanto et al., 2007). Pengolahan tandan segar kelapa sawit menghasilkan 6.5% limbah cangkang sawit (Susanto et al., 2020), sehingga

jumlah limbah cangkang sawit pada tahun 2019 setara dengan 3.14 juta ton.

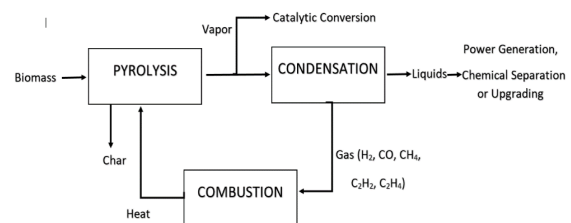


Gambar 1. Produksi limbah pengolahan kelapa sawit di Indonesia tahun 2019 (Direktorat Jendral Perkebunan, 2021)

Cangkang kelapa sawit adalah biomassa generasi kedua yang kaya dengan kandungan karbon dan hidrogen dan setara dengan kayu keras (Asadullah et al., 2013) sehingga menjadikan cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku yang potensial untuk memproduksi biofuels, produk kimia berharga, atau energi melalui metode termokimia (Abnisa et al., 2011) (Asadullah et al., 2013). Cangkang kelapa sawit mempunyai kandungan nitrogen yang lebih rendah (<1%), kandungan sulfur (<0.2%) dan kandungan oksigen yang lebih tinggi (40-50%) dibandingkan dengan bahan bakar dari fosil. Rendahnya kandungan nitrogen dan sulfur akan mengurangi kandungan NO_x dan SO_x yang merupakan green house gas (GHG). Kandungan karbon yang tinggi cocok untuk pembuatan briket dengan densitas tinggi (Chang et al., 2020). Cangkang kelapa sawit dapat diubah menjadi sumber energi terbarukan melalui proses pirolisis menghasilkan bio-oil atau syngas tergantung pada suhu dan waktu reaksi (Jamilatun, Elisthatiana, et al., 2020).

Pirolisis adalah dekomposisi termal biomassa tanpa kehadiran oksigen (Sukiran et al., 2011). Pirolisis lebih menjanjikan dibandingkan konversi termokimia yang lain karena lebih fleksibel di dalam pemilihan bahan baku (tidak perlu memperhatikan tipe, bentuk dan sifat fisik dan kimia bahan baku), dapat dioperasikan pada kisaran suhu

yang luas dan pada tekanan atmosfer, dan menghasilkan tiga jenis produk (padat, cair, dan gas) (Melia et al., 2021).



Gambar 2. Skema proses pirolisis

Cangkang sawit juga mengandung *valuable chemicals* diantaranya adalah phenol dan komponen phenolic yang berasal dari dekomposisi lignin (Ani, n.d.; Omoriyekomwan et al., 2016). Penelitian untuk mempelajari komposisi phenol dan komponen phenolic dalam cangkang sawit telah dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Yang An dkk, melakukan pirolisis katalitik cangkang sawit untuk memproduksi phenol dan hydrogen (An et al., 2020). Kani dkk, mempelajari phenol dan komponen phenolic hasil fast pirolisis organosolv lignin (Soongprasit et al., 2020). Produksi phenol melalui proses pirolisis juga telah dilakukan oleh peneliti yang lain.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari pengaruh suhu terhadap yield *valuable chemicals* pada fase organik hasil pirolisis cangkang kelapa sawit.

2. METODE PENELITIAN

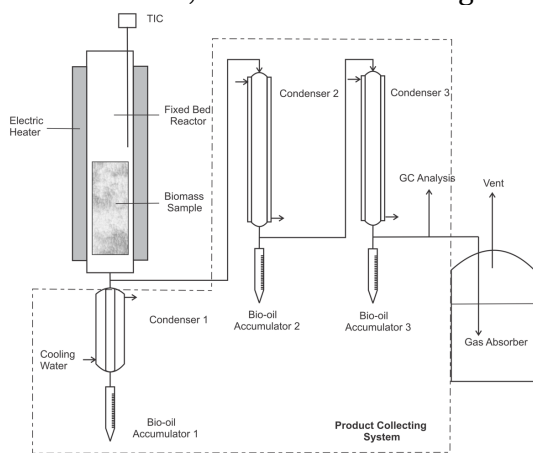
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah cangkang sawit. Cangkang sawit didapatkan dari perkebunan kelapa sawit di Borneo Barat. Sebelum digunakan cangkang kelapa sawit dibersihkan dengan dicuci menggunakan air bersih untuk menghilangkan pengotor, kemudian dikeringkan di bawah sinar matahari selama dua hari, dihaluskan menggunakan hammer mill, dan diayak untuk mendapatkan ukuran partikel -16 +40 mesh. Kemudian dilakukan pengeringan di dalam oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk mendapatkan kadar air sekitar 10% berat kering.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah reaktor fixed bed yang berbentuk silinder vertikal yang

terbuat dari stainless steel dengan diameter dalam 40 mm, diameter luar 44 mm, dan tinggi 600 mm. Reaktor dilengkapi dengan pemanas yang terbuat dari kawat nikelin yang dililitkan pada bagian luar reaktor. Suhu dan kecepatan pemanasan diukur dan diatur menggunakan thermocouples tipe K dan PID controller (Jamilatun et al., 2019).

Pirolisis dilakukan dalam kondisi isothermal dengan memasukkan 50 gram cangkang sawit ke dalam reaktor, kemudian dilakukan pemanasan dengan kecepatan pemanasan 10-12°C/menit, setelah suhu reaktor mencapai suhu yang diinginkan (300, 400, 500, dan 600°C) pemanasan dilanjutkan selama 60 menit secara isothermal.

Hasil pirolisis berupa gas terkondensasi ditampung dalam akumulator diukur beratnya dan dianalisis dengan GC-MS (QP2010-SE, Shimadzu). Gas yang tidak terkondensasi dialirkan ke tangki air untuk diserap, sedangkan char (arang) yang terbentuk diambil setelah pirolisis selesai, kemudian ditimbang.



Gambar 3. Rangkaian alat pirolisis dengan reaktor fixed bed

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Fase Organik.

Komposisi bio-oil hasil pirolisis cangkang sawit pada kisaran suhu 300 – 600°C ditunjukkan pada table 1. Hasil GC-MS juga menunjukkan bahwa pirolisis cangkang sawit menghasilkan berbagai macam senyawa yang berharga (*valuable chemicals*) seperti phenol, guaiacol, syringol, creosol, p-ethylguaiacol, eugenol, o-cresol, dan xylenol.

Tabel 1. Analisis GC-MS fase organik

Komponen (wt.%)	Suhu			
	300	400	500	600
Phenolics	25.32	52.93	50.7	49.94
Phenol	21.4	35.27	35.89	33.79
Phenol, 2-methoxy- (Guaiacol)	2.03	2.88	2.27	2.72
Phenol, 4-ethyl-2-methoxy- (p-Ethylguaiacol)	0.62	3.86	3.08	3.4
2-Methoxy-4-methylphenol (Creosol)	0.58	3.62	2.96	3.22
Phenol, 2,6-dimethoxy- (Syringol)		5.03	4.17	4.39
Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)- (Eugenol)		1.65	1.83	1.82
Phenol, 2-methyl- (o-Cresol)		0.41	0.33	0.39
Phenol, 2,4-dimethyl- (Xylenol)		0.21	0.17	0.21
4-Methoxy-3-(methoxymethyl)phenol	0.69			

Hasil pirolisis cangkang sawit pada suhu 300°C menghasilkan komponen utama phenol dan guaiacol. Pirolisis pada suhu 400°C menghasilkan komponen utama phenol, syringol, p-ethylguaiacol, creosol, guaiacol, dan eugenol. Pirolisis pada suhu 500°C menghasilkan komponen utama phenol, syringol, p-ethylguaiacol, creosol, guaiacol, dan eugenol. Sedangkan pirolisis pada suhu 600°C menghasilkan komponen utama phenol, syringol, p-ethylguaiacol, creosol, guaiacol, dan eugenol.

Phenol merupakan bahan baku utama dari berbagai proses kimia dan mempunyai aplikasi yang beragam (Ani, n.d.; Chang et al., 2018). Phenol bersama asam dan karbonil dapat bekerja sebagai antimikrobia sehingga dapat menghambat dekomposisi dari produk-produk awetan (Stołyhwo & Sikorski, 2005). Phenol juga merupakan bahan baku utama untuk pembuatan bio-plastik, resin phenolic atau epoxy resin atau polyurethane (Omoriyekomwan et al., 2016). Phenol juga digunakan dalam pembuatan spare-part automotif, peralatan rumah tangga, komponen elektronik, bahan perekat, cat, kayu lapis dan bahan isolasi (Ani, n.d.).

Guaiacol adalah komponen organik alam yang berperan sebagai minyak aromatik. Guaiacol diturunkan dari guaiacum dan terdapat pada berbagai macam minyak esensial dan merupakan precursor yang berguna untuk produksi *green fuels* karena dihasilkan dari biomassa. Guaiacol dan syringol adalah produk utama dari pirolisis *hardwood lignin* (K N et al., 2022).

Eugenol (2-Methoxy-4-prop-2-enylphenol) adalah senyawa fenolik dari

golongan fenilpropanoid dan merupakan komponen utama pada minyak cengkeh. Eugenol memiliki berbagai aktivitas farmakologis seperti antioksidan, anti-inflamasi, anti-mikroba, analgesia dan anestesi lokal (Yu et al., 2022).

Hasil dari pirolisis selain mempunyai aplikasi yang luas baik di

bidang farmasi, makanan, kosmetik, maupun industri, juga memiliki harga jual yang tinggi (tabel 2) yang menjadikan proses refinery *valuable chemicals* dari fase organik hasil pirolisis cangkang kelapa sawit sangat menjanjikan.

Tabel 2. Aplikasi dan harga jual *valuable chemicals* dari cangkang kelapa sawit

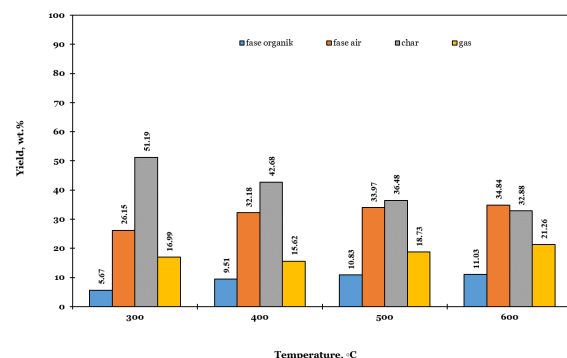
Komponen	Aplikasi	Harga (IDR)
Phenol	Anti mikrobia, resin phenolic, kayu lapis, produk farmasi (Ani, n.d.; Chang et al., 2018)	1.831.661,72/100 g
Guaiacol (Phenol, 2-methoxy-)	Anti kanker (Widiyarti et al., 2014), anti mikroba (N. Li et al., 2021), produksi vanillin (Soongprasit et al., 2020)	205.400,22/100 g
p-Ethylguaiacol (Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-)	Bahan pewangi, antioksidan (H. Li et al., 2018)	2.530.445,96/100 g
Creosol (2-Methoxy-4-methylphenol)	Bahan penyedap, bio-fuel (Aliu et al., 2021)	1.132.877,48/ml
Syringol (Phenol, 2,6-dimethoxy-)	Bahan penyedap, bahan pewangi (Api et al., 2022)	1.614.615,10/100 g
Eugenol (Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-)	Penghambat aktivitas campylobacter (Irem & Korkmaz, 2022), [35], menghambat respon inflamasi dan mengurangi jamur (Yu et al., 2022)	364.638,32/100 mg
o-Cresol (Phenol, 2-methyl-)	Bahan pewangi (Api et al., 2021), resin epoxy (Zeng et al., 2020)	109.687,95/100 mg
Xylenol (Phenol, 2,4-dimethyl-)	Bahan sintesis, medicinal intermediates, and insektisida (Tsukatani et al., 2010)	223.399,20/100 g

Pengaruh Suhu terhadap Yield Fase Organik

Pirolisis cangkang kelapa sawit menghasilkan fase organik, fase air, gas, dan char. Pengaruh suhu terhadap yield produk pirolisis ditunjukkan oleh gambar 4. Gambar 4 menunjukkan semakin tinggi suhu semakin tinggi yield fase organik, fase air, dan gas, sedangkan char semakin menurun. Yield fase organik tertinggi didapatkan pada suhu 600°C dengan yield fase organik sebesar 11.03%.

Meningkatnya suhu dari 300°C menjadi 500 °C menyebabkan kenaikan yield bio-oil dari 5.67% menjadi 11.03%. Kenaikan bio-oil pada kisaran suhu tersebut disebabkan oleh meningkatnya dekomposisi biomassa (Melia et al., 2021) karena dekomposisi hemiselulosa terjadi pada kisaran suhu 250-350°C, dekomposisi selulosa pada kisaran 325 -

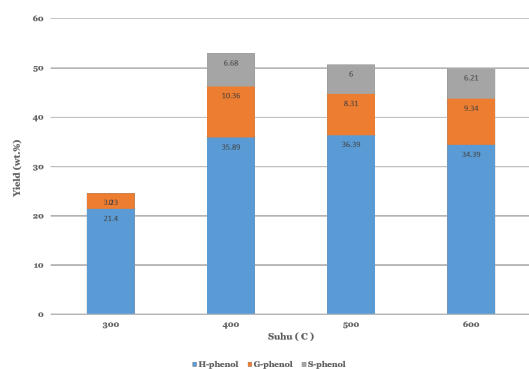
400°C, dan dekomposisi lignin pada suhu 300-550°C (K N et al., 2022).



Gambar 4. Yield produk pirolisis pada kisaran suhu 300-600°C

Pengaruh Suhu terhadap Yield Komponen Phenolik sebagai Valuable Chemicals

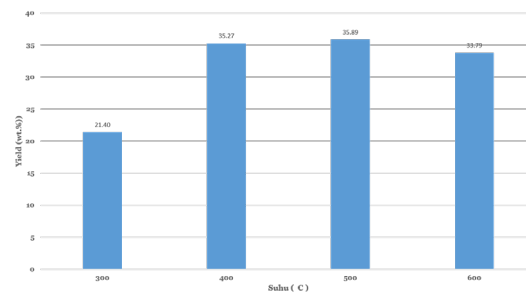
Pirolisis cangkang sawit menghasilkan *valuable chemicals* berupa komponen phenolik hasil dekomposisi lignin. Jenis dan kandungan *valuable chemicals* yang berupa komponen phenolics bergantung kepada kandungan lignin dan karakteristik struktur dari komponen phenolik dari biomassa. Lignin adalah polimer dengan cross-linking tiga dimensi yang mempunyai struktur yang kompleks yang terdiri atas tiga phenolpropanoid unit, yaitu H-phenol, G-phenol, dan S-phenol. H-phenol merupakan produk dengan p-hidroksiphenil unit hasil turunan dari p-coumaryl alcohol. G-phenol adalah produk dengan guaiacyl unit yang merupakan turunan dari coniferyl alcohol. S-phenol adalah produk dengan syringil unit yang merupakan turunan dari sinapyl alcohol. Sebagian besar unit tersebut digabungkan bersama dengan ikatan ether (C—C) dan ikatan C—C (Lyu et al., 2015; Soongprasit et al., 2020).



Gambar 5. Distribusi H-phenol, G-phenol, dan S-phenol dalam fase organik

Gambar 5 menunjukkan distribusi H-phenol, G-phenol, dan S-phenol pada suhu 300-600°C. Gambar menunjukkan semakin tinggi suhu yield G-phenol dan S-phenol semakin rendah. Sedangkan yield H-phenol semakin tinggi suhu maka yieldnya semakin besar sampai pada suhu 500°C, kemudian menurun pada suhu 600°C. Hal ini terjadi karena adanya deoksigenasi komponen oksigenat diantaranya komponen phenolic melalui demethylasi, demethoxylasi dan dehidroksilasi (K N et al., 2022) menjadi hidrokarbon alifatik dan hidrokarbon aromatic dengan mengeluarkan gas CO,

CO₂, dan yang lainnya (Jamilatun et al., 2019).

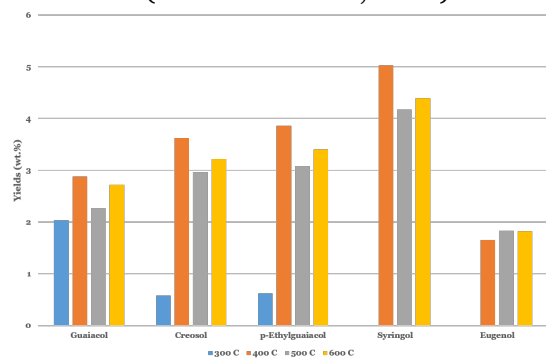


Gambar 6. Komposisi phenol pada berbagai suhu

Kandungan phenol dalam bio-oil dari cangkang sawit pada penelitian ini relatif tinggi dibandingkan dengan komponen phenolik yang lain. Tingginya kandungan phenol pada bio-oil dari cangkang sawit juga dilaporkan pada beberapa literature (Kim et al., 2010). Tingginya kandungan phenol dalam bio-oil dalam cangkang sawit disebabkan tingginya kandungan lignin (Chang et al., 2016). Lignin terdekomposisi melalui dehidrasi grup carboxyl pada rantai alkyl kemudian diikuti pemutusan ikatan inter-aromatik (Misson et al., 2009) dan hidrolisis ikatan ether pada lignin (Toor et al., 2011) menghasilkan phenol dan turunannya, benzene, xylene, pyridine dan turunan furan. Kandungan phenol dalam bio-oil pada penelitian ini berada pada kisaran 21.40-35.89 wt.% (gambar 6). Kandungan phenol tertinggi 35.89 wt.% pada suhu 500°C. Kandungan phenol pada suhu dibawah 300°C cukup tinggi padahal dekomposisi lignin terjadi pada suhu 300-550°C (K N et al., 2022). Pembentukan phenol pada suhu dibawah 300 disebabkan adanya pemutusan rantai cabang ferulic acid ester pada xylan dan juga polimerisasi unsaturated light komponen (Evans & Milne, 1987).

Pembentukan phenol meningkat dari 21.40 pada suhu 300°C menjadi 35.89 wt.% pada suhu 500°C, hal ini disebabkan oleh meningkatnya dekomposisi lignin yang terjadi pada kisaran suhu 300 sampai 500°C (Yang et al., 2007), dan juga karena adanya pemutusan rantai methoxy dan alkyl pada gugus-gugus yang tersubstitusi pada phenol seperti methoxy

phenol, alkyl phenol, alkyl methoxy phenol, dan oxygenated alkyl methoxy phenol (Soongprasit et al., 2020). Pada suhu di atas 500°C, kandungan phenol menurun seiring dengan meningkatnya suhu yang mana hal ini disebabkan oleh adanya deoksigenasi phenol menjadi hidrokarbon aromatic dengan mengeluarkan gas CO, CO₂, dan yang lainnya (Jamilatun, Budhijanto, et al., 2020) atau karena adanya electrophilic aromatic substitution melalui raksi alkilasi dan asilasi (Roswanda et al., 2018).



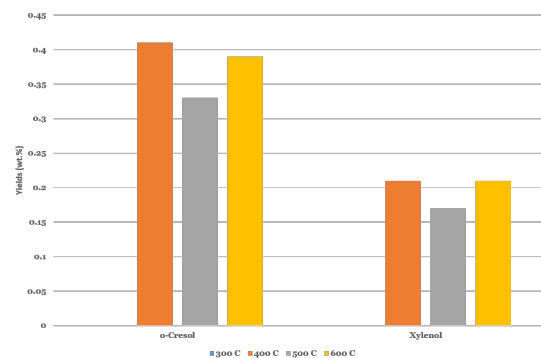
Gambar 7. Yield *valuable chemicals* (G-phenol dan S-phenol) pada suhu 300-600 C

Gambar 7 menunjukkan yield *valuable chemicals* dalam bentuk G-phenol (guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol) dan S-phenol (syringol, dan eugenol) pada suhu 300-600°C. Guaiacol dan syringol termasuk dalam kategori methoxy phenol, komponen phenol dengan grup methoxy. Sedangkan creosol dan p-ethylguaiacol termasuk dalam kategori alkyl-methoxy phenol, komppnen phenol dengan grup alkil dan grup methoxy. Gambar menunjukkan guaiacol dan syringol merupakan komponen yang paling tinggi. Tingginya kandungan guaiacol dan syringol menunjukkan bahwa produk berasal dari pirolisis hardwood lignin.

Pada suhu 400°C produk didominasi oleh guaiacol dan syringol. Pada suhu 400 sampai 600°C terjadi penurunan jumlah kedua komponen tersebut dan peningkatan jumlah phenol, hal ini disebabkan oleh adanya radical induced rearrangement (ipso-substitution) reactions dengan menghasilkan cresol dan xylenol, kemudian kedua senyawa aromatic ini mengalami dekomposisi lebih lanjut dengan menghasilkan phenol

melalui reaksi demethylasi (Stefanidis et al., 2014).

Meningkatnya suhu pirolisis menyebabkan kandungan guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, dan syringol cenderung menurun. Kandungan guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, dan syringol tertinggi didapatkan pada suhu 400°C dengan yield berturut-turut sebesar 2.88, 3.62, 3.86, dan 5.03 wt.%. Kandungan eugenol tertinggi didapatkan pada suhu 500 °C dengan yield 1.83 wt.%.



Gambar 8. Yield *valuable chemicals* (H-phenol) pada suhu 300-600 C

Gambar 8 menunjukkan yield H-phenol (o-cresol dan xylenol) pada suhu 300-400°C. Cresol dan xylenol termasuk dalam kategori alkil phenol, komponen phenol dengan grup alkil. Kedua komponen tersebut termasuk dalam phenol sederhana. Phenol sederhana terbentuk dari hasil dekomposisi selulosa dan hemiselulosa (Evans & Milne, 1987) Kedua komponen tersebut juga terbentuk karena adanya radical induced rearrangement (ipso-substitution) reactions pada guaiacol dan syringol dan demethoxilasi pada alkil methoxy phenol. Reaksi lebih lanjut kedua komponen tersebut melalui reaksi demethylasi menghasilkan phenol. Pada suhu 300°C kandungan kedua komponen tersebut tidak terdeteksi. Sedangkan pada suhu diatas 300°C jumlah o-cresol sedikit menurun sedangkan jumlah xylenol cenderung stabil. Hal ini terjadi dimungkinkan karena adanya perbedaan antara kecepatan pembentukan dan dekomposisi kedua komponen tersebut pada suhu tinggi.

Meningkatnya suhu menyebabkan kandungan o-cresol sedikit menurun dan kandungan xilenol bernilai tetap. Kandungan o-cresol dan xilenol tertinggi didapatkan pada suhu 400°C dengan yield sebesar 0.41 dan 0.21 wt.%.

4. KESIMPULAN

Pirolisis cangkang sawit menghasilkan fase organik, fase air, gas, dan char. Fase organik hasil pirolisis mempunyai kandungan *valuable chemicals* seperti phenol, guaiacol, syringol, creosol, p-ethylguaiacol, eugenol, o-cresol, dan xilenol. Komponen-komponen tersebut memiliki aplikasi dalam bidang farmasi, makanan, kosmetik, dan industri dan mempunyai harga jual yang tinggi. Meningkatkan suhu pirolisis menyebabkan turunnya kandungan G-phenol dan S-phenol seperti guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, dan syringol, dan meningkatkan kandungan H-phenol seperti phenol. Kandungan guaiacol, creosol, p-ethylguaiacol, o-cresol dan syringol tertinggi didapatkan pada suhu 400 C dengan yield berturut-turut sebesar 2.88, 3.62, 3.86, 0.41, dan 5.03 wt.%. Kandungan phenol dan eugenol tertinggi didapatkan pada suhu 500°C dengan yield sebesar 35.89 dan 1.83 wt.%. Kandungan xilenol tertinggi didapatkan pada suhu 600°C dengan yield sebesar 0.21 wt.%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aliu, E., Hart, A., & Wood, J. (2021). Mild-Temperature hydrodeoxygenation of vanillin a typical bio-oil model compound to Creosol a potential future biofuel. *Catalysis Today*, 379, 70–79.
<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2020.05.066>

An, Y., Tahmasebi, A., Zhao, X., Matamba, T., & Yu, J. (2020). Catalytic reforming of palm kernel shell

microwave pyrolysis vapors over iron-loaded activated carbon: Enhanced production of phenol and hydrogen. *Bioresource Technology*, 306.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123111>

Ani, F. N. (n.d.). *Oil palm shell as a source of phenol*.
<https://www.researchgate.net/publication/285298658>

Api, A. M., Belsito, D., Biserta, S., Botelho, D., Bruze, M., Burton, G. A., Buschmann, J., Cancellieri, M. A., Dagli, M. L., Date, M., Dekant, W., Deodhar, C., Fryer, A. D., Gadhia, S., Jones, L., Joshi, K., Kumar, M., Lapczynski, A., Lavelle, M., ... Tokura, Y. (2021). RIFM fragrance ingredient safety assessment, o-cresol, CAS Registry Number 95-48-7. In *Food and Chemical Toxicology* (Vol. 149). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112112>

Api, A. M., Belsito, D., Botelho, D., Bruze, M., Burton, G. A., Cancellieri, M. A., Chon, H., Dagli, M. L., Date, M., Dekant, W., Deodhar, C., Fryer, A. D., Jones, L., Joshi, K., Kumar, M., Lapczynski, A., Lavelle, M., Lee, I., Liebler, D. C., ... Tokura, Y. (2022). RIFM fragrance ingredient safety assessment, 2,6-dimethoxyphenol, CAS Registry Number 91-10-1. In *Food and Chemical Toxicology* (Vol. 165). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.fct.2022.113092>

Chang, G., Huang, Y., Xie, J., Yang, H., Liu, H., Yin, X., & Wu, C. (2016). The lignin pyrolysis composition and pyrolysis products of palm kernel shell, wheat straw, and pine sawdust. *Energy Conversion and Management*, 124, 587–597.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.038>

Chang, G., Miao, P., Yan, X., Wang, G., & Guo, Q. (2018). Phenol preparation

- from catalytic pyrolysis of palm kernel shell at low temperatures. *Bioresource Technology*, *253*, 214–219.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.084>
- Direktorat Jendral Perkebunan. (2021). Statistik Perkebunan Indonesia 2018-2021. *Secretariate of Directorate General of Estates*, 1–82.
- Evans, R. J., & Milne, T. A. (1987). Molecular characterization of the pyrolysis of biomass. *Energy & Fuels*, *1*(2), 123–137.
<https://doi.org/10.1021/ef00002a001>
- Irem, B., & Korkmaz, O. (2022). *The anti-campylobacter activity of eugenol and its potential for poultry meat safety: A review*. 394(June).
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133519>
- Jamilatun, S., Budhijanto, Rochmadi, Yuliestyan, A., Aziz, M., Hayashi, J. ichiro, & Budiman, A. (2020). Catalytic pyrolysis of spirulina platensis residue (SPR): Thermochemical behavior and kinetics. *International Journal of Technology*, *11*(3), 522–531.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i3.2967>
- Jamilatun, S., Budiman, A., Anggorowati, H., Yuliestyan, A., Pradana, Y. S., Budhijanto, & Rochmadi. (2019). Ex-situ catalytic upgrading of Spirulina platensis residue oil using silica alumina catalyst. *International Journal of Renewable Energy Research*, *9*(4), 1733–1740.
<https://doi.org/10.20508/ijrer.v9i4.10119.g7776>
- Jamilatun, S., Elisthatiana, Y., Aini, S. N., Mufandi, I., & Budiman, A. (2020). Effect of Temperature on Yield Product and Characteristics of Bio-oil From Pyrolysis of Spirulina platensis Residue. *Elkawanie*, *6*(1), 96.
<https://doi.org/10.22373/ekw.v6i1.6323>
- K N, Y., T, P. D., P, S., S, K., R, Y. K., Varjani, S., AdishKumar, S., Kumar, G., & J, R. B. (2022). Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*, *286*(P2), 131824.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131824>
- Kim, S. J., Jung, S. H., & Kim, J. S. (2010). Fast pyrolysis of palm kernel shells: Influence of operation parameters on the bio-oil yield and the yield of phenol and phenolic compounds. *Bioresource Technology*, *101*(23), 9294–9300.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.110>
- Li, H., Lin, L., Feng, Y., Zhao, M., Li, X., Zhu, Q., & Xiao, Z. (2018). Enrichment of antioxidants from soy sauce using macroporous resin and identification of 4-ethylguaiacol, catechol, daidzein, and 4-ethylphenol as key small molecule antioxidants in soy sauce. *Food Chemistry*, *240*, 885–892.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.001>
- Li, N., Su, J., Wang, H., & Cavaco-Paulo, A. (2021). Production of antimicrobial powders of guaiacol oligomers by a laccase-catalyzed synthesis reaction. *Process Biochemistry*, *111*, 213–220.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2021.07.018>
- Lyu, G., Wu, S., & Zhang, H. (2015). Estimation and comparison of bio-oil components from different pyrolysis conditions. *Frontiers in Energy Research*, *3*(JUN), 1–11.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2015.00028>
- Misson, M., Haron, R., Kamaroddin, M. F. A., & Amin, N. A. S. (2009). Pretreatment of empty palm fruit bunch for production of chemicals via catalytic pyrolysis. *Bioresource*

- Technology*, 100(11), 2867–2873.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.060>
- Omoriyekomwan, J. E., Tahmasebi, A., & Yu, J. (2016). Production of phenol-rich bio-oil during catalytic fixed-bed and microwave pyrolysis of palm kernel shell. *Bioresource Technology*, 207, 188–196.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.002>
- Roswanda, R., Sirampun, A. D., Mukti, R. R., & Mujahidin, D. (2018). A straightforward selective acylation of phenols over ZSM-5 towards making paracetamol precursors. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 13(3), 573–587.
<https://doi.org/10.9767/bcrec.13.3.2856.573-587>
- Soongprasit, K., Sricharoenchaikul, V., & Atong, D. (2020). Phenol-derived products from fast pyrolysis of organosolv lignin. *Energy Reports*, 6, 151–167.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.08.040>
- Stefanidis, S. D., Kalogiannis, K. G., Iliopoulou, E. F., Michailof, C. M., Pilavachi, P. A., & Lappas, A. A. (2014). A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 143–150.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.013>
- Stołyhwo, A., & Sikorski, Z. E. (2005). Polycyclic aromatic hydrocarbons in smoked fish - A critical review. *Food Chemistry*, 91(2), 303–311.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.06.012>
- Subiyanto, B., Basri, H., Sari, L. N., & Rosalita, Y. (2007). *Komponen Kimia Cangkang Sawit (Elaeis guineensis Jacq .) dan Pengaruhnya terhadap Sifat Beton Ringan Chemical Components of Oil Palm (Elaeis guineensis Jacq .) Shell and Its Effect on Light Concrete Performance*. 5(4).
- Susanto, J. P., Dwi, A., Dan, S., & Suwedi, N. (2020). *Perhitungan Potensi Limbah Padat Kelapa Sawit untuk Sumber Energi Terbaharukan dengan Metode LCA Palm Solid Wastes Potential Calculation for Renewable Energy with LCA Method*. 18(2), 165–172.
- Toor, S. S., Rosendahl, L., & Rudolf, A. (2011). Hydrothermal liquefaction of biomass: A review of subcritical water technologies. In *Energy* (Vol. 36, Issue 5, pp. 2328–2342). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.013>
- Tsukatani, H., Okudaira, H., Shitamichi, O., Uchimura, T., & Imasaka, T. (2010). Selective determination of 2,4-xyleneol by gas chromatography/supersonic jet/resonance-enhanced multiphoton ionization/time-of-flight mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 682(1–2), 72–76.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2010.09.043>
- Widiyarti, G., Abbas, J., & Anita, Y. (2014). Biotransformation and cytotoxic activity of guaiacol dimer. *Indonesian Journal of Chemistry*, 14(2), 179–184.
<https://doi.org/10.22146/ijc.21256>
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Yu, B., Li, C., Gu, L., Zhang, L., Wang, Q., Zhang, Y., Lin, J., Hu, L., Jia, Y., Yin, M., & Zhao, G. (2022). Eugenol protects against *Aspergillus fumigatus* keratitis by inhibiting inflammatory response and reducing

fungal load. *European Journal of Pharmacology*, 924.
<https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2022.174955>

Zeng, Y., Liu, S., Xu, X., Chen, Y., & Zhang, F. (2020). Fabrication and curing properties of o-cresol formaldehyde epoxy resin with reversible cross-links by dynamic boronic ester bonds. *Polymer*, 211.
<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.123116>