

Efektivitas Pemurnian Asap Cair Biomassa Serbuk Gergaji dengan Distilasi, Adsorpsi Zeolite dan Karbon Aktif

Wahyu Anggo Rizal^{a,*}, Ria Suryani^a, Muslih Anwar^a, Dwi Joko Prasetyo^a, Satriyo Krido Wahono^a, Wuri Apriyana^a, Tri Hadi Jatmiko^a, Andri Suwanto^a, Roni Maryana^b, Hernawan^a, Sugeng Hariyadi^a

^aPusat Riset Teknologi dan Proses Pangan, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jl.Jogja-Wonosari Km 31,5 Yogyakarta, Indonesia

^bPusat Riset Kimia Maju, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia

Diterima : 28 April 2022 Revisi akhir : 9 Juni 2022 Disetujui terbit : 29 Juni 2022

Effectiveness of Liquid Smoke Purification of Sawdust by using Distillation Method, Zeolite and Active Carbon Adsorption

Abstract

Liquid smoke is a product of biomass pyrolysis. To get quality liquid smoke, it is necessary to carry out a purification process to reduce or eliminate harmful compounds. Methods that have been widely applied include distillation and adsorption processes. This study aims to measure the effectiveness of zeolite and activated carbon in the purification of liquid smoke with mixed sawdust biomass as raw material. Liquid smoke is purified by distillation and adsorption with several adsorbents. The results showed that there was a change in color, floating objects, and transparency, which indicated a reduction in the concentration of tar in the liquid smoke. GC-MS data showed a decrease in % area of hazardous compounds 2-propanone, 2-butanone, and cyclopentanone, which were identified in almost all adsorption treatments. Gunungkidul zeolite 12N dealumination (ZG₂) with an SI/AL ratio of 5.91 is 100% effective at removing hazardous compounds and is more effective than the distillation process.

Keywords: Liquid smoke, adsorption, biomass, sawdust

Abstrak

Asap cair merupakan produk pirolisis biomassa. Komposisi senyawanya dipengaruhi oleh jenis biomassa, kadar air, dan kondisi proses pirolisis. Asap cair berkualitas dapat diperoleh melalui proses pemurnian untuk mengurangi atau menghilangkan kandungan senyawa yang berbahaya. Metode yang telah banyak diaplikasikan antara lain proses distilasi dan adsorpsi. Penelitian ini bertujuan mengukur efektivitas zeolite dan karbon aktif dalam pemurnian asap cair dengan bahan baku biomassa serbuk gergaji campuran. Asap cair dimurnikan dengan distilasi, dan adsorpsi dengan beberapa adsorben. Hasil penelitian terjadi perubahan warna, benda terapung dan transparansi, yang menunjukkan pengurangan konsentrasi jumlah tar didalam asap cair. Data GC-MS menunjukkan penurunan % area senyawa berbahaya 2-propanone, 2-butanone dan cyclopentanone, yang teridentifikasi pada hampir semua perlakuan adsorpsi. Zeolite Gunungkidul dealuminasi 12N (ZG₂) dengan rasio SI/AL sebesar 5,91 efektif 100% menghilangkan senyawa berbahaya dan lebih efektif daripada proses destilasi.

Kata Kunci: asap cair, adsorpsi, biomassa, serbuk gergaji kayu

Pendahuluan

Asap cair merupakan cairan yang dihasilkan dari proses dekomposisi thermal biomassa lignoselulosa melalui pirolisis dengan kondisi minimal oksigen pada rentang suhu 180°C–500 °C (Abdullah *et al.*, 2017; Lingbeck *et al.*, 2014). Biomassa di pirolisis dan menghasilkan asap yang dialirkan pada kondensor, sehingga dari hasil kondensasi diperoleh produk berupa asap cair. Selain asap cair, proses pirolisis juga menghasilkan produk berupa gas dan arang. Pada umumnya asap cair dari biomassa hasil proses pirolisis berwarna cokelat tua dengan nilai pH asam dan memiliki aroma serta rasa yang unik, tergantung dari jenis tanaman yang digunakan dalam proses pirolisis (Janairo dan Amalin, 2018) Asap cair banyak dikenal dengan berbagai macam istilah antara lain: cuka kayu, *bio oil*, cairan pirolisis, minyak pirolisis, *bio crude oil*, *biofuel oil*, *pyroligneous tar*, *pyroligneous acid*, *wood liquid*, dan *wood oil*. (Abdullah *et al.*, 2017; Pires *et al.*, 2019). Komposisi senyawa dari asap cair dipengaruhi oleh jenis biomassa, kadar air, dan suhu proses pirolisis serta lama waktu pirolisis (Rizal *et al.*, 2020). Kandungan utama dari asap cair adalah air, asam, karbonil dan fenol yang berasal dari biomassa lignoselulosa, komposisi kimianya diklasifikasikan menjadi lima kelompok antara lain: Fenol, asam organik, karbonil, furans dan furfural, serta kelompok senyawa lainnya. Campuran kompleks dari senyawa kimia ini mencirikan sifat organoleptik, antimikroba dan antioksidan pada asap cair (Maga, 1987; Xin *et al.*, 2021).

Selain kelima senyawa penyusun asap cair diatas, terdapat formasi senyawa *Polycyclic aromatic hydrocarbon* (PAH) yang antara lain: *Naphthalene*, *Acenaphthylene*, *Acenaphthene*, *Fluorene*, *Phenanthrene*, *Anthracene*, *Fluoranthene*, *Pyrene*, *Benzo [a] anthracene*, *Chrysene*, *Benzo [b] fluoranthene*, *Benzo [k] fluoranthene*, *Benzo [a] pyrene*, *Dibenzo [a,h] anthracene*, *Benzo [g,h,i] perylene*, *Indeno [1,2,3-c, d] pyrene*, dan tar, serta *2-propanone*, *2-butanone*, *cyclopentanone* yang bersifat toksik atau karsinogenik. Senyawa ini dapat menyebabkan kerusakan asam amino essensial dari protein dan vitamin (Darmadji, 2002). Senyawa PAH, tar dan *2-propanone*, *2-butanone*, *cyclopentanone* berbahaya bagi kesehatan manusia jika asap cair diaplikasikan dalam produk pangan. Senyawa PAH dapat terbentuk

selama proses pirolisis pada rentang suhu 500°C–900°C. Suhu proses pirolisis berperan penting dalam menghasilkan senyawa PAH, karena jumlah PAH yang terkandung dalam asap cair akan meningkat secara linier pada kisaran suhu proses 400°C – 1000 °C (Simko, 2005; Ratnawati and Singgih, 2010).

Asap cair *crude* hasil proses pirolisis belum sepenuhnya murni dan kemungkinan tercampur beberapa senyawa berbahaya yang dipengaruhi oleh kondisi prosesnya, sehingga tidak dapat secara langsung diaplikasikan pada produk pangan. Asap cair yang berkualitas dapat diperoleh melalui proses pemurnian lanjutan untuk mengurangi atau menghilangkan senyawa berbahaya tersebut. Beberapa metode yang telah banyak diaplikasikan antara lain dengan proses distilasi (Fatimah dan Gugule, 2009; Ketut Budaraga, Marlida dan Bulanin, 2016; Oktafany, Idiawati dan Harlia, 2016; Suaib, Yermia dan Agustina, 2019), adsorpsi dengan zeolite alam (Manni *et al.*, 2007; Fauzan and Ikhwanus, 2017), zeolite yang telah teraktivasi (Lestari *et al.*, 2015; Ningrum and Anggraini, 2018), silika gel (Katja, Suryanto and Momuat, 2008) dan menggunakan arang aktif (Jamilatun and Salamah, 2015; Salamah and Jamilatun, 2017). Distilasi merupakan proses pemisahan komponen yang terjadi pada kondisi campuran berwujud cair dan gas pada suhu dan tekanan yang sama (Seader *et al.*, 1997), proses pemisahan terjadi berdasarkan pada perbedaan titik didih antar komponen. Adsorpsi merupakan proses perpindahan massa pada pori atau permukaan dalam material adsorben, perpindahan massa terjadi pada batas antara dua fasa: cair-padat dan gas-padat, sehingga sebagian zat tersebut teradsorpsi dan menyebabkan perubahan komposisi fluida. Pada umumnya adsorben terbuat dari material berpori yang antara lain kaolin, sepiolit, silika, zeolite, dan arang (Asip, Mardhiah and Husna, 2008; Wahono *et al.*, 2010; Kesuma and Sitorus, 2013). Salah satu metode aktivasi zeolite adalah dengan dealuminasi yang merupakan proses penghapusan Al dari dalam zeolite yang juga mengeluarkan kation seperti logam dan alkali (Ca, Na, K, dan Mg). Asap cair yang telah dimurnikan dapat digunakan untuk pengawetan, penyedap rasa dan pewarnaan pada produk olahan pangan. Aplikasi asap cair pada produk pangan memiliki keuntungan dibandingkan dengan pengasapan tradisional secara langsung, antara lain: homogenitas produk, kecepatan aplikasi

dan kemudahan dalam pemakaiannya, serta lebih ramah terhadap lingkungan dengan tanpa menghilangkan rasa dan aroma yang diinginkan dari pengasapan tradisional. Pemakaian asap cair dapat dilakukan dengan cara penyemprotan, penyuntikan ataupun dengan dicampur langsung pada makanan. (Lingbeck *et al.*, 2014; Pino, 2014; Suryani *et al.*, 2020).

Hampir sebagian besar metode yang dilakukan untuk pemurnian asap cair adalah distilasi, salah satu kekurangan dari distilasi adalah penggunaan energi panas selama prosesnya. Pemurnian dengan menggunakan adsorben spesifik diharapkan dapat menjadi solusi pemurnian asap cair yang lebih ramah energi. Penelitian ini bertujuan mengukur efektivitas zeolite dan karbon aktif dibandingkan dengan destilasi pada proses pemurnian asap cair berbahan baku biomassa serbuk gergaji kayu campuran hasil penelitian (Rizal *et al.*, 2020), menggunakan beberapa macam jenis adsorben zeolite dan arang aktif untuk mengetahui efektivitasnya. Hasil Penelitian diharapkan dapat mengetahui metode pemurnian spesifik untuk pemanfaatan jenis senyawa tertentu atau menghilangkan senyawa tertentu. Komponen penyusun senyawa aktif yang terdapat dalam asap cair hasil pemurnian dapat diketahui melalui analisis menggunakan *Gas Chromatography – Mass Spectrometry* (GC-MS).

Bahan dan Metode

Bahan dan Alat

Bahan baku asap cair yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil proses pirolisis dengan bahan baku sejumlah 3,6 kg pada suhu 500°C selama 8 jam (Rizal *et al.*, 2020), bahan baku biomassa berupa serbuk gergaji kayu campuran dari industri pemotongan kayu di daerah Nglipar, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Adsorben yang digunakan

antara lain zeolite natural Gunungkidul (ZG), zeolite Gunungkidul teraktivasi (ZG₁, ZG₂) dengan ukuran penyaringan 425 mikro, zeolite komersial India (ZK₁), zeolite komersial Korea (ZK₂), zeolite komersial merk bioethanol Kreatif Energi Indonesia (ZK₃), karbon aktif (Merck Germany). Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain *Dean Stark apparatus*, *furnace*, *moisture balance* (Ohaus), GC-MS-QP2010S (Shimadzu, Japan) dengan kolom AGILENT DB-624 dan Epsilon 4 *X-ray Fluorescence* (XRF) Spectrometer (Malvern Panalytical).

Preparasi dan Aktivasi Adsorben

Perlakuan aktivasi hanya dilakukan pada zeolite Gunungkidul dengan metode dealuminasi dan kalsinasi untuk meningkatkan rasio Si/Al nya. Sedangkan zeolit komersial langsung digunakan sebagai adsorben tanpa melalui proses perlakuan awal. Zeolite Gunungkidul digiling hingga ukuran 100 mesh dan dilanjutkan pengayakan pada ukuran 425 mikro, kemudian di dealuminasi dengan larutan HCl 1N dan 12N, perbandingan pelarut dan bahan (1:1) selama 24 jam. Setelah dilakukan perendaman, zeolite dicuci dengan akuades hingga nilai pH sama dengan pH akuades. Zeolite selanjutnya dikeringkan dan di kalsinasi pada suhu 400 °C selama 3 jam (Wahono and Rizal, 2014). Penampakan adsorben pada *petri dish* berdiameter 10 cm ditunjukkan pada **Gambar 1**.

Karakterisasi Adsorben dengan X-Ray Fluorescence (XRF)

Analisis material adsorben dilakukan dengan *x-ray fluorescence spectrometer* (XRF), metode analisis ini paling umum dipakai karena waktu analisis cepat,



Gambar 1. Material Adsorben

preparasi sampel sederhana, hasil lebih akurat dan kestabilan pengukuran dari instrumen lebih baik. XRF adalah salah satu metode analisis terbaik untuk mengetahui komposisi kimia dari beberapa material antara lain logam, keramik dan adsorben (Sari *et al.*, 2014). Proses pengujian dilakukan pada sampel serbuk, sampel dimasukkan ke dalam *sample cup*, kemudian ditera dengan proses vakum menggunakan gas helium. Hasil analisis berupa spektrum serta dievaluasi secara kualitatif dan kuantitatif untuk mengetahui unsur dari adsorben (Ginting *et al.*, 2007)

Proses Pemurnian Asap Cair

Proses pemurnian dilakukan dengan 2 metode yaitu distilasi dan adsorpsi seperti ditunjukkan pada **Tabel 1**. Asap cair hasil pirolisis didiamkan selama 1 hari untuk mengendapkan zat – zat kotor di dalam *beaker glass*. Setelah terpisah dari pengotor, diambil sebanyak 200 mL untuk didistilasi dengan perangkat *dean stark apparatus*. Asap cair dimasukkan ke dalam perangkat alat *dean stark apparatus*, dipanaskan dengan menggunakan pemanas listrik pada suhu 100°C, berdasar pada penelitian (Fatimah and Gugule, 2009) yang menyatakan bahwa asap cair tidak dapat didistilasi pada beberapa suhu, karena sebagian besar komponen terdiri dari air, sehingga senyawa organik semi polar akan membentuk sifat azeotrop di dalam air. Suhu indikator merupakan suhu asap cair di dalam *dean stark apparatus*, uap yang terbentuk mengalir masuk ke dalam pipa pendingin balik kondensor dan hasil destilat ditampung ke dalam Erlenmeyer.

Proses adsorpsi dilakukan menggunakan zeolite dan arang aktif (ZG, ZG₁, ZG₂, ZK₁, ZK₂, ZK₃, C_{ca}). Adsorben ditimbang pada neraca analitik dengan perbandingan adsorben dan asap cair 1:2. Adsorben ditempatkan pada corong kaca yang sudah terlapisi dengan kertas saring yang ditempatkan pada erlenmeyer, setelah itu asap cair *crude* dialirkan pada adsorben dan diamkan selama 8 jam sampai tidak ada lagi cairan yang menetes dari corong adsorben. Proses pemurniannya seperti ditunjukkan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Proses adsorpsi asap cair

Karakteristik Fisik Asap Cair

Asap cair hasil pirolisis disaring dengan kertas saring dan diendapkan selama 24 jam, kemudian diamati secara visual untuk mengetahui keberadaan dari benda terapung dan transparansinya (Alpian *et al.*, 2014; Suryani *et al.*, 2020). Nilai pH dari asap cair diukur menggunakan indikator universal (Albaki *et al.*,

Tabel 1. Metode Proses Pemurnian Asap Cair

No	Jenis Asap Cair	Proses Pemurnian	Kode
1	<i>Crude</i>	-	C
2	<i>Crude</i>	Distilasi 100 °C	D
3	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Gunungkidul	ZG
4	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Gunungkidul dealuminasi HCl 1N	ZG ₁
5	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Gunungkidul dealuminasi HCl 12N	ZG ₂
6	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Komersial 1	ZK ₁
7	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Komersial 2	ZK ₂
8	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + zeolite Komersial 3	ZK ₃
9	<i>Crude</i>	<i>Crude</i> + Karbon Aktif	C _{ca}

2021) pada asap cair *crude*, setelah destilasi dan adsorpsi. Pengamatan warna asap cair dilakukan secara visual seperti pada penelitian (Wijaya *et al.*, 2008; Komarayati *et al.*, 2011) yang menghasilkan warna asap cair kuning kecoklatan sampai dengan hitam pada tiap kondisi proses pirolisis yang berbeda, kemudian pengamatan aroma dilakukan dengan sensoris penciuman bau.

Analisis Gas Chromatography - Mass Spectrometer (GC-MS) Asap Cair

Identifikasi komponen senyawa kimia asap cair menggunakan GC-MS yang dioptimalkan pada suhu kolom 60°C selama 5 menit, kemudian dinaikkan hingga mencapai 200°C dan dipertahankan selama 30 menit, suhu injektor diatur pada suhu 250°C. Gas pembawa menggunakan gas helium dengan tekanan 50 kPa. Data MS disusun berdasarkan berat molekul komponen antara 28 hingga 600 m/z dalam waktu 1,2 menit hingga 70 menit (Rizal *et al.*, 2020).

Hasil dan Pembahasan

Kandungan Unsur Senyawa pada Adsorben

Material adsorben yang digunakan antara lain ZG, ZG₁, ZG₂, ZK₁, ZK₂, ZK₃, dan karbon aktif C_{ca}. Seluruh adsorben yang digunakan sebagai bahan pemurnian asap cair dilakukan pengujian dengan XRF untuk mengetahui komposisi kandungan unsur senyawanya. Dari pengujian pada seluruh adsorben tersebut diperoleh hasil komposisi unsur-unsur senyawa yang ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Unsur dalam Material Adsorben

Unsur senyawa	ZG	ZG ₁	ZG ₂	ZK ₁	ZK ₂	ZK ₃	Unit	Karbon Aktif		
								Unsur senyawa	Unit	
SiO ₂	34,618	35,503	74,846	48,619	65,357	45,714	%	Si	1,871	%
Al ₂ O ₃	7,157	7,499	12,679	26,371	12,91	26,241	%	Al	0,339	%
CaO	55,308	53,831	8,051	0,581	6,252	1,183	%	Ca	0,628	%
MgO	1,153	1,181	1,198	3,176	1,673	4,985	%	Mg	7,455	%
Na ₂ O	0	0	0	6,093	0,285	3,42	%	Na	0	%
K ₂ O	0,749	0,776	1,619	13,351	5,576	17,22	%	K	0,254	%
P ₂ O ₅	0,476	0,506	0,748	0,686	0,576	0,832	%	P	0,258	%
TiO ₂	0,394	0,46	0,623	0,353	0,259	0,203	%	S	0,666	%
V ₂ O ₅	0,047	0,0028	0,0036	0,01154	0	0,0061	%	Cl	0,433	%
Rasio Si/Al	4,84	4,74	5,91	1,85	5,07	1,75				

Zeolite adalah salah satu mineral alam yang banyak digunakan untuk menghilangkan senyawa berbahaya seperti *fenantrena*, *fluorene*, *fluoranthene* dan senyawa golongan PAH pada cairan (Fauzan and Ikhwanus, 2017; Lamichhane *et al.*, 2016). Daya serap zeolite tergantung dari jumlah ruang kosong dan luas permukaannya (Oktafany, Idiawati dan Harlia, 2016), dengan ukuran partikel zeolite sekitar satu milimeter atau lebih, dan bebas dari penyusutan maka zeolite menunjukkan karakter hidrolik yang unggul dan tepat digunakan pada sistem filtrasi (Lamichhane, Krishna dan Sarukkalige, 2016). Berdasarkan analisis dengan XRF dapat diketahui bahwa hasil perlakuan ZG₁ tidak jauh berbeda dengan nilai rasio Si/Al ZG sebesar 4,84, sedangkan pada perlakuan ZG₂ terjadi peningkatan rasio Si/Al nya. Sehingga aktivasi perlu dilakukan untuk meningkatkan luas permukaan dan daya serap dari zeolite. Rasio Si/Al meningkat mengikuti peningkatan konsentrasi HCl. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi asam mempunyai pengaruh besar dalam menghilangkan Al untuk meningkatkan nilai rasio Si/Al. Efek utama dari dealuminasi adalah peningkatan rasio Si/Al. Rasio Si/Al yang tinggi dapat menghasilkan permukaan yang lebih hidrofobik dibandingkan pada rasio rendah (Wahono *et al.*, 2019). Pada umumnya zeolite alam masih mengandung pengotor baik organik maupun anorganik yang berada pada rongga porinya, namun bentuk kristal yang teratur pada zeolite dan luas permukaan yang besar membuatnya sangat sesuai untuk diaplikasikan sebagai adsorben (Atikah, 2017).

Salah satu senyawa berbahaya dalam asap cair adalah PAH dan tar yang bersifat non polar serta

hidrofobik (Schlanges *et al.*, 2008; Yogaswara, 2017), dengan rasio Si/Al tinggi molekul-molekul non polar akan mudah diserap oleh zeolite (Lestari, 2010). Sehingga dengan demikian zeolite sangat sesuai digunakan sebagai bahan adsorben pemurnian asap cair, terutama ZG₂ yang nilai rasio Si/Al nya tinggi. Pada ZK₁, ZK₂, ZK₃ komposisi tertinggi adalah silika dan alumina, sehingga dari **Tabel 2** dapat diketahui bahwa silika dan alumina merupakan komponen utama penyusun dari zeolite komersial (Atikah, 2017). Penggunaan arang aktif pada proses adsorpsi bertujuan untuk memperoleh asap cair dengan aroma yang tidak pekat dan warna lebih jernih. Arang aktif yang digunakan dalam penelitian ini dalam bentuk serbuk yang berfungsi untuk menjerap zat penyebab warna dan aroma yang terlalu pekat atau tidak diinginkan (Jamilatun dan Salamah, 2015).

Karakter Fisik Asap Cair Crude dan Hasil Pemurnian

Dari 200 mL asap cair yang didistilasi diperoleh hasil sebanyak 182 mL dengan warna yang sudah tidak keruh atau lebih jernih dari *crude* asap cair, dan aroma asap yang berkurang atau tidak menyengat, dengan tar yang tersisa pada labu distilasi sebanyak 10 mL. Tujuan utama dari distilasi ini adalah untuk menghilangkan senyawa berbahaya, sehingga diperoleh asap cair yang jernih, murni, bebas tar dan PAH (Ningrum and Anggraini, 2018). Karakter fisik asap cair sebelum dan sesudah dilakukan filtrasi ditampilkan pada **Tabel 3**.

Warna hasil pengujian bervariasi mulai dari

cokelat tua, cokelat muda, kuning tua, kuning muda dan jernih. Karbonil dan fenol merupakan komponen yang mempengaruhi warna serta bau dari asap cair (Girard, 1992). Warna asap cair juga dapat dijadikan indikasi konsentrasi adanya tar, warna kuning dan jernih merupakan salah satu indikasi tidak ada kandungan tar dalam asap cair (Yulistiani *et al.*, 2020).

Warna optimal diperoleh pada filtrasi menggunakan karbon aktif yang menghasilkan asap cair berwarna jernih, ini dimungkinkan karena tingginya luas permukaan karbon aktif, sehingga komponen zat warna yang ada dalam asap cair dapat terserap secara optimum. Daya serap karbon aktif sangat besar, yaitu 25-100% terhadap berat jenisnya dan diameter porinya mencapai 1000 Å (Jamilatun and Salamah, 2015). Aroma asap pada hampir semua perlakuan menjadi lebih ringan setelah dilakukan distilasi maupun adsorpsi dengan zeolite maupun arang aktif. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan (Kadir, Darmadji and Hidayat, 2015), yang menyatakan bahwa filtrasi asap cair menggunakan zeolite adalah metode paling efektif dalam pemisahan senyawa aroma pekat dan memperoleh tingkat penerimaan panelis tertinggi. Hasil pemurnian asap cair baik dengan metode distilasi maupun adsorpsi menunjukkan nilai pH di bawah 7, yang mempunyai arti bahwa asap cair bersifat asam. Sifat asam diperoleh dari komponen senyawa terutama asam asetat dan senyawa asam lainnya. Selain senyawa asam, kandungan dari fenol pada asap cair juga mempengaruhi tingkat keasamannya.

Tabel 3. Karakter Fisik Asap Cair sebelum dan sesudah Filtrasi

Kode	Parameter				
	Warna	Aroma	pH	Benda terapung	Transparansi
C	Cokelat tua	Asap pekat	3	ada	Gelap
D	Kuning muda	Asap ringan	2	-	Transparan
ZG	Kuning tua	Asap ringan	5	-	Transparan
ZG ₁	Cokelat muda	Asap ringan	3	-	Transparan
ZG ₂	Cokelat muda	Asap ringan	4	-	Transparan
ZK ₁	Cokelat tua	Asap ringan	4	-	Transparan
ZK ₂	Cokelat tua	Asap ringan	5	-	Transparan
ZK ₃	Cokelat tua	Asap ringan	5	-	Transparan
C _{Ca}	Jernih	Asap ringan	4	-	Transparan

(Ningrum dan Anggraini, 2018). Berdasarkan karakter fisik asap cair pada penelitian ini tidak semua masuk dalam kategori mutu asap cair spesifikasi Jepang (Alpian *et al.*, 2014). Nilai pH asap cair standar Jepang adalah 1,5 – 3,7, sehingga hanya C, D, dan ZG₁ yang memenuhi kriteria ini. Warna asap cair yang masuk dalam standar adalah D, ZG, ZG₁, ZG₂, ZK₁, ZK₂, ZK₃ yaitu dalam lingkup warna kuning coklat kemerahan. Untuk benda terapung dan transparansi pada semua perlakuan telah sesuai dengan mutu asap cair standar Jepang. Secara keseluruhan hasil optimal yang telah memenuhi kategori mutu asap cair spesifikasi Jepang adalah D dan ZG₁, akan tetapi tidak menutup kemungkinan hasil perlakuan adsorben lainnya dapat ditingkatkan melalui pengembangan metode adsorbsinya.

Identifikasi Komponen Senyawa Asap Cair

Asap cair *crude* (Rizal *et al.*, 2020), hasil distilasi dan adsorpsi kemudian dianalisis menggunakan GC-MS untuk mengidentifikasi kandungan senyawa yang terdapat pada asap cair. Kelompok senyawa dominan hasil identifikasi dalam asap cair antara lain ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Berdasarkan hasil identifikasi senyawa asap cair, diketahui dari semua variabel menghasilkan jumlah kandungan senyawa yang berbeda-beda dengan 37 senyawa teridentifikasi pada asap cair *crude* (Rizal *et al.*, 2020), dengan persentase senyawa asam sebesar 26,07%. Perlakuan distilasi pada asap cair *crude* menurunkan jumlah senyawanya menjadi 20 dan tidak begitu berpengaruh dengan jumlah persentase dari senyawa asam. Asap cair hasil adsorpsi dengan ZG dan ZK menghasilkan jumlah senyawa yang

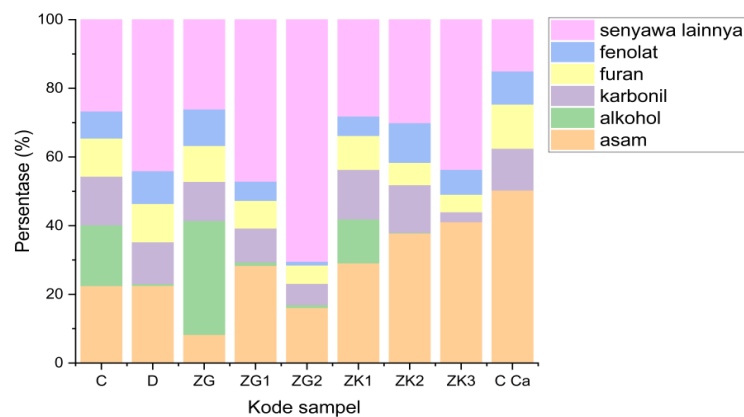
lebih bervariasi, Pada adsorben ZG₁ terjadi peningkatan jumlah senyawa teridentifikasi menjadi 39 dengan persentase senyawa asam yang meningkat 4,58%. Pada ZG jumlah senyawanya menjadi 47 akan tetapi kandungan asam menurun sebanyak 15,49% dan lebih meningkatkan jumlah persentase dari senyawa alkohol. Adsorben ZG₁ dan ZG₂ cenderung sama dalam menurunkan persentase jumlah dari alkohol, selain itu pada perlakuan ZG₂ juga banyak menurunkan persentase kandungan fenol. ZK₁ sejumlah 55 senyawa teridentifikasi dengan komposisi asam hampir sama dengan perlakuan ZG₁. Peningkatan kelompok senyawa asam tertinggi pada perlakuan C_{ca} sebanyak 52,98%, turun di bawahnya ZK₂ sebanyak 43,72% dan ZK₃ sebanyak 41,13%. Selain meningkatkan senyawa asam pada perlakuan ini juga mendegradasi kelompok senyawa alkohol.

Penelitian yang dilakukan oleh (Maulina, Kamny dan Amalia, 2021) dalam perbandingan zeolite aktif dan karbon aktif sebagai adsorben pada pemurnian asap cair juga diperoleh bahwa kandungan asam asetat meningkat setelah dilakukan adsorpsi. Jumlah persentase kelompok senyawa yang terdapat pada asap cair *crude*, distilasi dan proses adsorpsi ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Jumlah persentase senyawa yang berbeda dari perlakuan pada adsorpsi menggunakan zeolite dimungkinkan karena jenis zeolite dan metode aktivasinya mempengaruhi perbandingan Si/Al nya. Perbandingan Si/Al pada zeolite menentukan kerapatan muatan dalam struktur kristalnya, sehingga mempengaruhi tingkat adsorpsi dari adsorben tersebut (Atikah, 2017). Zeolite alam dapat dimanfaatkan untuk mengadsorpsi asam-asam organik seperti asam asetat, asam humat, dan asam α -oksiopropionat (Wang, Terdkiatburana dan Tadé, 2008; Narin, 2017; Kareem dan Dawagreh, 2018; Sabadash *et al.*, 2021) zeolites are found in the following locations: zeolitic tuffs are located at Jabal Aritayn (JNZ-4. Mekanisme adsorpsi asam organik dikontrol oleh reaksi kimia yang dimungkinkan melibatkan reaksi sederhana antara anion asam dengan oksida dan kation divalen pada zeolite (Wang, Terdkiatburana dan Tadé, 2008; Narin, 2017) Cu²⁺ and Pb²⁺, and humic acid (HA. Pada penelitian ini, proses pemurnian asap dengan menggunakan adsorben ZG dan ZG₂ menunjukkan penurunan kadar asam organik yang paling tinggi. Hal ini dimungkinkan

Tabel 4. Senyawa Dominan pada Asap Cair

Kelompok senyawa	senyawa pada asap cair
asam	<i>Acetic acid, propanoic acid</i>
alkohol	<i>Ethanol, Methanol</i>
karbonil	<i>2-Cyclopenten, Acetone</i>
furan	<i>Ethanone, 5 Methyl Furfural</i>
fenol	<i>Mequinol, Phenol</i>
lainnya	<i>l-Limonene, Benzenesulfonic acid</i>

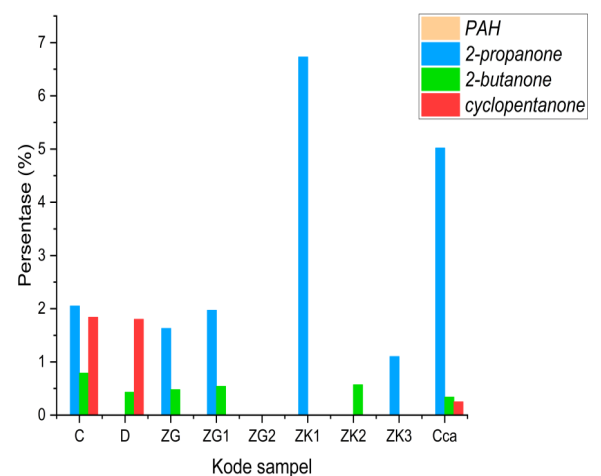


Gambar 3. Persentase Jumlah Jenis Senyawa Komponen Penyusun Asap Cair

terjadi karena kadar kation divalen (misal Ca dan Mg) yang lebih tinggi dibanding adsorben yang lain. Hasil analisis menggunakan GC-MS disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 menunjukkan kelompok senyawa dominan pada semua perlakuan asap cair adalah asam organik, alkohol, karbonil, furan, dan fenol, berdasarkan dari persentase area terbesar, menunjukkan bahwa komponen utama dari asap cair adalah asam organik. PAH memiliki daya kelarutan rendah pada air, ukuran molekul tinggi dan kurang mudah menguap. PAH mempunyai sifat hidrofobik dan lipofilik, sehingga dapat lebih mudah terserap oleh partikel organik yang ada didalam sedimen (Edward, 2017). Zeolite merupakan batuan berpori dengan mineral butir halus yang berasal dari batuan sedimen atau metamorf tingkat rendah (Muzwar *et al.*, 2012). Karakter ini menunjukkan bahwa zeolite berpotensi sebagai bahan baku adsorben pada asap cair terutama dalam menghilangkan PAH. Penghilangan PAH tidak efektif melalui metode fisika kimia, namun proses adsorpsi lebih efektif dalam menghilangkan polutan persisten senyawa organik seperti PAH (Yogaswara, 2017). Namun demikian senyawa kelompok PAH tidak terdeteksi baik dari asap cair *crude* maupun setelah melalui perlakuan distilasi maupun adsorpsi. Tidak adanya senyawa PAH pada asap cair dimungkinkan karena belum terbentuknya senyawa PAH selama proses pirolisis berlangsung. Menurut Simko (2005) pembentukan senyawa PAH terjadi pada rentang suhu 500°C–900°C, sehingga pengondisian dan pengontrolan suhu dapat menurunkan atau menghilangkan kandungan PAH pada asap cair. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ratnawati and Singgih, (2010), disebutkan bahwa *2-propanone*, *2-butanone*, *cyclopentanone* tergolong senyawa yang berbahaya selain PAH yang terkandung pada asap cair, ke tiga

senyawa ini terkandung dalam asap cair *crude* dengan % area *2-propanone* sebesar 2,05 %, *2-butanone* sebesar 0,79 % dan *cyclopentanone* sebesar 1,84 %. Proses perlakuan distilasi dan adsorpsi berpengaruh dalam jumlah % area dari ke tiga senyawa tersebut. Proses distilasi dapat menghilangkan senyawa *2-propanone* dan menurunkan % area dari kedua senyawa lainnya, zeolite ZG₂ adalah yang paling efektif untuk menghilangkan ketiga senyawa tersebut. Zeolite ZK₁ dan C_{ca} cenderung meningkatkan % area *2-propanone* seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**. Dengan demikian proses perlakuan adsorpsi menggunakan zeolite efektif dalam mengurangi senyawa berbahaya yang terdapat dalam asap cair.



Gambar 4. Komparasi Tingkat Efektivitas Adsorpsi Senyawa PAH, *2-propanone*, *2-butanone*, dan *cyclopentanone*

Tabel 5. Hasil Analisis GC-MS Komposisi Senyawa Asap Cair

Kelompok Senyawa	Nama Senyawa	Area %									
		C	D	ZG	ZG ₁	ZG ₂	ZK ₁	ZK ₂	ZK ₃	C _{ca}	
Asam	Asam Format	0,42	-	-	0,23	-	-	-	-		
	Asam Asetat	19,06	18,91	6,78	22,68	13,88	19,98	33,45	30,31	48	
	Asam Propionat	1,82	2,38	-	2,06	1,57	4,52	2,8	-		
	Asam Isobutirat	0,19	-	0,18	0,17	-	0,4	-	-		
	Asam Butirat	1,03	1,28	0,81	0,95	0,48	1,04	1,17	-	0,52	
	Senyawa Asam lainnya	-	-	0,59	2,29	0,22	4,97	0,22	10,82	1,84	
Alkohol	Metanol	16,77	-	31,91	-	-	13,55	-	-		
	Etanol	0,63	0,53	0,83	0,71	0,82	-	-	-		
	2-propenol	0,30	-	0,51	0,3	-	-	0,16	-		
	Senyawa alkohol lainnya	-	-	0,22	-	-	-	-	-		
Karbonil	Aseton	-	0,92	-	-	2,76	-	1,81	-		
	2-propanon	2,05	-	1,63	1,97	-	6,73	-	1,1	5,02	
	2,3-butadienon	2,38	1,45	0,56	1,6	0,64	-	1,83	-	0,69	
	2-butanon	0,79	0,43	0,48	0,54	-	-	0,57	-	0,34	
	2-butanal	0,24	-		0,27	-	-	-	-		
	1-hidroksi-2-propanon	2,88	3,41	2,19	2,52	1,54	-	6,05	-	3,28	
	1-hidroksi-2-butanon	1,35	1,83	1,17	1,15	-	-	1,53	-	0,85	
	Siklopentanon	1,84	1,8	-	-	-	-	-	-	0,25	
	2-metil-2-siklopenten-1-on	1,86	-	1,59	-	-	-	-	-		
	3-metil-2-siklopenten-1-on	0,40	2,32	0,54	0,38	-	0,49	1,48	-	0,51	
	2,3-Dimetil-2-siklopenten-1-on	0,35	-	0,34	-	-	-	0,29	-		
Senyawa karbonil lainnya	-	-	3	1,44	1,26	8,07	0,25	1,78	1,22		
Furan	Furfural	10,02	11,17	7,98	6,66	5,34	3,64	5,63	5,11	12	
	Asetil furan	0,51	-	0,53	0,32	-	0,73	0,32	-	0,32	
	5-metil furfural	0,34	-	0,44	0,37	-	-	-	-		
	Furfuril alkohol	0,23	-	0,41	0,29	-	4,62	-	-		
	Senyawa Furan lainnya	-	-	1,18	0,41	-	1,5	0,53	-	0,55	
Fenolat	Guaiacol	4,95	-	4,99	3,52	-	2,1	-	2,43	1,23	
	m-Kresol	1,48	2,02	1,95	1,29	1,11	-	-	4,83	0,55	
	2,4-dimetil fenol	0,36	-	-	-	-	-	-	-		
	2-metoksi-4-metil fenol	0,79	1,04	0,88	0,51	-	-	-	-		
	4-etil-2-metoksi fenol	0,31	-	0,34	-	-	-	-	-		
	4-metoksi fenol	-	6,49	-	-	-	-	3,61	-		
	Senyawa fenolat lainnya	-	-	2,57	0,26	-	3,91	7,89	-	7,87	
Senyawa lainnya	-	-	26,63	44,02	26,29	47,04	70,38	29,82	29,87	43,63	14,99

Kesimpulan

Proses perlakuan distilasi maupun adsorpsi dengan zeolite dan karbon aktif dalam menghilangkan senyawa berbahaya 2-propanone, 2-butanone, cyclopentanone, PAH dan tar pada asap cair cukup efektif. Perubahan warna, benda terapung dan transparansi pada asap cair hasil adsorpsi menunjukkan terjadinya pengurangan konsentrasi jumlah tar didalam asap cair. Analisis asap cair menggunakan GC-MS menunjukkan penurunan % area senyawa berbahaya yang teridentifikasi pada hampir semua perlakuan adsorpsi. Adsorben ZG₂ dengan rasio SI/AL sebesar 5,91 efektif 100 % menghilangkan senyawa berbahaya dan lebih efektif daripada proses destilasi, sedangkan zeolite lainnya dan arang aktif mampu dengan efektif mengurangi jumlah konsentrasi dari senyawa berbahaya.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional atas pendanaan kegiatan Rumah Program Organisasi Riset Ilmu Pengetahuan Teknik dengan SK Kegiatan No. 2/III/HK/2022.

Daftar Pustaka

Abdullah, N. A., Putra, N., Hakim, I. I. and Koestoer, R. A. (2017) 'A review of improvements to the liquid collection system used in the pyrolysis process for producing liquid smoke', *International Journal of Technology*, 8(7), pp. 1197–1206. doi: 10.14716/ijtech.v8i7.745.

Albaki, A. Z. H., Purnama, A. S., Yulianto, F. and Rahmat, B. (2021) 'Potensi Produksi Asap Cair, Arang dan Ter dari Limbah Industri Pengolahan Kayu', *AGRITEKNO: Jurnal Teknologi Pertanian*, 10(2), pp. 100–105. doi: 10.30598/jagritekno.2021.10.2.100.

Alpian, A., Agus Prayitno, T., Pramana, J., Sutapa, G. and Budiadi, B. (2014) 'Kualitas asap cair batang gelam (*Melaleuca* sp.)', *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 32(2), pp. 83–92. doi: 10.20886/jphh.2014.32.2.83-92.

Asip, F., Mardhiah, R. and Husna (2008) 'Uji Efektifitas Cangkang Telur dalam Mengadsorpsi Ion Fe dengan Proses Batch', *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2), pp. 22–26.

Atikah, W. S. (2017) 'Potensi Zeolit Alam Gunung Kidul Teraktivasi Sebagai Media Adsorben Pewarna Tekstil the Potentiality of Activated Natural Zeolite From Gunung Kidul As Adsorben To Textile Dyes', *Arena Tekstil*, 32, pp. 17–24.

Budaraga, I. K., Marlida, Y. and Bulanin, U. (2016) 'Toxicity of Liquid Smoke Cinnamon (*Cinnamomum Burmannii*) Production of Ways for Purification and Different Concentration', *International Journal of Scientific and Research Publications*, 6(7), pp. 13–21.

Darmadji, P. (2002) 'Optimasi Pemurnian Asap Cair dengan Metoda Redistilasi', *Teknologi dan Industri Pangan*, XIII(3), pp. 267–271.

Edward, . (2017) 'Pengamatan Awal Konsentrasi Senyawa Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (PAH) Dalam Sedimen Di Perairan Delta Mahakam, Kalimantan Timur', *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 9(2), pp. 453–464. doi: 10.29244/jitkt.v9i2.19282.

Fatimah, F. and Gugule, S. (2009) 'Penurunan Kandungan Benzo(a)Pirena Asap Cair Hasil Pembakaran', *Chemistry Progress*, 2(1), pp. 15–21. doi: 10.35799/cp.2.1.2009.58.

Fauzan and Ikhwanus, M. (2017) 'Pemurnian Asap Cair Tempurung Kelapa Melalui Distilasi Dan Filtrasi Menggunakan Zeolit Dan Arang Aktif', *Prosiding Seminar nasional sains dan teknologi*, 0(0), pp. 1–2.

Ginting, A., Anggraini, D., Indaryati, S. and Kriswarini, R. (2007) 'Karakterisasi Komposisi Kimia, Luas Permukaan Pori Dan Sifat Termal Dari Zeolit Bayah, Tasikmalaya, Dan Lampung', *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, 3(1), pp. 38–48.

Jamilatun, S. and Salamah, S. (2015) 'Peningkatan Kualitas Asap Cair Dengan Menggunakan Arang Aktif SNTT FGDT 2015', *Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT)*, 3, pp. 1–6.

Janairo, J. I. B. and Amalin, D. M. (2018) 'Volatile chemical profile of cacao liquid smoke', *International Food Research Journal*, 25(1), pp. 213–216.

Kadir, S., Darmadji, P. and Hidayat, C. (2015) 'Sifat sensoris asap cair tempurung kelapa hasil adsorpsi pada zeolit', *Agroland*, 22, pp. 1–8.

Kareem, A. and Dawagreh, M. A. (2018) 'Evaluation of Natural Zeolite As Sorbent Material for the Removal of Acetic Acid From Aqueous Solution', *Poll Res*, 37(1), pp. 38–41.

Katja, D. G., Suryanto, E. and Momuat, L. I. (2008) 'Pengaruh adsorben terhadap aktivitas antioksidan dari asap cair kayu cempaka (*Michelia champaka* linn)', *Chemistry Progress*, 1(1), pp. 54–59.

- Kesuma, R. F. and Sitorus, B. (2013) 'Karakterisasi Pori Adsorben Berbahan Baku Kaolin Capkala dan Zeolit Dealuminasi', *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 2(1), pp. 19–23.
- Komarayati, S., Gusmailina, G. and Pari, G. (2011) 'Produksi Cuka Kayu Hasil Modifikasi Tungku Arang Terpadu', *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 29(3), pp. 234–247. doi: 10.20886/jphh.2011.29.3.234-247.
- Lamichhane, S., Bal Krishna, K. C. and Sarukkalige, R. (2016) 'Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) removal by sorption: A review', *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 148(March 2019), pp. 336–353. doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.01.036.
- Lestari, D. Y. (2010) 'Kajian Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Alam dari Berbagai Negara', *Prosiding Seminar Nasional Kimia dan Pendidikan Kimia 2010*, p. 6.
- Lestari, Y. I., Idiawati, N. and Harlia, H. (2015) 'Aktivitas antibakteri asap cair tandan kosong sawit grade 2 yang sebelumnya diadsorpsi zeolit teraktivasi', *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 4(4), pp. 45–52.
- Lingbeck, J. M., Cordero, P., O'Bryan, C. A., Johnson, M. G., Ricke, S. C. and Crandall, P. G. (2014) 'Functionality of liquid smoke as an all-natural antimicrobial in food preservation', *Meat Science*. Elsevier B.V., 97(2), pp. 197–206. doi: 10.1016/j.meatsci.2014.02.003.
- Maga, J. A. (1987) 'The flavor chemistry of wood smoke', *Food Reviews International*, 3(1–2), pp. 139–183. doi: 10.1080/87559128709540810.
- Manni, A., Saviano, G., De Casa, G., Rotatori, M., Guarnieri, A. and Guerriero, E. (2007) 'Natural zeolites for PAH removal from liquid effluents', *Organohalogen Compounds*, 69(February 2015), pp. 2938–2941.
- Maulina, S., Kamny, E. R. and Amalia, R. (2021) 'Comparison of activated zeolite and activated carbon as adsorbent on liquid smoke purification', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122(1), p. 012102. doi: 10.1088/1757-899x/1122/1/012102.
- Muro-Fraguas, I., Sainz-García, A., Fernández Gómez, P., López, María, Múgica-Vidal, R., Sainz-García, E., Toledano, P., Sáenz, Y., López, Mercedes, González-Raurich, M., Prieto, M., Alvarez-Ordóñez, A., González-Marcos, A. and Alba-Elías, F. (2020) 'Atmospheric pressure cold plasma antibiofilm coatings for 3D printed food tools', *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. Elsevier, 64(May), p. 102404. doi: 10.1016/j.ifset.2020.102404.
- Muzwar, K., Hidajat, W. K. and Winarno, T. (2018) 'Genesis dan Karakteristik Endapan Zeolit Desa Hargomulyo dan Sekitarnya, Kecamatan Gedangsari, Gunung Kidul, Daerah Istimewa Yogyakarta', *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 1(1), pp. 19–24. doi: 10.14710/jgt.1.1.2018.19-24.
- Narin, G. (2017) 'Removal of Acetic Acid From Dilute Aqueous Solutions Using Zeolite 13X', *JOTCSB. Narin, JOTCSB*, 11(12), pp. 159–190.
- Ningrum, S. S. Y. and Anggraini, S. P. A. (2018) 'Pemurnian Asap Cair terhadap Kinerja Reaktor Pirolisis Melalui Proses Filtrasi Zeolit Aktif', in *Prosiding Seminar Nasional teknologi industri, lingkungan dan infrastruktur*, pp. 1–6.
- Oktafany, E., Idiawati, N. and Harlia (2016) 'Pengaruh Destilasi Berulang dan Pemurnian menggunakan Zeolit Teraktivasi H₂SO₄ terhadap Komposisi Asap Cair Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)', *Jurnal Kimia dan Kemasan (JKK)*, 5(2), pp. 62–67.
- Pinheiro Pires, A. P., Arauzo, J., Fonts, I., Domine, M. E., Fernández Arroyo, A., Garcia-Perez, M. E., Montoya, J., Chejne, F., Pfromm, P. and Garcia-Perez, M. (2019) 'Challenges and Opportunities for Bio-oil Refining: A Review', *Energy & Fuels*, 33(6), pp. 4683–4720. doi: 10.1021/acs.energyfuels.9b00039.
- Pino, J. A. (2014) 'Characterisation of volatile compounds in a smoke flavouring from rice husk', *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 153, pp. 81–86. doi: 10.1016/j.foodchem.2013.12.041.
- Ratnawati and Singgih, H. (2010) 'Pengaruh suhu pirolisis cangkang sawit terhadap kuantitas dan kualitas asap cair', *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 12(1), pp. 7–11.
- Rizal, W. A., Nisa, K., Maryana, R., Prasetyo, D. J., Pratiwi, D., Jatmiko, T. H., Ariani, D. and Suwanto, A. (2020) 'Chemical composition of liquid smoke from coconut shell waste produced by SME in Rongkop Gunungkidul', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 462(1). doi: 10.1088/1755-1315/462/1/012057.
- Rizal, Wahyu Anggo, Suryani, R., Wahono, S. K., Anwar, M., Prasetyo, D. J., Amdani, R. Z., Suwanto, A. and Februanata, N. (2020) 'Pirolisis Limbah Biomassa Serbuk Gergaji Kayu Campuran : Parameter Proses dan Analisis Produk Asap Cair', *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 14(2), p. 353. doi: 10.26578/jrti.v14i2.6606.

- Sabadash, V., Gumnitsky, J., Lyuta, O. and Hyvlyud, A. (2021) 'Regularities of Adsorption of A-Oxypropionic Acid By Natural Zeolite', *Advances in Materials Science*, 21(1), pp. 43–56. doi: 10.2478/adms-2021-0004.
- Salamah, S. and Jamilatun, S. (2017) 'Pemanfaatan Asap Cair Food Grade yang Dimurnikan dengan Arang Aktif sebagai Pengawet Ikan Nila', *Eksergi*, 14(2), p. 29. doi: 10.31315/e.v14i2.2027.
- Sari, W. P., Sumantri, D., Noviyanti, D. and Imam, A. (2014) 'Pemeriksaan komposisi glass fiber komersial dengan teknik X-ray fluorescence spectrometer (XRF)', *B-Dent: Jurnal Kedokteran Gigi Universitas Baiturrahmah*, 1(2), pp. 155–160.
- Schlanges, I., Meyer, D., Palm, W. U. and Ruck, W. (2008) 'Identification, quantification and distribution of PAC-metabolites, heterocyclic PAC and substituted PAC in groundwater samples of tar-contaminated sites from Germany', *Polycyclic Aromatic Compounds*, 28(4–5), pp. 320–338. doi: 10.1080/10406630802377807.
- Simko, P. (2005) 'Factors affecting elimination of polycyclic aromatic hydrocarbons from smoked meat foods and liquid smoke flavorings', *Mol. Nutr. Food Res*, 49, pp. 637–647. doi: 10.1002/mnfr.200400091.
- Suaib, N. F., Yermia, Y. and Agustina, A. (2019) 'Pembuatan dan analisis komponen kimia asap cair kayu gamal (*Gliricidia sepium*) hasil pemurnian dengan metode destilasi bertingkat', *Jurnal Sains dan Teknologi Pangan*, 4(1), pp. 1868–1878.
- Suryani, R., Rizal, W. A., Pratiwi, D. and Prasetyo, D. J. (2020) 'Karakteristik dan aktivitas antibakteri asap cair dari biomassa kayu putih (*Melaleuca leucadendra*) dan kayu jati (*Tectona grandis*)', *Jurnal Teknologi Pertanian*, 21(2), pp. 106–117. doi: 10.21776/ub.jtp.2020.021.02.4.
- Wahono, S. K., Maryana, R., Kismurtono, M., Nisa, K. and Poeloengasih, C. D. (2010) 'Modifikasi Zeolit Lokal Gunungkidul Sebagai Upaya Peningkatan Performa Biogas untuk Pembangkit Listrik', in *Seminar Rekayasa Kimia dan Proses*, pp. 1–6.
- Wahono, S. K., Prasetyo, D. J., Jatmiko, T. H., Pratiwi, D., Suwanto, A., Hernawan and Vasilev, K. (2019) 'Multi-stage dealumination for characteristic engineering of mordenite-clinoptilolite natural zeolite', *AIP Conference Proceedings*, 2085(March). doi: 10.1063/1.5095022.
- Wahono, S. K. and Rizal, W. A. (2014) 'Biogas Filter Based on Local Natural Zeolite Materials', *International Journal of Renewable Energy Development (IJRED)*, 3(1), pp. 1–5. doi: 10.14710/ijred.3.1.1-5.
- Wang, S., Terdkiatburana, T. and Tadé, M. O. (2008) 'Adsorption of Cu(II), Pb(II) and humic acid on natural zeolite tuff in single and binary systems', *Separation and Purification Technology*, 62(1), pp. 64–70. doi: 10.1016/j.seppur.2008.01.004.
- Wijaya, M., Noor, E., Tun, T. I. and Pari, G. (2008) 'Perubahan suhu pirolisis terhadap struktur kimia asap cair dari serbuk gergaji kayu pinus', *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan*, 1(2), pp. 73–77.
- Xin, X., Dell, K., Udugama, I. A., Young, B. R. and Baroutian, S. (2021) 'Transforming biomass pyrolysis technologies to produce liquid smoke food flavouring', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 294(xxxx), p. 125368. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125368.
- Yogaswara, D. (2017) 'Adsorpsi Senyawa Polisiklik Aromatik Hidrokarbon (Pah) Oleh Karbon Aktif', *Oseana*, 42(1), pp. 1–8. doi: 10.14203/oseana.2017.vol.42no.1.33.
- Yulistiani, F., Husna, A., Fuadah, R., Keryanti, Sihombing, R. P., Permanasari, A. R. and Wibisono, W. (2020) 'The Effect of Distillation Temperature in Liquid Smoke Purification Process: A Review', in *Proceedings of the International Seminar of Science and Applied Technology (ISSAT 2020)*. Paris, France: Atlantis Press. doi: 10.2991/aer.k.201221.088.