

BAB V

PENUTUP

V.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan terhadap kinerja *catalytic converter* multimaterial berbasis zeolit *clinoptilolite*, tembaga, dan kuningan pada Suzuki *Carry Pick Up* menggunakan bahan bakar RON 90, 92, dan 98, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Pengaruh Katalis Multimaterial terhadap Penurunan Emisi CO dan HC

Pemasangan *catalytic converter* multimaterial terbukti mampu menurunkan kadar emisi CO dan HC secara terukur pada seluruh variasi putaran mesin yang diuji. Penurunan paling signifikan terjadi pada putaran 1.500 rpm, dengan reduksi CO mencapai 50,61% dan HC sebesar 60,87% dibandingkan kondisi *baseline*. Secara keseluruhan pada bahan bakar RON 90, rata-rata reduksi CO mencapai 42,26% dan HC sebesar 54,93% di tiga variasi putaran mesin. Capaian ini menunjukkan bahwa sinergi antara tembaga dan kuningan sebagai media reaksi oksidasi-reduksi, dikombinasikan dengan zeolit *clinoptilolite* sebagai agen adsorpsi berpori, menghasilkan mekanisme konversi berlapis yang tidak dapat dicapai oleh material tunggal.

2. Pengaruh Geometri Pelat Spiral terhadap Efektivitas Konversi

Desain pelat spiral 2 pelat yang diterapkan dalam penelitian ini mampu menciptakan turbulensi aliran gas buang di dalam ruang katalis sehingga waktu kontak antara gas dan permukaan aktif meningkat. Hal ini tercermin dari konsistensi data antarulangan pada kondisi *idle* 800 rpm RON 90, di mana reduksi CO berkisar antara 38,84% hingga 52,61% dan reduksi HC antara 45,08% hingga 55,30%. Rentang variasi tersebut masih dalam batas yang dapat diterima untuk pengujian berbasis mesin nyata, dan secara rata-rata menghasilkan reduksi CO sebesar 47,47% serta HC sebesar 48,65%.

3. Pengaruh Variasi RON Bahan Bakar terhadap Emisi, Efektivitas Katalis, dan Keterkaitan dengan Data XRD

Variasi RON bahan bakar memengaruhi kondisi stoikiometri pembakaran (λ) yang menentukan komposisi gas buang masuk ke katalis. Reduksi CO meningkat seiring naiknya RON — 47,45% (RON 90), 48,42% (RON 92), hingga 49,41% (RON 98), rata-rata 48,43% — karena pembakaran lebih mendekati stoikiometrik menghasilkan CO yang lebih reaktif terhadap oksidasi katalitik. Sebaliknya, reduksi HC tertinggi justru pada RON 90 (48,65%), menurun pada RON 92 (43,66%) dan RON 98 (42,94%), rata-rata 45,08%. Hal ini berkaitan langsung dengan data XRD yang mengidentifikasi saluran mikropori *10-membered ring* pada $2\theta = 9,98^\circ$ dengan *d-spacing* 8,865 Å — dimensi pori ini lebih kompatibel dengan HC rantai pendek yang mendominasi RON 90 dibandingkan senyawa aromatik besar pada RON tinggi.

Hasil perbandingan XRD sebelum (sampel 088) dan sesudah pengujian (sampel 089) mengonfirmasi bahwa puncak utama *clinoptilolite* pada $2\theta \approx 22,4^\circ$ mempertahankan intensitas relatif 100% dengan FWHM tetap sempit, dan fasa dominan sesudah pengujian masih teridentifikasi sebagai *heulandite-clinoptilolite* sebesar 37%. Artinya, efektivitas katalis pada ketiga variasi RON didukung oleh stabilitas struktural material yang terjaga secara kristalografis sepanjang pengujian.

V.2. Saran

Penelitian ini merupakan langkah awal pengembangan *catalytic converter* berbasis material lokal sebagai alternatif logam mulia konvensional. Hasil yang diperoleh menunjukkan efektivitas yang terukur, namun sejumlah aspek masih terbuka untuk dikembangkan lebih lanjut oleh peneliti berikutnya.

1. Optimalisasi Preparasi Material Katalis

Penghalusan zeolit secara manual menghasilkan ukuran partikel yang tidak seragam dan berpotensi memengaruhi konsistensi luas permukaan aktif. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan *ball mill* dengan parameter terstandar dan dilengkapi analisis distribusi ukuran

partikel sebelum perakitan, guna menghasilkan dasar perbandingan antarvariasi material yang lebih valid.

2. Perluasan Variabel dan Parameter Pengujian

Penelitian lanjutan disarankan menyertakan pengukuran NO_x secara eksplisit, mengingat zeolit *clinoptilolite* berpotensi mereduksinya melalui mekanisme *Selective Catalytic Reduction* (SCR) yang didukung oleh keberadaan situs aktif Cu^{2+} pada struktur aluminosilikat (Kaspar et al., 2003). Pengujian pada kondisi berbeban dengan variasi torsi juga perlu dilakukan agar data emisi lebih representatif terhadap kondisi operasi nyata.

3. Pendalaman Karakterisasi Material

Data XRD dalam penelitian ini telah mengonfirmasi stabilitas struktur kristal, namun belum menjelaskan distribusi logam aktif pada permukaan pori. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan karakterisasi SEM-EDX untuk mengamati sebaran unsur Cu dan Zn, serta analisis BET untuk mengukur perubahan luas permukaan spesifik sebelum dan sesudah pengujian. Kombinasi ketiganya akan memberikan pemahaman mekanistik yang jauh lebih komprehensif.

4. Pengembangan Desain dan Konfigurasi Katalis

Variasi sistematis jumlah pelat, jarak antarpelat, dan orientasi susunan material perlu diteliti untuk menentukan konfigurasi optimal dengan efisiensi konversi tertinggi dan *back pressure* terendah. Pendekatan ini dapat diperkuat dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) sebelum fabrikasi fisik dilakukan, sehingga alokasi sumber daya penelitian menjadi lebih efisien.

5. Uji Ketahanan dan Kelayakan Penerapan

Paparan suhu tinggi secara berkelanjutan berpotensi menyebabkan *sintering* logam aktif dan penyempitan pori zeolit seiring waktu. Penelitian lanjutan perlu merancang uji durabilitas melalui simulasi siklus panas-dingin berulang untuk menilai kestabilan kinerja katalis. Apabila hasilnya memadai, teknologi ini berpotensi dikembangkan menjadi produk *aftermarket* terjangkau bagi kendaraan niaga tua di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Cataldo, E., Salvi, L., Paoli, F., Fucile, M., Masciandaro, G., Manzi, D., Masini, C. M., & Mattii, G. B. (2021). Application of Zeolites in Agriculture and Other Potential Uses: A review. *Agronomy*, 11(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081547>
- Cholilulloh, M. S., & Warju. (2014). Pengaruh Metallic Catalytic Converter Tembaga Berlapis Krom dan Air Induction System (AIS) terhadap Reduksi Emisi Gas Buang Yamaha New Jupiter MX. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 03(02), 104–113.
- Daryono, M., & Darmanto, S. (2022). Penambahan Katalik Konverter Plat Tembaga Berbentuk Spiral Terhadap Emisi Gas Buang Motor Bakar Menggunakan Gasboard 5020. *Jurnal Mekanova: Mekanikal, Inovasi Dan Teknologi*, 8(2), 294–303.
- Fu, W., & Li, Y. (2024). Fabrication, Processing, Properties, and Applications of Closed-Cell Aluminum Foams: A Review. *Materials*, 17(3), 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma17030560>
- Hamid, A., Diah Wilujeng, A., Rohman, A., Rohmah, F., Nurul Khalifah, S., & Abdullah, M. (2021). The Reduction of CO and SO₂ by Natural Zeolites in Catalytic Converter of Diesel Engine. *Proceedings of the International Conference on Innovation in Science and Technology (ICIST 2020)*, 208, 162–167.
- Hamid, M. A. A., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., & Rezan, S. A. (2020). Optimization and Analysis of Zeolite Augmented Electrocoagulation Process in the Reduction of High-Strength Ammonia in Saline Landfill Leachate. *Water (Switzerland)*, 12(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w12010247>
- Irawan, R. B., Purwanto, & Hadiyanto. (2013). Karakterisasi Katalis Tembaga pada Catalytic Converter untuk Mengurangi Emisi Gas Carbon Monoksida Motor Bensin. *TRAKSI*, 13(2), 52–62. <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/jtm/article/view/1039>
- Kaspar, J., Fornasiero, P., & Hickey, N. (2003). Automotive Catalytic Converters: Current Status and Some Perspectives. *CATALYSIS TODAY*, 77(4), 419–449. <https://doi.org/10.1177/00368504211025933>

- Kritsanaviparkporn, E., Baena-Moreno, F. M., & Reina, T. R. (2021). Catalytic Converters for Vehicle Exhaust: Fundamental Aspects and Technology Overview for Newcomers to the Field. *Chemistry (Switzerland)*, 3(2), 630–646. <https://doi.org/10.3390/chemistry3020044>
- Lapisa, R., Sugiarto, T., & Halim, A. G. (2019). Efek Geometri pada Katalis dalam Penurunan Level Emisi Gas Buang Kendaraan. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 2(1), 1–8. <https://doi.org/10.24036/jptk.v2i1.4523>
- Laurenzi, M., & Spigler, R. (2018). Geometric Effects in the Design of Catalytic Converters in Car Exhaust Pipes. *Mathematics-in-Industry Case Studies*, 9(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s40929-018-0018-2>
- Milovanović, J. A., Stensrød, R. E., Myhrvold, E. M., Tschentscher, R., Stöcker, M., Lazarević, S. S., & Rajić, N. Z. (2015). Modification of Natural Clinoptilolite and ZSM-5 with Different Oxides and A Study of the Obtained Products in Lignin Pyrolysis. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 80(5), 717–729. <https://doi.org/10.2298/JSC310714109M>
- Pavelic, S. K., Medica, J. S., Gumbarevic, D., Filosevic, A., Przulj, N., & Pavelic, K. (2018). Critical Review on Zeolite Clinoptilolite Safety and Medical Applications in vivo. *Frontiers in Pharmacology*, 9(1350), 1–15. <https://doi.org/10.3389/fphar.2018.01350>
- Prasetyo, D., Muhammad, A., Baihaqi, M., Abdillah, H., & Supraptiningsih, L. (2022). Pengaruh Nilai RON pada Bahan Bakar Jenis Bensin terhadap Emisi Gas Buang. *CERMIN: JURNAL PENELITIAN*, 6(2), 561–571.
- Rahmandhika, A., Mokhtar, A., Defantyan, E. D., & Lutfi, V. T. (2024). Pengaruh Penambahan Catalytic Converter Berbahan Ceramic Cordierite Honeycomb dan Sponge steel terhadap Emisi Gas Buang Kendaraan. *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah Dan Teknologi Teknik Mesin*, 8(2), 117–122. <https://doi.org/10.32528/jp.v8i2.1429>
- Rajakrishnamoorthy, P., Elavarasan, G., Karthikeyan, D., & Saravanan, C. G. (2019). Emission Reduction in SI Engines by using metal doped Cu-ZSM5 and Ce.Cu-ZSM5 Zeolite as Catalysts. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9), 1423–1427. <https://doi.org/10.35940/ijitee.h6993.078919>
- Ranganathan, P., & Rakesh, A. (2018). Study Designs : Part 1 – Descriptive studies: An Overview and Classification. *Perspectives in Clinical Research*, 18(9), 184–

186. <https://doi.org/10.4103/picr.PICR>
- Ronaldo, R. (2008). *Zeolit Alam dan Chitosan sebagai Adsorben Catalytic Converter Monolitik untuk Pereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor*.
- Senila, M., Cadar, O., Begy, R. C., Tanaselina, C., Simedru, D., & Roman, C. (2025). Silver-Exchanged Clinoptilolite-Rich Natural Zeolite for Radon Removal from Air. *Materials*, 18(7), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma18071465>
- Shinjoh, H. (2018). Automotive Exhaust Catalyst for Clean Air: Progress of the Three-way Catalyst and Supporting Catalyst Technologies Special Review. *R&D Review of Toyota CRDL*, 49(4), 47–60. <http://www.tytlabs.com/review/>
- Siregar, A., Syam, A., & Mustafa, M. (2019). Rancangan Media Adsorpsi Zeolit Alam sebagai Adsorben Emisi Gas Mesin Otomotif. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 3(1), 64. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v3i1.2499>
- Syahruji, S., & Ghofur, A. (2019). Penggunaan Kuningan sebagai Bahan Catalytic Converter Terhadap Emisi Gas Buang dan Performa Mesin Suzuki Shogun Axelo 125. *Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematika*, 4(2), 67–78. <https://doi.org/10.20527/sjmekinematika.v4i2.118>
- W, W., & Pulkrabek. (2004). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*.
- Widihati, I. A. G., Apriliyanto, I., & Sibarani, J. (2021). Karakterisasi Zeolit Mangan Termodifikasi TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Filter Gas Buang Kendaraan Bermotor dalam Penurunan Kadar Gas CO, HC, dan Pb. *Jurnal Kimia*, 107. <https://doi.org/10.24843/jchem.2021.v15.i01.p15>