

REVIEW : CATALITIC CONVERTER BERBAHAN TEMBAGA (Cu) DAN KUNINGAN / BRASS (CuZn) UNTUK MEREDUKSI KARBON MONOKSIDA (CO) DAN HIDROKARBON (HC) EMISI GAS BUANG PADA KENDARAAN BERMOTOR

Eko B Aziz Basyari^{1,3}, Hadi Pranoto²

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Mercu Buana Jakarta

²Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta

³BPLJSKB, Kementerian Perhubungan

*Corresponding author: 55822120003@students.mercubuana.ac.id

Abstract

Motor vehicle exhaust emissions containing carbon monoxide (CO) and hydrocarbons (HC) are a strategic issue for Indonesia, which has not yet set an age limit for motor vehicles. As a control measure, the Indonesian government itself has issued regulations on exhaust gas emission quality standards for motorized vehicles that are used by the public through Regulation of the Minister of Environment and Forestry of the Republic of Indonesia Number 8 of 2023. Catalytic converter technology is the most effective system for reducing CO and HC emissions. Currently, it is from the Platinum Gold Metal (PGM) group, namely Platinum, Palladium, Rhodium which is still very expensive. This article uses a literature review research method with reference sources originating from previous research journals by comparing. This paper will discuss gas emissions, the development of converter catalytic materials and also the effectiveness of converter catalytic materials from the non-PGM metal group, namely Copper (Cu) and Brass/ Brass (CuZn) which has been proven to be able to reduce exhaust gas emissions so that it can be an alternative as a converter catitic at a more affordable price for the wider community.

Keywords: Catalytic Converter, Non Platinum Gold Metal, Vehicle Gas Emmisions.

Abstrak

Emisi Gas Buang Kendaraan bermotor yang mengandung Karbon Monoksida (CO) dan Hidrokarbon (HC) menjadi isu strategis bagi negara Indonesia yang belum menetapkan batas umur kendaraan bermotor. Sebagai langkah pengendalian, pemerintah Indonesia sendiri telah mengeluarkan aturan baku mutu emisi gas buang bagi kendaraan bermotor yang telah digunakan masyarakat melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2023. Teknologi katalitik konverter sebagai sistem yang mereduksi emisi CO, HC yang paling efektif saat ini adalah dari golongan Platinum Gold Metal (PGM) yaitu Platina, Palladium, Rhodium masih sangat mahal. Artikel ini menggunakan metode penelitian literature review dengan sumber referensi yang berasal dari jurnal penelitian terdahulu dengan membandingkan efektifitas bahan katalitik konverter dari golongan logam non PGM yaitu Tembaga (Cu) dan Kuningan/Brass (CuZn) yang sudah terbukti mampu mengurangi kadar emisi gas buang sehingga bisa menjadi alternatif dijadikan katitik konverter dengan harga lebih terjangkau oleh masyarakat luas.

Kata kunci: Katalitik Konverter, Non Platinum Gold Metal, Emisi Gas Buang Kendaraan.

1. Pendahuluan

Dengan statusnya sebagai pusat perkotaan dalam Kawasan Metropolitan Jabodetabek, DKI Jakarta selalu dipadati dengan mobilitas transportasi darat dari berbagai kota satelit di sekitarnya. Hal tersebut dapat meningkatkan emisi gas kendaraan bermotor dan berdampak terhadap penurunan kualitas udara di wilayah DKI Jakarta. Melalui inventarisasi di Provinsi DKI Jakarta, didapatkan

kuantitas emisi dari setiap parameter pengukuran yaitu:

- 1). 4.257 ton *Sulfur Oxide* (SO₂)
- 2). 106.068 ton *Nitrogen Oxida* (NO_x)
- 3). 298.170 ton *Carbon Monoxide* (CO)
- 4). 8.817 ton *Particulate Matter* (PM₁₀), 7.842 ton (PM_{2,5})
- 5). 6.007 ton *Black Carbon*
- 6). 201.927 ton *Non-methane volatile organic compounds* (NMVOCs).

DOI: <http://dx.doi.org/10.24127/trb.v13i1.3077>

Received December 15, 2023; Received in revised form June 02, 2024; Accepted June 04, 2024

Available online June 30, 2024



Dimana sumber emisi sebagian besar berasal dari sector transportasi [1].

Salah satu jenis transportasi paling umum dan memiliki populasi terbanyak adalah sepeda motor. Di Indonesia sendiri jumlah sepeda motor sebesar 120.200.245 unit dan mengalami pertumbuhan sebesar 4,62% dalam 3 tahun terakhir. Sedangkan jumlah sepeda motor [2]RI.

Tabel 1. Jumlah kendaraan bermotor di Indonesia

Jenis Kendaraan	2019	2020	2021
Mobil Penumpang	15.592.419	15.797.746	16.413.348
Bus	231.569	233.261	237.566
Sepeda Motor	5.021.888	5.083.405	5.299.361
Sepeda Motor	112.771.136	115.023.039	120.042.298
Total	133.617.012	136.137.451	141.992.573

Emisi yang dikeluarkan dari gas buang kendaraan bermotor antara lain SO_x, NO_x, CO, HC, dan partikulat debu. Parameter pencemaran udara untuk gas CO dan NO₂ dianalisis karena gas ini memiliki prosentase yang cukup besar dalam pencemaran udara. Gas tersebut cukup berbahaya bagi kesehatan manusia bahkan dapat menyebabkan kematian apabila berada di atas standar baku muku. Sumber utama CO dan NO₂ berasal dari asap kendaraan bermotor. Konsentrasi CO dan NO₂ total yang ada di dalam atmosfer menunjukkan korelasi yang positif dengan kepadatan lalu lintas. Efeknya terhadap kesehatan yaitu CO mempunyai daya ikat yang tinggi terhadap Hb dalam aliran darah sehingga dapat menghalangi masuknya O₂ dalam darah. [3]

Pemerintah melalui Kementerian Lingkungan Hidup telah mengeluarkan aturan terkait Penerapan Baku Mutu Emisi Kendaraan Bermotor Kategori M, Kategori N, Kategori O, Dan Kategori L yang tertuang pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2023. Peraturan ini mengatur baku mutu emisi gas buang bagi kendaraan bermotor secara berkala dan dilakukan penekanan terhadap pelaksanaan pemeriksaan secara berkala.

Tabel 2. Buku mutu emisi gas buang kendaraan bermotor jenis mobil

Kategori	Tahun	Parameter		Metode Uji
		CO	HC	
Berpenggerak motor bakar cetus api (bensin)				
M	<2007	4%	1000ppm	Mesin Idle
	2007 - 2018	1%	150 ppm	
	>2018	0.5%	100 ppm	
N & O	<2007	4%	1000ppm	Mesin Idle
	2007-2018	1%	200 ppm	
	>2018	0.5%	150 ppm	
Berpenggerak motor bakar penyalaaan kompresi (diesel)				
Kategori M, Kategori N dan Kategori O				
JBB ≤ 3,5 ton	<2010			65% HSU
	2010-2021			40% HSU
	>2021			30% HSU
GVW > 3,5 ton	<2010			65% HSU
	2010-2021			40% HSU
	>2021			30% HSU

Tabel 3. Buku mutu emisi gas buang sepeda Motor

Kategori	Tahun Pembuatan	Parameter		Metode Uji
		Karbon Monoksida (CO)	Hidrokarbon (HC)	
Berpenggerak penyalaaan cetus api (bensin)				
Sepeda motor 2 langkah	<2010	4.5%	6000 ppm	Kondisi diam (idle)
		5.5%	2200 ppm	
Sepeda motor 4 langkah	2010 – 2016	4%	1800 ppm	Kondisi diam (idle)
Sepeda motor	>2016	3%	1000 ppm	

Berkaitan Dengan Penerapan Peraturan Kementerian Lingkungan Hidup diatas mengharuskan kendaraan yang telah beroperasi di jalan memenuhi baku mutu yang ditetapkan maka diperlukan peralatan yang mampu mereduksi emisi gas buang karena umur mesin memiliki hubungan yang signifikan terhadap konsentrasi emisi CO dan NO_x, di mana semakin tua umur

mesinnya maka akan semakin tinggi konsentrasi CO dan Nox [4]. Dengan adanya penerapan aturan baru mengenai baku mutu emisi gas buang kendaraan yang telah dioperasikan di jalan raya maka studi dilakukan untuk melihat efektifitas bahan katalitik konverter dari golongan logam non PGM yaitu Tembaga (Cu) dan Kuningan/Brass (CuZn) sehingga masyarakat bisa mendapatkan katalitik konverter untuk mengurangi emisi gas buang kendaraan bermotor yang lebih terjangkau.

2. Konverter Katalitik

Katalitik Konverter adalah perangkat kontrol emisi kendaraan yang mengurangi gas beracun dan polutan dalam gas buang dari mesin pembakaran dalam menjadi polutan yang kurang berbahaya dengan mengkatalisis reaksi redoks. Biasanya, Katalitik Konverter mengandung substrat keramik atau logam yang dilapisi dengan bahan katalis [5].

Katalitik Konverter adalah bagian tak terpisahkan dari setiap sistem pembuangan mobil, yang tujuan utamanya adalah mengurangi emisi gas buang ke atmosfer. Saat ini Katalitik Konverter praktis diterapkan pada semua jenis kendaraan yang diproduksi. Konverter katalitik (Gambar 1) terdiri dari cangkang baja atau keramik yang berbentuk sarang [6].

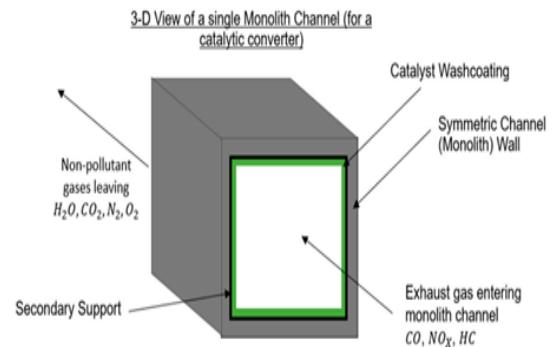


Gambar 1. Skema Katalitik Konverter

Katalitik converter terdiri dari :

- a. Inti katalis (*substrate*)
Biasanya, untuk konverter katalitik, intinya adalah monolit keramik saluran terbuka atau substrat sarang lebah logam yang menyediakan area untuk katalis.[30]. Struktur yang paling umum digunakan, keramik sarang lebah, dirancang untuk memaksimalkan luas permukaan (Gambar 2) [7].

Luas permukaan yang lebih besar akan menghasilkan laju reaksi yang lebih tinggi [8] *Cordierite* ($2\text{MgO}-2\text{Al}_2\text{O}_3-5\text{SiO}_2$) merupakan jenis monolit yang paling umum digunakan karena memiliki luas permukaan yang tinggi, luas bagian depan terbuka yang besar, kapasitas panas yang rendah, dan mekanik yang baik.



Gambar 2. Reaktan melewati saluran monolit tunggal dan keluar sebagai produk. Dinding monolit = warna abu-abu solid, dukungan sekunder = hitam dan lapisan katalis = hijau [9].

- b. *Washcoat*
Washcoat adalah pembawa material katalis digunakan untuk menyebarkan katalis tersebut pada area yang luas sehingga katalis mudah bereaksi dengan gas buang. *Washcoat* merupakan lapisan katalis pendukung diaplikasikan pada permukaan struktur keramik sarang lebah. Lapisan tipis bubuk berbahan dasar basah diaplikasikan langsung pada bahan berpori tinggi, yang mengandung alumina serta berbagai oksida logam atau zeolit [6]. Cerium oksida dicampur dengan bahan katalis karena digunakan untuk meningkatkan stabilitas termal alumina, dan dapat menyimpan dan melepaskan O_2 masing-masing dalam kondisi ramping dan kaya. Lapisan tipis bubuk berbahan dasar basah ini kemudian dikeringkan dan dikalsinasi, yaitu pemanasan padatan hingga suhu tinggi untuk menghilangkan zat yang mudah menguap [10].
- c. Katalis
Logam mulia atau sering disebut dengan Platnium Group Metal (PGM)

adalah katalis heterogen yang paling umum digunakan, karena dapat dibuat lebih tahan panas terhadap penurunan aktivitas suhu rendah. Karakteristik lainnya adalah mereka memberikan aktivasi katalitik yang lebih baik dibandingkan logam dasar. Oleh karena itu, material PGM dalam bentuk larutan, seperti paladium, platina, dan rhodium nitrat, digunakan untuk melapisi permukaan keramik sarang lebah (Milton.1988).

Jenis larutan katalis heterogen ini disebut Larutan PGM, merupakan larutan logam golongan platina yang sangat tahan terhadap serangan kimia dan memiliki ketahanan suhu serta ketahanan korosi yang sangat tinggi [6].

3. Perkembangan Bahan Katalitik Konverter

Katalitik konverter dengan bahan Platinum Group Metal (PGM) memiliki kendala utama diantaranya (Patel et al., 2013):

- a. Material PGM jarang tersedia di kerak bumi dan habis suatu hari nanti.
- b. Biaya ekstraksi material PGM dari dalam tanah masih relative tinggi sehingga menyebabkan peningkatan biaya secara keseluruhan terhadap harga katalitik konverter.

Karena kendala di atas terkait dengan penggunaan material PGM menjadi konverter katalitik mendorong penelitian terkait efisiensi material selain PGM untuk dijadikan bahan utama katalitik konverter dengan kelebihan sebagai berikut:

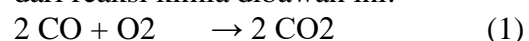
- a. Bahan-bahan yang tidak mulia mudah diperoleh di pasaran bumi.
- b. Biaya bahan non-mulia jauh lebih murah dibandingkan dengan bahan non-mulia bahan mulia dan konverter katalitik dapat dibuat dengan biaya yang sangat rendah.
- c. Suhu pengoperasian konverter katalitik terbuat dari bahan non-mulia rendah dibandingkan dengan bahan yang mulia.

Pada perkembangan baru-baru ini dilakukan komparasi Katalitik Konverter Logam (FeCrAl) and Ceramic Catalytic Converter Emisi gas buang CO menunjukkan bahwa katalitik konverter keramik memiliki konversi yang lebih efisien dibandingkan dengan Katalitik Konverter Logam (FeCrAl) dengan efisiensi konversi tertinggi. 96,88% yang mana pada beban mesin 10% dan putaran 1000 rpm. Sedangkan dalam mereduksi emisi gas HC menunjukkan Katalitik Konverter Keramik lebih efisien dibandingkan dengan Katalitik Konverter Logam (FeCrAl) dimana nilai efisiensi konversi catco keramik paling tinggi pada kecepatan 1000 rpm dan beban mesin 10% sebesar 97,66% [11].

Meskipun bukan logam mulia, tembaga berfungsi sebagai katalis untuk konversi polutan dalam gas buang tetapi dalam proporsi yang terbatas. Meskipun efisiensi konversi konverter katalitik berbasis bahan non PGM meningkat dengan memberikan pemanasan pada konverter katalitik dengan sejumlah kecil pasokan listrik dari baterai mobil. Konverter katalitik yang terbuat dari bahan non mulia memiliki keunggulan yang signifikan seperti biaya yang lebih murah dibandingkan konverter katalitik yang terbuat dari bahan PGM dan suhu pengoperasian yang lebih rendah dibandingkan logam mulia serta ketersediaan bahan non mulia yang mudah [12].

4. Katalitik Konverter Dari Bahan Non PGM

Tujuan reaksi oksidasi pada katalitik konverter adalah untuk mengubah CO dan emisi HC menjadi gas yang tidak terlalu berbahaya seperti karbon dioksida (CO₂) dan uap air (H₂O) [13] dapat dilihat dari reaksi kimia dibawah ini:



dibawah ini akan dijelaskan cara kerja Tembaga (Cu) dan Kuningan/Brass (CuZn) untuk membantu proses oksidasi pada katalitik konverter.

- a. Tembaga (Cu)

- 1) Studi kinetika reaksi tembaga oksidasi terhadap CO

Proses oksidasi senyawa CO yang dibantu oleh aktivitas katalis tembaga. Reaksi oksidasi adalah reaksi pengikatan oksigen, ketika emisi gas buang CO melewati katalis tembaga, yaitu proses reaksi antara CO dan O₂ akan lebih efektif karena karakteristik tembaga sebagai katalis oksidasi, sehingga emisi gas buang CO dapat diubah menjadi gas yang tidak berbahaya yaitu CO₂ [14]. Reaksi oksidasi CO yang dibantu oleh aktivitas katalis tembaga.

- 2) Studi kinetika reaksi oksidasi terhadap Hc

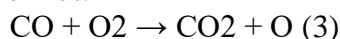
Proses oksidasi senyawa HC yang dibantu oleh aktivitas katalis tembaga. Reaksi oksidasi adalah reaksi pengikatan oksigen, ketika emisi gas buang HC melewati katalis tembaga, yaitu proses reaksi antara HC dan O₂ akan lebih efektif karena sifat tembaga sebagai katalis oksidasi, sehingga emisi gas buang HC dapat diubah menjadi gas yang tidak berbahaya yaitu CO₂ dan H₂O [15]. Reaksi oksidasi HC yang dibantu oleh aktivitas katalis tembaga ditunjukkan persamaan dibawah ini.

Catalytic converter berbahan dasar tembaga dengan bentuk tabung melingkar dapat mengurangi emisi gas buang. Menurun emisi gas buang CO sebesar 16,67%, sekaligus mengurangi emisi gas buang HC sebesar 32,54% (Shoffan et al., 2019).

b. Kuningan/Brass (Cu Zn)

- 1) Studi kinetika reaksi oksidasi terhadap CO

Reaksi oksidasi CO sesuai dengan *Table of Recommended Rate Constant for Chemical Reactions Occuring in Combustion* pada suhu 1500 – 3000 K (All, 1964) menggunakan reaksi orde kedua dengan Persamaan (3) sebagai berikut:



Sedangkan suhu reaksi oksidasi yang diukur di dalam knalpot kira-kira 336 – 338 K [16], yang jauh lebih rendah dari Wesley (yaitu 1500 – 3000 K). Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa reaksi oksidasi CO yang terjadi pada knalpot dengan catalytic converter Cu-Zn telah mengikuti reaksi pada reaksi orde pertama (1).

- 2) Studi kinetika reaksi oksidasi terhadap Hc

Menurut penelitian reaksi oksidasi HC pada suhu 298 – 650 K mengikuti reaksi orde dua. Sedangkan suhu reaksi oksidasi diukur dalam knalpotnya kira-kira 336 – 338 K, yang berada dalam kisaran Wesley (yaitu 298 – 650 K). Oleh karena itu, dapat diasumsikan bahwa terjadi reaksi oksidasi HC pada knalpot dengan Cu-Zn catalytic converter telah mengikuti reaksi orde kedua [17].

Penerapan catalytic converter berbasis tembaga-seng (Cu-Zn) untuk mengurangi emisi gas buang, terutama karbon monoksida (CO) dan hidrokarbon (HC) diselidiki. Itu Hasil uji emisi jelas menunjukkan efektivitas Cu-Zn sebagai katalis katalitik konverter [18].

c. Perbandingan

Tabel 4. Hasil penelitian Katalitik Konverter dengan bahan non PGM

Bahan	Parameter		Keterangan
	CO	HC	
Kuningan	76,32%	76,05%	[18]
Tembaga Berlapis Croum	24%	30%	[14]

5. Kesimpulan

Emisi gas buang kendaraan yang saat ini dianggap berbahaya dan perlu untuk diatur diantaranya adalah Karbon Monoksida (CO). Indonesia menetapkan baku mutu emisi gas buang untuk semua

jenis kendaraan bermotor yang sudah beroperasi di jalan dan dilakukan pengawasan secara berkala. Teknologi saat ini yang dianggap paling efektif mereduksi emisi gas buang adalah katalitik konverter dengan bahan katalis pada dari material golongan Platinum Group Metal (PGM) seperti Platina, Phaladium dan Rhodium. Dikarenakan nilai PGM yang masih mahal, mendorong para peneliti untuk mengembangkan bahan katalis alternatif dari bahan Non PGM seperti tembaga dan kuningan. Dari hasil penelitian yang ada, secara umum bahan katalis dari Tembaga dan Kuningan mampu mereduksi kandungan CO dan HC pada gas buang kendaraan bermotor.

Daftar Pustaka

- [1] DLH Provinsi DKI Jakarta, "Ringkasan Eksekutif Dokumen Informasi Kinerja Pengelolaan Lingkungan Hidup Ddaerah Provinsi DKI Jakarta Tahun 2021," 2021.
- [2] BPS RI, "Statistik Transportasi Darat 2020," *Jakarta; Badan Pus. Stat. ndonesia*, pp. 1–87, 2020.
- [3] K. Tri BASuki, "PENURUNAN KONSENTRASI CO DAN NO PADA EMISI GAS BUANG DENGAN MENGGUNAKAN MEDIA PENYISIPAN TiO₂ LOKAL PADA KARBON AKTIF.," *J. Forum Nukl.*, vol. 1, no. 1, p. 45, 2007, doi: 10.17146/jfn.2007.1.1.3272.
- [4] T. C. Bani, "Kendaraan Bermotor Roda Empat Terhadap konsentrasi Emisi Karbon Monoksida (CO) dan Nitrogen Oksida (NO_x) (Studi kasus: Toyota Avanza Berbahan Bakar Premium)," 2012.
- [5] R. Manojkumar, S. Haranethra, M. Muralidharan, and A. Ramaprabhu, "I.C. Engine emission reduction using catalytic converter by replacing the noble catalyst and using copper oxide as the catalyst," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 769–773, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.804.
- [6] A. Fornalczyk and M. Saternus, "Platinum recovery from used auto catalytic converters in electrorefining process," *Metalurgija*, vol. 52, no. 2, pp. 219–222, 2013.
- [7] M. Durilla, W. J. Hizny, and S. Mack, *Carbon monoxide oxidizers*. Elsevier Ltd, 2017. doi: 10.1016/b978-0-08-101940-5.00009-9.
- [8] B. Török and T. Dransfield, "Green Chemistry: An Inclusive Approach," *Green Chem. An Incl. Approach*, no. January, pp. 1–1044, 2017, doi: 10.1016/j.focat.2017.12.054.
- [9] S. Govender and H. B. Friedrich, "Monoliths: A review of the basics, preparation methods and their relevance to oxidation," *Catalysts*, vol. 7, no. 2, 2017, doi: 10.3390/catal7020062.
- [10] J. Kašpar, P. Fornasiero, and M. Graziani, "Use of CeO₂-based oxides in the three-way catalysis," *Catal. Today*, vol. 50, no. 2, pp. 285–298, 1999, doi: 10.1016/S0920-5861(98)00510-0.
- [11] D. Feriyanto, H. Pranoto, H. Carles, and A. M. Leman, "Comparison of metallic (FeCrAl) and Ceramic Catalytic Converter (CATCO) in reducing exhaust gas emission of gasoline engine fuelled by RON 95 to develop health environment," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 485, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/485/1/012004.
- [12] N. B. Patel, S. B. Patel, M. S. Patel, and D. Patel, "Catalytic Converter Made of Non-noble Material for an Automobile," vol. 1, no. 9, pp. 5–7, 2013.
- [13] P. Bera and M. S. Hegde, "Recent advances in auto exhaust catalysis," *J. Indian Inst. Sci.*, vol. 90, no. 2, pp. 299–305, 2010.
- [14] S. H. S. M. N. A. N. A. E. Utomo, "Pengaruh Catalytic Converter Tembaga (Cu) Terhadap Konsentrasi Gas Karbon Monoksida (Co) Dan

- Hidro Karbon (Hc) Pada Gas Buang Sepeda Motor 4 Langkah 125 Cc,” *J. Tek. Mesin Univ. Muhammadiyah Jember*, pp. 1–9, 2017.
- [15] S. P. Venkatesan, D. S. Uday, B. K. Hemant, K. R. Kushwanth Goud, G. L. Kumar, and K. P. Kumar, “I.C. Engine emission reduction by copper oxide catalytic converter,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 197, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/197/1/012026.
- [16] S. K. Sharma, P. Goyal, and R. K. Tyagi, “Conversion efficiency of catalytic converter,” *Int. J. Ambient Energy*, vol. 37, no. 5, pp. 507–512, 2016, doi: 10.1080/01430750.2015.1020567.
- [17] S. S. J. All, “Table of Recommended Rate Constants for Chemical Reactions Ocurring in Cobustion,” 1964.
- [18] S. Syahrui and A. Ghofur, “PENGUNAAN KUNINGAN SEBAGAI BAHAN CATALYTIC CONVERTER TERHADAP EMISI GAS BUANG dan PERFORMA MESIN SUZUKI SHOGUN AXELO 125,” *Sci. J. Mech. Eng. Kinemat.*, vol. 4, no. 2, pp. 67–78, 2019, doi: 10.20527/sjme kinematika.v4i2.118.