

Contents list available at [Sinta](https://sinta)**ARMATUR**

: Artikel Teknik Mesin & Manufaktur

Journal homepage: <https://scholar.ummetro.ac.id/index.php/armatur>**Pengaruh Aktivasi Termal Abu Dasar Batubara terhadap Kinerja Adsorpsi dalam Peningkatan Sifat Fisik Pelumas Bekas**

Randy Yusuf Kurniawan^{1*}, Darrel Parulian Cleverson Aritonang², Dino Nata Hidayat³, Glory Florensa Br Siregar⁴, Asri Damertine Girsang⁵, Raihan Ramadhan⁶, Devano Ramadhan⁷, Rezky Tri Yunanda⁸, Rikki Martin Nababan⁹, Ummi Kulsum Hidayati¹⁰
^{1,2,3,4,5,6,7,8,9}Prodi Rekayasa Minyak dan Gas, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan
¹⁰Prodi Pendidikan Geografi, Universitas Negeri Surabaya, Jawa Timur

ARTICLE INFO**Keywords:**

Lubricating Oil Waste
Properties of Lubricating Oil
Adsorption
Bottom Ash
Thermal Activation

ABSTRACT

Used lubricating oil contains degradation products and contaminants that may cause environmental pollution if improperly disposed of. This study investigated the utilization of coal bottom ash as an adsorbent for used lubricating oil purification and evaluated the effect of thermal activation on its adsorption performance. Bottom ash was purified using 2 M H₂SO₄ and subsequently thermally activated at 650°C for 3 h with NaOH assistance. The chemical composition of the adsorbent was analyzed using X-ray Fluorescence (XRF), while adsorption performance was evaluated through density, kinematic viscosity, and flash point measurements of the treated oil. XRF results showed that the purification process reduced Ca content from 22.36 wt.% to 10.44 wt.% and Fe content from 29.19 wt.% to 20.61 wt.% while preserving the major silica and alumina components. The thermally activated bottom ash exhibited improved adsorption performance compared with the non-activated adsorbent, producing density and viscosity values that were closer to those of fresh lubricating oil. This result indicates a more effective removal of degradation products and contaminants from the used lubricating oil. These findings demonstrate that thermal activation improves the adsorption capability of bottom ash, indicating its

*Corresponding author: randy.kurniawan@rmg.itera.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.24127/armatur.v7i2.11727>

Received 30 May 2026; Received in revised form 5 June 2026; Accepted 14 June 2026

Available online 1 September 2026

Pendahuluan

Pelumas merupakan salah satu komponen penting dalam sistem permesinan yang berfungsi untuk mengurangi gesekan antarpermukaan, meminimalkan keausan, membantu proses pendinginan, serta melindungi komponen dari korosi. Selama penggunaan, pelumas mengalami degradasi akibat oksidasi, kontaminasi logam, residu pembakaran, serta paparan temperatur tinggi sehingga kualitasnya menurun dan berubah menjadi limbah pelumas bekas. Limbah pelumas bekas mengandung berbagai senyawa hidrokarbon teroksidasi, logam berat, dan senyawa organik berbahaya yang berpotensi mencemari tanah maupun perairan apabila dibuang tanpa pengolahan yang tepat [1,2]. Seiring meningkatnya jumlah kendaraan bermotor dan aktivitas industri, volume limbah pelumas bekas terus bertambah setiap tahunnya sehingga diperlukan teknologi pengolahan yang mampu mengurangi dampak lingkungan sekaligus memanfaatkan kembali sumber daya yang masih bernilai [3].

Berbagai metode telah dikembangkan untuk meregenerasi pelumas bekas, di antaranya acid-clay treatment, solvent extraction, hydrotreating, dan adsorpsi. Dibandingkan metode lainnya, adsorpsi memiliki beberapa keunggulan seperti proses yang relatif sederhana, kebutuhan energi yang lebih rendah, biaya operasional yang ekonomis, serta kemampuan yang baik dalam menghilangkan senyawa pengotor dari pelumas bekas [4]. Efektivitas proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh karakteristik adsorben yang digunakan, terutama luas permukaan spesifik, ukuran pori, serta keberadaan gugus aktif pada permukaannya. Oleh karena itu, pengembangan adsorben berbasis limbah industri menjadi alternatif yang menarik karena selain meningkatkan efisiensi pengolahan limbah pelumas, juga

mendukung konsep ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan [5].

Salah satu limbah industri yang berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben adalah abu dasar batubara (bottom ash), yaitu residu padat hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Abu dasar umumnya mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida, dan mineral aluminosilikat yang memiliki kemampuan adsorpsi cukup baik [6]. Namun demikian, keberadaan pengotor serta struktur pori yang belum berkembang secara optimal menyebabkan kemampuan adsorpsinya masih terbatas. Untuk meningkatkan performanya, berbagai metode aktivasi telah diterapkan, seperti aktivasi kimia menggunakan asam kuat dan aktivasi fisik melalui thermal treatment. Aktivasi kimia mampu menghilangkan pengotor yang menutupi permukaan adsorben, sedangkan thermal treatment dapat meningkatkan luas permukaan, membuka pori-pori material, dan membentuk struktur kristal aluminosilikat yang lebih aktif terhadap proses adsorpsi [7,8]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa perlakuan termal pada material berbasis aluminosilikat dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi secara signifikan melalui peningkatan jumlah situs aktif dan porositas material [9].

Meskipun berbagai penelitian mengenai pemanfaatan abu dasar sebagai adsorben telah banyak dilakukan, kajian mengenai penggunaan abu dasar teraktivasi untuk pemulihan sifat fisik pelumas bekas masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan abu dasar batubara yang telah diaktivasi secara kimia menggunakan H_2SO_4 2M dan secara fisik melalui *thermal treatment* sebagai adsorben dalam proses pemulihan kualitas pelumas bekas. Karakteristik adsorben dianalisis menggunakan instrumen *X-Ray*

Flourescence (XRF), sedangkan efektivitas adsorpsi dievaluasi berdasarkan perubahan sifat fisik pelumas yang meliputi densitas, viskositas kinematik, dan flash point. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif teknologi pengolahan limbah yang ramah lingkungan serta meningkatkan nilai guna dua jenis limbah sekaligus, yaitu limbah pelumas bekas dan limbah abu dasar batubara.

Metode Penelitian

1. Preparasi Limbah Abu Dasar Batubara

Tahap persiapan awal penelitian diawali dengan karakterisasi abu dasar (*bottom ash*) menggunakan metode *X-ray fluorescence* (XRF) untuk menentukan komposisi kimia material. Selanjutnya, abu dasar dilakukan proses pengayakan menggunakan ayakan berukuran 100 mesh untuk memperoleh partikel adsorben dengan ukuran ≤ 100 mesh. Ukuran partikel ini dipilih karena mampu meningkatkan luas permukaan spesifik adsorben sehingga memperbesar kapasitas adsorpsi terhadap kontaminan, sekaligus meminimalkan kehilangan minyak selama proses pemurnian. Setelah proses pengayakan, abu dasar dipisahkan secara fisik dari partikel besi (Fe) menggunakan *magnetic separator*. Tahap praperlakuan ini dilakukan karena spesies Fe relatif sulit direduksi selama proses aktivasi termal dan berpotensi menghambat perkembangan struktur pori adsorben selama perlakuan termal berlangsung.

2. Aktivasi Limbah Abu Dasar Batubara melalui *Alkali-Treatment*

Tahap aktivasi dilakukan melalui perlakuan termal (*thermal treatment*), yang merupakan variasi dalam penelitian ini. Perlakuan ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan adsorben dengan menghilangkan sisa kelembapan serta pengotor yang masih terperangkap di dalam jaringan pori material. Aktivasi termal dilakukan menggunakan furnace pada suhu 650°C selama 3 jam [8,9]. Selama proses tersebut, abu dasar dicampurkan dengan natrium hidroksida (NaOH) berbentuk

serbuk halus untuk mendukung proses aktivasi termal berbantuan alkali. Kehadiran NaOH berperan dalam mempercepat transformasi silika dan alumina amorf menjadi fase kristalin yang lebih reaktif dan memiliki stabilitas struktur yang lebih baik [10]. Transformasi ini diharapkan dapat meningkatkan jumlah situs aktif adsorpsi serta memperbaiki karakteristik pori adsorben. Setelah seluruh tahapan aktivasi selesai dilakukan, diperoleh dua kondisi adsorben yang digunakan untuk analisis perbandingan, yaitu abu dasar hasil pemurnian sebelum perlakuan termal yang dinotasikan dengan (AB-X) dan abu dasar hasil pemurnian setelah perlakuan termal berbantuan NaOH yang dinotasikan dengan (ABT-X) dimana X menunjukkan variasi massa sampel ketika dilakukan adsorpsi pada pelumas bekas.

3. Evaluasi Kinerja Adsorpsi Material Limbah Abu Dasar

Kinerja adsorben dievaluasi melalui percobaan adsorpsi sistem batch, yaitu dengan mencampurkan abu dasar teraktivasi ke dalam pelumas bekas menggunakan *magnetic stirrer* selama 1 jam [11]. Proses adsorpsi dilakukan menggunakan abu dasar hasil pemurnian tanpa perlakuan termal (AB-X) dan abu dasar hasil perlakuan termal (ABT-X) dengan variasi massa adsorben sebesar 2%, 4%, 6%, 8%, dan 10% terhadap massa pelumas bekas yang diolah. Setelah proses adsorpsi selesai, fase minyak dipisahkan dari adsorben dan selanjutnya dilakukan pengujian sifat fisik terhadap pelumas hasil perlakuan. Pengukuran densitas dilakukan menggunakan piknometer, viskositas kinematik ditentukan menggunakan viskometer Redwood, sedangkan titik nyala (*flash point*) dianalisis menggunakan alat uji *flash point*. Hasil pengujian sifat fisik tersebut digunakan untuk mengevaluasi efektivitas adsorben dalam memperbaiki kualitas pelumas bekas setelah proses adsorpsi. Sebagai standar baku, maka digunakan Pelumas baru dengan merek yang sama (Merek X) dengan Pelumas bekas kemudian akan

dibandingkan dengan sifat fisik Pelumas baru tersebut.

Pembahasan

1. Analisis Komposisi Kimia dari Abu Dasar Batubara

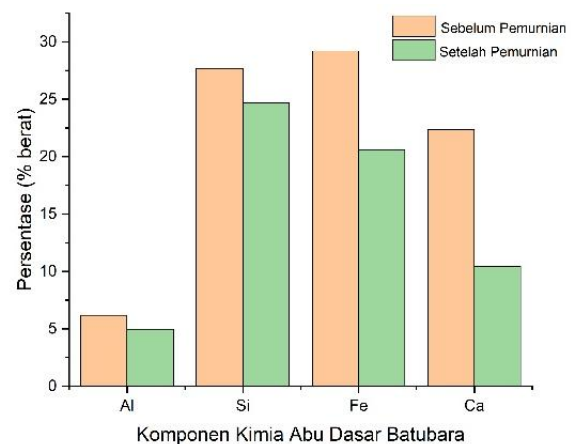
Tahap persiapan awal diawali dengan proses pemisahan magnetik (*magnetic separation*) untuk mengurangi kandungan partikel yang mengandung besi dalam abu dasar. Untuk memaksimalkan kinerja adsorpsi material, selanjutnya dilakukan proses aktivasi kimia menggunakan asam kuat guna menghilangkan sisa spesies besi dan senyawa kalsium yang merupakan pengotor utama dalam abu dasar. Penghilangan pengotor tersebut diharapkan dapat meningkatkan aksesibilitas pori serta memperbanyak jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi [8]. Untuk mengevaluasi efektivitas proses pemurnian, komposisi kimia sampel abu dasar sebelum dan sesudah perlakuan dianalisis menggunakan spektroskopi *X-ray Fluorescence* (XRF). Hasil perbandingan komposisi kimia kedua sampel disajikan pada Tabel 1.

Hasil analisis XRF yang disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa proses pemurnian berhasil menurunkan konsentrasi unsur-unsur pengotor yang terkandung dalam abu dasar. Penurunan paling signifikan terjadi pada unsur kalsium (Ca), yaitu dari 22,36% berat menjadi 10,44% berat, yang setara dengan penurunan sekitar 53,3%. Kandungan besi (Fe) juga mengalami penurunan yang cukup besar, dari 29,19% berat menjadi 20,61% berat atau berkurang sekitar 29,4%. Berkurangnya kandungan kedua unsur tersebut menunjukkan bahwa perlakuan asam yang dilakukan mampu melarutkan fase-fase mineral yang mudah bereaksi dengan asam, terutama senyawa yang mengandung kalsium dan besi.

Tabel 1. Komposisi Kimia dari Abu Dasar Batubara baik sebelum dan setelah Pemurnian

Komposisi Sebelum Pemurnian	Persentase (% wt)	Komposisi setelah Pemurnian	Persentase (% wt)
Al	6.18	Al	4.96
Si	27.68	Si	24.69
Fe	29.19	Fe	20.61
Ca	22.36	Ca	10.44

Penurunan kandungan Ca dan Fe memberikan dampak positif terhadap karakteristik adsorben yang dihasilkan. Kandungan kalsium dan besi yang tinggi dapat menutupi permukaan material serta menghambat perkembangan struktur pori, sehingga mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk proses adsorpsi. Oleh karena itu, berkurangnya kedua unsur tersebut diperkirakan mampu meningkatkan aksesibilitas pori dan memperbesar luas permukaan efektif adsorben. Kondisi ini memungkinkan interaksi yang lebih optimal antara adsorben dan kontaminan dalam pelumas bekas, sehingga berpotensi meningkatkan kinerja adsorpsi abu dasar pada proses pemurnian pelumas.



Gambar 1. Perbandingan Komposisi Kimia Abu dasar Batubara sebelum dan setelah Pemurnian

Pada Gambar 1, dapat teramati bahwa kandungan silikon (Si) dan aluminium (Al) hanya mengalami penurunan yang relatif kecil setelah proses pemurnian, masing-masing dari 27,68% berat menjadi 24,69% berat dan dari 6,18% berat menjadi 4,96% berat. Penurunan yang tidak terlalu signifikan tersebut menunjukkan bahwa

perlakuan asam yang diterapkan cenderung lebih selektif dalam melarutkan mineral pengotor dibandingkan dengan kerangka aluminosilikat utama penyusun abu dasar. Kondisi ini menguntungkan karena Si dan Al merupakan komponen utama yang berperan dalam pembentukan struktur aluminosilikat yang memiliki situs aktif bermuatan negatif untuk mengadsorpsi berbagai kontaminan. Terjadanya kandungan Si dan Al setelah proses pemurnian mengindikasikan bahwa integritas struktur adsorben tetap dipertahankan meskipun telah mengalami perlakuan kimia. Struktur aluminosilikat yang tetap stabil memungkinkan material mempertahankan sifat adsorptifnya sekaligus menyediakan lebih banyak situs aktif yang dapat berinteraksi dengan molekul pengotor. Selain itu, berkurangnya kandungan Ca dan Fe dapat meningkatkan kontribusi relatif fase silika dan alumina pada permukaan adsorben. Akibatnya, interaksi antara permukaan adsorben dan kontaminan yang terdapat dalam pelumas bekas menjadi lebih efektif, sehingga berpotensi meningkatkan kapasitas adsorpsi serta efisiensi proses pemurnian pelumas bekas.

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian terdahulu mengenai aktivasi asam pada material abu batubara. Proses aktivasi asam diketahui mampu melarutkan mineral alkali dan alkali tanah, khususnya senyawa kalsium, magnesium, dan besi, tanpa menyebabkan kerusakan yang signifikan terhadap kerangka silika dan alumina penyusun material. Akibatnya, struktur adsorben menjadi lebih bersih dan memiliki karakteristik adsorpsi yang lebih baik karena meningkatnya aksesibilitas pori dan jumlah situs aktif pada permukaan material [12], [13]. Selain itu, perlakuan asam juga dilaporkan dapat meningkatkan rasio Si/Al relatif dengan menghilangkan fase-fase mineral pengotor yang mudah larut dalam asam. Penelitian lainnya [14] menunjukkan bahwa penghilangan fase yang mengandung kalsium selama proses aktivasi

berkontribusi terhadap perkembangan pori dan peningkatan luas permukaan spesifik adsorben, sehingga mempermudah difusi molekul adsorbat ke dalam struktur material.

2. Analisis Kinerja Adsorpsi Material Limbah Abu Dasar Batubara pada Pelumas Bekas

Kinerja abu dasar sebagai adsorben dalam pemurnian pelumas bekas dievaluasi berdasarkan perubahan sifat fisik pelumas setelah proses adsorpsi. Parameter yang digunakan meliputi densitas, viskositas kinematik, dan titik nyala (*flash point*), karena ketiga parameter tersebut merupakan indikator penting yang mencerminkan tingkat degradasi dan kualitas pelumas. Perubahan nilai sifat fisik setelah perlakuan adsorpsi menunjukkan kemampuan adsorben dalam menghilangkan berbagai kontaminan, seperti partikel logam, senyawa hasil oksidasi, residu karbon, serta komponen volatil yang terbentuk selama penggunaan pelumas. Oleh karena itu, analisis terhadap parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk menilai efektivitas abu dasar yang telah dimurnikan dan diaktivasi dalam memperbaiki karakteristik pelumas bekas serta menentukan pengaruh perlakuan termal terhadap peningkatan kinerja adsorben. Hasil tersebut dapat ditunjukkan pada Tabel 2.

Hasil pengujian pada Tabel 2 menunjukkan bahwa mulanya pelumas baru dengan merk yang sama memiliki nilai densitas 0,85885 g/mL, viskositas 32,2252 cSt, dan flash point 204°C. Sementara itu, ketika telah digunakan, pelumas bekas menunjukkan densitas 0,8604 g/mL, viskositas 25,62641 cSt, dan flash point 153°C. Kemudian densitas pelumas meningkat menjadi 0,88917–0,89680 g/cm³ setelah perlakuan adsorpsi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses adsorpsi menggunakan kedua jenis adsorben mampu meningkatkan densitas pelumas bekas dibandingkan kondisi awal. Namun demikian, adsorben yang mengalami aktivasi termal (ABT) menghasilkan nilai

densitas yang lebih mendekati densitas pelumas baru dibandingkan adsorben tanpa aktivasi termal (AB). Sebagai contoh, pada penggunaan adsorben 10%, densitas ABT sebesar 0,88305 g/mL lebih dekat terhadap densitas pelumas baru (0,85885 g/mL) dibandingkan AB sebesar 0,89680 g/mL.

Temuan ini mengindikasikan bahwa aktivasi termal tidak menyebabkan peningkatan densitas yang berlebihan, melainkan menghasilkan karakteristik pelumas yang lebih mendekati kondisi awalnya. Peningkatan densitas ini mengindikasikan berkurangnya fraksi hidrokarbon ringan dan senyawa volatil yang terbentuk akibat degradasi pelumas

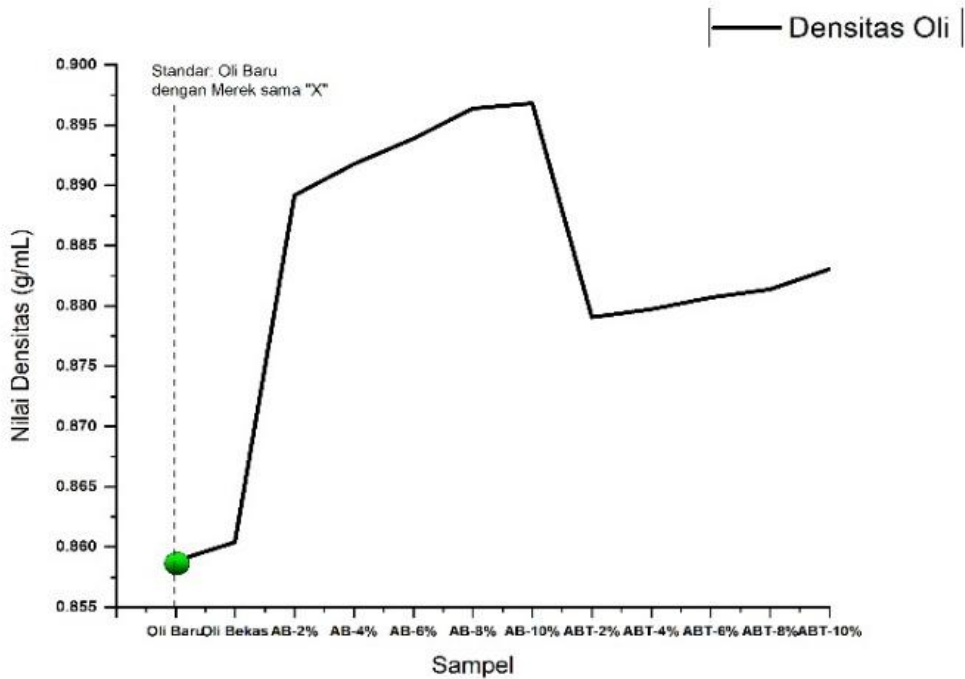
during use. Besides that, the presence of active sites that are more abundant on adsorbents as a result of thermal treatment may make adsorption more effective against contaminants, oxidation products, and suspended particles, so that the composition of the lubricant becomes more stable. The larger the mass of adsorbent used, the more sites are available for adsorption, so that the effectiveness of the purification process increases.

Tabel 2. Perbandingan Sifat Fisik Pelumas Bekas pada masing-masing sampel.

Sampel	Densitas	Viskositas	Flash Point	Deviasi Densitas	Deviasi Viskositas	Deviasi Flash Point
	(g/mL)	(cSt)	(°C)	(%)	(%)	(%)
Oli Baru	0,85885	32,2252	204	-	-	-
Oli Bekas	0,8604	25,6264	153	0,18	20,48	25,00
AB-2%	0,88917	30,1301	182	3,53	6,50	10,78
AB-4%	0,89177	34,4309	183	3,83	6,84	10,29
AB-6%	0,89389	38,2328	183	4,08	18,64	10,29
AB-8%	0,89637	43,7591	182	4,37	35,79	10,78
AB-10%	0,8968	48,6144	180	4,42	50,86	11,76
ABT-2%	0,87907	31,7245	181	2,35	1,55	11,27
ABT-4%	0,87972	31,9122	180	2,43	0,97	11,76
ABT-6%	0,88068	31,3508	182	2,54	2,71	10,78
ABT-8%	0,88139	34,6170	179	2,62	7,42	12,25
ABT-10%	0,88305	38,5097	181	2,82	19,50	11,27
	Rata-rata			3,30	15,08	11,13

Apabila dibandingkan dengan standar pelumas pelumas dasar (*base oil*), Gambar 2 menunjukkan bahwa nilai densitas hasil adsorpsi berada pada rentang yang masih umum ditemukan pada minyak pelumas mineral, yaitu sekitar 0,85–0,90 g/mL pada suhu kamar [15]. Nilai densitas menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak menyebabkan perubahan komposisi yang berlebihan dan masih mempertahankan karakteristik dasar pelumas. Hasil ini juga

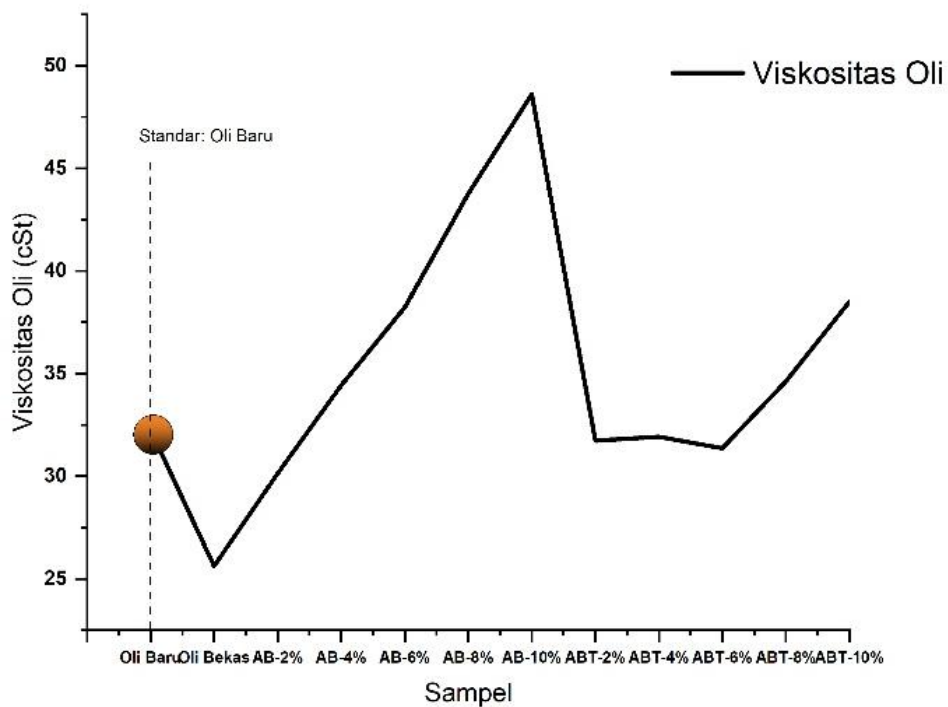
is in line with previous research that reported that the regeneration of used lubricant through adsorption can improve the quality of the lubricant by reducing the amount of contaminants without changing the physical characteristics, especially in a significant way [16]. With this, the increase in density that is obtained can be related to the decrease in contaminants and the increase in the homogeneity of the composition of the lubricant after the adsorption process.



Gambar 2. Grafik Hasil Densitas Pelumas setelah dilakukan Proses Adsorpsi

Nilai viskositas kinematik (Gambar 3) menunjukkan perubahan yang cukup signifikan setelah proses adsorpsi. Pelumas baru memiliki viskositas sebesar 32,23 cSt,

kemudian menurun menjadi 25,63 cSt saat menjadi pelumas bekas, namun meningkat secara bertahap hingga mencapai 48,61 cSt pada penggunaan adsorben hasil *thermal treatment* dengan massa 10%.



Gambar 3. Grafik Hasil Viskositas Pelumas setelah dilakukan Proses Adsorpsi

Sifat reologi pelumas setelah proses adsorpsi menunjukkan kecenderungan yang lebih baik karena nilainya mendekati karakteristik pelumas baru, terutama pada nilai viskositas sampel variasi ABT-2%, ABT4%, dan ABT 6%. Aktivasi termal pada abu dasar terbukti meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui pengembangan struktur pori dan luas permukaan. Meskipun peningkatan viskositas tertinggi terjadi pada sampel AB-10% (48,61144 cSt), peningkatan ini mengindikasikan perubahan sifat fisik yang berlebihan akibat hilangnya fraksi ringan, senyawa hasil oksidasi tertentu, serta kontaminan. Oleh karena itu, kualitas pelumas dinilai berdasarkan persentase deviasi terendah terhadap pelumas baru, sampel dengan konsentrasi lebih rendah hingga moderat terbukti lebih efektif dalam menjaga kestabilan kekentalan pelumas sesuai standar.

Menurut standar klasifikasi viskositas yang dikeluarkan oleh organisasi otomotif internasional, viskositas merupakan parameter utama yang menentukan kemampuan pelumas dalam membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam [17]. Nilai viskositas yang terlalu rendah dapat menyebabkan kegagalan pelumasan, sedangkan viskositas yang terlalu tinggi dapat meningkatkan hambatan aliran dan konsumsi energi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efektivitas adsorpsi tidak dapat dievaluasi berdasarkan peningkatan nilai parameter fisik semata, melainkan harus ditinjau dari tingkat kedekatan (deviasi minimum) sifat fisik pelumas hasil regenerasi terhadap karakteristik pelumas baru. Guna menentukan kombinasi perlakuan yang paling optimal antara perlakuan adsorben (AB dan ABT) serta variasi konsentrasi massa (2%, 4%, 6%, 8%, dan 10%), dilakukan analisis berbasis persentase deviasi terhadap sifat fisik pelumas baru sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan Deviasi terhadap Sifat Fisik Pelumas Baru

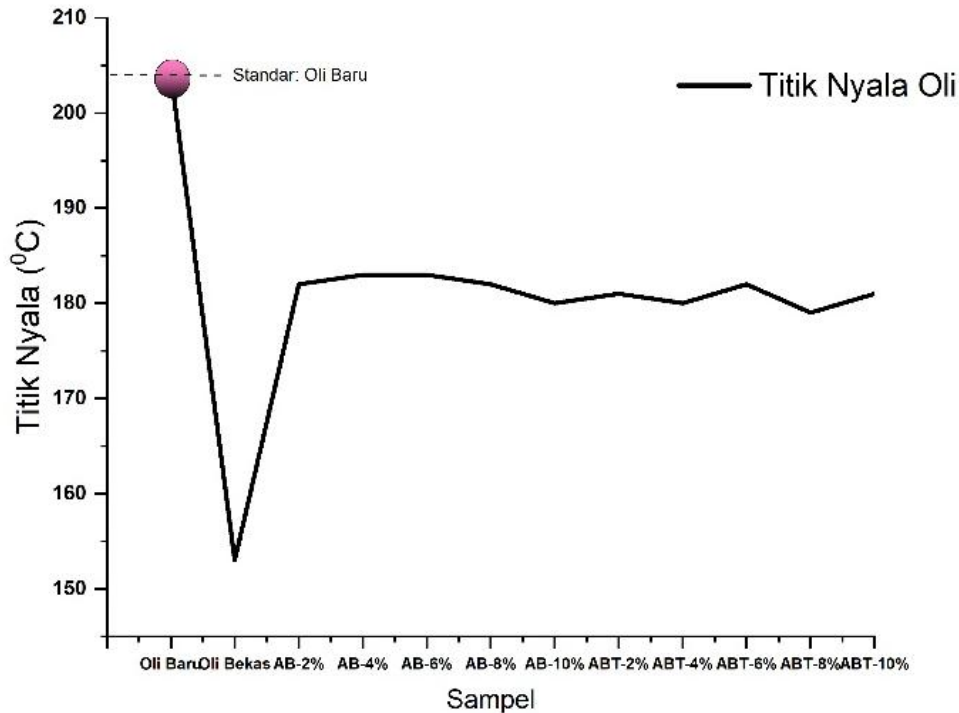
Sampel	Deviasi Densitas	Deviasi Viskositas	Deviasi Flash Point
Oli Baru	-	-	-
Oli Bekas	Rendah	Tinggi	Tinggi
AB-2%	Tinggi	Rendah	Rendah
AB-4%	Tinggi	Rendah	Rendah
AB-6%	Tinggi	Tinggi	Rendah
AB-8%	Tinggi	Tinggi	Rendah
AB-10%	Tinggi	Tinggi	Tinggi
ABT-2%	Rendah	Rendah	Tinggi
ABT-4%	Rendah	Rendah	Tinggi
ABT-6%	Rendah	Rendah	Rendah
ABT-8%	Rendah	Rendah	Tinggi
ABT-10%	Rendah	Tinggi	Tinggi

Berdasarkan Tabel 3, proses adsorpsi menggunakan abu dasar teraktivasi termal (ABT) secara konsisten menghasilkan nilai parameter fisik yang lebih mendekati pelumas baru dibandingkan dengan abu dasar tanpa aktivasi (AB). Pada parameter viskositas dengan konsentrasi abu dasar 4%, sampel ABT menghasilkan nilai viskositas 31,9122 cSt paling dekat ke viskositas pelumas baru (32,2252 cSt) dibandingkan sampel AB. Secara keseluruhan sampel ABT dengan konsentrasi 6% memiliki nilai deviasi rendah dari pelumas baru secara keseluruhan dari tiga parameter sifat fisik (densitas, viskositas, dan *flash point*). Aktivasi termal pada abu dasar terbukti memodifikasi struktur pori menjadi lebih berkembang dan memperluas area permukaan spesifik. Hal ini meningkatkan selektivitas kapasitas adsorpsi dalam mengikat produk degradasi, komponen oksidasi, dan kontaminan tanpa mengubah kestabilan reologi minyak secara ekstrem. Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang melaporkan bahwa proses adsorpsi menggunakan adsorben berbasis mineral mampu memperbaiki karakteristik viskositas pelumas bekas melalui eliminasi produk degradasi yang terakumulasi selama masa pakai [1].

Sementara itu, pengujian titik nyala pelumas (*flash point*) (Gambar 4) menunjukkan bahwa pelumas bekas awal

sebesar 204°C mengalami penurunan setelah pemakaian menjadi 153°C. Setelah adsorpsi, mengalami peningkatan pada rentang 179-183°C. Peningkatan dari nilai pelumas bekas dan stabilitas nilai pada kisaran 180-183°C mengindikasikan bahwa

adsorben mampu mengangkat sebagian fraksi ringan atau kontaminan pengencer tanpa menyebabkan hilangnya fraksi utama secara signifikan selama proses pemanasan atau kontak dengan adsorben.



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Titik Nyala (*Flash Point*) Pelumas setelah dilakukan Proses Adsorpsi

Menurut standar pengujian ASTM D92, nilai *flash point* digunakan sebagai indikator keamanan pelumas terhadap risiko penguapan dan penyalaan selama penyimpanan maupun penggunaan [18]. Pelumas dengan nilai *flash point* yang lebih tinggi umumnya memiliki kandungan fraksi ringan yang lebih rendah dan stabilitas termal yang lebih baik. Nilai *flash point* hasil penelitian ini masih berada pada rentang yang umum dijumpai pada pelumas mineral bekas yang telah mengalami proses pemurnian [19]. Hasil tersebut juga sejalan dengan penelitian regenerasi pelumas bekas yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi cenderung mempertahankan nilai *flash point* dalam kisaran aman meskipun terjadi perubahan pada parameter fisik lainnya [16]. Oleh karena itu, penggunaan abu dasar sebagai adsorben dapat dianggap efektif dalam memperbaiki kualitas pelumas bekas

tanpa menurunkan karakteristik keselamatan termalnya secara signifikan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa abu dasar batubara (*bottom ash*) berpotensi dimanfaatkan sebagai adsorben untuk pemurnian pelumas bekas. Proses pemurnian menggunakan H_2SO_4 2 M berhasil menurunkan kandungan pengotor utama, yaitu Ca dan Fe, tanpa mengurangi secara signifikan kandungan Si dan Al yang berperan penting dalam pembentukan struktur aluminosilikat adsorben. Aktivasi termal pada suhu 650°C selama 3 jam dengan bantuan NaOH terbukti meningkatkan kinerja adsorpsi abu dasar lebih selektif dibandingkan adsorben tanpa perlakuan termal. Meskipun terjadi peningkatan signifikan pada sampel abu dasar tanpa perlakuan termal (AB), abu dasar dengan perlakuan termal (ABT)

memiliki deviasi paling rendah terhadap pelumas baru. Berdasarkan deviasi, ABT 6% merupakan kondisi paling mendekati karakteristik pelumas baru dengan deviasi rendah untuk ketiga parameter, nilai densitas dengan deviasi 2,54% (0,88139 g/ml), viskositas 2,71% (31,3508 cSt), dan *flash point* 10,78% (182°C). Oleh karena itu, abu dasar teraktivasi memiliki potensi sebagai adsorben alternatif dalam pemurnian pelumas bekas lebih baik dibandingkan abu dasar tanpa termal yang cenderung mengalami *over-adsorption* dan menghasilkan parameter densitas dan viskositas yang menjauh dari nilai pelumas baru.

Ucapan terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Fluida Reservoir, Rekayasa Minyak dan Gas, Institut Teknologi Sumatera atas dukungan fasilitas, peralatan, dan bantuan teknis yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Dukungan tersebut telah berperan penting dalam proses pengujian, pengumpulan data, serta penyelesaian penelitian sehingga dapat terlaksana dengan baik. Penulis juga mengapresiasi seluruh staf laboratorium yang telah membantu dan memberikan arahan selama kegiatan penelitian berlangsung

Referensi

- [1] Kamal, M.A., Khan, M.A., 2019. Used lubricating oil recycling using solvent extraction and adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 7(3), 103–112.
- [2] Hassan, A.M., El-Naggar, A., El-Sayed, M.A., 2021. Environmental impacts of waste lubricating oils and sustainable management approaches. *Environmental Technology & Innovation* 24, 101894.
- [3] United Nations Environment Programme (UNEP), 2024. *Global Waste Management Outlook 2024*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- [4] Hamawand, S.A., Yusaf, T., Rafat, S., 2013. Recycling of waste engine oils using a new washing agent. *Energies* 6(2), 1023–1049.
- [5] Menéndez, R., Arenillas, M., Álvarez, J.A., 2021. Coal combustion by-products as adsorbent materials: Characterization and environmental applications. *Fuel* 286, 119389.
- [6] Yao, J., Kong, L., Wang, X., 2020. Characterization and utilization of coal bottom ash as an adsorbent material. *Materials Today: Proceedings* 33, 2234–2240.
- [7] Luo, X., Wang, F., Zhang, Y., 2016. Synthesis and characterization of sodium aluminosilicate derived from coal ash. *Ceramics International* 42(15), 17236–17244.
- [8] Ding, Y., Wang, H., Liu, Z., 2020. Effect of thermal activation on physicochemical properties and adsorption performance of aluminosilicate materials. *Applied Surface Science* 528, 146978.
- [9] Wijaya, D., Haryanto, S., Kurniawan, M., 2023. Thermal activation effect on adsorption performance of coal combustion residues. *International Journal of Technology* 14(3), 521–530.
- [10] Luo, X., Wang, F., Zhang, Y., 2016. Synthesis and characterization of sodium aluminosilicate derived from coal ash. *Ceramics International*, 42(15), 17236–17244.
- [11] Laharto, P.B.F., Anggraini, A.P.K., Fauzany, U.S., Kurniawan, R.Y., Ningsih, P.S.E., 2019. Synthesis of mesoporous silica from bottom ash waste for CH₄ adsorption. *Materials Science Forum*, 964, 130–135.
- [12] Visa, M., 2016. Synthesis and characterization of new zepelumaste materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment. *Powder Technology*, 294, 338–347.

- [13] Musyoka, N.M., Petrik, L.F., Balfour, G., 2011. Utilization of South African coal fly ash for the synthesis of zepelumastes. *Applied Clay Science* 53(4), 639–645.
- [14] Hsu, T.C., Yu, C.C., Yeh, C.M., 2008. Adsorption of Cu (II) from water using raw and modified coal fly ashes. *Fuel* 87(7), 1355–1359.
- [15] Mortier, R.M., Fox, M.F., Orszulik, S.T., 2010. *Chemistry and Technology of Lubricants*. 3rd ed. Dordrecht: Springer.
- [16] Hamawand, S.A., Yusaf, T., Rafat, S., 2013. Recycling of waste engine oils using a new washing agent. *Energies* 6(2), 1023–1049.
- [17] SAE International, 2024. *SAE J300 Engine Oil Viscosity Classification*. Warrendale, PA: SAE International.
- [18] ASTM International, 2024. *ASTM D92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [19] Speight, J.G., 2015. *Handbook of Petroleum Product Analysis*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons.