

Perbandingan Karakteristik Fisikokimia Asap Cair Grade 1, 2, dan 3 Berbasis Limbah Perkebunan

Comparison of Physicochemical Characteristics of Grade 1,2, and 3 Liquid Smoke Based on Plantation Waste

Dinda Eka Febriani ¹, Anni Nuraisyah ^{1*}, Rahmawati ¹, Abdurrahman Salim ¹, Charmelia Dwi Ardhana ¹, Fabe Satria Nagitara ¹

¹ Department of Agricultural Production, Politeknik Negeri Jember

[*anni.nuraisyah@polije.ac.id](mailto:anni.nuraisyah@polije.ac.id)

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara agraris dengan sektor perkebunan yang berkembang pesat, khususnya pada komoditas kopi, kelapa, dan kakao. Namun, limbah hasil pengolahan komoditas tersebut belum dimanfaatkan secara optimal. Limbah perkebunan seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao berpotensi diolah menjadi asap cair melalui proses pirolisis dan pemurnian bertingkat. Penelitian ini bertujuan membandingkan karakteristik fisikokimia asap cair grade 1, grade 2, dan grade 3 yang dihasilkan dari empat jenis limbah perkebunan. Penelitian menggunakan Rancangan Acak Lengkap Faktorial (RALF) dengan dua faktor, yaitu jenis bahan baku dan tingkat grade asap cair, dengan total 36 satuan percobaan. Parameter yang diamati meliputi suhu proses, waktu pirolisis/destilasi, rendemen, warna, densitas, dan pH. Data dianalisis menggunakan ANOVA dan dilanjutkan dengan uji BNT taraf 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pemurnian berpengaruh nyata terhadap seluruh parameter kualitas asap cair. Grade 1 memiliki rendemen tertinggi (86,29-89,94%), warna paling jernih, dan pH sesuai standart pangan sehingga berpotensi sebagai pengawet alami. Grade 2 memiliki rendemen menengah dan sesuai untuk aplikasi pertanian, sedangkan grade 3 memiliki rendemen terendah, warna paling pekat, dan kandungan tar tinggi sehingga direkomendasikan untuk aplikasi non pangan. Tempurung kelapa pada grade 1 merupakan kombinasi paling potensial untuk pengawet alami atau pestisida nabati.

Kata kunci — asap cair, limbah perkebunan, pirolisis

ABSTRACT

Indonesia is an agricultural country with a rapidly growing plantation sector, particularly for coffee, coconut, and cocoa commodities. However, waste from processing these commodities has not been optimally utilized. Plantation waste such as coffee husks, coffee fruit skins, coconut shells, and cocoa pod skins have the potential to be processed into liquid smoke through a multi-stage pyrolysis and purification process. This study aims to compare the physicochemical characteristics of grade 1, grade 2, and grade 3 liquid smoke produced from four types of plantation waste. The study used a Factorial Completely Randomized Design (FARD) with two factors: raw material type and liquid smoke grade level, with a total of 36 experimental units. Observed parameters included process temperature, pyrolysis/distillation time, yield, color, density, and pH. Data were analyzed using ANOVA followed by a 5% LSD test. The results showed that the purification level significantly affected all liquid smoke quality parameters. Grade 1 had the highest yield (86,29-89,94%), the clearest color, and a pH that met food standards, making it a potential natural preservative. Grade 2 has a medium yield and is suitable for agricultural applications, and a high tar content, making it recommended for non-food application. Grade 1 coconut shells offer the most potential combination for natural preservatives or botanical pesticides.

Keywords — liquid smoke, plantation waste, pyrolysis

OPEN ACCESS

© 2026. Dinda Eka Febriani, Anni Nur Aisyah, Rahmawati, Abdurrahman Salim, Charmelia Dwi Ardhana, Fabe Satria Nagitara



Creative Commons
Attribution 4.0 International License

1. Pendahuluan

Indonesia dikenal sebagai negara agraris dengan sektor perkebunan yang berkembang pesat, terutama pada komoditas utama seperti kopi, kelapa, dan kakao. Menurut data Kementerian Pertanian Indonesia 2023, produksi kopi nasional mengalami peningkatan dengan rata-rata pertumbuhan 2,54% selama periode 1984–2023. Produksi tertinggi tercatat pada tahun 2021 mencapai 786.191 ton, sedangkan produksi terendah terjadi pada tahun 1985 sebesar 311.398 ton. Sebagian besar produksi kopi tersebut berasal dari perkebunan rakyat, yaitu sekitar 95,5% per tahun, sementara perkebunan negara dan swasta masing-masing hanya sebesar 2,59% dan 1,91%. Kondisi tersebut menunjukkan adanya potensi besar dalam pengembangan industri perkebunan, namun juga menimbulkan tantangan baru, khususnya dalam aspek pengelolaan limbah pascapanen (Nugroho *et al.*, 2025).

Peningkatan produksi kopi maupun komoditas perkebunan lainnya menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah yang melimpah, seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa dan kulit buah kakao. Namun, sebagian besar limbah tersebut belum dimanfaatkan secara optimal dan cenderung hanya dibakar atau dibuang, sehingga berpotensi mencemari lingkungan baik tanah, air maupun udara (Sarwendah *et al.*, 2019). Limbah tersebut mengandung lignoselulosa yang dapat diolah menjadi produk yang bernilai tambah. Salah satu produk yang berpotensi dikembangkan adalah asap cair (liquid smoke) melalui proses pirolisis, yang dapat diaplikasikan sebagai pengawet alami, koagulan, penetral bau serta agen antimikroba.

Asap cair merupakan hasil kondensasi dari proses pembakaran biomassa pada kondisi terbatas oksigen dan mengandung senyawa fenol, asam organik, serta karbonil yang berperan sebagai pengawet maupun antimikroba alami (Rizal *et al.*, 2022). Asap cair memiliki kualitas yang sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku serta tingkat pemurniannya. Berdasarkan tingkat pemurnian tersebut, produk asap cair diklasifikasikan menjadi tiga grade, yaitu grade 3 (produk pirolisis langsung), grade 2 (hasil destilasi dari grade 3), dan grade 1 (hasil pemurnian lanjutan dari grade 2) (Sahrums *et al.*,

2021). Setiap jenis bahan baku menghasilkan karakteristik asap cair yang berbeda-beda. Misalnya, asap cair yang berasal dari kulit tanduk kopi dan kulit buah kopi memiliki kandungan fenol sekitar 2,11%, karbonil 12,26%, dan pH sekitar 2,94. Adapun asap cair dari tempurung kelapa menunjukkan kadar fenol yang lebih tinggi, yaitu 3,13% dengan pH 3,2, sehingga lebih efektif digunakan sebagai pengawet alami. Sedangkan, berdasarkan hasil penelitian lain, asap cair yang dihasilkan dari kulit buah kakao diketahui mengandung senyawa bioaktif berupa 2-metoksi fenol dengan konsentrasi tinggi mencapai 34,85%, yang menjadikannya lebih unggul dalam fungsi pengawetan (Sarwendah *et al.*, 2019).

Perbedaan bahan baku dan tingkat pemurnian tersebut menghasilkan variasi signifikan pada sifat fisikokimia asap cair, termasuk pH, kandungan fenol, kadar asam organik, warna, aroma dan kejernihan. Proses pemurnian lanjutan pada asap cair grade 1 mampu menghilangkan senyawa berbahaya seperti tar dan komponen bersifat karsinogenik, sehingga produk yang dihasilkan lebih aman untuk digunakan, bahkan pada aplikasi produk pangan (Lingbeck *et al.*, 2014). Dengan demikian, perbedaan karakteristik bahan baku dan metode pemurnian berpengaruh signifikan terhadap kualitas akhir asap cair, baik dari segi keamanan maupun efektivitasnya sebagai pengawet alami. Menurut (Sahrums *et al.*, 2021), parameter proses seperti suhu dan lama pirolisis memiliki peran penting dalam menentukan kualitas produk yang dihasilkan. Selain itu, (Handayani and Sa'diyah, 2023) menyatakan bahwa variasi suhu berpengaruh terhadap nilai densitas dan memiliki keterkaitan langsung dengan rendemen yang dihasilkan.

Berdasarkan uraian tersebut, pemanfaatan limbah perkebunan dalam bentuk asap cair dapat menjadi solusi pengelolaan limbah yang ramah lingkungan sekaligus memberikan nilai tambah secara ekonomi. Namun, penelitian yang membahas perbandingan kualitas asap cair antargrade dari berbagai jenis limbah perkebunan masih tergolong terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis perbandingan karakteristik fisikokimia asap cair grade 1, 2, dan 3 yang dihasilkan dari berbagai jenis bahan baku, yaitu kulit tanduk kopi, kulit

buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi komprehensif mengenai potensi pemanfaatan limbah perkebunan sebagai bahan baku asap cair, serta menjadi alternatif solusi dalam upaya pengelolaan limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2. Target dan Luaran

Penelitian ini menganalisis pengaruh perbedaan jenis limbah perkebunan dan tingkat pemurnian terhadap sifat fisikokimia asap cair. Target yang ingin dicapai adalah menentukan kombinasi bahan baku dan grade asap cair yang menghasilkan kualitas optimal berdasarkan parameter rendemen, warna, densitas, dan pH. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memperkuat informasi ilmiah mengenai pemanfaatan limbah perkebunan sebagai bahan baku alternatif yang bernilai tambah dan berwawasan lingkungan.

Luaran dari penelitian ini berupa data karakteristik fisikokimia asap cair yang dihasilkan dari berbagai jenis limbah perkebunan pada tingkat grade yang berbeda. Hasil penelitian diharapkan dapat dipublikasikan dalam bentuk artikel ilmiah serta dimanfaatkan sebagai rujukan dalam pengembangan asap cair untuk aplikasi sebagai pengawet alami, pestisida nabati, dan solusi pengelolaan limbah perkebunan yang berkelanjutan.

3. Metodologi

3.1 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi asap cair kulit buah kopi, kulit tanduk kopi, kulit buah kakao, dan tempurung kelapa yang masing-masing terdiri atas grade 1, grade 2, dan grade 3. Bahan pendukung yang digunakan antara lain gas portable, garam asam, sabun cuci piring, sikat dan air untuk proses pembersihan peralatan.

Alat yang digunakan diantaranya satu set alat pirolisis (wadah penampung, cup plastik, korek dan stop kontak), satu set alat destilasi (pipa T, labu bowling, kondensor, pipa L, erlenmeyer pyrex 200 ml, kompor, aerator, selang, gelas ukur (Herma) 250 ml, baskom tiang statis, dan thermometer alkohol 150°C, neraca analitik, piknometer 5 ml, pH meter digital, pH

paper (MACHEREY-NAGEL 92110), timbangan digital, timbangan analitik, timbangan jarum 15 kg, dan parang.

Penelitian ini menggunakan Rancangan Acak Lengkap Faktorial (RALF) dengan dua faktor perlakuan. Faktor pertama adalah jenis bahan baku limbah perkebunan yang terdiri atas kulit tanduk kopi (P), kulit buah kopi (Q), tempurung kelapa (R), dan kulit buah kakao (S). Faktor kedua adalah tingkat grade asap cair yang meliputi grade 1 (G1), grade 2 (G2), dan grade 3 (G3). Kombinasi kedua faktor tersebut menghasilkan 12 perlakuan dengan 3 kali ulangan, sehingga diperoleh sebanyak 36 satuan percobaan. Data hasil penelitian dianalisis menggunakan analisis sidik ragam (ANOVA) dan dilanjutkan dengan uji Beda Nyata Terkecil (BNT) pada taraf signifikansi 5%.

3.2 Tahapan Penelitian

Tahap awal penelitian diawali dengan persiapan bahan biomassa berupa kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, kulit buah kakao. Bahan dibersihkan dari kotoran, dipotong menjadi ukuran lebih kecil, kemudian dikeringkan hingga mencapai kadar air $\pm 10\%$. Biomassa kering selanjutnya dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis untuk mengalami proses degradasi termal pada suhu 300-400°C dengan kondisi oksigen terbatas. Proses pirolisis ini menyebabkan terjadinya penguraian senyawa organik kompleks menjadi senyawa volatil. Uap hasil pirolisis kemudian dialirkan menuju kondensor untuk mengalami proses pendinginan dan kondensasi sehingga dihasilkan asap cair grade 3.

Selanjutnya dilakukan pemurnian dari asap cair grade 3 menjadi asap cair grade 2. Pemurnian dilakukan melalui proses destilasi untuk mengurangi kandungan senyawa berat dan tar. Sebanyak 250 mL asap cair grade 3 dimasukkan ke dalam labu didih yang dirangkai dengan pipa T, kondensor, dan termometer. Pemanasan dilakukan menggunakan kompor gas hingga mencapai suhu titik didih sekitar 104 °C. Proses destilasi dibantu oleh aerator untuk menjaga aliran pendinginan pada kondensor. Uap yang terbentuk dikondensasikan dan ditampung dalam erlenmeyer, kemudian volume hasil destilasi dicatat berdasarkan tetesan awal hingga interval waktu 58 menit.



Asap cair grade 2 selanjutnya dimurnikan kembali untuk menghasilkan asap cair grade 1. Pemurnian ini bertujuan memperoleh asap cair dengan kualitas terbaik, ditandai dengan warna jernih, aroma lebih netral, dan tingkat keasaman yang lebih ringan. Proses destilasi dilakukan dengan prosedur yang serupa, menggunakan 100 mL asap cair grade 2 sebagai bahan baku. Asap cair dipanaskan hingga mencapai titik didih, kemudian uap hasil destilasi dikondensasikan dan ditampung. Volume produk dicatat mulai dari tetesan pertama hingga waktu interval yang telah ditentukan.

3.3 Variabel Pengamatan

Variabel yang diamati dalam penelitian ini meliputi suhu proses, waktu pirolisis dan destilasi, rendemen, warna, densitas, dan pH. Suhu dicatat secara langsung selama proses pirolisis dan destilasi untuk mengetahui kestabilan suhu pada setiap tahapan dan grade asap cair. Waktu proses diukur untuk mengetahui durasi pirolisis dan destilasi pada masing-masing perlakuan.

Rendemen dihitung sebagai persentase perbandingan antara berat asap cair yang diperoleh dengan berat awal bahan baku. Warna dan tingkat kejernihan diamati secara visual dengan membandingkan sampel asap cair antargrade pada kondisi pencahayaan yang sama. Densitas diukur menggunakan piknometer 5 mL dengan membandingkan berat sampel terhadap volume piknometer. Nilai pH diukur menggunakan pH meter digital dan kertas pH untuk mengetahui tingkat keasaman asap cair yang berkaitan dengan kandungan asam organik di dalamnya.

4. Pembahasan

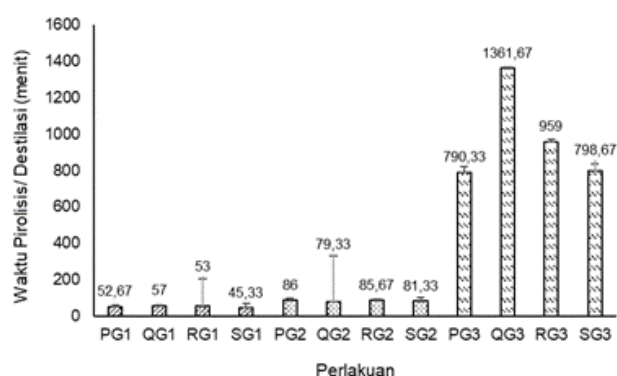
4.1 Waktu pirolisis/ destilasi (menit)

Pengukuran waktu pirolisis/ destilasi dilakukan untuk menilai efisiensi proses konversi biomassa selama pembentukan asap cair. Berdasarkan Gambar 2, waktu pirolisis menunjukkan peningkatan yang konsisten pada setiap grade. Grade 1 memiliki durasi proses tercepat, yaitu 45,33–57,00 menit, karena fase volatil awal didominasi oleh komponen volatil yang mudah menguap pada suhu lebih rendah. Grade 2 menunjukkan waktu pemrosesan yang lebih lama, yaitu 79,33–86,00 menit, disebabkan oleh keberadaan senyawa termal yang lebih

kompleks sehingga memerlukan energi lebih besar untuk terdekomposisi. Selanjutnya, Grade 3 memiliki waktu pirolisis/ destilasi terlama yaitu 790,33–1361,67 menit, yang dipengaruhi oleh kandungan tar dan senyawa berat yang membutuhkan suhu lebih tinggi dan durasi lebih panjang untuk terurai.

Waktu pemrosesan asap cair grade 3 merupakan waktu yang diperlukan untuk menghasilkan asap cair melalui proses pirolisis bahan baku biomassa limbah perkebunan yang sudah dikeringkan, seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao dengan total massa 17 kg. Waktu pemrosesan asap cair grade 2 merupakan durasi yang dibutuhkan untuk menjalankan proses destilasi pertama menggunakan bahan baku berupa asap cair grade 3 dengan volume 250 mL. Sementara itu, waktu pemrosesan asap cair grade 1 adalah durasi proses destilasi kedua menggunakan bahan baku asap cair grade 2 dengan volume 100 mL.

Variasi waktu pada setiap bahan baku berhubungan dengan perbedaan komposisi lignoselulosa. Selulosa dengan kristalinitas tinggi memerlukan energi lebih besar untuk mengalami depolimerisasi (Sun *et al.*, 2022), sedangkan lignin memiliki ketahanan termal tinggi sehingga terdegradasi secara bertahap pada rentang suhu yang lebih luas (Lu and Gu, 2022). Oleh karena itu, bahan dengan kandungan selulosa dan lignin lebih tinggi, seperti kulit buah kopi dan tempurung kelapa, membutuhkan waktu pirolisis/ destilasi lebih lama dibandingkan bahan yang strukturnya lebih mudah terurai.



Gambar 1. Rerata waktu pirolisis/ destilasi

Waktu pirolisis adalah waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan asap cair grade 3. Berdasarkan Gambar 1, menunjukkan bahwa rerata waktu pirolisis yang dibutuhkan berkisar 790,33 menit hingga 1361,67 menit. Waktu pirolisis tercepat berasal dari bahan kulit tanduk kopi (PG3 sekitar 790,33 menit) sedangkan waktu pirolisis paling lama berasal dari bahan kulit buah kopi yaitu (QG3 sekitar 1361,67 menit). Selain itu, terdapat dua perlakuan lainnya, yaitu RG3 (tempurung kelapa) dan SG3 (kulit buah kakao) juga menunjukkan nilai cukup tinggi, masing masing sebesar 959 menit dan 798,67 menit. Perbedaan lama waktu pirolisis diduga dipengaruhi oleh kandungan selulosa pada bahan baku (Sun *et al.*, 2022).

Waktu destilasi adalah waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan asap cair grade 2 serta grade 1. Pada grade 2, durasi proses pirolisis/ destilasi menunjukkan nilai yang lebih rendah dibanding grade 3, yaitu berkisar antara 79,33 menit hingga 86,00 menit. Waktu yang lebih singkat pada grade ini disebabkan oleh dominasi senyawa semi-volatil yang memerlukan energi lebih rendah untuk terurai dibanding kelompok tar berat pada grade 3. Senyawa pada grade 2 memiliki struktur kimia yang lebih sederhana dan lebih mudah mengalami pemutusan ikatan selama pemanasan, sehingga proses destilasi berlangsung lebih cepat dan efisien.

Sementara itu, grade 1 memiliki durasi proses tercepat, yaitu 45,33 menit hingga 57,00 menit, karena berada pada tahap volatil awal yang didominasi oleh komponen volatil ringan seperti fenol, aldehid, dan asam organik yang mudah menguap pada suhu lebih rendah. Senyawa- senyawa ini dilepaskan lebih cepat karena struktur kimia yang relatif sederhana dan ikatannya lebih mudah diputus oleh pemanasan awal. Hal ini sejalan dengan penjelasan (Sygula *et al.*, 2024) yang menyatakan bahwa tahap awal pirolisis lignoselulosa ditandai dengan pelepasan senyawa ringan dari dekomposisi selulosa dan hemiselulosa, menghasilkan fraksi volatil ringan secara cepat dibandingkan grade 2 dan grade 3.

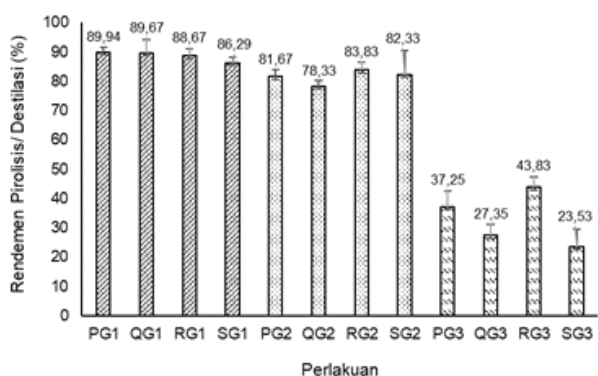
Dengan demikian, perbandingan antar grade menunjukkan bahwa semakin kompleks struktur lignoselulosa dan semakin tinggi kandungan tar dalam bahan baku, maka semakin lama waktu pirolisis/ destilasi yang diperlukan.

Hal ini sejalan dengan laporan (Sygula *et al.*, 2024) yang menjelaskan bahwa komponen lignoselulosa berdensitas tinggi memperlambat pelepasan senyawa volatil, serta diperkuat oleh (Lu and Gu, 2022) yang menyatakan bahwa senyawa berat dan tar memerlukan suhu lebih tinggi dan durasi pemanasan lebih panjang untuk terurai.

4.2 Rendemen (%)

Pengukuran rendemen pada proses pirolisis/ destilasi asap cair dilakukan untuk menilai efisiensi konversi bahan organik menjadi produk yang dapat dimanfaatkan. Berdasarkan Gambar 3, rendemen asap menunjukkan variasi antar grade, yaitu 33,33-38,67% pada grade 1, 32,33-35,33% pada grade 2, serta 28,33-32,67% pada grade 3. Rendemen asap cair grade 3 merupakan rendemen yang dihasilkan dari proses pirolisis menggunakan bahan baku biomassa limbah perkebunan seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi sebanyak 17 kg, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao yang telah dikeringkan. Rendemen asap cair grade 2 merupakan hasil perhitungan rendemen dari proses destilasi pertama dengan bahan baku berupa asap cair grade 3 dengan volume 250 mL, sedangkan rendemen asap cair grade 1 diperoleh dari proses destilasi kedua menggunakan bahan baku asap cair grade 2 dari masing- masing sampel limbah perkebunan dengan volume 100 mL.

Penurunan rendemen terjadi sebagai konsekuensi dari peningkatan suhu pirolisis/ destilasi, yang menyebabkan penguraian senyawa volatil berlangsung lebih intensif serta pembentukan residu padat dalam jumlah lebih besar. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada grade dengan suhu lebih tinggi, proses dekomposisi bahan terjadi lebih lanjut sehingga sebagian senyawa mudah menguap terurai menjadi gas yang tidak terkondensasi. Hasil ini sejalan dengan temuan (Oramahi *et al.*, 2020) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu pirolisis di atas 120°C menurunkan rendemen asap cair akibat meningkatnya laju penguapan senyawa organik.



Gambar 2. Rerata rendemen asap cair

Rendemen pirolisis digunakan untuk mengetahui bagian biomassa yang berhasil berubah menjadi asap cair pada setiap tahapan penyaringan (grade). Berdasarkan Gambar 2, rendemen pirolisis/ destilasi menunjukkan variasi nilai antar grade, yang menggambarkan perbedaan kemampuan masing-masing bahan baku dalam menghasilkan asap cair. Perbedaan ini berkaitan dengan karakteristik lignoselulosa setiap bahan, terutama komposisi selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang memengaruhi jumlah cairan yang dapat terbentuk selama proses pemanasan. Hal ini sejalan dengan laporan (Segers *et al.*, 2024), yang menjelaskan bahwa variasi struktur lignoselulosa menentukan perilaku degradasi termal serta jumlah produk asap cair yang dapat dihasilkan. Temuan ini juga diperkuat oleh studi (Afraz *et al.*, 2024) yang menunjukkan bahwa bahan dengan kandungan lignin lebih tinggi cenderung menghasilkan rendemen cair yang lebih rendah akibat pembentukan tar dan residu padat yang lebih besar selama pirolisis.

Rendemen destilasi merupakan jumlah asap cair yang berhasil diperoleh pada grade 2 dan grade 1 setelah proses pemisahan uap dilakukan, sehingga dapat menggambarkan seberapa besar bagian bahan yang berhasil dikonversi menjadi produk cair pada setiap tahap penyulingan. Rendemen pada grade 2 berkisar antara 32,33–35,33%, sedikit lebih rendah dibanding grade 1. Penurunan ini diduga berkaitan dengan komposisi lignin yang lebih tinggi, karena lignin cenderung menghasilkan lebih banyak char dan fraksi berat, bukan fraksi cair (bio-oil/asap cair). Hal ini sejalan dengan temuan dalam (Shahbaz *et al.*, 2022), yang menunjukkan bahwa biomassa dengan

kandungan lignin tinggi memiliki rendemen cair lebih rendah karena lignin mengalami dekomposisi lambat dan menghasilkan produk kondensat lebih sedikit.

Grade 3 memiliki rendemen paling rendah, yaitu 28,33–32,67%, yang menunjukkan bahwa bahan baku pada grade ini memiliki struktur lignoselulosa yang lebih resisten terhadap pirolisis. Rendemen rendah ini juga dapat dipengaruhi oleh tingginya proporsi lignin atau keberadaan senyawa non-karbohidrat seperti ekstraktif. Lignin menghasilkan lebih banyak residu padat serta fraksi fenolik berat, sehingga menurunkan jumlah kondensat cair yang diperoleh.

Hasil ini sejalan dengan laporan (Sahrurn *et al.*, 2021); (Sarwendah *et al.*, 2019), yang menyatakan bahwa nilai rendemen sangat dipengaruhi oleh tingkat pemurnian dan karakteristik bahan baku. Menurut (Lingbeck *et al.*, 2014), proses destilasi berperan dalam mengurangi kandungan senyawa berbahaya seperti tar, sehingga menghasilkan asap cair yang lebih murni dan aman digunakan. (Handayani and Sa'diyah, 2023) juga menegaskan bahwa proses destilasi membantu pelepasan senyawa semi-volatil yang meningkatkan rendemen pada grade 2 dibandingkan grade 3.

Selain itu, karakteristik bahan baku seperti kadar air dan komposisi lignoselulosa juga berkontribusi terhadap variasi rendemen. Bahan dengan kandungan lignin tinggi berpotensi menghasilkan lebih banyak senyawa volatil selama pirolisis (Kawamoto, 2017), sedangkan kadar air tinggi menurunkan rendemen akibat terbentuknya uap air berlebih. Efisiensi sistem destilasi menjadi faktor kunci, di mana sistem pendingin optimal dan pengaturan suhu stabil dapat meningkatkan efektivitas kondensasi uap. Penerapan destilasi bertingkat atau fraksionasi memungkinkan pemisahan senyawa berdasarkan titik didih, sehingga meminimalkan kehilangan komponen volatil dan meningkatkan hasil rendemen (Haqbin *et al.*, 2022).

4.3 Warna

Pengamatan warna pada asap cair hasil pirolisis/ destilasi dilakukan untuk mengetahui tingkat kemurnian serta konsentrasi senyawa yang terkandung di dalamnya. Warna asap cair berfungsi sebagai indikator kualitas produk, karena menunjukkan kandungan senyawa fenol,

karbonil, dan asam organik yang terbentuk selama proses pirolisis. Berdasarkan Gambar 3, asap cair grade 1 menunjukkan warna paling jernih dengan rona kekuningan muda, grade 2 berwarna kuning kecokelatan, dan grade 3 berwarna cokelat tua hingga kehitaman.

Warna asap cair grade 3 merupakan warna yang dihasilkan dari proses pirolisis menggunakan bahan baku biomassa limbah perkebunan seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao sebanyak 17 kg yang telah dikeringkan, sehingga tingginya kandungan tar dan komponen aromatik kompleks memberikan warna pekat pada produk akhir. Sementara itu, warna asap cair grade 2 merupakan warna yang terbentuk dari hasil pemurnian bertahap terhadap asap cair grade 3 dengan volume 250 mL untuk setiap jenis limbah, sehingga menghasilkan warna kuning kecokelatan akibat berkurangnya fraksi berat namun masih tersisa sebagian komponen fenolik dan karbon aromatik. Adapun warna asap cair grade 1 diperoleh dari proses destilasi kedua menggunakan bahan baku asap cair grade 2 dari masing-masing sampel limbah perkebunan sebanyak 100 mL, sehingga menghasilkan warna paling jernih karena fraksi non-volatil dan senyawa aromatik berat telah tersisihkan hampir seluruhnya.

Variasi warna tersebut dipengaruhi oleh perbedaan suhu dan durasi proses pirolisis, di mana kondisi yang lebih tinggi dapat mendorong pembentukan senyawa tar dan komponen aromatik kompleks. Intensitas warna yang semakin gelap mengindikasikan peningkatan kandungan senyawa non-volatil dan karbon aromatik. Temuan ini konsisten dengan laporan (Oramahi et al., 2020) yang menyatakan bahwa peningkatan suhu pirolisis memperkuat intensitas warna akibat meningkatnya reaksi dekomposisi lignin dan selulosa.



Gambar 3. Warna Asap Cair Grade 3, 2 dan 1

Warna asap cair merupakan parameter visual yang berperan sebagai indikator tingkat kemurnian serta komposisi kimia yang terkandung didalamnya. Berdasarkan hasil penelitian, setiap grade menunjukkan perbedaan warna yang dipengaruhi oleh jenis bahan baku dan tahapan proses pemurnian yang dilakukan. Asap cair grade 3 (gambar pertama dari kiri) menunjukkan warna cokelat tua hingga kehitaman akibat tingginya kandungan tar, kreosot, dan senyawa aromatik polisiklik (PAH). Warna pekat ini umumnya dihasilkan dari bahan dengan kandungan lignin tinggi dan proses pemurnian terbatas, sehingga lebih tepat digunakan untuk aplikasi non-pangan seperti pengawet kayu atau deodorizer (Maulina et al., 2021).

Asap cair grade 2 (gambar tengah) berwarna kuning tua hingga cokelat muda, menunjukkan keberadaan senyawa kompleks yang belum sepenuhnya terfraksinasi. Produk pada grade ini lebih sesuai untuk aplikasi di sektor pertanian karena masih mengandung sebagian komponen berat namun dalam kadar yang lebih rendah dibandingkan dengan grade 3. Asap cair grade 1 pada (gambar kanan) menunjukkan warna bening sampai kuning pucat dengan kadar tar yang rendah, yang menandakan dominasi senyawa volatil dan tereliminasi sebagian besar komponen berat. Kondisi ini menjadikan grade 1 layak digunakan pada produk pangan, kosmetik, dan pestisida organik karena kandungan senyawa toksiknya minimal (Saputra et al., 2020). Jenis bahan baku juga berkontribusi terhadap intensitas warna. Tempurung kelapa dan kulit tanduk kopi menghasilkan warna lebih pekat karena kandungan lignin yang tinggi, sedangkan kulit buah kakao memberikan warna lebih jernih akibat kandungan selulosa yang dominan (Amrullah et al., 2023). Secara umum, tingkat kecerahan warna berbanding lurus dengan derajat pemurnian asap cair. Proses fraksinasi dan destilasi ulang terbukti efektif menurunkan intensitas warna dengan menghilangkan senyawa berat. Penelitian (Yulistiani et al., 2020) menunjukkan bahwa setiap tahap pemurnian menurunkan nilai absorbansi cahaya, sejalan dengan perubahan warna ke arah yang lebih terang. Dengan demikian, pengamatan warna dapat digunakan sebagai parameter visual dalam

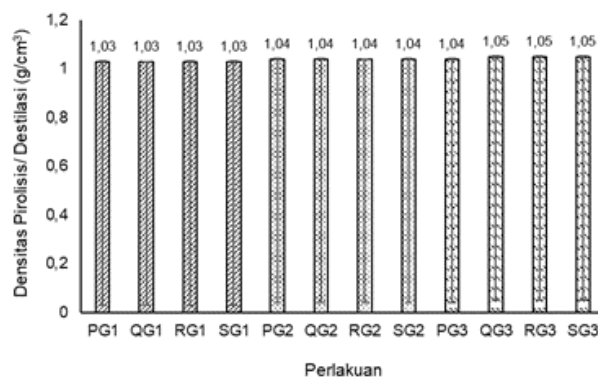
menilai kualitas dan efisiensi proses produksi asap cair.

4.4 Densitas (g/cm³)

Pengukuran asap cair hasil pirolisis/destilasi dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan fisik dan kandungan zat terlarut dalam produk. Densitas merupakan parameter kimia penting yang menggambarkan konsentrasi komponen organik seperti asam organik, fenol, dan karbonil yang terbentuk selama proses pirolisis. Berdasarkan Gambar 4, densitas asap cair grade 1 menunjukkan nilai yang relative seragam, yaitu 1,03 g/cm³ pada seluruh perlakuan (PG1, QG1, RG1, SG1). Pada grade 2 nilai densitas sedikit meningkat menjadi 1,04 g/cm³, untuk seluruh perlakuan (PG2, QG2, RG2, SG2). Sementara itu, densitas grade 3 berada pada rentang kisaran 1,04–1,05 g/cm³, dengan sebagian perlakuan (PG3, QG3, RG3), mencapai 1,05 g/cm³ dan satu perlakuan (SG3) berada pada 1,04 g/cm³.

Densitas asap cair grade 3 merupakan nilai densitas yang diperoleh dari produk hasil pirolisis biomassa limbah perkebunan yang sudah dikeringkan, seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao sebanyak 17 kg sebagai bahan baku utama. Densitas asap cair grade 2 merupakan nilai densitas yang dihitung dari hasil destilasi pertama menggunakan bahan baku asap cair grade 3 dengan volume sebesar 250 mL. Sementara itu, densitas asap cair grade 1 merupakan nilai densitas yang diperoleh dari hasil destilasi kedua menggunakan bahan baku asap cair grade 2 dengan volume 100 mL.

Variasi antar grade tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi pirolisis/destilasi berpengaruh terhadap pembentukan senyawa dengan berat molekul lebih tinggi. Peningkatan suhu pirolisis cenderung meningkatkan densitas akibat intensifikasi reaksi kondensasi dan dekomposisi lignoselulosa yang menghasilkan senyawa aromatik kompleks. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Lu et al., 2019) dan (Aguirre et al., 2020) yang menunjukkan bahwa intensifikasi suhu pirolisis/destilasi meningkatkan densitas produk asap cair biomassa karena akumulasi senyawa fenolik dan asam organik dalam fase cair.



Gambar 4. Rerata densitas asap cair

Berdasarkan Gambar 4, seluruh perlakuan menunjukkan nilai densitas yang berada pada rentang 1,03–1,05 g/cm³, yang menandakan bahwa asap cair hasil pirolisis maupun destilasi memiliki kestabilan fisik yang baik. Nilai tersebut berada sedikit di atas densitas air, sehingga menunjukkan bahwa produk mengandung komponen organik terlarut dengan konsentrasi yang cukup tinggi. Pada grade 1, densitas seluruh perlakuan (PG1, QG1, RG1, SG1) konsisten pada 1,03 g/cm³. Nilai densitas meningkat pada grade 2 menjadi 1,04 g/cm³, sedangkan grade 3 menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 1,04–1,05 g/cm³.

Perbedaan densitas antar grade menggambarkan variasi jumlah senyawa organik berat yang dihasilkan selama proses pirolisis. Grade 3, sebagai produk tanpa pemurnian, memiliki densitas tertinggi karena masih mengandung tar, resin, dan senyawa fenolik berat. Sebaliknya, grade 1 dan 2 mengalami proses destilasi yang mengurangi komponen berat sehingga densitasnya menurun. Hal ini sesuai dengan penjelasan (Valente et al., 2025) bahwa proses pemurnian mampu menurunkan densitas dengan menghilangkan fraksi berat yang tidak diinginkan.

Faktor operasional pirolisis/destilasi seperti suhu dan durasi pemanasan juga berperan penting dalam menentukan densitas. Suhu yang lebih tinggi mempercepat reaksi dekomposisi lignoselulosa dan menghasilkan lebih banyak komponen berat seperti senyawa aromatik kompleks. Akumulasi senyawa ini menyebabkan densitas meningkat, sebagaimana dilaporkan oleh (Lu et al., 2019) dan (Aguirre et al., 2020). Namun, suhu yang terlalu rendah akan menghasilkan komponen volatil ringan dalam jumlah besar sehingga densitas menjadi lebih

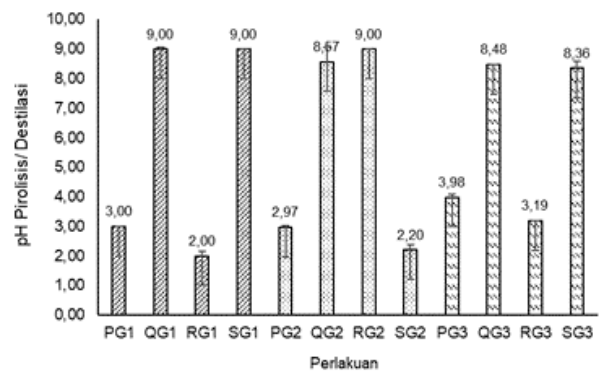
rendah. Oleh karena itu, pengaturan suhu pirolisis dan tahap destilasi sangat penting untuk menghasilkan asap cair dengan densitas yang stabil dan sesuai kebutuhan penggunaannya.

4.5 pH

Pengukuran pH pada proses pirolisis/destilasi asap cair dilakukan untuk mengetahui tingkat keasaman produk yang dihasilkan, karena nilai pH berpengaruh langsung terhadap kestabilan senyawa kimia dan efektivitasnya sebagai antibakteri maupun pengawet alami. Berdasarkan Gambar 6, nilai pH asap cair yang dihasilkan menunjukkan variasi pada setiap grade dan perlakuan. Grade 1 memiliki rentang pH antara 2,00–9,00, grade 2 berkisar antara 2,20–9,00, sedangkan grade 3 berada pada kisaran 3,19–8,48. Nilai pH tertinggi terdapat pada perlakuan QG1, QG2, SG1, dan RG2 yaitu mencapai 9,00, sedangkan pH terendah terdapat pada RG1 sebesar 2,00.

Nilai pH asap cair grade 3 merupakan karakteristik pH yang diperoleh dari hasil pirolisis biomassa limbah perkebunan kering seperti kulit tanduk kopi, kulit buah kopi, tempurung kelapa, dan kulit buah kakao dengan total massa bahan baku 17 kg. Nilai pH asap cair grade 2 merupakan karakteristik pH yang dihasilkan dari proses destilasi pertama menggunakan bahan baku berupa asap cair grade 3 dengan volume sebesar 250 mL. Sementara itu, nilai pH asap cair grade 1 merupakan nilai pH dari hasil destilasi kedua dengan menggunakan bahan baku asap cair grade 2 yang memiliki volume 100 mL.

Variasi pH ini menunjukkan bahwa proses pirolisis/ destilasi yang berbeda menghasilkan komposisi senyawa asam organik dan fenolik yang tidak sama pada setiap grade. Semakin tinggi tingkat keasaman (pH rendah), maka kandungan asam organik seperti asam asetat dan asam formiat dalam asap cair cenderung lebih tinggi. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Aguirre *et al.*, 2020) yang menyatakan bahwa perbedaan suhu dan waktu pirolisis dapat memengaruhi kadar asam dalam asap cair, sehingga berdampak pada nilai pH dan kestabilan kimia produk yang dihasilkan.



Gambar 5. Rerata pH asap cair

Berdasarkan Gambar 5, nilai pH asap cair menunjukkan variasi yang cukup lebar pada setiap perlakuan dan grade, dengan rentang pH 2,00–9,00. Rentang tersebut menggambarkan adanya perbedaan tingkat keasaman yang terbentuk selama proses pirolisis dan destilasi. Pada grade 1, nilai pH berkisar antara 2,00–9,00, di mana perlakuan QG1 dan SG1 menunjukkan nilai tertinggi (9,00), sedangkan RG1 memiliki nilai pH terendah yaitu 2,00. Pada grade 2, variasi pH berada pada kisaran 2,20–9,00, dengan QG2 dan RG2 mencatat nilai tertinggi (9,00) dan SG2 menunjukkan nilai terendah (2,20). Sementara itu, grade 3 memiliki rentang pH 3,19–8,48, di mana QG3 mencapai pH 8,48, dan RG3 berada pada nilai pH 3,19.

Perbedaan nilai pH antar grade mencerminkan variasi komposisi senyawa volatil, terutama asam organik dan fenol, yang terbentuk dari degradasi lignoselulosa selama pirolisis. Grade 3, sebagai produk tanpa pemurnian, memiliki pH yang lebih stabil pada kisaran asam hingga netral karena kandungan senyawa asam yang lebih tinggi. Sebaliknya, grade 1 dan 2 yang melalui proses pemurnian menunjukkan nilai pH lebih bervariasi hingga mencapai kondisi basa. Fenomena ini menunjukkan bahwa proses destilasi mampu mengurangi fraksi asam dan meningkatkan proporsi senyawa bersifat basa. Hal ini sesuai dengan (Afrah *et al.*, 2024) bahwa pemurnian dapat meningkatkan pH dengan menghilangkan komponen asam yang volatil.

Nilai pH juga dipengaruhi oleh karakteristik bahan baku. Perlakuan berbahan kulit buah kakao (Q) secara konsisten memiliki pH tertinggi hingga 9,00, yang menunjukkan rendahnya kadar asam organik yang tertinggal

setelah proses pemurnian. Sebaliknya, bahan berbasis tempurung kelapa (R) menghasilkan pH yang lebih rendah (2,00–3,19), menunjukkan tingginya kandungan senyawa asam hasil degradasi hemiselulosa dan lignin. Hal ini sejalan dengan (Izza *et al.*, 2023) yang menyebutkan bahwa biomassa ber kandungan lignin tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak asam organik selama pirolisis/ destilasi.

Variasi pH ini memiliki implikasi terhadap aplikasi akhir asap cair. Asap cair dengan pH rendah (bersifat asam) lebih efektif digunakan sebagai antimikroba dan pengawet, karena asam organik berperan dalam merusak membran sel mikroba. Sebaliknya, asap cair dengan pH netral hingga basa lebih sesuai untuk aplikasi non-pangan, seperti aditif pertanian atau bahan pendukung formulasi kimia yang memerlukan stabilitas pH. Senyawa fenolik yang berfungsi sebagai penyangga juga berkontribusi terhadap kestabilan pH, sebagaimana dijelaskan oleh (Maulinda *et al.*, 2023). Dengan demikian, perbedaan nilai pH pada setiap grade dipengaruhi oleh jenis bahan baku, tahapan pemurnian, serta kondisi termal, yang secara keseluruhan menentukan karakteristik kimia asap cair yang dihasilkan.

5. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat pemurnian dan jenis bahan baku berpengaruh nyata terhadap karakteristik fisikokimia asap cair. Peningkatan tingkat pemurnian dari grade 3 ke grade 1 meningkatkan mutu asap cair, ditandai dengan waktu pemrosesan lebih singkat, warna lebih terang, pH lebih stabil, serta penurunan kandungan tar dan senyawa berat. Grade 1 menghasilkan kualitas terbaik dengan rendemen tertinggi, warna paling jernih, densitas stabil, serta nilai pH yang sesuai standar pangan, sehingga layak digunakan sebagai pengawet alami dan agen antimikroba. Grade 2 memiliki rendemen sedang dan karakteristik kimia yang sesuai untuk aplikasi pertanian, sedangkan grade 3 menunjukkan rendemen terendah, warna paling pekat dan kandungan tar tinggi sehingga direkomendasikan untuk aplikasi non-pangan.

Perbedaan bahan baku juga memengaruhi karakteristik asap cair. Tempurung kelapa menghasilkan rendemen dan densitas tertinggi

karena kandungan ligninnya yang besar, sedangkan kulit buah kakao cenderung menghasilkan nilai pH lebih rendah akibat tingginya senyawa asam organik. Berdasarkan keseluruhan parameter kualitas, kombinasi bahan baku tempurung kelapa pada grade 1 merupakan formulasi terbaik untuk diaplikasikan sebagai pengawet alami dan pestisida nabati.

Untuk pengembangan lebih lanjut, penelitian disarankan melakukan analisis kuantitatif komponen bioaktif dan uji efektivitas aplikasi lapangan pada sektor pangan maupun pertanian untuk mengoptimalkan potensi pemanfaatan asap cair berbasis limbah perkebunan sebagai produk ramah lingkungan dan bernilai ekonomi tinggi.

6. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada KEMENDIKTISAINTEK yang telah mendanai penelitian ini melalui Program Kreativitas Mahasiswa (PKM).

7. Daftar Pustaka

- [1] Afrah, B.D. *et al.* (2024) "Analysis of Liquid Smoke Grade Characteristics from Coconut Shells and Palm Kernel Shell Waste Through a Slow Pyrolysis Process," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(4), pp. 545–558. Available at: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.4.10>.
- [2] Afraz, M. *et al.* (2024) "Thermo-catalytic decomposition of cotton seed press cake over nickel doped zeolite Y, hydrogen : enhanced yield of bio-oil with highly selective fuel-," pp. 31549–31559. Available at: <https://doi.org/10.1039/d4ra06163b>.
- [3] Aguirre, J.L. *et al.* (2020) "Composition, ageing and herbicidal properties of biomass pyrolysis," *Energies*, 13(2418), pp. 1–17.
- [4] Amrullah, S., A, B. and Faisal, M. (2023) "Karakteristik Asap Cair Tempurung Kelapa, Cangkang Kemiri," 8(2), pp. 48–54.
- [5] Handayani, I. and Sa'diyah, K. (2023) "Pengaruh Waktu Pirolisis Serbuk Gergaji Kayu Terhadap Hasil Asap Cair," *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(1), pp. 28–35. Available at: <https://doi.org/10.33795/distilat.v8i1.227>.
- [6] Haqbin, M. *et al.* (2022) "Improving the Quality of Fast Pyrolysis Bio-oil (Liquid Fuel) using Thermal Distillation Method," *Asian Journal of Research in Biochemistry*, 10(1), pp. 63–68. Available at: <https://doi.org/10.9734/ajrb/2022/v10i130215>.



- [7] Izza, N. *et al.* (2023) *Comparison of Raw Materials for Making Liquid Smoke with Pyrolysis Method as an Alternative to Formalin and Borax in Food*. Atlantis Press International BV. Available at: https://doi.org/10.2991/978-94-6463-118-0_13.
- [8] Kawamoto, H. (2017) "Lignin pyrolysis reactions," *Journal of Wood Science*, 63(2), pp. 117–132. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1606-z>.
- [9] Lingbeck, J.M. *et al.* (2014) "Functionality of liquid smoke as an all-natural antimicrobial in food preservation," *Meat Science*, 97(2), pp. 197–206. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.02.003>.
- [10] Lu, X. *et al.* (2019) "Effect of Pyrolysis Temperature on the Characteristics of Wood Vinegar Derived from Chinese Fir Waste: A Comprehensive Study on Its Growth Regulation Performance and Mechanism," *ACS Omega*, 4(21), pp. 19054–19062. Available at: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02240>.
- [11] Lu, X. and Gu, X. (2022) *Biotechnology for Biofuels A review on lignin pyrolysis : pyrolytic behavior , mechanism , and relevant upgrading for improving process efficiency*, *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*. BioMed Central. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0>.
- [12] Maulina, S. and Karo, E.O. br (2021) "Improving the quality of liquid smoke from pyrolysis of oil palm fronds with the adsorption–distillation purification process," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122(1), p. 012101. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1122/1/012101>.
- [13] Maulinda, L. *et al.* (2023) "The Influence of Pyrolysis Time and Temperature on the Composition and Properties of Bio-Oil Prepared from Tanjong Leaves (*Mimusops elengi*)," *Sustainability (Switzerland)*, 15(18), pp. 1–17. Available at: <https://doi.org/10.3390/su151813851>.
- [14] Nugroho, S. *et al.* (2025) "Peramalan Produksi, Volume Ekspor dan Nilai Ekspor Kopi Indonesia Tahun 2025-2035," *JAGO TOLIS: Jurnal Agrokompleks Tolis*, 5(2), pp. 178–185. Available at: <https://doi.org/10.56630/jago.v5i2.764>.
- [15] Oramahi, H.A. *et al.* (2020) "Optimization and characterization of wood vinegar produced by shorea laevis ridl wood pyrolysis," *Indonesian Journal of Chemistry*, 20(4), pp. 825–832. Available at: <https://doi.org/10.22146/ijc.45783>.
- [16] Rizal, W.A. *et al.* (2022) "Efektivitas Pemurnian Asap Cair Biomassa Serbuk Gergaji dengan Distilasi, Adsorpsi Zeolite dan Karbon Aktif," *Jurnal Selulosa*, 12(01), p. 11. Available at: <https://doi.org/10.25269/jsel.v12i01.353>.
- [17] Sahrum, R.P., Syaiful, A.Z. and Al-Gazali (2021) "Uji Kualitas Asap Cair Tempurung Kelapa Dan Serbuk Gergaji Kayu Metode Pirolisis," *Saintis*, 2(2), pp. 72–78.
- [18] Saputra, R.Y., Naswir, M. and Suryadri, H. (2020) "Perbandingan Karakteristik Asap Cair Pada Berbagai Grade Dari Pirolisis Batubara," *Jurnal Engineering*, 2(2), pp. 96–108. Available at: <https://doi.org/10.22437/jurnalengineering.v2i2.11531>.
- [19] Sarwendah, M. *et al.* (2019) "PEMANFAATAN LIMBAH KOMODITAS PERKEBUNAN UNTUK PEMBUATAN ASAP CAIR / Utilization of Plantation Commodities Waste for Liquid Smoke," *Jurnal Penelitian Tanaman Industri*, 25(1), p. 22. Available at: <https://doi.org/10.21082/litri.v25n1.2019.22-30>.
- [20] Segers, B. *et al.* (2024) "Sustainability feedstocks , processes and potential value chains process †," pp. 3730–3749. Available at: <https://doi.org/10.1039/d4su00342j>.
- [21] Shahbaz, M. *et al.* (2022) "Investigation of biomass components on the slow pyrolysis products yield using Aspen Plus for techno-economic analysis," pp. 669–681.
- [22] Sun, T. *et al.* (2022) "Fast Pyrolysis of Cellulose and the Effect of a Catalyst on Product Distribution."
- [23] Syguła, E., Ciolkosz, D. and Białowiec, A. (2024) "The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar - a review," pp. 859–886.
- [24] Valente, A.L. *et al.* (2025) "Process Analysis of Waste Animal Fat Pyrolysis and Fractional Distillation in Semi-Batch Reactors : Influence of Temperature and Reaction Time."
- [25] Yulistiani, F. *et al.* (2020) "The Effect of Distillation Temperature in Liquid Smoke Purification Process: A Review," 198(Issat), pp. 532–536. Available at: <https://doi.org/10.2991/aer.k.201221.088>.

