

Systematic Review Desain Substrat dan Material Catalytic Converter Terhadap Efektivitas Reduksi Emisi Gas Buang pada *Internal Combustion Engine*

Ilyas Sofana¹, Moh. Arif Batutah²,

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surabaya
Jl. Sutorejo No. 59, Surabaya, Indonesia
E-mail: ¹ilyas_sofana@ft.um-surabaya.ac.id.

Submitted Date: Februari 28, 2025

Reviewed Date: Maret 04, 2025

Revised Date: Maret 05, 2025

Accepted Date: Maret 07, 2025

Abstract

The use of fossil fuels in Internal Combustion Engines has a very serious impact on the environment. The strategy to minimize the impact is by applying a catalytic converter (CC) to reduce the exhaust gases. This study uses the meta-synthesis systematic review method, which is a qualitative systematic review method aimed at collecting and extracting information from the analyzed articles. The data in this study includes 22 international journal articles indexed in Scopus ranked Q4-Q1, conference proceedings, and book chapters related to substrate design and CC materials on the effectiveness of exhaust gas reduction. The review results were discussed in depth, leading to the insight that the design of the substrate and CC material has a varied impact on the effectiveness of exhaust gas reduction in Internal Combustion Engines.

Keywords: Catalytic Converter, design, materials, exhaust gas reduction

Abstrak

Penggunaan bahan bakar fosil pada *Internal Combustion Engine* memberikan dampak yang sangat serius terhadap lingkungan. Strategi dalam meminimalisir dampak tersebut adalah dengan pengaplikasian *catalytic converter* (CC) untuk mereduksi gas buang tersebut. Studi ini menggunakan metode sistematik review meta-sintesis, yaitu metode tinjauan sistematis kualitatif yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mengekstrak informasi dari artikel yang dianalisis. Data dalam penelitian ini meliputi 22 artikel jurnal internasional terindeks Scopus peringkat Q4-Q1, *conference prosiding* serta *book chapter* terkait desain substrat dan material CC terhadap efektivitas reduksi gas buangnya. Hasil ulasan dibahas secara mendalam sehingga diperoleh *insight* bahwasanya desain substrat dan material CC memberikan dampak yang variatif terhadap efektivitas reduksi gas buang *Internal Combustion Engine*.

Kata kunci: Katalis Konverter, desain, material, emisi gas buang

I. Pendahuluan

Penggunaan bahan bakar fosil di sektor transportasi telah meningkatkan emisi gas rumah kaca selama beberapa dekade terakhir (EPA, 2024; Hannappel, 2017). Bahan bakar fosil seperti bensin atau solar melepaskan gas buang yang tersusun dari karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), karbon monoksida (CO) dan hidrofluorokarbon (HFC) (Kroeze, 1994). Reduksi dari emisi ini adalah tantangan besar untuk memutus siklus perubahan iklim (Baruch, 2008).

Beberapa strategi telah diusulkan untuk memecahkan masalah emisi di sektor transportasi. Dalam hal ini, penggunaan

Catalytic Converter (CC) yang bertujuan untuk mengurangi emisi gas buang pada *internal combustion engine* dalam hal ini adalah kendaraan bermotor yang menjadi sumber polusi berbahaya bagi lingkungan. CC mengubah emisi gas buang tersebut menjadi senyawa yang tidak berbahaya, dan hingga saat ini CC telah diaplikasikan secara meluas (Laskar, A., & Liang, 2018). Di antara beberapa jenis CC, *three way catalytic converter* (TWC) telah menjadi yang terunggul teknologi sejak tahun 1970 (Zeng et al., 2018). TWC digunakan untuk mereduksi emisi gas polutan yang terkandung pada gas buang sebagai hasil dari *internal combustion engine* (Avneet

Kahlon, 2023). TWC dipilih dibandingkan *Two Way Catalytic Converter* pada mobil karena bisa mengurangi emisi gas N₂O, serta emisi gas CO dan sisa pembakaran hidrokarbon. *Two Way Catalytic Converter* hanya akan mampu mengurangi emisi gas CO dan hidrokarbon yang tidak terbakar, akibat katalis yang digunakan dan reaksi yang terjadi (Avneet Kahlon, 2023). Dengan menggunakan konsep katalisis heterogen dan laju reaksi, diaplikasikan model katalis sarang lebah dengan struktur keramik (biasanya dilapisi dengan Al₂O₃), yang bertindak sebagai pendukung katalis. Alasan utamanya adalah memfasilitasi kontak antara aliran gas buang dan permukaan katalis (Brown, T. E., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., Woodward, P., & Stoltzfus, 2018). Struktur keramik sarang lebah adalah katalis dukungan yang menyediakan luas permukaan yang besar, agar reaksi redoks dapat berlangsung secara optimal dan efisien. Luas permukaan, suhu dan juga tekanan yang besar menjadi beberapa faktor utama yang memfasilitasi laju reaksi menjadi lebih tinggi (Clark, 2003). Strukturnya kemudian dilapisi dengan larutan yang mengandung nitrat logam mulia yang berbeda seperti paladium nitrat, rhodium nitrat dan platinum nitrat (Milton, 1998). Struktur sarang lebah memfasilitasi aliran gas melalui CC dan mengontrol *pressure drop*.

CC saat ini telah banyak digunakan secara masif dan memiliki nilai komersial, pengkajian tentang aspek fundamental dan teknologinya telah dilakukan pada riset sebelumnya (Farrauto et al., 2019; Venkateswarlu et al., 2020), (Mahyon et al., 2019). Pembahasan secara detail tentang desain substrat dan material CC terhadap efektivitas reduksi emisi gas buang perlu dijelaskan untuk memberikan gambaran dan pemahaman kepada masyarakat pengguna kendaraan otomotif yang merupakan. Studi *systematic review* desain dan material substrat CC diharapkan dapat mengakomodir masyarakat untuk memahami dengan jelas seperti apa desain dan material CC serta efektivitasnya

terhadap reduksi emisi gas buang pada *internal combustion engine*.

II. Metode Penelitian

Studi ini menggunakan metode penelitian sistematik review meta-sintesis, yaitu metode tinjauan sistematis kualitatif yang bertujuan untuk mengumpulkan dan mengekstrak informasi dari artikel yang dianalisis (Francis, C., 2006). Data yang dipaparkan untuk desain substrat dan material CC serta efektivitas reduksi emisi gas buang dalam penelitian ini diperoleh dari 22 artikel jurnal internasional terindeks Scopus peringkat Q4-Q1 dan *conference prosiding* terbitan 10 tahun terakhir serta *book chapter*.

Proses meta-sintesis dilakukan dengan beberapa alur diantaranya; (1) merumuskan variabel penelitian yang relevan, (2) melakukan penelusuran literatur untuk tinjauan sistematis, (3) menyaring dan memilih artikel penelitian yang sesuai, dan (4) menganalisis dan mensintesis temuan secara kualitatif (Siswanto, 2010).

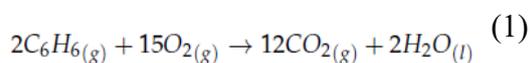
III. Hasil dan Pembahasan Prinsip Kerja *Catalytic Converter*

Internal Combustion Engine menggunakan langkah buang untuk mengeluarkan gas sisa melalui sistem knalpot, di mana emisi berbahaya kemudian melewati perangkat yang mirip dengan peredam suara, yaitu *Catalytic Converter* (Brown, T. E., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., Woodward, P., & Stoltzfus, 2018; Venkateswarlu et al., 2020). Komponen dari gas buang terdiri dari hidrokarbon yang tidak terbakar, NO, dan CO (Brown, T. E., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., Woodward, P., & Stoltzfus, 2018). Seperti yang disebutkan di atas, tujuan utama dari CC adalah untuk mengurangi emisi berbahaya melalui reaksi kimia yang dikendalikan oleh CC tersebut.

Prosedur awal reaksi dalam CC adalah adsorpsi reaktan, di mana adsorpsinya mengacu pada ikatan molekul dengan permukaan (Brown, T. E., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C.,

Woodward, P., & Stoltzfus, 2018). Adsorpsi akan terjadi karena reaktivitas tinggi dari atom/ion di permukaan padatan, memfasilitasi aliran gas melalui konverter dan mengontrol penurunan tekanan. Karena komposisi gas buang juga mengandung gas oksigen dan gas pencemar (CO, N₂O, dan hidrokarbon yang tidak terbakar), atom oksigen tersedia untuk bereaksi dengan gas pencemar lainnya yang teradsorpsi. Dalam kasus CO, atom oksigen bereaksi dengan CO menghasilkan CO₂, dan sebagai tahapan terakhir dalam CC, CO₂ teradsorpsi dari permukaan logam dan dilepaskan sebagai produk dari CC. Konsep ini berlaku baik untuk N₂O maupun hidrokarbon yang tidak terbakar. Secara singkat, reaksi redoks simultan dalam konverter TWC terdiri dari sistem tiga arah yang mengontrol emisi melalui oksidasi hidrokarbon yang tidak terbakar dan CO, serta penurunan NO_x (Kritsanaviparkporn et al., 2021). Dengan demikian, prinsip *Three Way Catalytic Converter* akan melakukan fungsi sebagai berikut:

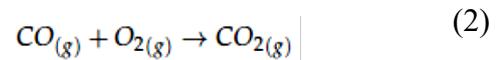
1. Oksidasi hidrokarbon yang belum terbakar, di mana gas oksigen hadir dalam gas buang, menyebabkan ikatan-ikatan tersebut terputus dan atom oksigen bereaksi dengan hidrokarbon yang belum terbakar untuk menghasilkan CO₂ dan uap air sebagai produk akhir. Sebuah contoh adalah oksidasi benzena (Persamaan (1)):



Dalam reaksi ini, paladium atau platinum akan digunakan. Meskipun paladium dan platinum memiliki sifat kimia yang serupa, paladium lebih diutamakan dibandingkan platinum karena penurunan efektivitas konverter, yang berarti platinum terdeaktivasi lebih cepat daripada paladium, sehingga efisiensi konverter akan menurun dengan sangat cepat (Kritsanaviparkporn et al., 2021).

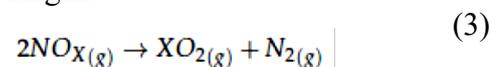
2. Oksidasi CO menjadi CO₂ dengan menggunakan katalis platinum atau nitrat paladium. Gas oksigen yang

terdapat dalam gas buang diadsorpsi ke permukaan keramik sarang lebah, sehingga ikatan oksigen melemah dan atom oksigen bereaksi dengan CO untuk menghasilkan CO₂ (Persamaan (2)).



Baik platinum maupun paladium dapat digunakan sebagai katalis untuk reaksi ini, karena keduanya memiliki sifat fisik dan kimia yang sangat mirip.

3. Reduksi NO_x bertujuan untuk menghasilkan nitrogen dan gas oksigen yang stabil (Persamaan (3)). Karena ini adalah reaksi reduksi, rhodium digunakan sebagai gantinya. Rhodium biasanya dicampur dengan platinum atau paladium karena merupakan jenis logam mulia yang langka.



Logam rhodium digunakan untuk reaksi reduksi ini karena ia merupakan agen pengoksidasi (zat yang kehilangan elektron), dibandingkan dengan agen reduksi lainnya, yaitu paladium dan platinum. Untuk reaksi redoks ini, jumlah gas oksigen yang ada dalam gas buang adalah parameter yang sangat penting. Jika terdapat konsentrasi gas oksigen yang lebih tinggi dalam gas buang daripada yang dibutuhkan, sistem tersebut didefinisikan sebagai lean, sehingga oksidasi hidrokarbon yang tidak terbakar dan CO akan lebih mungkin terjadi, karena terdapat lebih sedikit bahan bakar dalam mobil. Namun, jika terdapat konsentrasi gas oksigen yang lebih rendah dalam gas buang, sistem tersebut didefinisikan sebagai kaya, sehingga pengurangan N₂O lebih mungkin terjadi karena terdapat konsentrasi bahan bakar yang lebih tinggi dari yang dibutuhkan. Oleh karena itu, efisiensi CC tidak selalu 100% efisien (Avneet Kahlon, 2023).

Desain Substrat *Catalytic Converter*

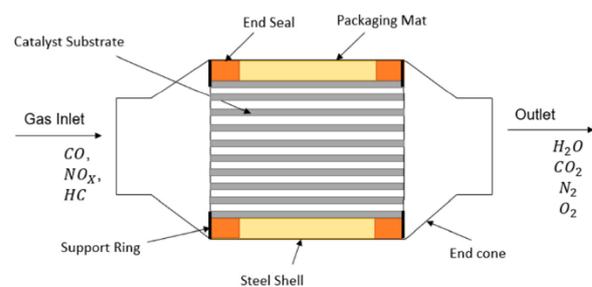
Pada bagian ini, desain substrat mengacu pada karakteristik geometris dan pilihan material untuk substrat. Sebagian besar CC mobil memiliki desain struktur monolit, yang dilapisi dengan lapisan alumina. Struktur monolit ini disebut sebagai inti dari CC, dimana inti biasanya merupakan monolit keramik dengan konfigurasi *honeycomb*. Tujuan dari struktur *honeycomb* adalah untuk memungkinkan terjadinya katalis heterogen di permukaan strukturnya. Monolit logam terbuat dari FeCrAl yang memiliki ketahanan panas tinggi. Lapisan dasar juga dapat terdiri dari aluminium oksida, silikon dioksida, titanium dioksida, atau campuran silika dan alumina (Kritsanaviparkporn et al., 2021).

Efisiensi CC secara signifikan dipengaruhi oleh karakteristik geometris monolit *honeycomb*. Meskipun memiliki ketebalan dinding yang lebih tinggi (0,178 mm), monolit keramik ekstrusi yang terbuat dari kordierit ($2\text{MgO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 5\text{SiO}_2$) paling banyak digunakan karena biaya yang relatif murah untuk pembuatannya (Jan Kašpar, Paolo Fornasiero, 2003). Monolit logam digunakan dalam kendaraan berkinerja tinggi (Farrauto & Heck, 1999) dan memiliki keuntungan besar berupa area frontal terbuka yang sangat tinggi (91% area terbuka) sebagai konsekuensi dari kemampuan untuk memproduksi ketebalan dinding yang sangat rendah (0,050 mm), yang memberikan area permukaan kontak aliran yang lebih tinggi dan menawarkan resistensi aliran (tekanan balik) yang lebih rendah (Santos & Costa, 2008). Keuntungan lain dari substrat logam termasuk konduktivitas termal yang tinggi dan kapasitas panas yang rendah, yang memungkinkan pemanasan yang sangat cepat dan waktu pemanasan yang lebih singkat.

Catalytic Converter menggunakan katalis logam untuk memfasilitasi reaksi yang diinginkan pada suhu yang lebih rendah. Katalis logam umum yang digunakan bisa berupa logam dasar (seperti krom) dan logam mulia, seperti platinum,

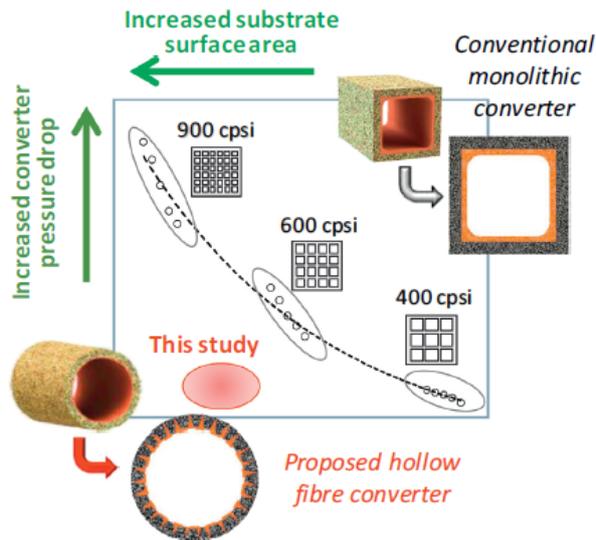
paladium, dan rhodium (Kritsanaviparkporn et al., 2021). Katalis ini dapat digunakan untuk reaksi redoks; reduksi N_2O dan oksidasi hidrokarbon yang tidak terbakar serta CO. Jika logam platinum, paladium, dan rhodium digunakan, ini dapat menjadi bagian dari Solusi *Platinum Group Metal* (PGM), yang juga digunakan untuk melapisi struktur sarang lebah. Ini akan memungkinkan terjadinya katalisis heterogen di permukaan inti, yang memungkinkan produksi gas yang kurang beracun (CO_2 , nitrogen, dan uap air) (Kritsanaviparkporn et al., 2021).

Komponen lain dari katalisator adalah *casing* metalnya yang mengelilingi inti dari CC tersebut. *Casing metal* ini mengarahkan aliran gas buang melalui lapisan katalis. *Casing metal* biasanya terbuat dari *stainless steel*, tetapi sejak CC dengan suhu rendah digunakan, *stainless steel* mungkin tidak diperlukan untuk konstruksi CC (Kritsanaviparkporn et al., 2021). Berikut adalah diagram TWC yang ditampilkan pada gambar 1.



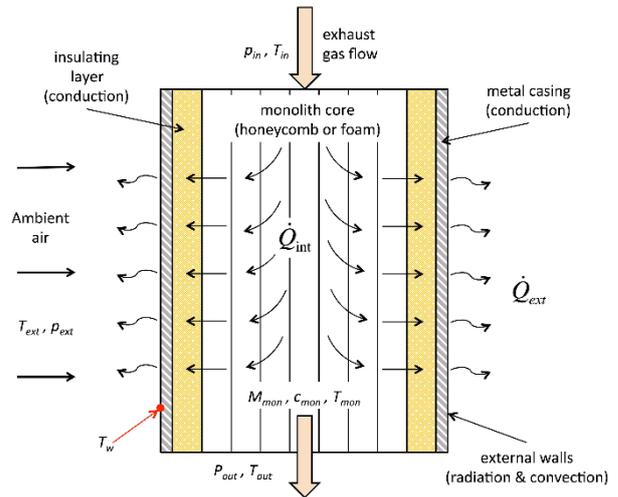
Gambar 1. *Automobile catalytic converter*. Diadaptasi dari (Kritsanaviparkporn et al., 2021)

Sebuah substrat serat berongga keramik mikrostruktur baru yang diimpregnasi dengan kurang dari 0,7 persen berat paladium (Pd) sebagai katalis telah diteliti oleh Mahyon et al. (Mahyon et al., 2019). Area permukaan geometris yang tinggi, *pressure drop* yang rendah, dan suhu pemicu oksidasi CO yang sebanding dengan rekan-rekan komersialnya adalah beberapa keuntungan yang mereka temukan.



Gambar 2. Perbandingan skematik diagram antara *conventional catalytic converter* dengan *hollow fibre converter*. Diadaptasi dari (Mahyon et al., 2019)

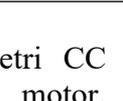
Gambarotta et al. (Gambarotta et al., 2019) melakukan riset tentang komparasi simulasi numerik antara dua struktur busa sel terbuka dan substrat sarang lebah yang bertujuan untuk menyelidiki dampak substrat busa terhadap kinerja mesin dan untuk mengatasi beberapa kelemahan yang terkait dengan monolit sarang lebah, termasuk transfer massa yang rendah dan homogenitas aliran yang buruk. Mereka menyimpulkan bahwa busa, dibandingkan dengan *honeycomb*, lebih cepat memanaskan dan mendinginkan, yang memudahkan untuk mencapai suhu nyala dengan cepat dan meningkatkan efisiensi konversi, serta memiliki sifat transfer massa yang lebih tinggi yang memungkinkan konverter yang lebih kompak, dan penurunan tekanan yang lebih tinggi yang mengakibatkan peningkatan total konsumsi bahan bakar yang lebih rendah dari 0,20%.



Gambar 3. Skematik diagram untuk aliran dan proses perpindahan panas pada *catalyst core*. Diadaptasi dari (Gambarotta et al., 2019)

Srinivasa dan Venkateswara (Srinivasa Chalapathi & Venkateswara Rao, 2019) menguji marmer tanah liat sebagai substrat untuk CC, karena porositasnya yang tinggi memberikan kapasitas penyerapan yang baik untuk pelapisan kimia dan permukaan bulatnya memberikan area kontak gas yang maksimal. Pada saat yang sama, celah antara bola-bola yang berurutan memfasilitasi pergerakan gas, menyebabkan tekanan balik yang minimal. Para penulis juga menunjukkan bahwa geometri heksagonal adalah yang terbaik untuk saluran substrat karena menghasilkan penurunan tekanan minimum dibandingkan dengan geometri segitiga, persegi, dan lingkaran. Pada pengujian gas analyzer kandungan gas buang CO berhasil mengalami reduksi sebesar 50%, HC 61.5% dan NO_x 79.7%.

Studi oleh Lapisa et al. (Lapisa et al., 2020) juga menunjukkan bahwa parameter geometris secara signifikan mempengaruhi konversi HC dan CO. Mereka menemukan bahwa penggunaan pelat perforasi lipat sebagai substrat menghasilkan kinerja yang baik dalam hal penurunan tingkat HC (93,6%) dan CO (0,56%), karena bentuk pelat zig-zag dalam model mereka meningkatkan kontak permukaan dan intensitas tumbukan antara gas buang dengan CC.

Case	Remark	Catalyst 3D representation	Element of catalyst
1	Exhaust system without catalyst	No catalytic converter	No catalyst element
2	Catalyzed exhaust system with flat perforated plate type		
3	Catalyzed exhaust system with folded perforated plate type		
4	Catalyzed exhaust system with rolled brass sheet type		

Gambar 4. Variasi desain geometri CC untuk system *exhaust* pada motor. Dladaptasi dari (Lapisa et al., 2020)

Manufaktur CC dengan penambahan aditif digunakan untuk menyelidiki pengembangan pada geometri internal substrat. Misalnya, substrat kisi berlian yang digunakan sebagai aditif telah dibandingkan dengan desain katalis sarang lebah konvensional 400 *Cell Per Square Inch* (cps); suhu pemanasan awal CO, HC, dan NO 3D-printed substrat meningkat secara signifikan (Kovacev et al., 2023).

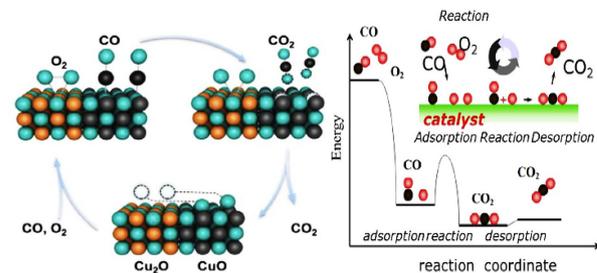
Yang et al. (Yang, X.; Zuo, Q.; Chen, W.; Guan, Q.; Shen, Z.; Li, Q.; Xie, 2023) menyarankan konstruksi monolit baru dengan kerapatan sel yang berubah secara seragam. Ini akan meningkatkan keseragaman medan aliran dan konversi NO hingga 13,66%.

Material Catalytic Converter

Lapisan tipis bahan berpori, seperti $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (sejenis alumina), diaplikasikan pada dinding saluran CC sebagai penyangga. Lapisan ini, yang disebut sebagai lapisan *washcoat*, digunakan untuk mendispersikan material CC, terutama logam mulia yang mempromosikan reaksi oksidasi dan reduksi dengan efisiensi konversi yang sangat tinggi. Meningkatkan muatan logam mulia adalah cara yang sederhana untuk meningkatkan efisiensi CC, terutama pada suhu rendah. Namun, penggunaan komposisi logam mulia yang tinggi meningkatkan harga CC dan memfasilitasi sintering pada suhu tinggi, yang mengarah pada deaktivasi CC (Robles-Lorite et al., 2023).

Logam mulia yang biasanya berfungsi sebagai bahan katalis adalah paladium dan platinum, yang memungkinkan oksidasi HC dan CO, serta rhodium untuk reduksi NOx. Biaya produksi yang tinggi dari logam-logam ini, akibat kelangkaannya, telah mendorong para peneliti untuk mempelajari bahan katalis alternatif. Menggunakan tembaga (Cu) sebagai bahan katalis alternatif yang murah adalah salah satu metode yang paling banyak diteliti untuk pengurangan emisi (Robles-Lorite et al., 2023).

Dey dan Chandra (Dey & Chandra Dhal, 2020) meninjau penggunaan katalis tembaga oksida untuk mengurangi emisi CO dan menyimpulkan bahwa tembaga oksida efektif dalam oksidasi CO. Namun, ukuran kristal secara signifikan mempengaruhi oksidasi CO. Peningkatan suhu juga mendorong laju konversi CO kecuali jika menyebabkan penggumpalan katalis.



Gambar 5. *Adsorption-desorption* gas CO melalui katalis *copper oxide*. Diadaptasi dari (Dey & Chandra Dhal, 2020)

Venkatesan et al. (Venkatesan et al., 2017) mempelajari pengaruh katalis tembaga oksida terhadap HC, NOx, CO, dan asap, dan mengamati pengurangan maksimum pada beban penuh: 32% pada HC dan asap, 61% pada NOx, dan 21% pada CO ketika mempertimbangkan emisi tanpa CC sebagai *baseline*.

Kombinasi tembaga dengan logam lainnya juga telah diteliti. Chafidz et al. (Chafidz et al., 2018) menguji logam tembaga-zinc (Zn) sebagai katalis, mengamati pengurangan emisi CO dan HC masing-masing hingga 47,71% dan 55,34%. Selain itu, energi aktivasi oksidasi CO dan HC ditemukan masing-masing sebesar 132,54 kJ/mol dan 37,55 kJ/mol.

Efisiensi pelat tembaga yang dilapisi krom (Cu + Cr) sebagai katalis dianalisis oleh (Warju et al., 2018), yang menemukan bahwa kombinasi logam ini mengurangi CO dan HC masing-masing sebesar 95,35% dan 79,28%.

Campuran oksida Cu dan mangan (Mn), (CuMnOx), adalah katalis yang paling dikenal untuk oksidasi CO pada suhu rendah (Patel et al., 2022)



Gambar 6. *Chrome-coated copper* (Cu+Cr) *catalytic converter*. Diadaptasi dari (Warju et al., 2018)

Kalsium titanium oksida (CaTiO₃), yang dikenal sebagai perovskit, menunjukkan kinerja yang baik sebagai katalis biaya rendah karena aktivitas dan stabilitasnya yang tinggi pada berbagai suhu, yang memberikan efisiensi konversi CO dan HC masing-masing hingga 77,89% dan 68,50% (Patel et al., 2022).

Barium oksida (BaO) dan magnesium oksida (MgO) diuji sebagai katalis, yang menghasilkan pengurangan emisi CO dan HC tetapi tidak pada emisi NO_x. Kedua katalis mencapai pengurangan emisi HC yang signifikan dan serupa. Emisi CO juga berkurang, tetapi katalis BaO memiliki efisiensi konversi yang lebih baik (Senthil Kumar et al., 2022). Barium klorida (BaCl₂) juga menunjukkan potensi untuk mengurangi emisi HC dan NO_x, dengan pengurangan masing-masing sebesar 60,2% dan 50%, seperti yang diamati oleh (Karthé & Prasanna, 2017).

Studi lain tentang produksi CC monolit menggunakan material berbiaya rendah juga telah dilakukan diantaranya oleh Ghofur et al. (Ghofur et al., 2018), yang menguji abu terbang yang dihasilkan dalam industri batubara sebagai katalis dengan dua tujuan: mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan abu terbang dan

mengurangi emisi gas buang dari mesin. Berdasarkan prototipe yang dikembangkan dari CC yang dikombinasikan dengan sistem injeksi udara, para penulis mengamati pengurangan emisi HC dan CO hingga 48% dan 45%.

Riset tentang penggunaan Substrat CC Zeolit juga telah dilakukan oleh Subramanian dan Gnanasikamani (Subramanian & Gnanasikamani, 2023). Riset tersebut menganalisis efisiensi konversi dari dua zeolit, ZSM 4A dan ZSM 5A, terhadap gas buang dari mesin yang menggunakan campuran diesel dan minyak pirolisis dari limbah plastik. ZSM 5A menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan ZSM 4A karena penguatan struktur pori. Untuk ZSM 5A, emisi NO, HC, dan CO masing-masing berkurang sebesar 18%, 22%, dan 10%, sedangkan untuk ZSM 4A, emisi tersebut berkurang sebesar 12%, 16%, dan 8%.

IV. Kesimpulan

Riset ini memberikan gambaran umum tentang *catalytic converter* dari perspektif *systematic review*. Fungsi CC sangat penting dalam mereduksi emisi gas buang berbahaya yang seharusnya dilepaskan ke atmosfer. *Catalytic Converter* jenis *Three Way Catalytic* lebih direkomendasikan dibandingkan *Two Way Catalytic Converter* karena mereka mampu mereduksi emisi gas buang CO, HC dan NO_x. Persentase reduksi gas buang CO, HC, dan NO_x berkisar antara 21-93% berdasarkan design substrat dan material CC yang telah diujikan. Tantangan masa depan TWC akan sangat terkait dengan kebijakan pengendalian emisi. Meskipun selama beberapa dekade terakhir kemajuan signifikan telah dicapai dalam pengendalian emisi, pembatasan lebih lanjut diperkirakan akan diterapkan dalam beberapa dekade mendatang untuk meningkatkan kualitas udara atmosfer. Dengan demikian, dalam hal ini TWC akan memainkan peran kunci, tantangan-tantangan ini akan mengarah pada pengembangan TWC dan penelitian yang luas (misalnya, katalis dengan perilaku

yang lebih baik pada emisi saat start dingin). Secara keseluruhan, karya ini adalah panduan yang berguna untuk memahami lebih baik tentang konverter TWC, perangkat penting untuk pengendalian lingkungan.

Daftar pustaka

- Avneet Kahlon, T. . (2023). *Catalytic Converters*. Chemistry LibreTexts. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Kinetics/07%3A_Case_Studies-_Kinetics/7.01%3A_Catalytic_Converters](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/07%3A_Case_Studies-_Kinetics/7.01%3A_Catalytic_Converters)
- Baruch, J. J. (2008). Combating global warming while enhancing the future. *Technology in Society*, 30(2), 111–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2007.12.008>
- Brown, T. E., LeMay, H. E., Bursten, B. E., Murphy, C., Woodward, P., & Stoltzfus, M. E. (2018). *Catalytic Converters*. Chemistry: The Central Science; Pearson: London, UK.
- Chafidz, A., Megawati, Widyastuti, C. R., Augustia, V., Nisa, K., & Ratnaningrum. (2018). Application of copper-zinc metal as a catalytic converter in the motorcycle muffler to reduce the exhaust emissions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 167(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/167/1/012014>
- Clark, J. (2003). THE COLLISION THEORY OF REACTION RATES. <https://www.chemguide.co.uk/physical/basicrates/introduction.html>
- Dey, S., & Chandra Dhal, G. (2020). Controlling carbon monoxide emissions from automobile vehicle exhaust using copper oxide catalysts in a catalytic converter. *Materials Today Chemistry*, 17, 100282. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100282>
- EPA. (2024). Carbon Pollution from Transportation 2020. <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/carbon-pollution-transportation>
- Farrauto, R. J., Deeba, M., & Alerasool, S. (2019). Gasoline automobile catalysis and its historical journey to cleaner air. *Nature Catalysis*, 2(7), 603–613. <https://doi.org/10.1038/s41929-019-0312-9>
- Farrauto, R. J., & Heck, R. M. (1999). Catalytic converters: State of the art and perspectives. *Catalysis Today*, 51(3–4), 351–360. (diakses pada 15 Januari 2025)
- Francis, C., B. (2006). *Systematic Reviews of Qualitative Literature*. UK Cochrane Centre.
- Gambarotta, A., Papetti, V., & Dimopoulos Eggenschwiler, P. (2019). *Analysis of the Effects of Catalytic Converter on Automotive Engines Performance Through Real-Time Simulation Models*. *Frontiers in Mechanical Engineering*.
- Ghofur, A., Soemarno, Hadi, A., & Putra, M. D. (2018). *Potential fly ash waste as catalytic converter for reduction of HC and CO emissions*. *Sustainable Environment Research*, 28(6), 357–362.
- Hannappel, R. (2017). *The impact of global warming on the automotive industry*. *AIP Conference Proceedings*, 1871, 1–7.
- Jan Kašpar, Paolo Fornasiero, N. H. (2003). *Automotive catalytic converters: current status and some perspectives*. *Catalysis Today*, Volume 77(4), 419–449.
- Karthe, M., & Prasanna, S. C. (2017). *The mixture of alkaline earth metal and zirconium oxide as a catalyst in catalytic converter*. *Pakistan Journal of Biotechnology*, 14, 168–171.
- Kovacev, N., Doustdar, O., Li, S., Tsolakis, A., Herreros, J. M., & Essa, K. (2023). *The synergy between substrate architecture of 3D-printed catalytic converters and hydrogen for low-*

- temperature aftertreatment systems*. Chemical Engineering Science, 269, 118490.
- 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.
- Kroeze, C. (1994). Nitrous oxide and global warming. 143, 193–209.
- Lapisa, R., Halim, A. G., Sugiarto, T., Arwizet, K., Martias, M., Maksun, H., Krismadinata, K., & Ambiyar, A. (2020). *Effect of geometric parameters on the performance of motorcycle catalytic converters*. Journal of Physics: Conference Series, 1469(1).
- Laskar, A., & Liang, M. C. (2018). *Probing the operational temperatures of vehicular catalytic converters using clumped isotopes in exhaust CO₂*. EGU General Assembly Conference Abstracts, 13284.
- Mahyon, N. I., Li, T., Martinez-Botas, R., Wu, Z., & Li, K. (2019). *A new hollow fibre catalytic converter design for sustainable automotive emissions control*. Catalysis Communications, 120, 86–90.
- Milton, B. E. (1998). Control Technologies in Spark-Ignition Engines. In Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines.
- Patel, K. D., Subedar, D., & Patel, F. (2022). *Design and development of automotive catalytic converter using non-nobel catalyst for the reduction of exhaust emission: A review*. Materials Today: Proceedings, 57, 2465–2472.
- Robles-Lorite, L., Dorado-Vicente, R., Torres-Jiménez, E., Bombek, G., & Lešnik, L. (2023). *Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review*. Energies, 16(18), 1–24.
- Santos, H., & Costa, M. (2008). *Evaluation of the conversion efficiency of ceramic and metallic three way catalytic converters*. Energy Conversion and Management, 49(2), 291–300.
- Senthil Kumar, J., Ramesh Babu, B. R., Sivasaravanan, S., Prabhu, M., Muthu Kumar, S., & Abubacker, M. A. (2022). *Experimental studies on emission reduction in a DI diesel engine by using a nano catalyst coated catalytic converter*. International Journal of Ambient Energy, 43(1), 1241–1247.
- Siswanto. (2010). *Systematic Review Sebagai Metode Penelitian*. Buletin Penelitian Sistem Kesehatan 13, i, 326–333.
- Srinivasa Chalapathi, K., & Venkateswara Rao, T. (2019). *Development of a cost effective catalytic converter for diesel automobiles*. International Journal of Recent Technology and Engineering, 8(3), 2989–2994.
- Subramanian, P., & Gnanasikamani, B. (2023). *Study of 4A and 5A zeolite as a catalyst material in a catalytic converter for NO emission reduction in a CI engine*. Environmental Science and Pollution Research, 30(14), 41726–41740.
- Venkatesan, S. P., Uday, D. S., Hemant, B. K., Kushwanth Goud, K. R., Kumar, G. L., & Kumar, K. P. (2017). *I.C. Engine emission reduction by copper oxide catalytic converter*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 197(1).
- Venkateswarlu, K., Kumar, R. A., Krishna, R., & Sreenivasan, M. (2020). *Modeling and fabrication of catalytic converter for emission reduction*. Materials Today: Proceedings, 33(xxxx), 1093–1099.
- Warju, Harto, S. P., & Soenarto. (2018). *The Performance of Chrome-Coated Copper as Metallic Catalytic Converter to Reduce Exhaust Gas Emissions from Spark-Ignition Engine*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 288(1), 0–15.
- Yang, X.; Zuo, Q.; Chen, W.; Guan, Q.; Shen, Z.; Li, Q.; Xie, Y. (2023). *Improvement of flow field uniformity*

and temperature field in gasoline engine catalytic converter. Applied Thermal Engineering, 230, 120792.

Zeng, F., Finke, J., Olsen, D., White, A., & Hohn, K. L. (2018). *Modeling of three-way catalytic converter performance with exhaust mixtures from dithering natural gas-fueled engines.* Chemical Engineering Journal, 352(November 2017), 389–404.