Blend Sains
Jurnal Teknik
https://jurnal.ilmubersama.com/index.php/blendsains

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

Studi Eksperimental Pengaruh Katalis Alami terhadap Emisi Gas Buang pada Proses Pirolisis

Ahmad Dani Setyawan, Agus Mukhtar, Muhammad Faesal Febriandyono, Hisyam Ma'mun, Muhamad Safi'i*

Fakultas Teknik dan Informatika, Program Studi Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Kota Semarang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 30 September 2026
Revisi Akhir: 16 Oktober 2026
Diterbitkan *Online*: 29 Oktober 2026

KATA KUNCI

Gas Buang
Katalis Alami
LDPE
Pirolisis

KORESPONDENSI

Phone: +62 882-3883-6759
E-mail: agusmukhtar@upgris.ac.id

A B S T R A K

Studi ini bertujuan untuk secara eksperimental memeriksa efek katalis alami (serbuk katul, serbuk gergaji, dan serbuk teh) sebagai filter gas buang terhadap karakteristik emisi proses pirolisis plastik LDPE. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 150–300 °C dengan tekanan 0,3–0,4 bar menggunakan reaktor *batch* berkapasitas 1 kg. Karakteristik gas buang dianalisis melalui pengukuran konsentrasi CO_2, suhu, dan kelembapan menggunakan detektor kualitas udara, serta distribusi suhu menggunakan kamera termal. Hasilnya menunjukkan bahwa katalis alami secara efektif mengurangi opasitas asap gas buang dan menurunkan suhu gas buang sekaligus membuat distribusinya lebih merata. Serbuk katul bekerja terbaik pada suhu titik tengah terendah (33,2 °C), diikuti oleh serbuk gergaji (34,1 °C) dan bubuk teh (36,0 °C), dibandingkan dengan kondisi tanpa katalis (35,6 °C). Produk minyak pirolisis yang dihasilkan memiliki nilai kalor 26,7–26,8 MJ/kg, densitas 0,65 g/ml, dan viskositas mendekati 1 cP. Temuan ini menunjukkan bahwa katalis alami, terutama serbuk katul, berpotensi menjadi media filtrasi gas buang yang murah dan ramah lingkungan dalam proses pirolisis plastik.

PENDAHULUAN

Penggunaan plastik secara global terus mengalami peningkatan signifikan setiap tahunnya dan telah menjadi salah satu tantangan lingkungan yang paling serius saat ini. Kondisi ini menyebabkan peningkatan jumlah sampah plastik yang signifikan dari tahun ke tahun. Berdasarkan Data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) tahun 2025, sampah plastik di Indonesia mencapai sekitar 19,84% dari total komposisi sampah nasional [1]. Plastik membutuhkan waktu ratusan hingga ribuan tahun untuk terurai secara alami, sehingga ketika terakumulasi, limbah ini mencemari tanah, air, dan udara, menciptakan ancaman jangka panjang bagi ekosistem [2]. Salah satu upaya yang menjanjikan untuk mengolah limbah plastik, khususnya LDPE, menjadi bahan bakar alternatif adalah melalui proses pirolisis [3].

Pirolisis adalah proses dekomposisi kimia bahan organik yang diinduksi secara termal (disebabkan oleh panas) dalam kondisi tanpa oksigen [4]. Salah satu kegunaan pirolisis yaitu untuk pengolahan sampah plastik dengan mengubahnya menjadi bahan bakar minyak (BBM) untuk mengurangi sampah plastik [5]. Pemanasan dilakukan secara endotermis yang menyerap panas selama proses berlangsung sehingga bahan baku akan berdekomposisi yaitu terjadi pemutusan rantai karbonsecara kimia dari polimer menjadi monomer hidrokarbon yang dapat digunakan sebagai bahan bakar [6]. Selain mengurangi volume limbah plastik, pirolisis juga menghasilkan gas dengan nilai kalori rendah hingga sedang (15–40 mJ/m^3) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif, *char* dengan nilai kalori tinggi (25–35 mJ/kg) sebagai bahan bakar padat, serta *wax* yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif maupun sumber bahan kimia. Proses ini

https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2089 Attribution-ShareAlike 4.0 International Some rights reserved

juga menghasilkan fase air yang mengandung senyawa organik [7]. Keunggulan lain teknologi ini adalah kemampuannya beroperasi pada suhu sekitar 500 °C dan tekanan atmosfer [8].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh kondisi operasi dan penambahan katalis terhadap distribusi produk pirolisis. Pirolisis termal (tanpa katalis) pada plastik PP berlapis aluminium foil (Al-PE). *Yield* minyak yang diperoleh berkisar 6,9–22,4 wt%, dengan aluminium residual sekitar 4% (kemurnian tinggi hingga 97,6%), dan kondisi optimal dicapai pada ukuran partikel 50×50 mm. [9]. Melalui pirolisis katalitik dengan ZSM-5. Pada penggunaan 50 wt% ZSM-5, diperoleh *yield* minyak sekitar 21%, gas 66%, aluminium 8,8%, dan *Al-free char* 3,12% [10]. Perbandingan pirolisis termal dan katalitik (menggunakan ZSM-5 serta *zeolite*) pada PET, BOPP, MET/PET, dan BOPP/MET dalam reaktor *packed-bed* skala pilot. Hasil menunjukkan penambahan katalis meningkatkan produksi *liquid pyrolysis oil*, dengan *zeolite* mencapai *yield* maksimal 46,67 wt%, sementara ZSM-5 lebih mendorong pembentukan gas melalui *secondary cracking*. Minyak dari PET dan MET/PET didominasi fraksi C_1–C_{10} (56–64%) yang cocok untuk aplikasi *gasoline*, disertai penurunan kandungan *oxygenate* [11]. Peningkatan suhu pirolisis diketahui menurunkan jumlah residu padat yang tertinggal dalam reaktor. Selain itu, penambahan katalis *zeolit* alam Gunung kidul terbukti menurunkan parameter fisis produk cair, seperti *specific gravity*, *kinematic viscosity*, dan *pour point* [12].

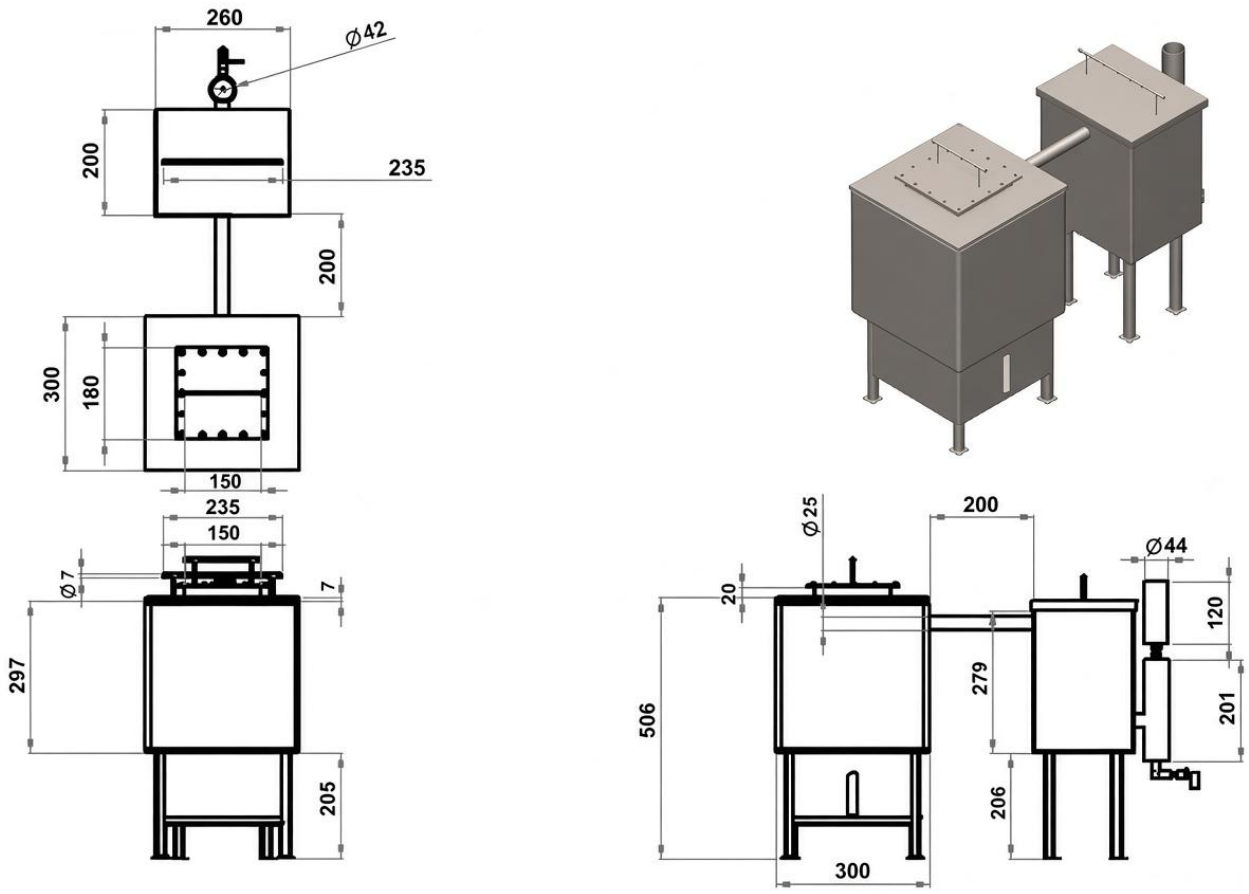
Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H_2, CO, CO_2, H_2O dan CH_4), tar, dan *char*. Semua produk dari pirolisis bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar ramah lingkungan. Selain tiga jenis produk tersebut teknologi pirolisis juga menghasilkan produklain. Adapun produk pirolisis lainnya antara lain: arang (*biochar*), *torrified wood*, arang aktif, briket arang, *bio-oil*, *syngas* [13], menunjukkan bahwa peningkatan suhu pirolisis dari 473 K hingga 723 K meningkatkan konsentrasi H_2 dan CH_4, namun menurunkan konsentrasi CO. Komposisi gas optimum dicapai pada suhu 723 K (setara ±450 °C) dengan dominasi hidrokarbon [14]. Pengaruh konsentrasi katalis RCC terhadap kualitas dan la ju alir gas dari pirolisis limbah polietilena menunjukkan bahwa konsentrasi 10% menghasilkan komposisi hidrokarbon terbaik (propana + butana 35,657%, etana 12,13%) serta *flowrate* gas yang meningkat seiring kenaikan konsentrasi katalis [15]. Pemanfaatan kembali *syngas* yang dihasilkan dari proses pirolisis plastik dapat mengurangi konsumsi bahan bakar eksternal (LPG) secara signifikan karena gas tersebut dialirkan kembali ke ruang bakar reaktor sebagai sumber panas [16].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada *yield* produk padat dan cair atau karakterisasi gas sebagai produk akhir. Kajian pengaruh karakteristik gas buang terhadap kinerja proses pirolisis itu sendiri masih relatif terbatas. Kesenjangan ini menunjukkan perlunya penelitian eksperimental secara khusus menelaah hubungan antara sifat-sifat gas buang dengan efisiensi energi, kualitas produk, dan stabilitas proses.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan mengkaji secara eksperimental pengaruh karakteristik gas buang hasil pembakaran terhadap proses pirolisis yang disaring menggunakan tiga jenis katalis alam berbeda. Katalis alam yang digunakan adalah serbuk katul, serbuk teh, dan serbuk gergaji, dengan kondisi operasi tekanan konstan 10.000 Pa serta temperatur 150°C dan 300°C. Penggunaan ketiga biomassa limbah tersebut sebagai bahan dasar katalis berbasis karbon aktif atau biochar didasari oleh ketersediaannya yang melimpah, murah, dan berkelanjutan, serta kandungan serat dan senyawa organik di dalamnya yang cocok menghasilkan material berpori berluas permukaan tinggi. Dari sudut pandang teknik mesin, pemanfaatan biomassa ini menerapkan prinsip rekayasa material dan proses termal (pirolisis, aktivasi, serta impregnasi) untuk menghasilkan katalis heterogen dengan porositas dan sifat permukaan yang dapat direkayasa, sehingga menekan biaya bahan baku, mendukung sifat dapat diperbarui dan netral karbon, serta meningkatkan aktivitas katalitik [17]. Data yang diamati meliputi kadar karbon, temperatur, dan kelembapan. Hasil penelitian diharapkan dapat menjelaskan hubungan antara karakteristik gas buang dan proses pirolisis, sekaligus menyediakan data dasar bagi pengembangan dan optimasi teknologi pirolisis di masa mendatang.

Model Fisik

Model fisik alat pirolisis (Gambar 1) terdiri atas dua unit utama, yaitu reaktor dan kondensor, yang dihubungkan melalui pipa penyalur uap. Rancangan alat dikembangkan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks* dan disajikan dalam bentuk tampak atas, tampak depan, tampak samping, serta gambar isometrik. Reaktor berfungsi sebagai ruang pemanasan dan penguraian termal plastik, sedangkan kondensor berperan mendinginkan uap hasil pirolisis hingga terkondensasi menjadi bahan bakar cair.



Gambar 1. Model Fisik Pirolisis.

Berdasarkan rancangan, reaktor memiliki dimensi utama 300 × 300 mm dengan bukaan bagian dalam berukuran 180 × 180 mm. Tinggi keseluruhan reaktor hingga kaki penyangga mencapai sekitar 506 mm, sementara tinggi badan reaktor sekitar 297 mm. Reaktor dilengkapi penutup pada bagian atas untuk menjaga ruang pemanasan tetap tertutup selama proses berlangsung. Pada sisi reaktor terdapat saluran keluaran uap berdiameter sekitar Ø25 mm yang mengalirkan uap hasil pirolisis menuju kondensor.

Unit kondensor ditempatkan terpisah dari reaktor dengan jarak sekitar 200 mm dan dihubungkan melalui saluran uap. Kondensor memiliki dimensi lebar sekitar 260 × 206 mm, sementara tutup reaktor berukuran 180 × 180 mm. Kondensor juga dilengkapi kaki penyangga untuk menjaga kestabilan alat selama operasi. Pada bagian keluaran kondensor terdapat dua saluran, yaitu tabung katalis yang mengalirkan hasil kondensasi berupa gas berdiameter sekitar Ø44 mm serta tabung penampungan bahan bakar cair berdiameter sekitar Ø46 mm.

Material

Pada penelitian ini, proses pirolisis menggunakan 3 jenis katalis alam (Gambar 2) yang berbeda yaitu dengan serbuk katul, serbuk gergaji, dan serbuk teh bekas. Katalis tersebut berfungsi sebagai filter pada proses pirolisis. Masing-masing katalis memiliki spesifikasi yang berbeda antara lain:

1. Katalis serbuk katul umumnya memiliki kandungan SiO_2 sekitar 90–96%, disertai K_2O (~1,6%), MgO, CaO, Na_2O, Fe_2O_3, Al_2O_3, dan P_2O_5 dalam jumlah kecil. Struktur amorf memberikan luas permukaan mesopori yang cukup baik [18]. Sifat katalitik pada serbuk katul memiliki keasaman sedang (Lewis/Brønsted dari silika dan logam alkali), kemampuan menurunkan energi aktivasi, serta efek deoksigenasi dan cracking. Logam alkali (K, Ca) berkontribusi pada migrasi ion yang mempercepat reaksi tertentu [19]. Serbuk katul sendiri lebih sering dipelajari sebagai bahan baku pirolisis (untuk *bio-oil* atau *syngas*) atau sumber minyak untuk biodiesel, bukan sebagai katalis utama untuk plastic [20].
2. Serbuk gergaji mentah memiliki aktivitas katalitik rendah. *Biochar* dari serbuk gergaji (terutama yang dimodifikasi) dapat bertindak sebagai katalis atau support karena kandungan logam abu, porositas, dan gugus oksigen yang memfasilitasi cracking, deoksigenasi, dan adsorpsi hidrokarbon berat [21]. Serbuk gergaji paling efektif dalam co-pirolisis

katalitik. Plastik (PE, PP, PS, LDPE, HDPE) bertindak sebagai donor hidrogen, sementara biomassa membantu mengurangi senyawa teroksigenasi dan meningkatkan selektivitas produk.

3. Serbuk teh bekas pada katalis merupakan biomassa lignoselulosa. Kandungan utamanya meliputi selulosa, hemiselulosa, dan lignin (lignin sering dilaporkan sekitar 29–37%, bahkan mencapai ~30–33% pada beberapa sampel spent green tea) [22]. *Char* atau abu yang dihasilkan dari serbuk teh bekas dapat memiliki porositas dan situs aktif terbatas. Namun, aktivitas katalitik utamanya berasal dari katalis yang ditambahkan (misalnya KOH untuk upgrading in-situ, atau logam pada support) [23]. Serbuk teh bekas paling bermanfaat dalam co-pirolisis katalitik dengan plastik. Sinergi terjadi karena plastik menyediakan hidrogen (mengurangi oksigenat), sementara biomassa teh membantu distribusi produk dan pembentukan senyawa tertentu.

Pembuatan katalis dilakukan melalui serangkaian tahapan yang sistematis. Bahan baku berupa serbuk katul, serbuk teh, dan serbuk gergaji dikumpulkan, kemudian disortir untuk memisahkan kotoran dan material asing. Selanjutnya, bahan dikeringkan dengan metode penjemuran di bawah sinar matahari selama satu hari hingga kadar airnya berkurang. Apabila partikel masih berukuran kasar setelah pengeringan, bahan digiling menggunakan blender hingga berbentuk serbuk halus, lalu diayak dengan saringan mesh 40–100 untuk memperoleh distribusi ukuran partikel yang seragam. Masing-masing bahan baku ditimbang sebanyak 40 g dan dicampur secara homogen dengan 80 ml perekat berbasis tepung tapioka yang sebelumnya telah dilarutkan dalam air panas. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam cetakan pipa berdiameter 42 mm dan panjang 60 mm, serta dipadatkan melalui proses pengepresan. Setelah dikeluarkan dari cetakan, setiap pelet katalis dilubangi sebanyak lima buah di bagian tengah menggunakan kawat, kemudian dikeringkan kembali di bawah sinar matahari selama tiga hari hingga mencapai kondisi kering sempurna.



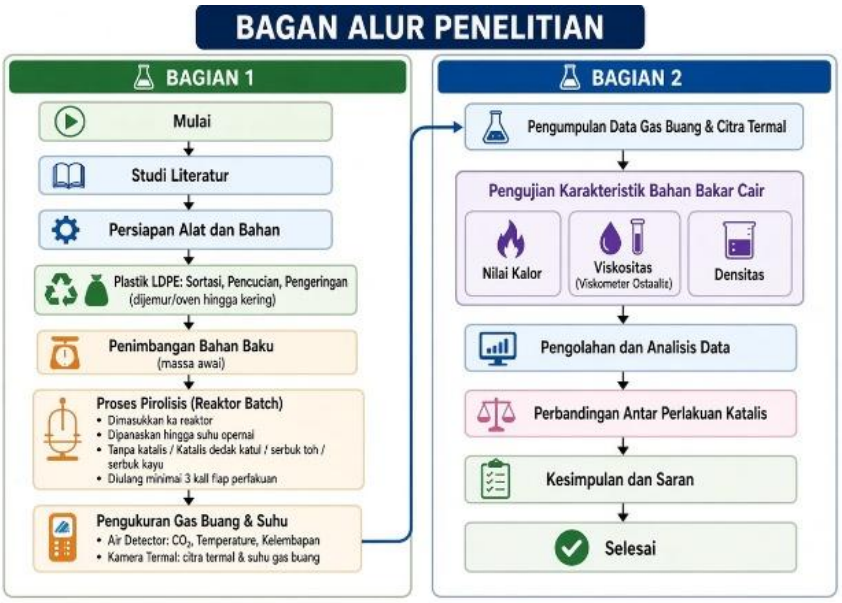
(a) (b) (c)

Gambar 2. Katalis berbahan (a). Serbuk Katul, (b). Serbuk Teh Bekas, dan (c). Serbuk Gergaji.

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian (Gambar 3) diawali dengan penyiapan umpan dari limbah jenis plastik LDPE. Plastik kemudian dimasukkan ke dalam reaktor pirolisis dan dipanaskan hingga mencapai suhu operasi yang telah ditentukan. Selama proses berlangsung, gas buang yang keluar diukur menggunakan *air detector* untuk memperoleh data konsentrasi kadar karbon CO_2, temperatur, dan kelembapan. Secara bersamaan, kamera termal digunakan untuk merekam citra termal dan data suhu gas buang. Setiap perlakuan dilakukan pengulangan minimal tiga kali tanpa mengunakan katalis, tiga kali kali mengunakan katalis serbuk katul, serbuk teh bekas, dan serbuk gergaji untuk meningkatkan keandalan data, sesuai dengan praktik eksperimen pirolisis yang umum dilakukan pada penelitian-penelitian nasional [24,25].

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2089



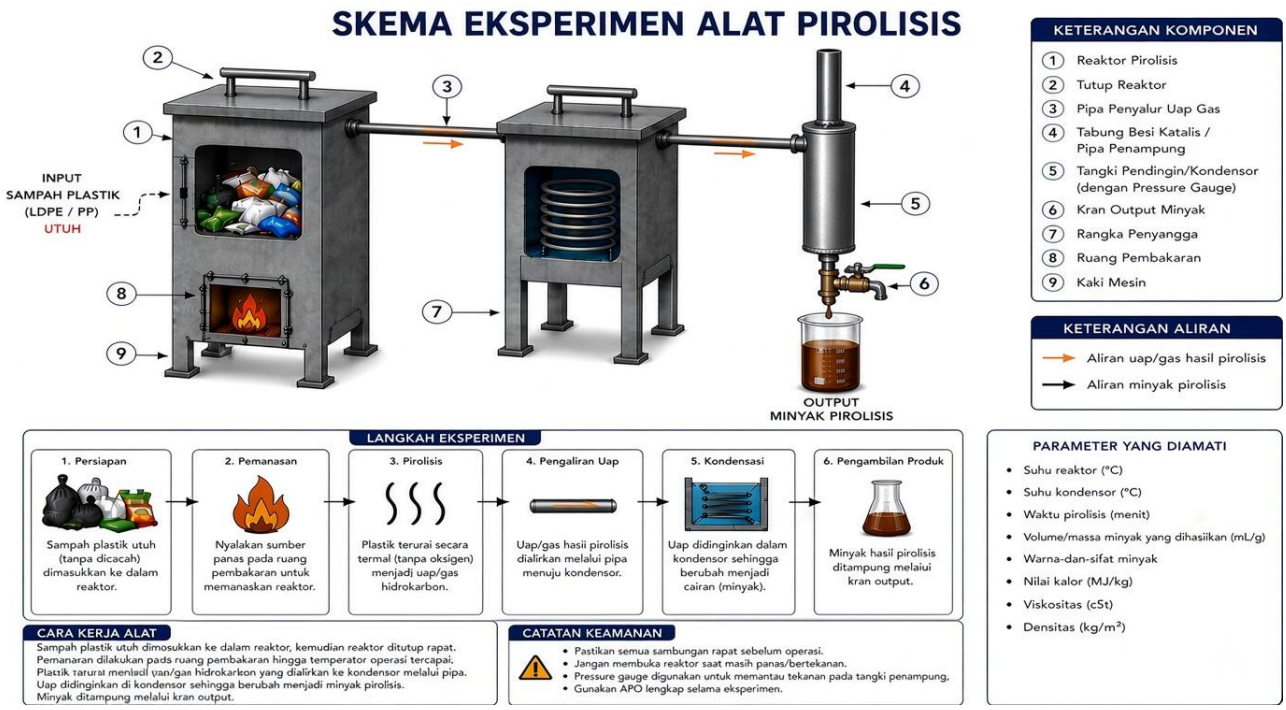
Gambar 3. Alur Penelitian.

Skema Penelitian

Rangkaian proses pirolisis termal plastik LDPE meggunakan katalis dimulai dengan memasukkan bahan baku plastik dalam kondisi utuh (tidak dicacah) ke dalam reaktor (Gambar 4). Reaktor kemudian ditutup rapat menggunakan tutup reaktor untuk mencegah masuknya oksigen selama proses berlangsung. Selanjutnya, reaktor dipanaskan secara bertahap pada ruang pembakaran hingga mencapai temperatur operasi 150–300 °C dengan tekanan 0,3– 0,4 bar selama 60–180 menit. Pemanasan menyebabkan plastik mengalami dekomposisi termal dan menghasilkan uap/gas hidrokarbon.

Uap hasil pirolisis dialirkan melalui pipa penyalur menuju kondensor. Pada kondensor, uap hidrokarbon didinginkan menggunakan media pendingin sehingga sebagian mengalami kondensasi menjadi bahan bakar cair. Cairan hasil kondensasi ditampung pada tangki penyimpanan melalui kran output dan disimpan sebagai minyak pirolisis untuk pengujian karakteristik. Sementara itu, gas yang tidak terkondensasi keluar melalui saluran gas yang dilengkapi katalis alam sebegai filter gas buangnya. Seluruh rangkaian alat ditopang oleh rangka penyangga dan kaki mesin guna menjaga kestabilan selama proses berlangsung.

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memperoleh data yang lebih representatif. Selama proses, tekanan pada tangki penampungan dipantau menggunakan *pressure gauge*. Parameter yang diamati meliputi suhu reaktor, suhu kondensor, waktu pirolisis, volume atau massa bahan bakar cair yang dihasilkan, serta karakteristik bahan bakar berupa nilai kalor, viskositas, dan densitas sebagai parameter utama, serta panas spesifik dan konduktivitas termal sebagai parameter pendukung. Data tersebut digunakan untuk membandingkan kualitas bahan bakar cair hasil pirolisis plastik LDPE dan mengetahui pengaruh jenis katalis alam terhadap karakteristik yang dihasilkan.



Gambar 4. Skema Penelitian.

Metode Pengambilan Data

Pada penelitian ini, pengambilan data dilakukan melalui pengamatan secara langsung selama proses pirolisis dan pengujian karakteristik gas buang serta bahan cair hasil pirolisis LDPE. Dalam pengambilang data gas buang menggunakan 2 alat ukur (Gambar 5) untuk mengetahui karakteristik gas buang pada proses pirolisis. Alat tersebut memiliki spesifikasi yang berbeda antara lain:

1. Alat detektor kualitas udara 5-in-1 model M8 yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi lengkap berupa pengukuran CO_2 dengan rentang 400–5.000 ppm dan sensitivitas 1 ppm, HCHO dengan rentang 0–9.999 mg/m³, TVOC dengan rentang 0–9.999 mg/m³, suhu dengan rentang 1–70 °C serta akurasi ±1 °C, dan kelembapan relatif dengan rentang 0–99% RH serta akurasi ±2% RH. Meskipun alat ini dilengkapi lima parameter tersebut, data yang diambil dalam penelitian ini dibatasi pada konsentrasi CO_2, pengukuran suhu, dan kelembapan. Parameter CO_2 digunakan untuk memantau kadar karbon dioksida sebagai salah satu komponen gas buang hasil proses pirolisis plastik, sedangkan data suhu dan kelembapan dimanfaatkan untuk mengetahui kondisi lingkungan gas buang selama proses dekomposisi termal berlangsung.
2. Kamera termal HTI HT-175 memilki spesifikasi parameter yang dapat dibaca langsung pada layar meliputi gambar termal (*thermal image*), suhu titik tengah (*center temperature*), suhu maksimum (*max temperature*), suhu minimum (*min temperature*), serta satuan suhu (°C/°F). Parameter-parameter tersebut dapat dimanfaatkan untuk menganalisis kondisi termal gas buang pada proses pirolisis plastik secara non-kontak. Gambar termal memberikan visualisasi distribusi suhu sehingga memudahkan identifikasi hotspot maupun zona pendinginan yang tidak merata. Sementara itu, nilai suhu titik tengah, maksimum, dan minimum yang ditampilkan secara simultan memungkinkan pemantauan tren suhu real-time serta deteksi anomali termal yang berpotensi memengaruhi kualitas gas buang maupun efisiensi proses *recovery* produk.

Langkah awal yang dilakukan yaitu dengan melakukan pemilihan sampah plastik, lalu pembersihan, pengeringan, dan penimbangan. Selanjutnya plastik dimasukkan ke reaktor *batch* yang berkapasitas 1 kg. Pengujian pertama dilakukan tanpa penggunaan katalis, lalu dilanjutkan dengan pengujian dengan katalis serbuk katul, serbuk gergaji, dan serbuk teh bekas, yang telah ditimbang terlebih dahulu, dan pengujian dilakukan masing-masing 3 kali. Pengujian pirolisis menggunakan pemanas LPG sebagai bahan bakar nya.

Dalam proses pengujian, data diamati menggunakan termokopel untuk mengetahui temperatur reaktor dan di operasikan secara bertahap selama proses, dengan temperature 150ºC sampai 300º C dengan tekanan 0,3 Bar hingga 0,4 Bar yang di ukur menggunakan *preesure gauge.* Selanjutnya dalam pengukuran suhu dan karaktristik gas buang menggunakan *air*

detector, dan kamera termal, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali, kemudian dirata-ratakan. Data yang diperoleh selanjutnya dibandingkan antara bahan



Gambar 5. Alat Tes Kadar Udara dan Thermal Kamera.

Massa plastik yang digunakan tiap pengujian yaitu 200 gram dengan menggunakan plastik jenis LDPE. Setelah pengujian, katalis kembali dilakukan penimbangan untuk mengetahui massa. Cairan yang dihasilkan ditampung, disaring, dan di simpan dalam wadah tertutup. Karakteristik bahan bakar cair dievaluasi berdasarkan parameter utama berupa nilai kalor, viskositas, dan densitas, serta parameter pendukung berupa panas spesifik dan konduktivitas termal. Pengukuran nilai kalor dilakukan menggunakan *Joule Calorimeter*, penentuan viskositas dilakukan dengan *Ostwald viscometer*, sedangkan densitas dihitung melalui perbandingan massa dan volume menggunakan gelas ukur serta timbangan digital. Setiap pengujian dilakukan secara triplo, kemudian nilai rata-ratanya dihitung.

REDUKSI DATA

Nilai Kalor

Nilai kalor (*calorific value / heating value*) adalah jumlah energi panas yang dilepaskan saat suatu bahan bakar (padat, cair, atau gas) dibakar secara sempurna dalam kondisi terkendali. Nilai ini mengukur potensi energi suatu bahan sebagai sumber bahan bakar pada Persamaan 1 [26].

$$NC = \frac{\text{C sistem}(\text{T2} - \text{T1})}{m\,fuel} \qquad (1)$$

Viskositas

Viskositas adalah ukuran yang menyatakan kekentalan suatu fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan dalam fluida [27]. Viskositas di ukur menggunakan Persamaan 3 [28].

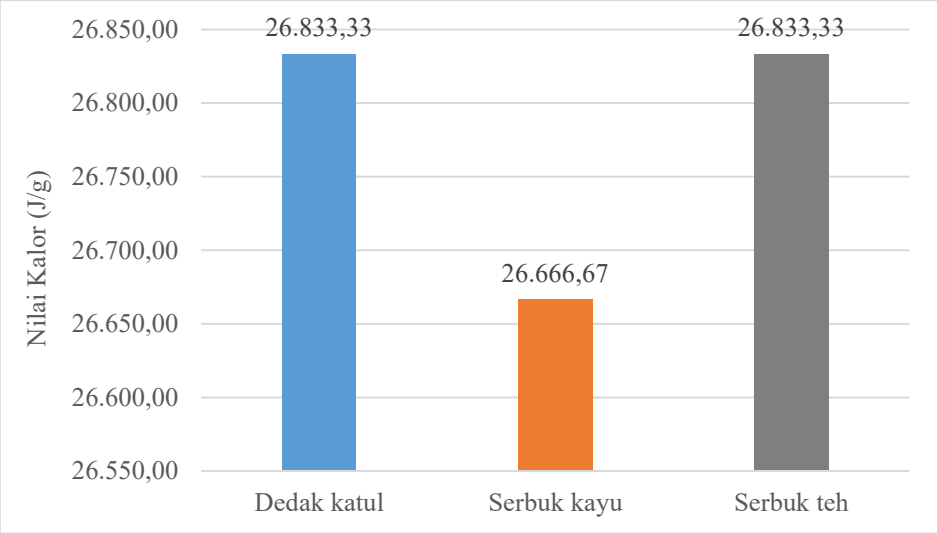
$$\eta = \eta_0 \frac{t \times \rho}{t_0 \times \rho_0} \qquad (2)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Performa Pirolisator

Hasil pengujian yang telah dilakukan terhadap performa pirolisator serta kinerja katalis alam sebagai media filtrasi gas buang disajikan secara sistematis. Pembahasan difokuskan pada karakteristik utama produk minyak hasil pirolisis, yang mencakup nilai kalor, densitas, dan viskositas, di mana data tersebut disajikan dalam bentuk grafik untuk mempermudah analisis perbandingan antar bahan baku. Selain itu, performa katalis alam dievaluasi melalui observasi visual gas buang sebelum dan sesudah proses filtrasi, dilengkapi dengan citra termal yang diperoleh menggunakan kamera termal guna mengungkap distribusi suhu dan fenomena fisik yang menyertainya. Seluruh data empiris tersebut selanjutnya diinterpretasikan secara mendalam untuk menjelaskan berbagai fenomena yang terjadi, baik yang berkaitan dengan

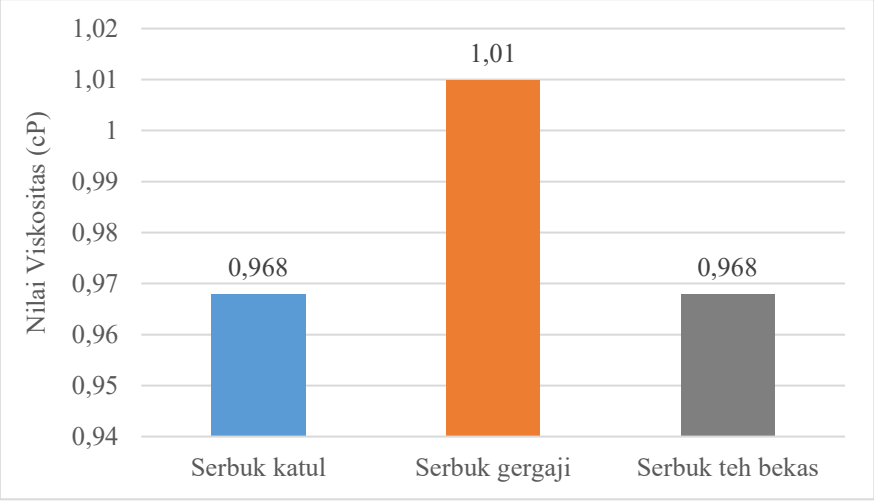
kualitas energi dan sifat fisikokimia produk pirolisis maupun efektivitas mekanisme filtrasi yang berlangsung pada katalis alam. Dengan demikian, temuan yang dipaparkan tidak hanya menampilkan data kuantitatif dan kualitatif, tetapi juga memberikan pemahaman ilmiah mengenai faktor-faktor yang memengaruhi performa sistem secara keseluruhan.



Gambar 6. Grafik Hasil Nilai Kalor.

Berdasarkan (Gambar 6), grafik nilai kalor *bio-oil* hasil pirolisis plastik LDPE menggunakan filter katalis alam menunjukkan bahwa nilai yang tertera merupakan nilai rata-rata dari hasil pengujian dan perhitungan pada setiap bahan baku. Serbuk katul menghasilkan nilai kalor sebesar 26.833,33 J/g, serbuk gergaji sebesar 26.666,67 J/g, dan serbuk teh bekas sebesar 26.833,33 J/g. Dari data tersebut terlihat bahwa serbuk katul dan serbuk teh bekas memberikan hasil nilai kalor tertinggi yang sama, sehingga keduanya lebih efektif dalam menghasilkan *bio-oil* dengan kandungan energi yang lebih tinggi dibandingkan serbuk gergaji yang memiliki nilai kalor sedikit lebih rendah.

Berdasarkan perhitungan densitas, *bio-oil* hasil pirolisis plastik LDPE menggunakan filter katalis alam menunjukkan bahwa ketiga bahan baku, yaitu serbuk katul, serbuk gergaji, dan serbuk teh bekas, menghasilkan nilai massa, volume, dan densitas yang sama. Massa *bio-oil* yang dihasilkan dari masing-masing bahan baku adalah 13 g dengan volume 20 ml, sehingga densitas yang diperoleh sebesar 0,65 g/ml. Kesamaan nilai ini mengindikasikan bahwa jenis filter katalis alam yang digunakan tidak memberikan perbedaan signifikan terhadap massa, volume, maupun densitas *bio-oil* yang dihasilkan.



Gambar 7. Grafik Hasil Nilai Viskositas.

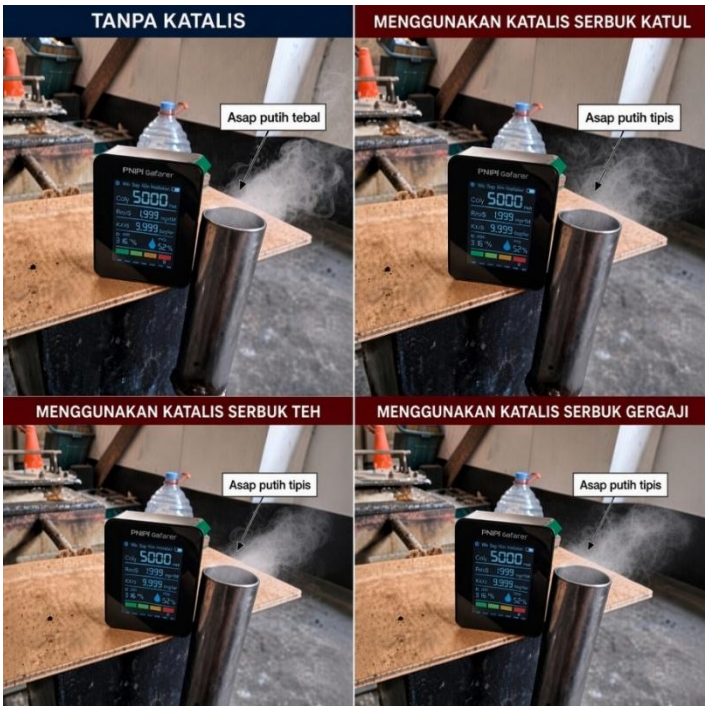
Berdasarkan (Gambar 7), grafik nilai viskositas *bio-oil* hasil pirolisis plastik LDPE menggunakan filter katalis alam menunjukkan bahwa nilai yang tertera merupakan nilai rata-rata dari hasil pengujian dan perhitungan pada setiap bahan

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2089

baku. Serbuk katul dan serbuk teh bekas menghasilkan nilai viskositas yang sama, yaitu 0,968 cP, sedangkan serbuk gergaji menghasilkan nilai viskositas lebih tinggi sebesar 1,01 cP. Nilai viskositas yang lebih rendah pada serbuk katul dan serbuk teh bekas mengindikasikan bahwa *bio-oil* yang dihasilkan lebih encer dan memiliki kemampuan alir yang lebih baik dibandingkan *bio-oil* dari serbuk gergaji yang sedikit lebih kental.

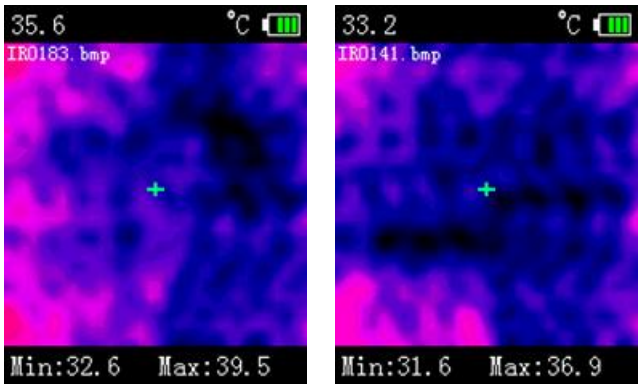
Performa Katalis Alam Sebagai Gas Buang

Performa katalis alam sebagai filter gas buang dievaluasi melalui observasi visual terhadap karakteristik gas buang serta analisis distribusi suhu menggunakan kamera termal. Hasil visualisasi foto real dan citra termal tersebut diinterpretasikan untuk mengungkap fenomena yang terjadi selama proses filtrasi, sekaligus menilai efektivitas katalis alam dalam mereduksi emisi gas buang.

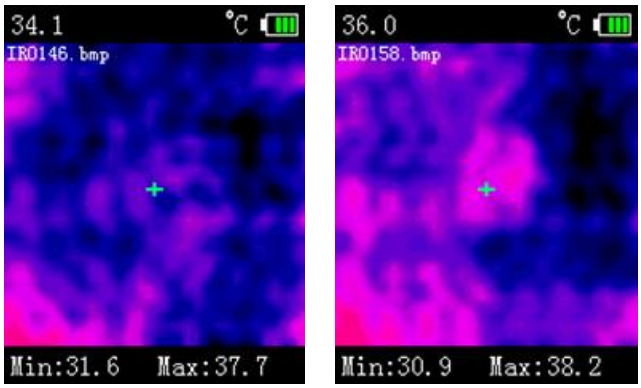


Gambar 8. Visualisasi Gas Buang.

Berdasarkan (Gambar 8), hasil visualisasi foto real menunjukkan perbedaan karakteristik gas buang sebelum dan sesudah melewati katalis alam. Pada kondisi sebelum diberikan katalis alam, asap yang keluar dari tabung gas buang pirolisis tampak berwarna putih dengan ketebalan yang cukup tinggi. Setelah gas buang dilewatkan melalui katalis alam dari serbuk katul, serbuk teh, dan serbuk gergaji, asap mengalami perubahan menjadi berwarna putih dengan intensitas yang lebih tipis. Perubahan visual ini mengindikasikan adanya pengurangan opasitas asap akibat proses filtrasi yang dilakukan oleh katalis alam.



(a) (b)



(c) (d)

Gambar 9. Hasil Pengamatan Kamera Termal (a). Tanpa Katalis, (b). Menggunakan Katalis Serbuk Katul, (c). Serbuk Gergaji, (d). Serbuk teh bekas.

Pada (Gambar 9. (a)) hasil pengamatan kamera termal dengan pengujian tanpa katalis menampilkan suhu titik tengah sebesar 35,6 °C dengan rentang suhu minimum 32,6 °C dan maksimum 39,5 °C. Area berwarna merah muda hingga magenta terlihat lebih dominan di beberapa bagian, yang menandakan adanya zona dengan suhu relatif lebih tinggi. Warna ungu dan biru masih tersebar, namun kontras suhu antar area cukup terlihat, menunjukkan distribusi panas yang kurang merata.

Pada (Gambar 9. (b)) pengujian dengan menggunakan katalis serbuk katul, mengalami penurunan suhu. Suhu titik tengah tercatat 33,2 °C, dengan suhu minimum 31,6 °C dan maksimum 36,9 °C. Citra termal didominasi oleh warna ungu dan biru gelap, sementara area merah muda menjadi lebih terbatas. Perubahan warna ini mengindikasikan bahwa distribusi suhu menjadi lebih homogen dan cenderung lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa katalis.

Pada (Gambar 9. (c)) penggunaan katalis serbuk gergaji saat pengujian, menunjukkan suhu titik tengah berada di 34,1 °C, dengan rentang minimum 31,6 °C dan maksimum 37,7 °C. Pola warna pada citra masih didominasi ungu–biru, namun terdapat sedikit area merah muda yang tersebar. Hal ini menunjukkan bahwa suhu gas buang sedikit lebih tinggi dibandingkan serbuk katul, tetapi tetap lebih rendah dan lebih stabil dibandingkan kondisi tanpa katalis.

Sementara itu, pada (Gambar 9. (d)), penggunaan katalis serbuk teh bekas menampilkan suhu titik tengah tercatat 36,0 °C dengan suhu minimum 30,9 °C dan maksimum 38,2 °C. Citra termal memperlihatkan kombinasi warna ungu, biru, dan merah muda yang relatif seimbang. Meskipun suhu titik tengahnya mendekati kondisi tanpa katalis, rentang suhu maksimumnya masih lebih rendah. Area berwarna merah muda yang muncul menandakan adanya zona dengan suhu sedikit lebih tinggi, namun tidak membentuk hot spot yang ekstrem.

Secara keseluruhan, penggunaan katalis alam cenderung menghasilkan distribusi suhu yang lebih rendah dan relatif lebih merata dibandingkan kondisi tanpa katalis. Dominasi warna ungu dan biru pada citra termal saat menggunakan katalis mengindikasikan berkurangnya akumulasi panas, yang dapat dikaitkan dengan proses perpindahan panas dari gas buang ke permukaan katalis serta aliran gas yang lebih terdistribusi. Perbedaan kecil antar jenis katalis menunjukkan bahwa karakteristik material katalis memengaruhi pola suhu, di mana serbuk katul memberikan efek pendinginan yang paling terlihat berdasarkan data citra termal.

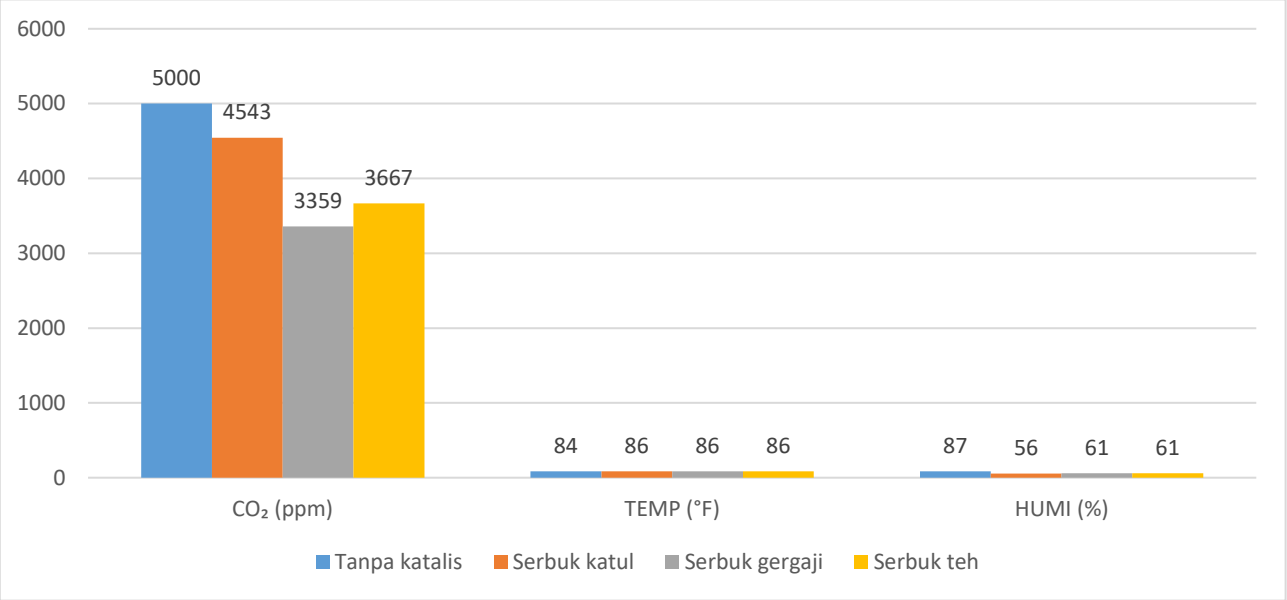
Hasil visualisasi menunjukkan bahwa gas buang sebelum melewati katalis alam menghasilkan asap putih yang tebal. Setelah dilewatkan melalui katalis alam, asap menjadi lebih tipis meskipun masih berwarna putih. Perubahan ini mengindikasikan terjadinya reduksi partikulat oleh katalis alam.

Citra termal menunjukkan bahwa kondisi tanpa katalis memiliki suhu titik tengah 35,6 °C (maksimum 39,5 °C) dengan area merah muda yang lebih dominan. Penggunaan katalis serbuk katul menghasilkan suhu terendah (33,2 °C) dan citra lebih didominasi warna ungu–biru. Katalis serbuk gergaji dan serbuk teh bekas masing-masing menghasilkan suhu 34,1 °C dan 36,0 °C dengan distribusi warna yang lebih seimbang. Secara umum, katalis alam cenderung menurunkan suhu dan membuat distribusi panas lebih merata.

 https://doi.org/10.56211/blendsains.v5i2.2089

Pengurangan ketebalan asap pada foto real sejalan dengan penurunan suhu dan dominasi warna ungu–biru pada citra termal. Hal ini menunjukkan bahwa proses filtrasi partikulat berlangsung bersamaan dengan perpindahan panas dari gas buang ke permukaan katalis.

Korelasi CO^2 dengan Porositas Filter Katalis



Gambar 10. Grafik Hasil Pengukuran Air Detector

Berdasarkan (Gambar 10.) hasil pengukuran kadar CO_2 menunjukkan adanya penurunan yang berbeda-beda pada setiap jenis filter dibandingkan kondisi Tanpa Katalis (5000 ppm). Nilai CO_2 yang terukur adalah:

- Serbuk Katul: 4543 ppm (turun 457 ppm)
- Serbuk Teh: 3667 ppm (turun 1333 ppm)
- Serbuk Gergaji: 3359 ppm (turun 1641 ppm)

Penurunan kadar CO_2 ini berkorelasi dengan sifat porositas masing-masing katalis:

1. Serbuk Gergaji menghasilkan kadar CO_2 terendah (3359 ppm). Struktur serat kayu pada serbuk gergaji memiliki porositas yang sangat tinggi dengan banyak rongga dan saluran mikro. Luas permukaan aktif yang besar memungkinkan gas CO_2 lebih banyak teradsorpsi dan bereaksi pada permukaan filter, sehingga reduksi emisi menjadi paling optimal.
2. Serbuk Teh menempati urutan kedua (3667 ppm). Ampas atau serbuk teh memiliki struktur organik berpori yang cukup baik, meskipun porositasnya sedikit lebih rendah dibandingkan serbuk gergaji. Luas permukaan yang tersedia masih cukup efektif untuk menyerap CO_2, sehingga mampu menurunkan kadar gas secara signifikan.
3. Serbuk Katul menunjukkan penurunan paling kecil (4543 ppm). Partikel katul cenderung lebih padat dan memiliki porositas yang lebih rendah. Akibatnya, luas permukaan kontak dengan gas buang menjadi terbatas, sehingga kemampuan adsorpsi dan reduksi CO_2 tidak sebaik dua filter lainnya.

Selain itu, data kelembaban juga mendukung korelasi ini. Filter Serbuk Katul, Gergaji, dan Teh mampu menurunkan kelembaban dari 87% menjadi 56–61%. Penurunan kelembaban mengindikasikan adanya kapasitas adsorpsi yang baik, di mana material berpori tidak hanya menyerap uap air tetapi juga gas CO_2.

Perbedaan kinerja antar katalis dipengaruhi oleh karakteristik material, seperti porositas dan luas permukaan aktif. Serbuk katul memberikan efek paling terlihat. Temuan ini menunjukkan bahwa katalis alam berpotensi sebagai media filtrasi gas buang pirolisis, meskipun efektivitasnya masih bergantung pada jenis material dan kondisi operasi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan katalis alam secara efektif mereduksi opasitas asap gas buang, di mana asap putih yang tebal sebelum melewati katalis berubah menjadi lebih tipis setelah filtrasi, menunjukkan kemampuan katalis dalam menangkap partikulat. Selain itu, katalis alam juga mampu menurunkan suhu gas buang dan membuat distribusi panas lebih merata dibandingkan kondisi tanpa katalis. Berdasarkan citra termal, kondisi tanpa katalis menunjukkan suhu titik tengah 35,6 °C dengan distribusi panas yang kurang merata, sedangkan serbuk katul menghasilkan suhu terendah (titik tengah 33,2 °C) dan distribusi paling homogen, diikuti serbuk gergaji (34,1 °C) dan serbuk teh bekas (36,0 °C). Dari aspek reduksi CO_2, penggunaan filter katalis juga menunjukkan penurunan kadar gas dibandingkan kondisi tanpa katalis (5000 ppm). Serbuk gergaji menghasilkan kadar CO_2 terendah (3359 ppm), diikuti serbuk teh (3667 ppm) dan serbuk katul (4543 ppm). Penurunan ini berkorelasi dengan porositas bahan filter, di mana struktur berpori yang lebih tinggi memberikan luas permukaan aktif lebih besar sehingga adsorpsi CO_2 berlangsung lebih optimal. Produk minyak pirolisis yang dihasilkan memiliki karakteristik yang relatif baik dan seragam, dengan nilai kalor sekitar 26,7–26,8 MJ/kg, densitas 0,65 g/ml, dan viskositas mendekati 1 cP yang didominasi fraksi ringan. Secara keseluruhan, katalis alam berpotensi digunakan sebagai media filtrasi gas buang yang murah dan ramah lingkungan pada proses pirolisis plastik LDPE. Temuan ini memberikan data dasar yang berguna untuk pengembangan dan optimasi teknologi pirolisis di masa mendatang. Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengukur komposisi HCHO dan CO_2 secara lebih rinci pada uji emisi gas buang, serta menguji variasi ketebalan filter dan waktu kontak gas dengan katalis guna meningkatkan efisiensi reduksi emisi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kementerian Lingkungan Hidup / Badan Pengendalian Lingkungan Hidup, "Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) - Kementerian Lingkungan Hidup," Https://Sampahnasional.Kemenlh.Go.Id/Portal-Indikatif/.

[2] A. Jamil, W. R. D., Et Al., "Pelatihan Pembuatan Bata Plastik Sebagai Bagian Dari Pengurangan Limbah Plastik Dan Peningkatan Ekonomi Pada Mahasiswa Universitas Muhammadiyah Sorong," *Jurnal Pengabdian Nusantara*, 2025.

[3] W. Pratama, "Studi Eksperimental Burner Untuk Bahan Bakar Pirolisis Polypropylene: Analisis Emisi Gas Buang," *Jurnal Teknik Terapan*, 2025.

[4] S. E. Sharma, "Comprehensive Review Of The Pyrolysis Process: From Carbon Nanomaterial Synthesis To Waste Treatment.," *Oxford Open Materials Science.*, 2021.

[5] S. Azmi, M. I. , Et Al., "Pemanfaatan Limbah Plastik Sebagai Bahan Bakar Minyak Melalui Teknologi Pirolisis Di Desa Danger," *Jurnal Wicara Desa*, 2025.

[6] B. Megaprastio, S. M. , Et Al., "Teknologi Pirolisis Untuk Konversi Sampah Plastik Menjadi Bahan Bakar Minyak: Kajian Literatur," *Jurnal Rekayasa Mesin*, 2023.

[7] S. Sharuddin, D. A. , Et Al., "Advanced Pyrolysis Methods For Mixed Plastic Waste Management: Enhanced Char And Gas Yields," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2026.

[8] N. Y. Salsabila, "Analisis Kelebihan Kekurangan Pengolahan Limbah Plastik Menjadi Bahan Bakar Melalui Proses Pirolisis," *Jurnal Mekanova*, 2023.

[9] M. N. Aridito, "Kajian Sustainabilitas Pemanfaatan Teknologi Pirolisis Pada Pemungutan Minyak Dan Aluminium Dari Limbah Plastik Polyethylene Berlapis Aluminium Foil (Al-PE)," Tesis, Universitas Gadjah Mada, 2016.

[10] S. Yousef, E. J. , Et Al., "A New Sustainable Strategy For Oil, CH_4 And Aluminum Recovery From Metallised Food Packaging Plastics Waste Using Catalytic Pyrolysis Over ZSM-5 Catalyst," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 2022.

[11] K. Sivagami, D. Et Al., "Catalytic Pyrolysis Of Polyolefin And Multilayer Packaging Based Waste Plastics: A Pilot Scale Study.," *Process Safety And Environmental Protection*, 2021.

[12] P. Pratiwi, "Proses Pirolisis Dan Karakteristik Produk Pirolisis Sampah Plastik Polyethylene (PE) Dan Polypropylene (PP) Berlapis Alumunium Dengan Katalis Zeolit Alam Gunungkidul," *Repository UGM.*, 2017.

[13] S. A. Novita, "Artikel Review: Parameter Operasional Pirolisis Biomassa," *Agroteknika*, 2021.

[14] A. Hidayat Et Al., "Exergy Analysis Of Empty Fruit Bunch Pyrolysis For Production Of Bio-oil And Syngas," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 2019.

[15] S. Naimah & A. N. N., "Karakteristik Gas Hasil Proses Pirolisis Limbah Plastik Polietilena (PE) Dengan Menggunakan Katalis Residue Catalytic Cracking (RCC)," *Jurnal Kimia Dan Kemasan*, 2017.

[16] L. O. M. Firman, & P. A. P. S., "Pemanfaatan Gas Buang (Syngas) Pada Proses Pirolisis Plastik Berkapasitas 10 Kg," *Teknobiz: Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin*, 2024.
[17] B. Debnath, D. Haldar, and M. K. Purkait, "Environmental remediation by tea waste and its derivative products: A review on present status and technological advancements," *Chemosphere*, 2022.
[18] H. Moayedi, B. Aghel, M. M. Abdullahi, H. Nguyen, And A. S. A. Rashid, "Applications Of Rice Husk Ash As Green And Sustainable Biomass," Journal Of Cleaner Production., Vol. 2019.
[19] W. A. Wibowo, C. R. B. , Et Al., "Thermogravimetric Analysis And Kinetic Study On Catalytic Pyrolysis Of Rice Husk Pellet Using Its Ash As A Low-Cost In-Situ Catalyst ," *Int. Journal Of Renewable Energy Development (IJRED)* , 2022.
[20] M. Kim, L. S. , Et Al., "Dual Valorisation Of Oil-Bearing Agricultural Waste (Rice Bran) Into Biodiesel And Syngas Via Integrated Transesterification And Pyrolysis," *Energy Elsevier*, 2025.
[21] Nishibayashi Et Al., "Potential Use Of Biochar As A Catalyst And An Adsorbent In Plastic Pyrolysis Process," *Waste Biomass Valorization*, 2025.
[22] A.B. Abdallah, T. A. B. H. , Et Al., "Enhancing The Production Of Syngas From Spent Green Tea Waste Through Dual-Stage Pyrolysis And Catalytic Cracking," *MDPI*, 2023.
[23] Z. Huang, N. Q. , Et Al., "Effects Of Heavy Metals And Antibiotics On Performances And Mechanisms Of Anaerobic Digestion," *Bioresour. Technol.*, 2022.
[24] S. Permana, "Pengaruh Variasi Temperatur Terhadap Komposisi Char Pada Pirolisis Serbuk gergaji Mahoni Dengan Katalis Zeolit 25%," *Skripsi Universitas Brawijaya*, 2017.
[25] R. D. Kurniawan, "Efek Sebagai Katalis Untuk Improvement Proses Pirolisis Kayu Mahoni," *Universitas Brawijaya.*, 2024.
[26] Qualitest Team., "Qualitest Advanced Testing Technologies.," Https://Www.Worldoftest.Com/Id/Articles/What-Calorific-Value-Gross-Vs-Net-Explained/.
[27] P. Y. Lumbantoruan, "Pengaruh Suhu Terhadap Viskositas Minyak Pelumas (Oli)," *Sainmatika*, 2016.
[28] K. Azwad, "Analisis Viskositasoli Pesawat King Air Di Hanggar Politeknik Penerbangan Makassar," *Journal Of Aircraft Maintenance Engineering & Aviation Technologies (JAMETS)*, 2023.