

Optimalisasi pemanfaatan cangkang kemiri untuk produksi karbon aktif dalam pengurangan emisi CO

Fitriyanti^{1*}, Emi Muliani¹, Kurniati Abidin¹, Jasdar Agus¹

¹Program Studi Fisika

Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar
Jl. Sultan Alauddin No. 63 Gowa, Sulawesi Selatan, Indonesia. 92113

*E-mail: fitriyanti_fisika@uin-alauddin.ac.id

Abstrak: Pengelolaan emisi gas buang dari insinerator menjadi isu penting dalam upaya mitigasi pencemaran udara dan perlindungan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan cangkang kemiri (*Aleurites moluccana*) sebagai bahan dasar karbon aktif dalam upaya mengurangi emisi gas karbon monoksida (CO) pada insinerator. Karbon aktif yang dihasilkan melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH diuji berdasarkan parameter kualitas sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI 06-3730-1995), yaitu kadar air, kadar abu, dan daya serap iod. Sampel karbon aktif yang diperoleh menunjukkan kualitas baik dengan kadar air sebesar 4,09%, kadar abu 9,01%, dan daya serap iod sebesar 837,738 mg/g. Selanjutnya, karbon aktif diaplikasikan sebagai media adsorpsi pada cerobong insinerator. Hasil pengujian menunjukkan adanya penurunan kadar gas CO secara signifikan dari 182 ppm menjadi 4,8 ppm pada menit ke-25 pembakaran, dengan efisiensi adsorpsi berkisar antara 23,4% hingga 96,5%. Penurunan kadar gas CO juga seiring dengan peningkatan suhu ruang bakar yang mendukung pembakaran lebih sempurna. Dengan demikian, karbon aktif dari cangkang kemiri terbukti efektif sebagai media adsorpsi emisi gas CO dan berpotensi diterapkan dalam pengelolaan emisi gas buang insinerator secara ramah lingkungan.

Kata Kunci: adsorpsi, cangkang kemiri, emisi gas CO, insinerator, karbon aktif

Abstract: Management of flue gas emissions from incinerators has become a critical issue in efforts to mitigate air pollution and protect the environment. This study aims to investigate the utilization of candlenut shells (*Aleurites moluccana*) as a precursor for producing activated carbon in the reduction of carbon monoxide (CO) emissions from incinerators. Activated carbon was synthesized through carbonization followed by chemical activation using sodium hydroxide (NaOH). The quality of the resulting activated carbon was evaluated based on the Indonesian National Standard (SNI 06-3730-1995), including parameters such as moisture content, ash content, and iodine adsorption capacity. The activated carbon exhibited favorable characteristics with a moisture content of 4.09%, ash content of 9.01%, and an iodine number of 837.738 mg/g. Subsequently, the material was applied as an adsorption medium at the incinerator chimney to reduce CO emissions. Experimental results demonstrated a significant decrease in CO concentration—from 182 ppm to 4.8 ppm—within 25 minutes of incineration, achieving adsorption efficiencies ranging from 23.4% to 96.5%. The findings also revealed that higher combustion temperatures facilitated more complete oxidation, thereby lowering CO formation. Overall, activated carbon derived from candlenut shells is proven to be an effective and eco-friendly adsorbent for controlling hazardous gas emissions from incineration processes.

Keywords: adsorption, candlenut shell, CO gas emissions, incinerator, activated carbon

PENDAHULUAN

Insinerator merupakan sebuah instrumen dengan sistem ruang tertutup yang digunakan pada pembakaran sampah dengan suhu yang tinggi. Penggunaan insinerator telah dilakukan oleh Rizali et al. (2022) serta Rudend & Hermana (2020) untuk membakar sampah organik, anorganik, dan limbah medis. Suhu pembakaran insinerator dapat mencapai 800-1.100°C (Hermansyah & Hernawati, 2017). Pada suhu tinggi, akan terjadi

pembakaran sempurna pada insinerator sehingga tidak menghasilkan gas buang berbahaya, sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P,70/Menlhk/Setjen/Kum.1/12/2016 tentang Baku Mutu Emisi Usaha dan/atau Kegiatan Pembakaran Sampah, disebutkan bahwa proses pembakaran menghasilkan emisi gas buang berupa partikulat, sulfur dioksida (SO_2), nitrogen oksida (NO_x), karbon monoksida (CO), dioksin, furan, serta berbagai polutan lainnya.

Emisi gas buang karbon monoksida (CO) pada insinerator tersebut merupakan gas buang berbahaya yang dapat menyebabkan kerusakan pada tubuh manusia serta kerusakan lingkungan seperti polusi udara. Paparan karbon monoksida (CO) dapat memicu terbentuknya karboksihemoglobin (COHb) dalam darah. Selain itu, paparan gas ini juga dapat menyebabkan berbagai gejala, seperti sakit kepala, pusing, kesulitan bernapas, mata berair, dan peningkatan tekanan darah. (Rizali et al., 2022). Paparan gas karbon monoksida (CO) dalam tingkat yang lebih tinggi dapat menyebabkan gangguan serius, seperti penurunan fungsi motorik tubuh, masalah pada sistem kardiovaskular, serangan jantung, hingga risiko kematian (Rambing et al., 2022). Hal tersebut terjadi karena berdasarkan struktur lewisnya, CO memiliki pasangan elektron bebas pada karbon. Pasangan elektron ini memungkinkan karbon membentuk ikatan koordinasi yang sangat kuat dengan ion besi (Fe^{2+}) dalam hemoglobin sehingga dapat menggantikan oksigen. Ikatan CO dengan hemoglobin (karboksihemoglobin) sangat stabil yaitu sekitar 200-250 kali lebih kuat dibandingkan dengan oksigen, sehingga dapat menghalangi pengangkutan oksigen ke jaringan tubuh. Akibatnya, tubuh mengalami kekurangan oksigen (hipoksia) yang dapat menyebabkan kerusakan organ atau kematian. Salah satu solusi yang dikembangkan untuk meminimalkan dampak emisi gas buang pada insinerator tersebut berupa penggunaan media adsorpsi pada cerobong insinerator.

Penggunaan media adsorpsi pada saat proses pembakaran telah terbukti dapat mengurangi emisi gas buang yang berbahaya (Subekti et al., 2020), (Kumar & Singh, 2020), (Zhang & Li, 2021). Media ini berfungsi sebagai penghalang fisik yang memisahkan zat yang tidak diinginkan. Media adsorpsi yang umum digunakan yaitu pasir, serabut kelapa, arang tempurung kelapa, zeolite, dan karbon aktif (Gultom et al., 2018), (Pratama et al., 2021). Karbon aktif adalah material yang telah melalui proses karbonisasi dan aktivasi, sehingga memiliki struktur berpori dan permukaan yang aktif. Hal ini membuatnya mampu menyerap zat dengan efektif, dengan kapasitas adsorpsi mencapai 25-100% dari berat karbon aktif itu sendiri (Nurhaliq et al., 2022). Karbon aktif dibuat dari bahan yang mengandung karbon melalui serangkaian proses, yang meliputi dua tahap utama yaitu karbonisasi dan aktivasi (baik secara fisik maupun kimia). Salah satu bahan baku utama yang sering digunakan untuk pembuatan karbon aktif adalah cangkang kemiri (Rumi et al., 2021).

Cangkang kemiri merupakan limbah yang dapat dijadikan bahan dasar untuk pembuatan karbon aktif karena memiliki komposisi yang terdiri dari holoselulosa sebesar 49,22%, pentose 14,55%, lignin 54,46%, dan abu 8,73%. Tingginya kandungan lignin dalam cangkang kemiri berpotensi untuk menghasilkan karbon aktif dengan nilai kalor yang tinggi (Sutanto et al., 2021). Cangkang kemiri adalah limbah dari tanaman kemiri, tetapi masih dapat dimanfaatkan sebagai karbon aktif. Hal ini sesuai dengan apa yang dikatakan Allah Swt. dalam QS Tha-ha/20:53.

الَّذِي جَعَلَ لَكُمُ الرُّضَىٰ مَهْدًا وَسَلَكَ لَكُم فِيهَا سُبُلًا وَأَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَأَخْرَجْنَا بِهِ أَزْوَاجًا مِنْ نَبَاتٍ شَتَّىٰ ۝٥٣

Terjemahnya:

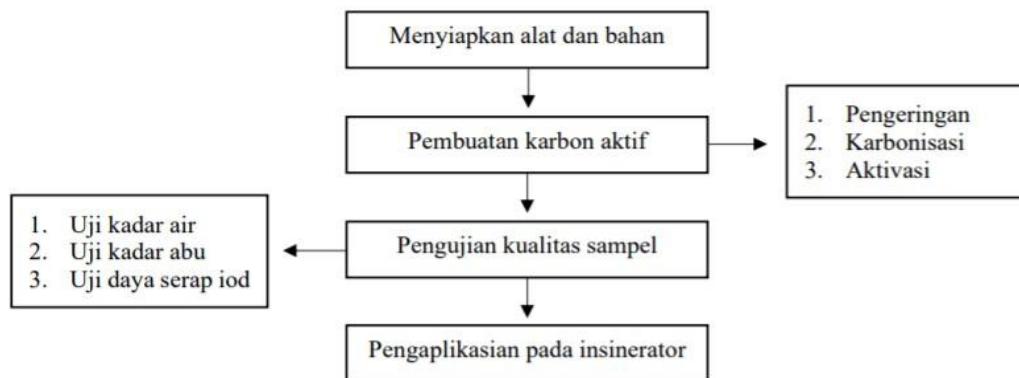
”(Tuhan) yang telah menjadikan bumi sebagai hamparan bagimu dan Yang telah menjadikan bagi kamu di bumi itu jalan-jalan, dan yang menurunkan dari langit air (hujan), maka Kami tumbuhkan dengannya berjenis-jenis tumbuh-tumbuhan yang bermacam-macam.”

Berdasarkan uraian latar belakang maka penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas sampel karbon aktif berdasarkan uji mekanik serta kemampuan adsorpsi karbon aktif terhadap gas CO pada cerobong insinerator. Pemanfaatan cangkang kemiri akan membantu mengurangi limbah Adapun penggunaan karbon aktif sebagai media adsorpsi dapat membantu mengurangi polusi dari emisi gas buang berbahaya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juli-Oktober 2024. Jenis penelitian ini adalah penelitian eksperimental yang dilakukan dengan membuat karbon aktif kemudian menguji sifat mekaniknya lalu mengaplikasikannya pada insinerator sebagai media adsorpsi emisi gas CO. Kegiatan penelitian pembuatan karbon aktif dari cangkang kemiri sebagai media adsorpsi emisi gas karbon monoksida pada insinerator ini menggunakan beberapa alat penelitian sebagai pendukung penelitian yaitu gelas ukur, *furnace*, oven, ayakan, kertas saring, pH meter, neraca, buret, cetakan, insinerator, *portable combustion gas analyzer*, dan *smart sensor AS8700A*. Sedangkan bahan yang digunakan yaitu cangkang kemiri, tepung tapioka, larutan NaOH, aquades, larutan iodium, pati amilum, dan natrium tiosulfat.

Prosedur penelitian pembuatan karbon aktif dari cangkang kemiri sebagai media adsorpsi emisi gas karbon monoksida pada insinerator dapat diamati pada Gambar 1.



Gambar 1. Prosedur kerja

Secara detail, Gambar 1 dapat dijelaskan sebagai berikut: (a) Menyiapkan alat dan bahan dalam penelitian; (b) Pembuatan karbon aktif, meliputi proses pengeringan, cangkang kemiri dikeringkan selama ± 2 hari dibawah terik matahari, untuk mengurangi kadar air; proses karbonisasi, pada proses ini, cangkang kemiri dikarbonisasi hingga menjadi arang di ruang yang minim oksigen; dan proses aktivasi, cangkang kemiri yang telah dikarbonisasi diaktivasi secara kimia dengan menggunakan larutan NaOH, untuk meningkatkan porositas, luas permukaan spesifik, dan daya adsorpsi karbon aktif. Sampel direndam pada wadah yang tertutup selama ± 24 jam kemudian disaring lalu dicuci dengan aquades hingga pH-nya netral, kemudian dipanaskan di oven pada suhu 200°C selama 1 jam; (c) Pengujian kualitas sampel karbon aktif, meliputi kadar air, kadar abu, uji daya serap iod.

- a. Uji kadar air, sampel karbon aktif sebanyak 5 gr kemudian dikeringkan dalam oven selama 1 jam pada suhu 150°C, dan menimbang kembali massanya, kadar air dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{(W_1 - W_2)}{(W_1)} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

W_1 = massa awal sampel sebelum dikeringkan (gram)

W_2 = massa sampel setelah dikeringkan (gram)

- b. Uji kadar abu, dilakukan dengan cara mengambil 5 gr karbon aktif kemudian memasukkan dalam *furnace* selama 2 jam pada suhu 700°C, kemudian menimbang massanya. Menghitung kadar abu dengan menggunakan Persamaan (2).

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_3 - W_1)} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

W_1 = massa cawan kosong (gram)

W_2 = massa cawan + karbon aktif sebelum dibakar (gram)

W_3 = massa cawan + sisa abu setelah dibakar (gram)

- c. Uji daya serap iod, dengan cara memasukkan sampel yang berupa karbon aktif sebanyak 5 gr ke dalam gelas ukur yang berisi 50 mL larutan iodium 0,2 N, kemudian mengaduknya menggunakan *stirrer* selama 15 menit sampai larutan menjadi homogen. Setelah itu, menyaring larutan iodium lalu mengambil titratnya sebanyak 10 mL kemudian dilakukan titrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat 0,1N. Jika warna kuning pada larutan mulai terlihat samar, kemudian ditambahkan dengan larutan pati amilum 1% hingga larutan menjadi bening. Daya serap iod dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.

$$\text{Daya serap iod} = \frac{(V_t \times N_t \times 126,9 \times V_{\text{total filtrat}})}{V_{\text{titrasi}} \times m} \quad (3)$$

Keterangan:

V_t = Volum titran (ml)

N_t = Normalitas titran

126.9 = Berat ekuivalen iodin (mg/mmol)

$V_{\text{total filtrat}}$ = Total volume filtrat setelah disaring (mL)

V_{titrasi} = Volume filtrat yang dititrasi (mL)

m = Massa karbon aktif (gram)

Tahap terakhir yaitu pengaplikasian pada insinerator. Sampel karbon aktif cangkang kemiri, yang telah melalui proses pengujian, dicetak dan dikeringkan selama ±1 hari di bawah sinar matahari. Sampel yang telah dikeringkan diaplikasikan pada bagian atas cerobong insinerator.

HASIL DAN PEMBAHASAN

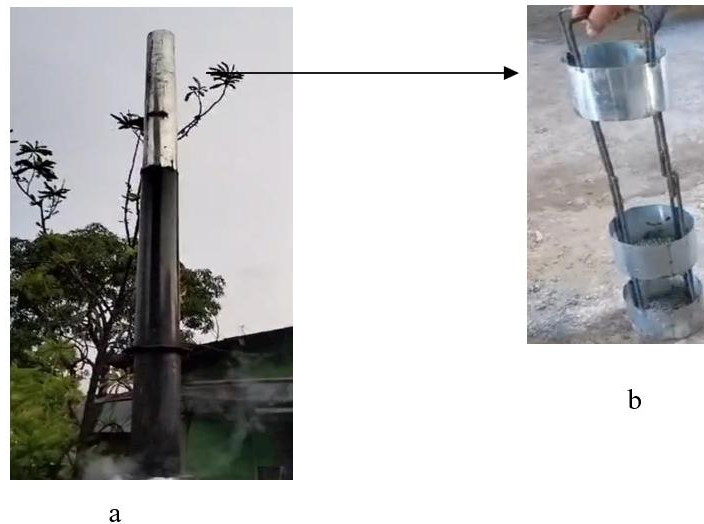
Uji kualitas sampel dilakukan untuk mengetahui apakah karbon aktif tersebut telah memenuhi standar kualitas yang ditetapkan. Uji kualitas sampel tersebut dilakukan

berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 06-3730-1995 yang meliputi: kadar air, kadar abu, dan daya serap iod. Hasil pengujian dapat dilihat dalam Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian kualitas sampel

Pengujian	Hasil	Standar SNI
Kadar air	4,09%	Maks 15%
Kadar abu	9,01%	Maks 10%
Daya serap iod	837,738 mg/g	Min 750 mg/g

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 1, dapat dilihat bahwa kualitas sampel karbon aktif telah memenuhi SNI 06-3730-1995. Hasil yang diperoleh tidak melewati nilai maksimum atau minimumnya. Setelah dilakukan pengujian, karbon aktif kemudian akan diaplikasikan pada insinerator yaitu dengan meletakkan karbon aktif pada cerobong yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tempat penyimpanan media adsorpsi pada cerobong insinerator, meliputi (a) Cerobong insinerator, dan (b) Wadah tempat karbon aktif yang diletakkan pada bagian atas cerobong insinerator

Dalam gas buang pada cerobong insinerator terdapat berbagai komponen yang berbahaya bagi tubuh manusia diantaranya gas karbon monoksida (CO). Kadar gas CO yang melebihi ambang batas akan membahayakan kesehatan manusia dan juga lingkungan sekitar. Pada penelitian, alat yang akan digunakan untuk mendeteksi gas CO adalah *smart sensor AS8700A*. Kadar gas CO yang didapatkan tanpa penggunaan media adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengamatan kadar gas CO tanpa penggunaan media adsorpsi

Waktu (menit)	Suhu ruang pembakaran (°C)	Kadar gas CO (ppm)
5	304	130
10	252	178
15	225	182
20	389	150
25	407	138

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 2, diperoleh kadar gas CO yang paling tinggi yaitu terjadi pada menit ke 15 yaitu 182 ppm. Pada Tabel 2 juga dapat dilihat bahwa

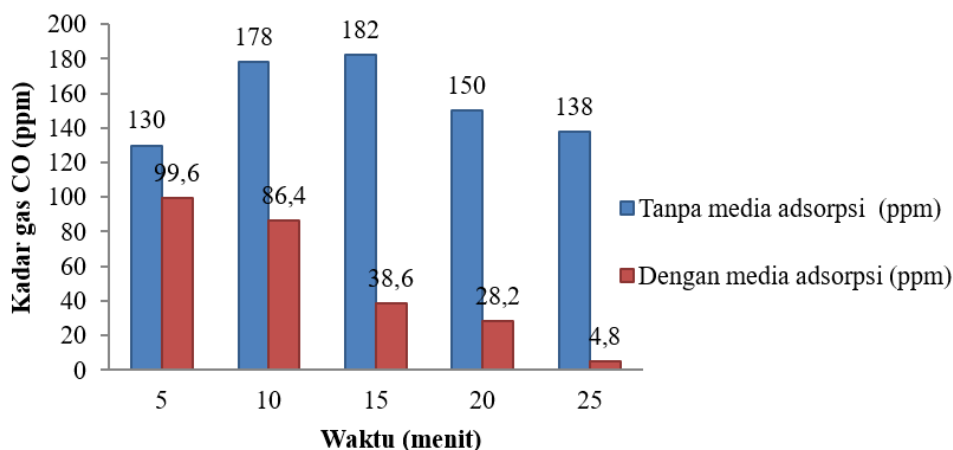
suhu ruang pembakaran sangat berpengaruh terhadap kadar gas CO dimana semakin tinggi suhu ruang pembakaran maka kadar gas CO nya semakin berkurang. Hal ini terjadi karena setelah insinerator mencapai panas optimal maka kadar gas CO yang keluar dari cerobong akan semakin berkurang. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan (Emami et al., 2018) yang menunjukkan bahwa pada pembakaran gas metana di turbin, peningkatan suhu pembakaran akan meningkatkan proses oksidasi karbon monoksida menjadi karbon dioksida sehingga menurunkan emisi gas CO yang dilepaskan ke atmosfer.

Gas CO merupakan gas buang berbahaya yang dapat menyebabkan pencemaran serta merusak kesehatan manusia apabila dihirup dalam jumlah dan waktu yang lama. Untuk mengurangi kadar gas CO pada cerobong insinerator dapat dilakukan dengan penggunaan media adsorpsi karbon aktif yang terbuat dari cangkang kemiri. Dimana diketahui bahwa karbon aktif merupakan bahan yang memiliki permukaan yang luas serta memiliki pori sehingga dapat menyerap suatu zat. Hasil yang diperoleh terlihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengamatan kadar gas CO dengan penggunaan media adsorpsi

Waktu (menit)	Suhu ruang pembakaran (°C)	Kadar gas CO (ppm)
5	152,6	99,6
10	266,6	86,4
15	382,8	38,6
20	431	28,2
25	499,8	4,8

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 3, diperoleh hasil yang baik karena terjadi penurunan kadar gas CO di setiap pengambilan data yaitu sebesar 99,6 ppm, 86,4 ppm, 38,6 ppm, 28,2 ppm, dan 4,8 ppm. Dengan melihat hasil tersebut maka dapat dikatakan bahwa dengan penggunaan media adsorpsi karbon aktif dari cangkang kemiri dapat mengurangi kadar gas CO pada insinerator. Hasil tersebut sejalan dengan laporan dari IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) yang menunjukkan bahwa karbon aktif dapat mengurangi emisi gas CO pada insinerator dengan cara menambahkan teknologi penangkapan karbon pada cerobong. Teknologi ini bekerja dengan mengikat gas berbahaya menggunakan media adsorpsi. Penelitian Kang et al. (2022), Ahmed et al. (2023), serta Calbry-Muzyka et al. (2024) melakukan *review* terhadap karbon aktif yang terbukti dapat mengabsorpsi berbagai zat berbahaya seperti CO, CO₂, HCHO, H₂S, VOC, siloksan, dan beberapa zat kimia yang berbahaya. Penelitian Park et al. (2025) menguji karbon aktif, terhadap gas formaldehida. Li et al. (2023), melakukan penelitian karbon aktif *low-background* dengan ukuran pori 2,3 nm mampu mengadsorpsi radon 2,6–4,7 kali lebih tinggi dari Saratech atau Carboact yang menandakan potensinya diaplikasi radon *removal*. Berdasarkan berbagai penelitian karbon aktif memiliki banyak potensi yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan untuk mengabsorpsi gas maupun bahan-bahan yang berbahaya, dengan pengolahan dan aktivasi yang tepat, karbon aktif dapat digunakan secara luas dalam pengendalian polusi udara, pengolahan gas industri, hingga sistem perlindungan lingkungan dan kesehatan. Penelitian ini mengaplikasikan karbon aktif untuk mengabsorpsi gas CO pada cerobong insinerator, grafik perbandingan penurunan kadar gas CO dengan dan tanpa menggunakan media adsorpsi karbon aktif cangkang kemiri dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perbandingan kadar gas CO dengan dan tanpa penggunaan media adsorpsi

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan kadar gas CO setelah pemakaian media adsorpsi. Terlihat pada grafik bahwa penurunan kadar gas CO pada menit ke 5 yaitu dari 130 ppm menjadi 99,6 ppm, pada menit ke 10 yaitu dari 178 ppm menjadi 86,4 ppm, pada menit ke 15 yaitu dari 182 ppm menjadi 38,6 ppm, pada menit ke 20 yaitu terjadi penurunan dari 150 menjadi 28,2 ppm, dan pada menit ke 25 adalah penurunan kadar gas CO yang paling signifikan yaitu dari 138 ppm menjadi 4,8 ppm. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama proses pembakaran pada insinerator berlangsung, maka kadar gas CO cenderung menurun. Hal ini disebabkan oleh semakin sempurnanya proses pembakaran seiring waktu. Oksigen bereaksi lebih optimal dengan karbon membentuk gas CO₂, sehingga jumlah gas CO yang terbentuk menjadi lebih sedikit. Adapun efisiensi adsorpsi dari karbon aktif tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil efisiensi adsorpsi dengan dan tanpa penggunaan media adsorpsi

Tanpa media adsorpsi (ppm)	Dengan media adsorpsi (ppm)	Efisiensi adsorpsi (%)
130	99,6	23,4
178	86,4	51,5
182	38,6	78,5
150	28,2	84,3
138	4,8	96,5

Berdasarkan hasil pengamatan pada Tabel 4, diketahui efisiensi adsorpsi karbon aktif yaitu sebesar 23,4%, 51,5%, 78,5%, 84,3%, dan 96,5%. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa penyerapan karbon aktif maksimal terhadap gas CO pada insinerator sebesar 96,5%. Semakin tinggi efisiensi adsorpsi maka kemampuan karbon aktif dalam menurunkan gas CO akan semakin besar begitu pula sebaliknya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa karbon aktif yang dibuat dari cangkang kemiri melalui proses karbonisasi dan aktivasi kimia dengan NaOH memiliki kualitas yang baik dan telah memenuhi standar SNI 06-3730-1995. Karbon aktif ini menunjukkan kadar air sebesar 4,09%, kadar abu 9,01%, dan daya serap iodin sebesar 837,738 mg/g, yang mencerminkan karakteristik adsorpsi yang optimal. Saat diaplikasikan pada cerobong insinerator, karbon aktif tersebut mampu menurunkan emisi

gas karbon monoksida (CO) secara signifikan, dengan efisiensi adsorpsi berkisar antara 23,4% hingga 96,5%. Penurunan kadar CO ini semakin meningkat seiring dengan waktu dan suhu pembakaran, karena proses pembakaran menjadi lebih sempurna dan oksigen lebih efektif bereaksi dengan karbon. Dengan demikian, pemanfaatan limbah cangkang kemiri sebagai bahan baku karbon aktif terbukti efektif dan ramah lingkungan dalam mengurangi polusi udara dari insinerator.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, A. S., Alsultan, M., Sabah, A. A., & Swiegers, G. F. (2023). Carbon dioxide adsorption by a high-surface-area activated charcoal. *Journal of Composite Science*, 7(5), 1-13. <https://doi.org/10.3390/jcs7050179>.
- Calbry-Muzyka, A. S., Hejna, M., Skóra, K., & Słomka, T. (2024). Performance assessment of activated carbon thermally modified with iron in the desulfurization of biogas in a static batch system supported by headspace gas chromatography. *Journal of Analytical Science and Technology*, 15(1), 1-18. <https://doi.org/10.1186/s40543-024-00401-3>.
- Emami, M. D., Shahbazian, H., & Sunden, B. (2019). Effect of operational parameters on combustion and emissions in a industrial gas turbine combustor. *Journal of Energy Resources Technology*, 141(1), 1-14. <https://doi.org/10.1115/1.4040532>.
- Gultom, O. S., Mess, N. T., & Silamba, I. (2018). Pengaruh penggunaan beberapa jenis media filtrasi terhadap kualitas limbah cair ekstrak sagu. *AGROINTEK: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 12(2), 81-89. <https://doi.org/10.21107/agrointek.v12i2.3805>.
- Hermansyah & Hernawati. (2017). Rancang bangun insinerator dua tahap (solusi mengatasi polusi udara pada pembakaran sampah. *JFT: Jurnal Fisika dan Terapannya*, 4(1), 38-48. <https://doi.org/10.24252/jft.v4i1.15686>.
- Kang, Y. J., Jo, H. K., Jang, M. H., Ma, X., Jeon, Y., Oh, K., & Park, J. I. (2022). A brief review of formaldehyde removal through activated carbon adsorption. *Applied Sciences*, 12(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/app12105025>.
- Kementerian Agama RI. (2019). *Al-Qur'an dan Terjemahannya*. Jakarta: Kementerian Agama RI.
- Kumar, R., & Singh, R. (2020). Reducing carbon monoxide emissions using activated carbon in waste incinerator. *Journal of Environmental Management*, 257, 109980.
- Li, C., Zhang, Y., Lv, L., Liu, J., Guo, C., Yang, C., ... & Tang, Q. (2023). Study on the radon adsorption capability of low-background activated carbon. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2303.00836>.
- Nurhaliq, F. D., Rahman, & Hidayat. (2022). Efektivitas karbon aktif dalam menurunkan konsentrasi COD pada limbah cair RSUD Massenrempulu Kabupaten Enrekang. *Window of Public Health Journal*, 3(2) 332-338. <https://doi.org/10.33096/woph.v3i2.386>.
- Park, S., Hong, Y., & Choi, H. (2025). Enhanced performance of highly activated carbon and surface-treated porous polymers as physical adsorbents for chemical warfare agents. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2502.01234>.
- Pratama, Y., Juhana, S., & Yuliatmo, R. (2021). Metode filtrasi menggunakan media arang aktif, zeolit, dan pasir silika untuk menurunkan amonia total (N-NH₃) dan sulfida (S²⁻) pada air limbah outlet industri penyamakan kulit. *Majalah Kulit Politeknik ATK Yogyakarta*, 20(1), 39-52.
- Rambing, V. V., Umboh, J. M. L., & Warouw, F. (2022). Literature review: Gambaran risiko kesehatan pada masyarakat akibat paparan gas karbon monoksida (CO). *Kesmas: Jurnal Kesehatan Masyarakat Universitas Sam Ratulangi*, 11(4), 95-101.
- Rizali, M., Friscila, I., & Wicaksono A. M. (2022). Insinerator limbah medis dari fasilitas pelayanan kesehatan di Banjarmasin. *Jurnal Impact*, 4(2), 138-149. <https://doi.org/10.31961/impact.v4i2.1363>.
- Rumi, S., Ashari, M. T., & Rahman, A. (2021). Penyisihan polutan pada limbah cair penatu menggunakan adsorben arang aktif berasal dari bambu. *Jurnal Pendidikan Fisika dan Fisika Terapan*, 7(1), 6-13. <https://doi.org/10.22373/p-jpft.v7i1.12409>.
- Rudend, J. A., & Hermana, J. (2020). Kajian pembakaran sampah plastik jenis polipropilena (PP) menggunakan insinerator. *Jurnal Teknik ITS*, 9(2), 124-130. <http://dx.doi.org/10.12962/j23373539.v9i2.55410>.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 06-3730-1995 Tentang Arang Aktif Teknis.
- Subekti, S., Basuki, P., & Purwaningrum, S. D. (2020). Pembakar sampah rendah emisi dengan air sebagai filtrasi. *Neo Teknika*, 6(2), 6-11. <https://doi.org/10.37760/neoteknika.v6i2.1623>.

- Sutanto, H., Abdi, F. N., & Kesuma, R. A. (2021). Pemanfaatan cangkang kemiri *Aleurites moluccana* (Candlenut) sebagai agregat kasar terhadap kuat tekan beton ringan. *Teknologi Sipil: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 5(1), 44-54. <http://dx.doi.org/10.30872/ts.v5i1.6299>.
- Zhang, Y., & Li, H. (2021). Efficiency of calcium hydroxide in reducing acidity of flue gas from municipal waste incinerator. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4750-4757.