

Modifikasi Knalpot dengan Bioadsorben Cangkang Telur Bebek sebagai Peningkat Serapan Emisi CO Kendaraan Bermotor Guna Mewujudkan *Net Zero Emission 2060*

Muhammad Radja Abdiel Halim Hibatullah^{1*}, Jesica Manda Prianto¹, Mohammad Syaikhuddin¹, Meyda Rahma Wulandari¹, Azzahra Thia Pramana¹

¹Universitas Diponegoro, Indonesia

ABSTRACT

Motor vehicle fumes are one of the main contributors to air pollution in big cities with a contribution of 60-70%. Motor vehicle production Indonesia in 2023 has significantly increased by 5,95% with 157 million units. These motorized vehicles produce harmful emissions dominated by carbon monoxide (CO) at 76.4%. Inhaled CO gas emissions can increase COHb levels which have potential to disrupt the cardiovascular, neurological, and fetus in the womb. The purpose of this research to modify the exhaust with bioadsorbent carbon capture as sustainable transportation technology. Bioadsorbent packaging made from duck eggshell waste is modeled like teabag so it's economical, biodegradable, and easily applied to private motor vehicles. Its massive application will create more decent and healthy city air quality. This study, duck eggshell powder was used which has been carbon activated using H_3PO_4 ratio of 1:4. The structural, morphological and optical properties of duck eggshell carbon activation were characterized using XRD, SEM, particle analysis, and FT-IR spectroscopy. The results showed 70.13% reduction in CO levels by bioadsorbent the modified exhaust. Activation of carbon with H_3PO_4 resulted in the development of pore structure so that more adsorbate can be absorbed. Bioadsorbent can also reduce CH_4 , C_2H_5OH , and H_2 levels to 60.06%, 45.84%, and 45.11%. The potential of bioadsorbent carbon capture is expected an innovative solution to prevent CO pollution from motor vehicle exhaust. Therefore, large scale production can supporting Net Zero Emission 2060 to solve environmental quality problems and have a positive impact on society.

ABSTRAK

Asap kendaraan bermotor merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran udara di kota besar dengan kontribusi 60-70%. Produksi kendaraan bermotor di Indonesia pada tahun 2023 mengalami kenaikan signifikan sebesar 5,95% dengan jumlah 157 juta unit. Kendaraan bermotor tersebut menghasilkan emisi berbahaya yang didominasi karbon monoksida (CO) sebesar 76,4%. Emisi gas CO yang terhirup dapat meningkatkan kadar COHb yang berpotensi mengganggu sistem kardiovaskuler, neurologis hingga janin pada kandungan. Tujuan penelitian ini adalah memodifikasi knalpot dengan *bioadsorbent carbon capture* sebagai teknologi transportasi berkelanjutan. Packaging bioadsorben berbahan limbah cangkang telur bebek dimodelkan seperti teh celup yang sederhana sehingga bernilai ekonomis, *biodegradable*, dan mudah diaplikasikan pada kendaraan bermotor pribadi. Penerapannya secara masif akan menciptakan kualitas udara kota yang lebih layak dan sehat. Dalam penelitian ini digunakan serbuk cangkang telur bebek yang telah dilakukan aktivasi karbon menggunakan H_3PO_4 dengan perbandingan 1:4. Sifat struktural, morfologi dan optik dari aktivasi karbon cangkang telur bebek dikarakterisasi menggunakan XRD, SEM, analisa partikel, dan spektroskopi FT-IR. Hasil penelitian menunjukkan penurunan kadar CO sebesar 70.13% oleh bioadsorben pada knalpot termodifikasi. Aktivasi karbon dengan H_3PO_4 mengakibatkan pengembangan struktur pori sehingga adsorbat yang terserap dapat lebih banyak. Selain CO, bioadsorben juga dapat menurunkan kadar CH_4 , C_2H_5OH , dan H_2 hingga 60.06%, 45.84%, dan 45.11%. Potensi *bioadsorbent carbon capture* diharapkan mampu menjadi solusi inovatif dalam upaya mencegah pencemaran CO dari knalpot kendaraan bermotor. Oleh karena itu produksi dalam skala besar dapat berkontribusi untuk mendukung *Net Zero Emission 2060* sehingga mampu menyelesaikan permasalahan kualitas lingkungan hidup serta memberikan dampak positif bagi masyarakat.

KONTAK

muhammadradjahadeen@gmail.com

KATA KUNCI

Teknologi Transportasi,
Bioadsorben, Karbon
Monoksida

PENDAHULUAN

Kebutuhan transportasi yang meningkat dalam dekade terakhir ini menjadi salah satu tantangan terbesar di Indonesia. Seiring dengan populasi yang terus tumbuh, Indonesia mengalami urbanisasi yang cepat dan peningkatan daya beli masyarakat yang berdampak langsung pada permintaan kendaraan pribadi. Pertambahan kendaraan bermotor secara nasional di tahun 2023 saja sebesar 5,95%. Sedangkan menurut data dari Badan Pusat Statistik (2024), jumlah kendaraan bermotor di Indonesia meningkat secara pesat, yaitu dari sekitar 105 juta unit/tahun 2015 menjadi lebih dari 157 juta unit/tahun 2023. Faktanya, 77% sepeda motor di Jakarta berusia >10 tahun yang secara langsung berkorelasi dengan tidak optimalnya pembakaran bahan bakar dan kinerja filter. Filter pada knalpot kendaraan bermotor merupakan komponen terpenting dalam penyerapan emisi (Mahalana *et al.*, 2022). Selain itu, terdapat komponen *muffler* sebagai peredam suara dan tekanan balik sebagai sistem penyerapan emisi yang juga bergantung pada usia kendaraan (Kang & Yang, 2022). Knalpot kendaraan bermotor membantu meredam suara ledakan di ruang bakar karena pembakaran campuran bahan bakar dan udara berjalan sangat cepat. Upaya untuk meredam suara atau gas yang dihasilkan dari pembakaran dilepaskan dari katup buang secara tidak langsung ke udara terbuka. Gas buang akan mengalir ke dalam *muffler* di dalam knalpot, lalu dikeluarkan melalui sistem pembuangan dan menghasilkan tekanan balik. Hal ini diperlukan oleh beberapa *engine* untuk menghindari pelepasan gas buang yang akan menyebabkan kerusakan internal (Putra *et al.*, 2015).

Pembakaran dan kinerja filter yang buruk memiliki banyak konsekuensi, salah satu dampak utama adalah emisi gas buang yang lebih banyak dan berbahaya. Permasalahan tersebut semakin diperparah bahwa kendaraan bermotor merupakan sumber polusi utama dengan kontribusi mencapai 60-70% di beberapa kota besar (Nurdjanah, 2014). Hampir 76,4% dari kandungan emisi tersebut dibentuk oleh polutan berbahaya karbon monoksida (CO) (Hodijah & Amin, 2014). Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (2023), konsentrasi CO di beberapa kota besar, seperti Jakarta sering kali melebihi ambang batas yang telah ditentukan, dengan rata-rata konsentrasi CO mencapai 1,5 kali lipat dari nilai ambang batas. Banyak kota besar lainnya seperti Surabaya juga mengalami pencemaran udara yang sangat tinggi oleh polutan seperti PM 2.5 yang dapat mengancam kesehatan. Menurut *World Health Organization* (WHO), polusi udara yang disebabkan oleh emisi kendaraan bermotor dapat menyebabkan gangguan pada sistem pernafasan dan kardiovaskuler. Selain itu, gas CO yang masuk ke dalam aliran darah dapat membentuk senyawa karboksihemoglobin (COHb) yang bisa menghambat transfer oksigen ke seluruh tubuh (Sihombing *et al.*, 2022).

Pemerintah Indonesia telah melakukan berbagai upaya untuk mengatasi masalah emisi CO dari kendaraan bermotor. Upaya ini mencakup penerapan regulasi yang ketat, pengembangan teknologi ramah lingkungan, peningkatan infrastruktur, serta program edukasi. Munculnya upaya-upaya tersebut sehingga terbentuknya komitmen global untuk mencapai *Net Zero Emission* pada tahun 2060, penting untuk mencari solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan secara ekonomi. Teknologi knalpot konvensional sering kali tidak memadai dalam mengatasi masalah emisi CO secara signifikan. Selain itu juga berbagai upaya lainnya telah dilakukan untuk mengurangi emisi kendaraan, termasuk pengembangan teknologi katalis dan sistem penyaringan udara. Namun, banyak dari teknologi ini masih menghadapi tantangan dalam hal biaya dan efektivitas jangka panjang (Nugroho *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan inovasi yang mampu meningkatkan efisiensi penyerapan emisi tanpa membebani biaya operasional secara berlebihan. Inovasi modifikasi sistem knalpot dengan menggunakan cangkang telur bebek sebagai bioadsorben menawarkan alternatif yang ekonomis dan berkelanjutan, dengan potensi untuk diterapkan secara luas pada kendaraan bermotor di seluruh dunia.

Cangkang telur bebek sebagai bahan limbah organik yang melimpah dan murah, menawarkan potensi sebagai bioadsorben efektif. Cangkang telur bebek yang mengandung kalsium karbonat tinggi memiliki kemampuan adsorpsi yang baik terhadap gas berbahaya hingga 30% seperti kadar CO (Yuliana *et al.*, 2021). Modifikasi knalpot dengan bioadsorben berbasis cangkang telur bebek tidak hanya menawarkan solusi untuk mengurangi emisi CO, tetapi juga memberikan alternatif pengolahan limbah organik yang sering kali terabaikan. Oleh karena itu, produksi dalam skala besar ditargetkan mampu memenuhi standar baku yang ditentukan. Inovasi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam upaya mencapai target *Net Zero Emission* 2060, sekaligus menawarkan solusi inovatif dalam pengelolaan limbah dan pengurangan polusi udara serta dapat berkontribusi pada *Sustainable Development Goals*, antara lain pilar 3, 7, 9, 11, 12, 13, dan 15.

METODOLOGI

Pembuatan Bioadsorben

Dalam penelitian ini, dibutuhkan cangkang telur bebek sebagai sumber karbon aktif. Cangkang telur bebek diperoleh dari limbah restoran yang telah dipisahkan. Pertama, cangkang telur bebek dicuci bersih kemudian dijemur sampai kering. Setelah kering cangkang telur bebek dihancurkan menggunakan mortar untuk memperoleh serbuk halus. Serbuk kemudian diayak menggunakan mesh 100 dan diaktivasi secara kimiawi dengan mencampurkan 4% asam fosfat (H_3PO_4) dan 1% karbon aktif (4:1), lalu dilakukan pengadukan selama 2 jam. Kemudian campuran didiamkan selama 24 jam. Selanjutnya bioadsorben dicuci menggunakan air distilasi untuk menghilangkan sisa bahan anorganik dan dimasukkan ke dalam oven pada suhu $110^{\circ}C$ selama 24 jam. Bioadsorben dilakukan perendaman dengan TiO_2 selama 2 jam kemudian diletakkan dalam oven pada suhu $500^{\circ}C$ selama 2 jam. Bioadsorben selanjutnya dikemas dalam kertas saring untuk dilakukan pengujian pada kendaraan bermotor sehingga diperoleh data pengukuran.

Karakterisasi Karbon Aktif

Dalam penelitian ini, dilengkapi kajian karakterisasi karbon aktif pada bioadsorben cangkang telur bebek berdasarkan studi literatur. Analisis serbuk karbon aktif diperlukan uji kadar abu, kadar air, berat jenis, dan massa jenis bioadsorben. Karakterisasi lebih lanjut diperlukan uji XRD (*X-ray Diffraction*), SEM (*Scanning Electron Microscope*), FT-IR (*Fourier-Transform Infrared Spectroscopy*), dan DLS (*Dynamic Light Scattering*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Abu Bioadsorben

Uji kadar abu dilakukan untuk mengetahui kandungan oksida logam dalam karbon aktif. Jika oksida logam masuk ke dalam pori-pori karbon aktif maka kapasitas adsorbsinya akan menurun (Batu *et al.*, 2022). Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa kandungan kadar abu cangkang telur bebek yang sangat tinggi yaitu senilai 44,76% (Wardani *et al.*, 2022). Tingginya kadar abu ini dikarenakan cangkang telur bebek yang terpisah belum 100%. Selain itu, penggunaan suhu yang tinggi juga menjadi penyebab tingginya kadar abu cangkang telur bebek. Hal ini disebabkan karena terlalu banyak abu yang menutupi pori-pori sehingga mengurangi luas permukaan dan menurunkan kapasitas adsorpsi (Putri *et al.*, 2019).

Kadar Air Bioadsorben

Uji kadar air dilakukan untuk mengetahui sifat higroskopis pada cangkang telur bebek. Kadar air memiliki pengaruh yang signifikan terhadap masa simpan makanan. Kadar air yang tinggi dapat meningkatkan kerentanan terhadap mikroorganisme (Dewi *et al.*, 2022). Hasil penentuan kadar air cangkang telur bebek menunjukkan nilai yang cukup rendah, yaitu 0.040% dan telah memenuhi syarat SNI (Hanifah *et al.*, 2024). Syarat kadar air menurut SNI 06-3730-1995 adalah tidak lebih dari 15% (SNI, 1995). Rendahnya kadar air ini menunjukkan sedikitnya air yang ada dalam pori karbon aktif. Kadar air yang tinggi dapat memengaruhi kualitas karbon aktif karena dapat menurunkan kemampuannya dalam menyerap gas, semakin besar pori maka semakin besar pula luas permukaan karbon aktif tersebut (Wardani *et al.*, 2022). Cangkang telur bebek menunjukkan sedikit penguapan saat aktivasi. Semakin rendah kadar air pada karbon aktif maka semakin baik karena memengaruhi daya serapnya (Novianti *et al.*, 2019).

Berat Jenis Bioadsorben

Pengujian berat jenis adalah perbandingan relatif antara massa jenis sebuah zat dengan massa jenis air murni (Kusuma *et al.*, 2017). Hasil pengujian menunjukkan nilai 2,74 gram/ml (Setiobudi *et al.*, 2024). Belum ada ketentuan nilai standar untuk berat jenis cangkang telur (Novianti *et al.*, 2019).

Massa Jenis Bioadsorben

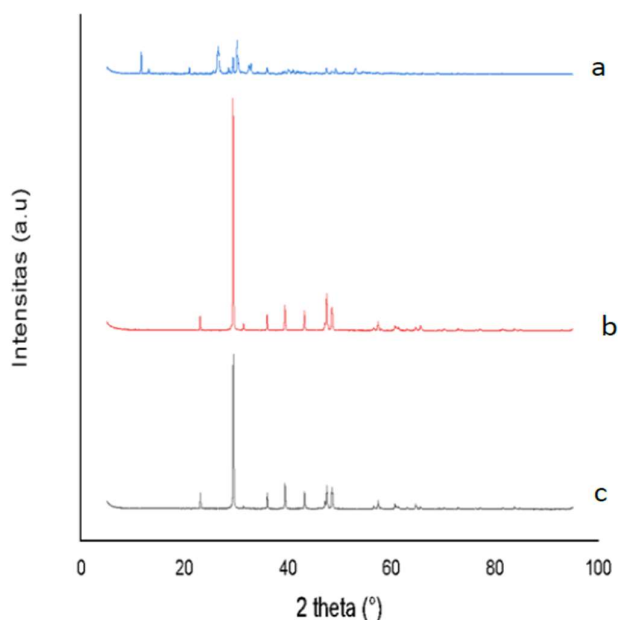
Pengujian massa jenis menunjukkan perbandingan massa terhadap volume suatu zat (Fanta *et al.*, 2023). Hasil pengujian adsorben dalam volume yang ditentukan menunjukkan nilai 1.13 g/cm^3 (Parvin *et al.*, 2020). Analisis bioadsorben disajikan dalam data berikut:

Tabel 1. Hasil Pengujian Analisis Bioadsorben

Pengujian	Hasil Penelitian	SNI 06-3530-1995
Kadar Abu	44.76%	Max 10%
Kadar Air	0.040%	Max 15%
Berat Jenis	2.74 g/ml	-
Massa Jenis	1.13 g/cm ³	-

Karakterisasi XRD Bioadsorben

XRD (*X-ray Diffraction*) adalah teknik untuk mempelajari struktur kristal dari suatu membran. Teknologi ini dapat menentukan tipe struktur kristal dan jarak antara rantai polimernya (Alqaheem, 2020). Dari hasil uji XRD, pola difraksi terlihat pada rentang sudut sehingga puncak maksimum berada pada 26,57°; 29,39°; dan 30,18° (Wardani, 2022). Pada bioadsorben puncak kristal yang menonjol dan berintensitas tinggi muncul pada $2\theta = 30,18^\circ$ menunjukkan bidang struktur heksagonal karbon (Balasubramanian *et al.*, 2019; Wardani, 2022).

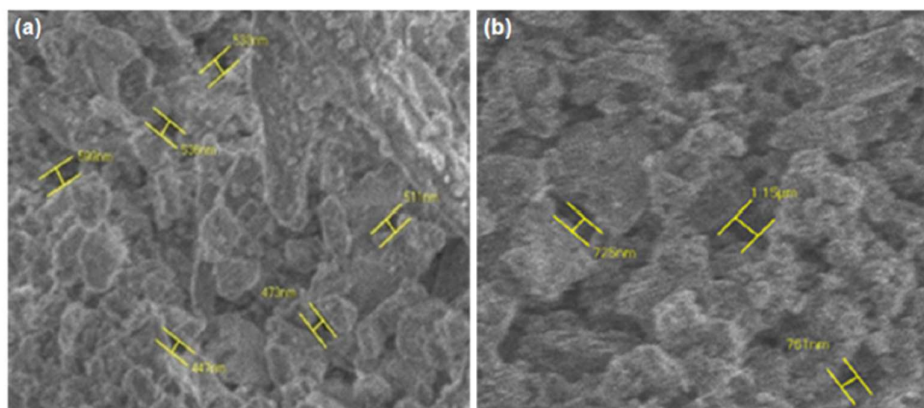


Gambar 1. Hasil uji XRD dari (a) cangkang telur bebek, (b) cangkang telur bebek yang telah dilakukan aktivasi karbon dan kalsinasi, dan (c) arang aktif (Wardani, 2022)

Cangkang telur bebek yang diaktivasi karbon dengan H_3PO_4 sesuai dengan metode pembuatan adsorben menghasilkan puncak kristal yang tinggi sehingga meningkatkan struktur berpori karbon (Ahmad *et al.*, 2020). Pemanasan cangkang telur bebek pada suhu tinggi juga menyebabkan pertumbuhan mikrokristalin karbon dan penguatan puncak-puncak pada spektrum XRD adsorben yang telah diaktifkan (Shahcheragh, 2023).

Karakterisasi SEM Bioadsorben

Karakterisasi bioadsorben cangkang telur bebek dengan SEM (*Scanning Electron Microscope*) bertujuan untuk mengetahui topografi, morfologi, dan ukuran pori suatu membran (Alqaheem, 2020). Analisis dengan SEM dilakukan pada 15 kV dan suhu ruang. Ukuran rata-rata pori dilakukan perhitungan dengan *image analysis software* (Hanifah *et al.*, 2024).



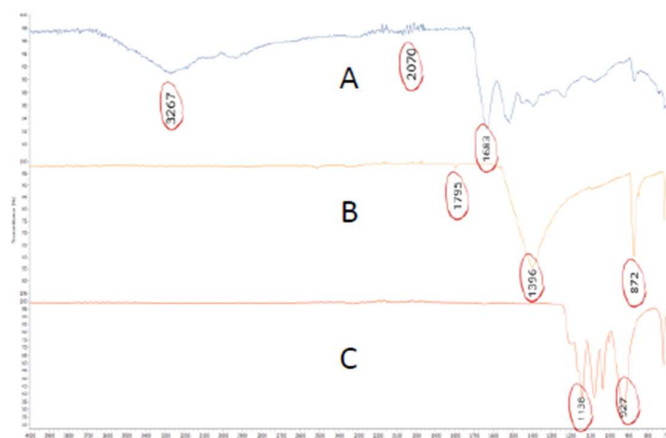
Gambar 2. Hasil uji SEM dari cangkang telur bebek dengan 3000 kali perbesaran untuk (a) sebelum kalsinasi dan (b) setelah kalsinasi (Hanifah et al., 2024)

Berdasarkan literatur, didapat hasil percobaan uji SEM dengan perbesaran 3000 kali, gambar (a) adalah cangkang telur bebek sebelum dilakukan aktivasi karbon dan gambar (b) adalah cangkang telur bebek setelah dilakukan aktivasi karbon dengan H_3PO_4 (Hanifah et al., 2024). Pada gambar (b), terlihat bahwa karbon yang telah diaktivasi oleh agen pengaktivasi, yaitu H_3PO_4 memiliki pori-pori yang lebih lebar. Karbon yang telah diaktivasi memiliki rongga yang diakibatkan oleh penguapan H_3PO_4 , sehingga menyisakan ruang yang sebelumnya ditempati oleh agen pengaktivasi tersebut (Ismail, 2010).

Keuntungan dari stuktur yang berpori adalah memungkinkan penetrasi elektrolit yang lebih mudah untuk difusi ion, transfer muatan, dan peningkatan kapasitas (Balasubramanian et al., 2019). H_3PO_4 yang bersifat asam bertindak juga sebagai *dehydration agent* yang menghambat pembentukan tar (Ahmad et al., 2020). Proses kalsinasi dari pemanasan dengan oven dapat meningkatkan luas permukaan serbuk adsorben sehingga membentuk area karbon yang aktif untuk proses penyerapan material (Pezoti et al., 2015).

Karakterisasi FTIR Bioadsorben

FTIR (*Fourier-Transform Infrared Spectroscopy*) adalah teknik untuk menentukan gugus fungsi. Umumnya gugus fungsi memberikan sifat reaksi kimia tertentu suatu senyawa (Alqaheem, 2020).



Gambar 3. Spektra FTIR dari (A) cangkang telur bebek, (B) cangkang telur bebek yang telah dilakukan aktivasi karbon dan kalsinasi, dan (C) arang aktif (Wardani, 2022)

Dari data percobaan, pada cangkang telur bebek (A) didapat karakteristik vibrasi C=O pada 1683 cm^{-1} , pita antara $870 - 1420\text{ cm}^{-1}$ adalah vibrasi gugus karbonat dikarenakan *stretching* dan *bending*, dan pita pada 3267 cm^{-1} adalah vibrasi gugus OH (Balasubramanian et al., 2019; Wardani, 2022). Pada cangkang telur bebek yang telah diaktivasi karbon (B), daerah sekitar $500-580\text{ cm}^{-1}$ adalah vibrasi PO_4^{3-} , karakteristik pada daerah 872 cm^{-1} akibat vibrasi *bending* $CaCO_3$, daerah C=C berada pada 1795 cm^{-1} , dan puncak pada 1396 cm^{-1} menunjukkan pita

peregangan P-O dari PO_3^{2-} yang disebabkan agen pengaktivasi (Balasubramanian *et al.*, 2019; Tangboriboon, 2012). Dari hasil uji FTIR menunjukkan bahwa agen pengaktivasi mempengaruhi intensitas pita karbonil dan adanya gugus fungsi lain pada adsorben cangkang telur bebek (Balasubramanian *et al.*, 2019).

Karakterisasi DLS Bioadsorben

Analisis partikel bioadsorben cangkang telur bebek dilakukan dengan uji DLS (*Dynamic Light Scattering*). DLS adalah metode untuk mengukur ukuran partikel, tetapi dalam konsentrasi partikel yang sangat rendah (Wang *et al.*, 2021). Pada pengukuran partikel bioadsorben cangkang telur bebek, didapat spektra DLS untuk rata-rata nilai aktivasi karbon dengan H_3PO_4 adalah 88 nm dengan indeks dispersif poli sebesar 0,57 (Ahmad *et al.*, 2020).

Pengujian Knalpot Termodifikasi

Knalpot termodifikasi memiliki bentuk tabung berbahan *stainless steel* dengan ukuran panjang 30 cm dan diameter 10 cm yang disesuaikan dengan ukuran knalpot sepeda motor uji. Teknologi tersusun atas dua komponen, yaitu bagian yang dapat dipasangkan pada knalpot asli kendaraan dan bagian ujung sebagai tempat bioadsorben. Knalpot termodifikasi dapat dibongkar pasang dan tahan getaran karena ditambahkan sistem mur baut sebagai pengunci. Bagian tempat bioadsorben teruji kuat dan tidak terhempas oleh angin atau gas buang sepeda motor, serta dilengkapi kawat ayakan untuk menahan bioadsorben.

Bioadsorben limbah cangkang telur bebek dihasilkan dalam bentuk serbuk abu yang mampu menyerap emisi kendaraan bermotor. Produk dikemas dalam kertas saring berlapis berbentuk lingkaran. Pengguna kendaraan dapat dengan mudah memasang produk pada knalpot termodifikasi karena model *packaging* yang aplikatif. Emisi kendaraan yang beroperasi akan direduksi secara otomatis setelah melewati produk bioadsorben dalam knalpot termodifikasi. Pengujian dilakukan pada kendaraan sepeda motor 4 tak *Suzuki Shogun* berbahan bakar pertalite. Data pengujian disajikan dalam tabel sebagai berikut:

Tabel 2. Hasil Pegujian Knalpot Termodifikasi pada Sepeda Motor Uji

Jenis Polutan	Kadar Sebelum Perlakuan (ppm)	Kadar Setelah Perlakuan (ppm)	Persentase
CO	439.99	131.41	70.13%
CH ₄	819.80	327.42	60.06%
C ₂ H ₅ OH	109.46	59.28	45.84%
H ₂	149.18	81.87	45.11%

Sejumlah variabel polutan dapat diturunkan signifikan hingga kadar yang rendah. Karbon monoksida (CO) sebagai target polutan berhasil diturunkan dengan persentase tertinggi, yaitu mencapai 70.13%. Adapun variabel lainnya, antara lain gas metana (CH₄), gas etanol (C₂H₅OH), dan gas hidrogen (H₂) dengan persentase 60.06%, 45.84%, dan 45.11%. Pengembangan bioadsorben dapat menekan dampak buruk CO mencapai nilai rendah sesuai aturan yang berlaku di Indonesia, yaitu sebesar 4,5% dari total kadar HC 2000 ppm. Dengan demikian, penerapan knalpot termodifikasi dapat menciptakan kendaraan bermotor yang memenuhi standar emisi dengan menjawab tantangan masa kerja optimal mesin filter bawaan yang seiring waktu sudah tidak efektif.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa modifikasi knalpot dengan bioadsorben berbahan cangkang telur bebek dapat meningkatkan serapan emisi kendaraan bermotor. Kadar karbon monoksida sebagai target polutan berhasil ditekan hingga mencapai 70.13%. Temuan ini dapat menjawab masalah keterbatasan sistem dan kinerja mesin filter kendaraan bermotor. Namun, knalpot termodifikasi perlu diujikan pada semua jenis kendaraan bermotor supaya mengetahui masing-masing masa kerja optimalnya. Dengan demikian, kesempatan penelitian lebih lanjut terbuka lebar untuk pengembangan knalpot termodifikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Departemen Biologi, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, atas penyediaan fasilitas Laboratorium Bioteknologi selama berlangsungnya penelitian ini.

REFERENSI

- Ahmad, Awais, D. Jini, M. Aravind, C. Parvathiraja, R. Ali, M. Z. Kiyani, & A. Alothman. (2020). A novel study on synthesis of eggshell based activated carbon for degradation of methylene blue via photocatalysis. *Arabian Journal Chemistry*, 13, 8717-8722.
- Alqaheem, Y. and A. A. Alomair. (2020). Microscopy and Spectroscopy Techniques for Characterization of Polymeric Membranes. *Membranes*, 10(33), 1-36.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik Transportasi 2023*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Badan Lingkungan Hidup DKI Jakarta. (2023). *Laporan Kualitas Udara Jakarta 2023*. Jakarta: Badan Lingkungan Hidup DKI Jakarta.
- Balasubramanian, V., T. Daniel, J. Henry, G. Sivakumar, & K. Mohanraj. (2019). Electrochemical performances of activated carbon prepared using eggshell waste. *SN Applied Sciences*, 2(127).
- Batu, M. S., Naes, E., & Kolo, M. (2022). Pembuatan Karbon Aktif Dari Limbah Sabut Pinang Asal Pulau Timor Sebagai Biosorben Logam Ca Dan Mg Dalam Air Tanah. *Jurnal Integrasi Proses* 11(1), 21–25.
- Dewi, L., Hadiesobroto, G., & Hanifah, H.N. (2023). Potensi Cangkang Telur Ayam dan Cangkang Telur Bebek sebagai Bioadsorben Logam Pb dari Limbah Cair Industri Farmasi. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 8(3), 314-325.
- Fanta, R., Maulina, W., Nugroho, A.T., Arkundato, A., & Berlianti, N.A. (2023). Kajian Sifat Fisik Putih dan Kuning Telur Bebek Selama Penyimpanan Pada Temperatur Berbeda. *Journal of Electronics and Instrumentation*, 1(1), 9-14.
- Hanifah, H. N., G. N., C. Cunayah, & D. A. K. Dani. (2024). Comparison of the Effectiveness of Calcined Chicken and Duck Eggshells as Zn Metal Adsorbent Using Atomic Absorption Spectrophotometric. *Indones. J. Chem*, 24(4), 939-950.
- Hodijah, N., dan Amin, B. (2014). Estimasi Beban Pencemar dari Emisi Kendaraan Bermotor. *Dinamika Lingkungan Indonesia*, 1(2), 71-79.
- Ismail, Amri, H. Sudrajat., D. Jumbianti. (2010). Activated Carbon From Durian Seed by H₃PO₄ Activation: Preparation and Pore Structure Characterization. *Indo. J. Chem*, 10(1), 36-40.
- Kang, I. S., & Yang, S. M. (2022). The Effect of Back Pressure Change on Exhaust Emissions According to the Confluence Geometry of a Dual Exhaust System in Idling. *Applied Sciences*, 12(4), 1855.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2023). *Laporan Emisi Gas Rumah Kaca Indonesia*. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Kusuma, R.I, Mina, E., & Hasibuan, P.R. (2017). Stabilisasi Tanah Lempung Dengan Menggunakan Pasir Laut Dan Pengaruhnya Terhadap Nilai Cbr (California Bearing Ratio). *Jurnal Fondasi*, 6(2), 24-33.
- Mahalana, A., Yang, L., Dallman, T., Lestari, P., Khafid, M., & Kusuma, N. (2022). Pengukuran Emisi Kendaraan Bermotor Real-World di Jakarta, Indonesia. *The Real Urban Emissions Initiative*.
- Novianti, N., Fitria, L., & Kadaria, U. (2019). Potensi Cangkang Telur Ayam sebagai Media Filter untuk Meningkatkan pH pada Pengolahan Air Gambut (The Potential of Chicken Eggshells as a Filter Media to Increase pH for Peat Water Treatment). *Jurnal Teknologi Lingkungan Laban Basah*, 7(2), 64-71.
- Nugroho, A., Widodo, Y., & Sulistyowati, T. (2022). Economic and environmental benefits of utilizing agricultural waste for pollution control. *Waste Management & Research*, 40(7), 989-999. doi:10.1177/0734242X211050469.
- Nurdjanah, N. (2014). Emisi CO₂ Akibat Kendaraan Bermotor di Kota Denpasar. *Jurnal Transportasi Darat*, 16(4), 189-201.
- Parvin, S., Al-Mamun, Rubbi, M.F., Ruman, M.A., Rahman, M.M., & Biswas, B.K. (2020). Utilization Of Egg-Shell, A Locally Available Bio-waste Material, for Adsorptive Removal of Congo Red From Aqueous Solution. *Aceb International Journal of Science and Technology*, 9(2), 63-74.
- Pezoti, O., A. L. Cazetta, K. C. Bedin, L. S. Souza, A. C. Martins, T. L. Silva, O. O. S. Júnior, J. V. Visentainer, & V. C. Almeida. (2015). NaOH-activated carbon of high surface area produced from guava seeds as a high-efficiency adsorbent for amoxicillin removal: kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Chemical Engineering Journal*, 288, 778-788.
- Putra, W., Maksum, H., & Fernandez, D. (2015). Pengaruh Penggunaan Knalpot Standar dan Racing Terhadap Tekanan Balik, Suhu dan Bunyi pada Sepeda Motor 4Tak. *Automotive Engineering Education Journals*, 4(2).
- Setiobudi, A., Kurniawan, R., & Alzahri, S. (2024). Pengaruh Penambahan Cangkang Telur Bebek Terhadap Kuat Tekan Beton K-250. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil* 10(1), 54-65.
- Shahcheragh, S. K., M. M. B. Mohagheghi, A. Shirpay. (2023). Effect of physical and chemical activation methods on the structure, optical absorbance, band gap and urbach energy of porous activated carbon. *SN Applied Sciences*, 5(313).

- Sihombing, O., E., Andaria, A., J., dan Pascoal, K., G. 2022. Kadar karboksihemoglobin (COHb) pada Lalu Lintas Angkutan Jalan (LLAJ) Dinas Perhubungan Kota Manado. *Indonesian Journal of Medical Laboratory Technology*. 1(1), 16-22.
- Tangboriboon, N., R. Kunanuruksapong, & A. Sirivat. (2012). Preparation and properties of calcium oxide from eggshells via calcination. *Material Science-Poland*, 30(4), 313-322.
- Wardani, G. A., W. W. Ramdani, & M. Fathurohman. (2022). Arang Aktif Cangkang Telur Bebek Termodifikasi Tween 80 sebagai Adsorben Tetrasiklin Hidroklorida. *Prosiding Seminar Nasional Diseminasi, Indonesia*, 2, 30-40.
- Wang, Mengjie, J. Shen, J. C. Thomas, T. Mu, W. Lu, Y. Wang, J. Pan, Q. Wang, & K. Lu. (2021). Particle Size Measurement Using Dynamic Light Scattering at Ultra-Low Concentration Accounting for Particle Number Fluctuations. *Materials*, 14(19), 5683.
- Yuliana, M., Sari, D., & Mulyani, N. (2021). Utilization of egg shell as an adsorbent for CO removal in exhaust gases. *Journal of Environmental Management*, 270, 110938. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110938.