

DOI: <https://doi.org/10.21009/JRSKT.091.02>

Karakterisasi Minyak Hasil Pirolisis Berbahan Dasar Serut Gergaji Kayu Akasia (*Acacia mangium*) dengan Variasi Suhu pada Pirolisis

Elida Togatorop¹, Erdawati^{1,*}, Sugeng Priyanto²

¹ Program Studi Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Gedung KH. Asj'arie, Jl. Rawamangun Muka, 13220, Jakarta, Indonesia.

² Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, Gedung KH. Asj'arie, Jl. Rawamangun Muka, 13220, Jakarta, Indonesia.

*Email: erda_wati_0912@yahoo.com

Informasi Artikel

Diterima: 17/09/2022

Direvisi: 05/01/2023

Online: 30/06/2023

Edisi: 30/06/2023

Abstrak

Bahan bakar merupakan salah satu kebutuhan yang sangat penting bagi kehidupan sehari-hari dengan penggunaan yang sangat signifikan. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan bahan bakar alternatif berbasis biomasa dengan metode pirolisis lambat. Pada proses pirolisis lambat menggunakan variasi suhu 250°C, 300°C, dan 350°C. Suhu optimum minyak hasil pirolisis serut gergaji kayu akasia diperoleh pada suhu 300°C. Minyak hasil pirolisis dari serut gergaji kayu akasia yang dihasilkan memiliki karakteristik fisika yakni viskositas 4,62 cSt, densitas 0,99 gram/mL, dan pH 3,53 serta mengandung komponen senyawa fenol, alkohol, keton dan senyawa asam organik. Dari senyawa komponen yang diperoleh adalah dominan mengandung senyawa fenol yang merupakan hasil degradasi lignin.

Kata kunci: GC-MS, minyak pirolisis, pirolisis

Abstract

Fuel is one of the needs that is very important for everyday life with a very significant use. This research was conducted to obtain biomass-based alternative fuels using slow pyrolysis method. The slow pyrolysis process use temperature variations of 250 °C, 300 °C, and 350 °C. The optimum temperature of the oil from the acacia sawdust pyrolysis was obtained at 300 °C. Pyrolysis oil from acacia wood sawdusts produced has physical characteristics viscosity 4.62 cSt, density 0.99 g/mL, and pH 3.53 and contains components of phenol compounds, alcohols, ketones and organic acid. From the component obtained, phenol compounds are the result of lignin degradation.

Keywords: GC-MS, pyrolysis oil, pyrolysis

Pendahuluan

Bahan bakar minyak merupakan kebutuhan yang sangat penting dalam kehidupan. Bahan bakar yang digunakan selama ini berasal dari minyak mentah yang diambil dari dalam bumi (Jie et al., 2019), sedangkan minyak bumi merupakan bahan bakar yang tidak dapat diperbaharui, sehingga untuk beberapa tahun ke depan diperkirakan masyarakat akan mengalami kekurangan bahan bakar (Khare et al., 2019). Ditinjau dari sifatnya yang tidak dapat diperbaharui, kebutuhan BBM yang semakin lama semakin meningkat akan menjadi masalah nantinya (Milewska & Milewski, 2022). Kebutuhan bahan bakar di Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat, pada tahun 2012 pemakaian bahan bakar telah mencapai sebesar 45 juta kilo liter (Deendarlianto et al., 2020). Diperkirakan pada tahun 2020 mendatang, Indonesia akan menjadi negara importer bahan bakar minyak (BBM) dengan jumlah yang sangat besar (Rahman et al., 2021).

Pirolisis adalah proses mengubah bahan organik menjadi produk bernilai tinggi dengan menggunakan dehidrasi tanpa pelarut (Mong et al., 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, telah ada penekanan yang semakin besar pada pengembangan bahasa dan energi. Limbah kayu, obat tradisional untuk pirolisis, diekstrak dari kulit pohon spesies *Acacia mangium* (Ahmed et al., 2021). Sebagai hasilnya, ini menjadi alternatif terbaik untuk memanfaatkan fitur jangka panjang dari perkembangan yang pesat sambil juga berkembang di tanah yang kurang subur. Meskipun gergaji kayu sering dianggap sampah, ia memiliki potensi yang cukup besar sebagai sumber energi (Zhang et al., 2020). Pirolisis dapat mengubah gergaji menjadi minyak, gas, dan arang, yang semuanya memiliki nilai ekonomi (Mishra & Mohanty, 2022). Sementara itu, minyak adalah bahan baku yang digunakan oleh kimia sebagai alternatif, pelarut, dan bahkan (Gevorgyan et al., 2021). Karena ini, karakteristik serut gergaji kayu akasia dapat memiliki dampak yang signifikan terhadap pasokan energi secara keseluruhan.

Variasi suhu selama pirolisis memiliki pengaruh penting dalam menentukan kualitas dan kandungan produk akhir (Gao et al., 2023). Suhu yang lebih rendah cenderung menghasilkan peningkatan produksi arang untuk menghasilkan lebih banyak gas dan minyak (Ain et al., 2021). Oleh sebab itu penelitian ingin mengembangkan energi alternatif yang dapat diperbaharui yang sifatnya lebih ramah lingkungan yaitu berasal dari tanaman pertanian atau kehutanan. Salah satunya adalah minyak hasil pirolisis atau *biocrude* yang mengandung komponen senyawa hasil degradasi selulosa, hemiselulosa dan lignin yang dihasilkan melalui metode pirolisis. Degradasi selulosa menghasilkan senyawa levoglukosan dan senyawa alkana (Suciu et al., 2021). Degradasi hemiselulosa menghasilkan senyawa keton dan alkohol, sedangkan degradasi lignin menghasilkan senyawa turunan fenol (Chen et al., 2022). Pada penelitian ini bahan baku yang digunakan adalah kayu Akasia (*Acacia mangium*) karena mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin, serta memiliki nilai kalor yang tinggi berkisar 4800-4900 kkal/kg yang dapat berpotensi sebagai bahan bakar (Duong et al., 2022).

Metodologi Penelitian

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan dari Desember 2017 sampai Juli 2018. Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia Kampus A dan Laboratorium CNC Teknik Mesin Universitas Negeri Jakarta.

Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan serut gergaji kayu akasia, dietil eter dan aquades. Alat yang digunakan dalam penelitian adalah gelas kimia, corong pisah, piknometer, viskometer Ostwald, pH meter, gelas ukur, termometer, cawan penguap, botol vial, balp, oven, alat pirolisis dan GC-MS.

Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi suhu pirolisis dan sebagai variabel terikat adalah karakteristik fisika yakni berat jenis, viskositas, pH, dan komponen senyawa kimia.

Prosedur Penelitian

Pengumpulan serut gergaji kayu akasia

Kayu akasia diambil dari salah satu hutan di Bogor, Jawa Barat. Kemudian dijadikan dalam bentuk serut gergaji kayu akasia.

Pengeringan

Serut gergaji dikeringkan di bawah sinar matahari. Tujuan pengeringan adalah untuk menghilangkan kadar air yang terdapat pada serut gergaji kayu akasia tersebut.

Pembuatan minyak pirolisis

Pembuatan minyak pirolisis dilakukan dengan cara pirolisis lambat pada biomasa serut gergaji kayu akasia. Biomasa serut gergaji kayu akasia 2500 Kg. Jika semua bahan dan persiapan proses sudah siap, selanjutnya memasukkan serut gergaji ke reaktor pirolisis dan menyalakan aliran listrik pada alat pirolisis. Kemudian dibakar selama 1-7 jam, tergantung dari kondisi umpan biomasa saat dimasukkan ke dalam reaktor. Gas yang dihasilkan pada proses ini dialirkan ke kondensor yang dikondensasi dari gas menjadi cair yaitu minyak pirolisis.

Untuk mengetahui kesesuaian minyak pirolisis sebagai bahan bakar maka dilakukan uji kemampuan bakar. Uji dilakukan secara visual, menggunakan sebuah *cotton bud* kemudian dibakar dan diperhatikan apakah terjadi nyala atau tidak.

Teknik Pengumpulan Data dan Analisis Data

Minyak pirolisis yang dihasilkan dikarakterisasi sifat fisika dan kimianya. Karakteristik yang diuji yaitu berupa densitas, viskositas, pH, dan kandungan senyawa kimia.

Densitas

Pengukuran densitas menggunakan piknometer 5 mL dengan suhu 40 °C. Piknometer terlebih dahulu dicuci sampai bersih kemudian dikeringkan sampai kering. Setelah piknometer kering, piknometer ditimbang dalam keadaan kosong (m_0) untuk mengetahui berat piknometer sebelum diisi dengan minyak pirolisis. Setelah diketahui berat piknometer kosongnya, piknometer diisi dengan minyak pirolisis sebanyak 5 mL, kemudian dimasukkan ke dalam penangas dan dipanaskan hingga suhunya mencapai 40 °C. Setelah suhunya mencapai 40 °C, didiamkan selama 10 menit dan kemudian piknometer yang berisi minyak pirolisis ditimbang kembali sehingga didapat berat piknometer ditambah berat minyak pirolisis (m_1). Pada piknometer kedua diisi dengan aquades dan dilakukan perlakuan yang sama dengan minyak pirolisis dan akan didapat berat piknometer berisi air (m_2). Densitas minyak pirolisis dapat ditentukan dengan:

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{m_2 - m_0} \quad \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

m_0 : berat piknometer dalam keadaan kosong

m_1 : berat piknometer yang berisi minyak pirolisis

m_2 : berat piknometer yang berisi air

Viskositas

Pada penentuan viskositas, digunakan viskometer Ostwald. Viskometer Ostwald dicuci dan dikeringkan. Kemudian mengisi minyak pirolisis ke dalam viskometer Ostwald secukupnya dan dimasukkan ke dalam penangas kemudian dipanaskan sampai suhunya mencapai 40 °C. Setelah suhunya mencapai 40 °C, didiamkan selama 10 menit agar suhunya konstan. Minyak pirolisis diambil menggunakan balp, hingga gari batas awal, kemudian balp dilipat untuk mengeluarkan minyak pirolisis. Dihitung waktu alir dari batas awal sampai batas akhir dengan menggunakan stopwatch. Viskositas dapat ditentukan dengan:

$$\eta = \frac{\eta_o \cdot t \cdot \rho}{t_o \cdot \rho_o} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

η_o : viskositas air

t_o : waktu alir air

ρ : densitas minyak pirolisis

ρ_o : densitas air

t : waktu alir minyak pirolisis

pH

Pada penentuan pH, digunakan alat pH meter. Pertama melakukan kalibrasi terhadap pH meter dengan cara mencelupkan ujung elektroda pH meter ke dalam larutan buffer pH 4 dan pH 7 kemudian dilap sampai kering. Disiapkan minyak pirolisis secukupnya (± 5 mL) kemudian dicelupkan ujung elektroda pH meter ke dalam sampel. Dicatat angka yang tertera pada pH meter.

Komponen senyawa kimia

Pada penentuan komponen senyawa kimia yang terkandung dalam minyak pirolisis dari hasil pirolisis digunakan instrumen GC-MS. Dioperasikan alat GC-MS dan perangkat komputer berikut softwarenya. Diinjeksikan minyak pirolisis pada suhu tertentu. Zat terlarut akan teradsorpsi kemudian akan merambat dengan laju rambatan masing-masing komponen. Detektor mencatat sederetan sinyal yang timbul akibat perubahan konsentrasi dan perbedaan laju reaksi. Melihat hasil pada detektor.

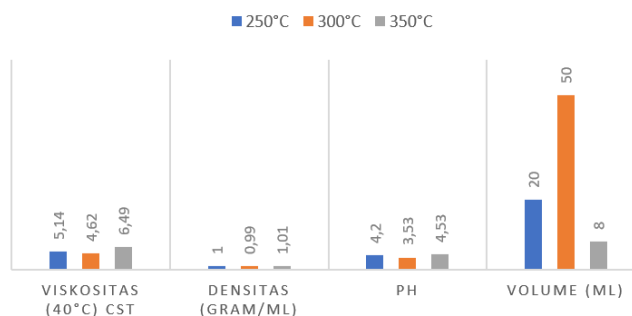
Hasil dan Pembahasan

Analisis Pengaruh Suhu terhadap Karakteristik Sifat Fisika dan Kimia Minyak Pirolisis

Adapun parameter sifat fisika kimia yang ingin diketahui pada berbagai suhu pirolisis adalah densitas, viskositas, pH, dan komponen senyawa kimia minyak pirolisis yang dihasilkan.

Tabel 1. Hasil penelitian dengan variasi suhu pirolisis.

Parameter	Suhu(°C)		
	250	300	350
Densitas	16,42	16,41	16,42
	16,42	16,1	16,42
	16,42	16,41	16,42
Viskositas	5,10	4,58	6,20
	4,80	4,55	6,52
	5,17	4,45	6,30
pH	4,20	3,43	4,35



Gambar 1. Grafik hasil penelitian dengan variasi suhu pirolisis

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini berdasarkan variasi suhu pada pirolisis akan dibandingkan dengan karakteristik fisika minyak hasil pirolisis menurut penelitian Isahak 2012, yang disajikan dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Karakteristik fisika minyak hasil pirolisis dengan variasi suhu (Isahak et al. 2012)

Sampel minyak pirolisis	Suhu (°C)			Referensi (Isahak et al. 2012)
	250	300	350	
Viskositas suhu 40 (cSt)	5,14	4,62	6,49	31
Densitas (gram/mL)	1,00	0,99	1,01	0,99
pH	4,20	3,53	4,35	3,82
Volume (mL)	20	50	8	-

Dari Tabel 2, karakteristik minyak pirolisis yang meliputi viskositas, densitas, dan pH dapat dilihat bahwa pada suhu 300 °C merupakan suhu paling optimal dari 3 variasi suhu yang digunakan, yaitu pada suhu 250 °C, 300 °C, dan 350 °C, karena karakteristik fisiknya paling mendekati karakteristik minyak hasil pirolisis dari referensi (Isahak et al. 2012). Data hasil penelitian tersebut digunakan sebagai patokan karena belum adanya data SNI untuk minyak pirolisis.

Data yang diperoleh menunjukkan bahwa viskositas paling tinggi dihasilkan pada suhu 350 °C. Hal ini membuktikan bahwa produk minyak pirolisis suhu tersebut sangat kental. Kekentalan produk minyak pirolisis pada suhu tersebut disebabkan oleh stuktur kimia yang dihasilkan dari penyusun biomasa serut gergaji kayu akasia pada proses pirolisis. Semakin panjang ikatan dari struktur kimia penyusunnya, maka viskositas akan semakin besar pula (Isahak et al. 2012).

Dari data densitas yang ditunjukkan pada Tabel 2, nilai densitas yang diperoleh rata-rata bernilai 0,9-1,0 g/mL. Densitas yang paling rendah diperoleh pada suhu 300 °C, sedangkan nilai densitas paling tinggi diperoleh pada suhu 350 °C. Jika nilai densitas hasil penelitian saat ini yaitu 0,999 g/mL dibandingkan dengan penelitian terdahulu, nilai densitas yang diperoleh pada penelitian ini tidak jauh berbeda dengan nilai densitas yang diperoleh pada penelitian sebelumnya dengan densitas 0,940 g/mL. Maka densitas dapat dipengaruhi oleh komponen senyawa kimia yang dimiliki minyak pirolisis yang dihasilkan.

pH minyak pirolisis yang diperoleh pada variasi suhu yang telah disebutkan dalam Tabel 2, dapat dilihat bahwa pH yang paling rendah adalah 3,43 pada suhu 300 °C dan 4,35 pada suhu 350 °C. Jika dibandingkan dengan (Isahak et al. 2012), yang paling mendekati adalah pH 3,43 yang diperoleh pada suhu 300 °C. Keasaman yang tinggi dapat dipengaruhi oleh adanya kandungan asam yang diperoleh dalam minyak pirolisis akibat proses pirolisis yang memecah selulosa dan lignin serta zat lainnya yang bersifat asam. Nilai pH minyak pirolisis yang cukup tinggi yaitu berkisar 2,5-3,0 menyarankan bahwa penyimpanan produk cair ini sebaiknya ditempatkan pada bahan tahan karat seperti gelas kaca atau plastik. Dengan demikian minyak pirolisis dengan pH yang tinggi hanya dapat digunakan sebagai bahan bakar langsung seperti *boiler*, penggunaan untuk mesin langsung tidak disarankan karena dapat menyebabkan mesin berkarat akibat adanya kandungan asam yang tinggi.

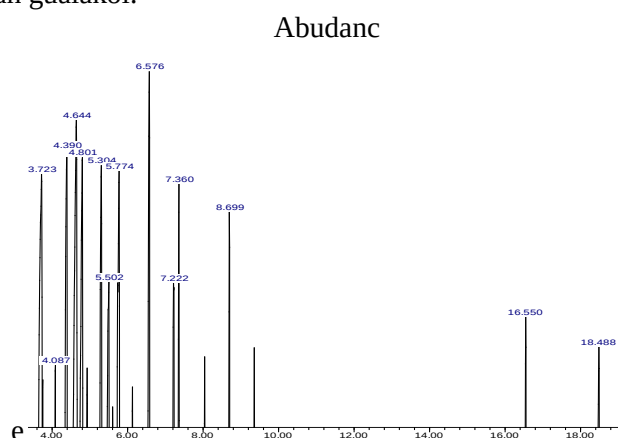
Berdasarkan hasil analisis variasi suhu pirolisis lambat terhadap minyak pirolisis yang dihasilkan, dapat disimpulkan bahwa suhu paling optimum serut gergaji kayu akasia pada pirolisis lambat adalah suhu 300 °C.

Komponen Senyawa Kimia Melalui Karakterisasi GC-MS

Pada penelitian ini, identifikasi produk cair dilakukan dengan menggunakan metode GC-MS. Identifikasi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi komponen senyawa pada produk cair hasil pirolisis. Berikut adalah hasil pemecahan spektra pada GC-MS terhadap produk cair pirolisis yang ditunjukkan pada Gambar 2.

Puncak-puncak spektra atau biasa juga disebut dengan *peak* di atas menunjukkan jenis-jenis komponen yang dikandung oleh produk minyak hasil pirolisis. Berdasarkan Gambar 2 spektrum di atas dapat dilihat bahwa jumlah komponen yang teridentifikasi sebanyak 14 *peak*. Komponen-komponen senyawanya dapat dilihat dalam Tabel 3.

Berdasarkan Tabel 3 terlihat bahwa komponen utama cairan produk atau minyak hasil pirolisis tersebut adalah fenol, senyawa asam, aromatik dan beberapa senyawa lainnya. Kandungan senyawa aromatik yaitu benzena berasal dari degradasi hemiselulosa. Sedangkan degradasi lignin diidentifikasi dengan adanya fenol dan guaiakol.



Gambar 2. Analisis spektrum senyawa minyak hasil pirolisis dengan GC-MS

Tabel 3. Karakteristik GC-MS produk pirolisis serut gergaji kayu akasia

No	Komponen	Titik didih	Area <i>peak</i>
1	Fenol	188	3,723
2	Metoksi toluene	169	4,087
3	2-metilfenol	174	4,390
4	<i>p</i> -Kresol	202	4,644
5	2,3-Xilenol	206	4,801
6	2,3-Dimetilfenol	218	5,304
7	3,4-Dimetilfenol	218	5,502
8	Kresol	221	5,774
9	4-Etilguaiakol	205	6,576
10	2,3-Dimetoksilfenol	169	7,222
11	2-Metoksi-4-propil- fenol	281	7,360
12	Asam 5-etil-2,4-dimetilfuran-3-karboksilat metil ester	231	8,699
13	Asam Tetrakosanoat metil ester	273	16,550
14	Asam heksakosanoat metil ester	271	18,488

Berdasarkan komponen yang ditunjukkan dalam Tabel 3 minyak hasil pirolisis memiliki komponen yang diperlukan untuk menjadi minyak hasil pirolisis. Senyawa fenol dapat meningkatkan kemampuan

terbakar produk cair. Sedangkan senyawa alkohol memiliki sifat mudah terbakar sehingga dapat juga meningkatkan pembakaran yang membentuk karbon dioksida.

Produk cair atau minyak hasil pirolisis serut gergaji kayu akasia ini kemudian dilakukan uji pembakaran untuk mengetahui kemampuan bakarnya. Hasil pengujian yang dilakukan didapatkan bahwa produk cair ini dapat terbakar. Hal ini mengindikasikan minyak pirolisis dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah proses pirolisis lambat akan menghasilkan konversi minyak hasil pirolisis atau produk cair pada kondisi temperatur optimum 300 °C untuk bahan uji biomasa berbahan dasar serut gergaji kayu akasia (*Acacia mangium*). Minyak hasil pirolisis yang didapat memiliki karakteristik kimia yakni viskositas 4,6275 cSt, densitas sebesar 0,9997 g/mL dan pH sebesar 3,53. Minyak hasil pirolisis yang didapat memiliki warna hitam pekat dan bau khas asap yang tajam. Minyak hasil pirolisis yang dihasilkan juga memiliki sifat dapat terbakar sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Berdasarkan hasil karakterisasi GC-MS, minyak pirolisis yang dihasilkan mengandung komponen senyawa kimia yang berasal dari proses degradasi termal selulosa, hemiselulosa dan lignin yakni senyawa alkana, senyawa aromatik, dan senyawa fenol.

Daftar Pustaka

- Ahmed, A., Bakar, M. S. A., Razzaq, A., Hidayat, S., Jamil, F., Amin, M. N., Sukri, R. S., Shah, N. S., & Park, Y.-K. (2021). Characterization and Thermal Behavior Study of Biomass from Invasive *Acacia mangium* Species in Brunei Preceding Thermochemical Conversion. *Sustainability*, 13(9), 5249. <https://doi.org/10.3390/su13095249>
- Ain, Q., Shafiq, M., Capareda, S. C., & Bareen, F. (2021). Effect of different temperatures on the properties of pyrolysis products of *Parthenium hysterophorus*. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(3), 101197. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101197>
- Chen, Z., Wang, Y., Cheng, H., & Zhou, H. (2022). Hemicellulose degradation: An overlooked issue in acidic deep eutectic solvents pretreatment of lignocellulosic biomass. *Industrial Crops and Products*, 187, 115335. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115335>
- Deendarlianto, D., Widyaparaga, A., Widodo, T., Handika, I., Chandra Setiawan, I., & Lindasista, A. (2020). Modelling of Indonesian road transport energy sector in order to fulfill the national energy and oil reduction targets. *Renewable Energy*, 146, 504–518. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.169>
- Duong, V. M., Flener, U., Hrbek, J., & Hofbauer, H. (2022). Emission characteristics from the combustion of *Acacia Mangium* in the automatic feeding pellet stove. *Renewable Energy*, 186, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.152>
- Gao, A., Zou, K., Wang, Y., Gao, G., Penzik, M. V., Kozlov, A. N., Isa, Y. M., Huang, Y., & Zhang, S. (2023). The core factors in determining product distributions during pyrolysis: The synergistic effect of volatile-char interactions and temperature. *Renewable Energy*, 218, 119359–119359. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119359>
- Gevorgyan, A., Hopmann, K. H., & Bayer, A. (2021). Lipids as versatile solvents for chemical synthesis. *Green Chemistry*, 23(18), 7219–7227. <https://doi.org/10.1039/d1gc02311j>
- Jie, X., Gonzalez-Cortes, S., Xiao, T., Yao, B., Wang, J., Slocombe, D. R., Fang, Y., Miller, N., Al-Megren, H. A., Dilworth, J. R., Thomas, J. M., & Edwards, P. P. (2019). The decarbonisation of petroleum and other fossil hydrocarbon fuels for the facile production and safe storage of hydrogen. *Energy & Environmental Science*, 12(1), 238–249. <https://doi.org/10.1039/c8ee02444h>
- Khare, A., He, Q., & Batta, R. (2019). Predicting gasoline shortage during disasters using social media. *OR Spectrum*, 42. <https://doi.org/10.1007/s00291-019-00559-8>

- Milewska, B., & Milewski, D. (2022). Implications of Increasing Fuel Costs for Supply Chain Strategy. *Energies*, 15(19), 6934. <https://doi.org/10.3390/en15196934>
- Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2022). Pyrolysis of low-value waste sawdust over low-cost catalysts: physicochemical characterization of pyrolytic oil and value-added biochar. *Biofuel Research Journal*, 9(4), 1736–1749. <https://doi.org/10.18331/brj2022.9.4.4>
- Mong, G. R., Chong, C. T., Chong, W. W. F., Ng, J.-H., Ong, H. C., Ashokkumar, V., Tran, M.-V., Karmakar, S., Goh, B. H. H., & Mohd Yasin, M. F. (2022). Progress and challenges in sustainable pyrolysis technology: Reactors, feedstocks and products. *Fuel*, 324, 124777. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124777>
- Rahman, A., Dargusch, P., & Wadley, D. (2021). The political economy of oil supply in Indonesia and the implications for renewable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144, 111027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111027>
- Suciu, L. G., Griffin, R. J., & Masiello, C. A. (2021). A zero-dimensional view of atmospheric degradation of levoglucosan (LEVCHEM_v1) using numerical chamber simulations. *Geoscientific Model Development*, 14(2), 907–921. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-907-2021>
- Zhang, F., Zhang, S., Chen, L., Liu, Z., & Qin, J. (2020). Utilization of bark waste of *Acacia mangium*: The preparation of activated carbon and adsorption of phenolic wastewater. *Industrial Crops and Products*, 160, 113157. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113157>