PENURUNAN EMISI CO PADA MOBIL MENGGUNAKAN ZEOLIT

REDUCE CO ON CAR BY USING ZEOLITE

Miftah Farhana^{1,*}, Budiyo¹, Nikie Astorina Yunita Dewanti¹, dan Wahyu Bambang Widayatno²

¹Bagian Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Diponegoro, Semarang

²Pusat Penelitian Fisika LIPI, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan

*E-mail: miftahfarhana1309@gmail.com, budiyonofkm@lecturer.undip.ac.id, nikieastorina@lecturer.undip.ac.id, wahy012@lipi.go.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received date

20 September 2019

Received in revised form date

04 February 2020

Accepted date

10 February 2020

Available online date

November 2020

Abstract

The number of vehicles in Jakarta increased by 5.66% from 2016. Vehicles have the highest contribution to air pollution, which is 70% of other activities. The purpose of this study was to determine the reduction of CO with zeolite pellets. This type of research is a quasi-experimental design with a non-equivalent control group design pre-test post-test design. The emission test instrument uses the automotive gas analyzer HESBOHN, a tachometer to measure engine speed, laptops, and stopwatches. The material used is activated natural zeolite pellets. Data were analyzed by univariate in the form of CO adsorption power efficiency, average, minimum, and maximum. The variables used are pellet drying time (3 and 24 hours) and engine speed (idle and 1250 rpm). The result of CO adsorption power efficiency using the most optimal zeolite pellets is Pellet I with 3 hours drying at 1250 rpm by 52%. While the lowest yield is Pellet II with 24-hour drying at idle conditions of 22%. The most effective CO emission reduction is by using Pellet I at 1250 rpm.

Keywords: Adsorption, CO Emissions, Zeolite Pellets, Drying Time, Engine Speed

Kata kunci:

Adsorpsi

Emisi CO

Pelet Zeolit

Lama Pengeringan

Putaran Mesin

Abstrak

Jumlah kendaraan di Jakarta meningkat sebesar 5,66% dari tahun 2016. Kendaraan memiliki kontribusi pencemaran udara paling tinggi, yaitu sebesar 70% dari kegiatan yang lain. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui penurunan CO dengan pelet zeolit. Jenis penelitian ini adalah *quasi* eksperimental desain dengan rancangan *non-equivalent control group pre test post test design*. Instrumen alat untuk uji emisi yang digunakan adalah *automotive gas analyzer* HESBOHN, *tracometer* untuk mengukur putaran mesin, laptop, dan *stopwatch*. Adapun bahan yang digunakan, yaitu pelet zeolit alam yang telah diaktivasi. Data dianalisis dengan univariat berupa efisiensi daya adsorp CO, rata-rata, minimal, dan maksimal. Adapun variabel yang digunakan adalah lama pengeringan pelet (3 dan 24 jam) dan putaran mesin (kondisi *idle* dan 1250 rpm). Hasil uji emisi yang didapat dengan menghitung efisiensi daya adsorpsi CO menggunakan pelet zeolit yang paling optimal adalah Pelet I dengan pengeringan tiga jam pada putaran 1250 rpm sebesar 52%. Sementara itu, hasil terendah adalah Pelet II dengan pengeringan 24 jam kondisi *idle* sebesar 22%. Penurunan emisi CO paling efektif, yaitu dengan menggunakan Pelet I pada putaran mesin 1250.

PENDAHULUAN

Menurut Badan Pusat Statistik (2018), kendaraan bermotor tahun 2017 di DKI Jakarta meningkat sebesar 5,66% dari tahun 2016. Kenaikan ini akibat adanya faktor penarik, seperti aspek pendidikan, pekerjaan, dan lainnya yang menimbulkan masyarakat melakukan urbanisasi. Kendaraan yang padat akan menimbulkan kemacetan. Hasil keluaran emisi gas tersebut berdampak pada pencemaran udara yang tinggi (Pangestu, Widodo, dan Rahayudi 2018). Kontribusi kendaraan bermotor merupakan yang paling tinggi dari kegiatan lainnya, yaitu mencapai 70% (Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah Jakarta 2013). Pada Juli 2019, Jakarta menduduki kota paling tinggi pencemaran udaranya di dunia, yaitu sebesar 184 US AQI dengan status udara tidak sehat (Fadhil 2019). Hal ini mengindikasikan adanya pengaruh peran kendaraan bermotor terhadap kontribusi pencemaran yang tinggi di Jakarta.

Karbon monoksida (CO) merupakan emisi gas yang paling tinggi keluarannya, yaitu sebesar 70,5% (Sugiarti 2009). Gas ini timbul akibat adanya pembakaran yang tidak sempurna yang disebabkan oleh dua faktor, yaitu kondisi kendaraan dan proses pembakaran (Amri dan W 2016; Muziansyah, Sulistyorini, dan Sebayang 2015; Syahrani 2006). Emisi CO akan terakumulasi sehingga berdampak pada lingkungan dan kesehatan. Pada lingkungan terjadi *global warming* yang mengganggu keseimbangan ekosistem dan perubahan iklim (Dallmann 2013). Adapun pada kesehatan, terjadi gangguan fungsi tubuh seperti sesak nafas, gangguan otak hingga kematian pada kadar tertentu (WHO 2004).

Terdapat tiga pengendalian emisi gas buang menurut Mathur mengacu pada program *Vehicle Emissions Control* oleh Environmental Sustainable Transporta-

tion, yaitu modifikasi mesin, modifikasi penggunaan bahan bakar, dan modifikasi saluran gas buang (Irawan 2012). Adapun pengendalian melalui saluran gas buang sudah banyak dilakukan oleh penelitian sebelumnya, yaitu perancangan knalpot menurut Seto (2013) dengan menggunakan *sponge steel*, metode *re-heater* (pemanasan kembali gas yang dibuang) menurut Kusuma (2010) penggunaan membran keramik dengan zeolit dan gypsum menurut Dahlan, Pratama, dan Mia (2016) serta penggunaan *catalitic converter* juga sudah banyak dilakukan karena dapat mengubah emisi bahaya menjadi tidak berbahaya dengan media, seperti palladium dan rhodium (Peterson dkk. 2012). Akan tetapi, biaya yang dikeluarkan cukup tinggi dan mudah rusak pada suhu $>500^{\circ}\text{C}$ (Irawan 2012). Adapun metode lain yang mudah dan murah, yaitu dengan metode adsorpsi dengan zeolit alam sebagai adsorbennya.

Zeolit alam, disebut juga dengan *sieve molecular mesh*, merupakan bahan galian nonlogam dari hasil pengkristalan alumino silikat yang berbentuk kristal dan sangat melimpah keberadaannya di Indonesia (Kesnawaty 2010; Yuliusman 2016). Zeolit alam memiliki keunggulan, yaitu mampu menyaring molekul secara selektif, memiliki pori yang berukuran molekuler, mudah ditemukan di Indonesia sehingga memiliki harga yang murah. Adapun penelitian sebelumnya telah menggunakan zeolit alam untuk menurunkan emisi CO, yaitu pada penelitian Yuliusman (2016) zeolit alam yang teraktivasi dengan ukuran 53–106 μm sebesar 12,2%. Sementara itu, Prihatma (2009) menyatakan bahwa zeolit alam dengan ukuran 50 μm sebesar 6,25% dan Maleiva, Sitorus, dan Jati (2015) menggunakan pelet zeolit dengan bentuk bulat yang didealuminasi sebesar 98,21%. Penelitian tersebut membuktikan bahwa zeolit alam dapat mengadsorpsi molekul

gas dengan lebih selektif seperti emisi CO yang memiliki ukuran molekul lebih kecil (Tagliabue dkk. 2009). Dengan demikian, peneliti akan menggunakan zeolit alam berbentuk pelet dalam penurunan emisi CO yang keluar dari knalpot.

Adapun tujuan penelitian ini adalah mengetahui efektivitas penurunan emisi CO dengan pelet zeolit pada mobil Toyota Hilux dengan variasi lama pengeringan pelet dan putaran mesin.

METODE

Penelitian dilakukan di LIPI Tangerang dan UPT Laboratorium DLH Jakarta dari April s.d. Agustus 2019. Penelitian ini menggunakan *non-equivalent control group pre-test post-test design* yang merupakan salah satu desain penelitian *quasi experimental* menggunakan grup eksperimental dan grup kontrol dengan *pre-test* dan *post-test*, tetapi tidak memiliki praeksperimental untuk sampel yang sama (Notoatmodjo 2005).

Variabel terikat penelitian ini adalah kadar emisi CO. Sementara itu, variabel bebas yang digunakan pada penelitian ini adalah lama pengeringan pelet [Pelet I (3 jam) dan Pelet II (24 jam), serta putaran mesin (*idle* (700 rpm) dan 1250 rpm)] untuk menurunkan emisi CO. Total sampel sebanyak 30 dengan rincian 24 sampel sebagai grup perlakuan dan enam sampel sebagai grup kontrol.

Uji emisi CO menggunakan *auto-motive gas analyzer* HESHBON KEG 500 dan *tracometer* untuk menghitung putaran mesin. Data tersebut kemudian diolah menggunakan Microsoft Excel 2010. Dalam perhitungannya, data menggunakan analisis univariat dengan menghitung efisiensi daya adsorb CO, rata-rata, minimal, dan maksimal. Berikut adalah perhitungan efisiensi daya adsorb CO menggunakan pelet zeolit.

$$Ef = \frac{(Co-Ci)}{Co} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

Ef : Efektivitas penurunan parameter (%)

Co : Konsentrasi parameter saat masuk ke proses

Ci : Konsentrasi parameter saat keluar dari proses

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar emisi CO yang keluar dari kendaraan disebabkan oleh dua faktor, yaitu proses pembakaran yang tidak sempurna dan kondisi kendaraan. Pada dasarnya, kendaraan pasti memiliki emisi CO pada pengeluarannya, namun yang membedakan adalah besarnya konsentrasi yang keluar dari knalpot kendaraan. Proses pembakaran berasal dari campuran bahan bakar dan oksigen di ruang bakar. Terjadinya pembakaran yang tidak sempurna akibat adanya *knocking*. Hal ini terjadi ketika kenaikan tekanan secara tiba-tiba sehingga timbul suara yang lebih keras akibat banyak kehilangan panas. Hasilnya akan mengakibatkan campuran menjadi gemuk sehingga mengeluarkan emisi CO yang tinggi.

Zeolit dalam bentuk pelet digunakan dalam penelitian ini karena adsorbat (zat yang ada diserap) berbentuk gas sehingga lebih efektif menggunakan bentuk pelet daripada serbuk. Hal ini juga serupa dengan penelitian sebelumnya bahwa bentuk pelet lebih baik karena tidak menghambat terjadinya aliran emisi gas buang yang keluar melalui celah-celah (Wahono dkk. 2010).

Aktivasi Zeolit

Kesnawaty (2010) menyatakan bahwa tahap aktivasi pada penelitian dimulai dari dealuminasi, pertukaran ion, dan terakhir tahap kalsinasi. Aktivasi berfungsi untuk mengurangi zat pengotor, kandungan air,

meningkatkan rasio Si/Al, menguatkan struktur, serta meningkatkan daya adsorpsi terhadap gas. Menggunakan tiga tahap ini dapat membentuk zeolit yang lebih selektif dan murni.

Tahap dealuminasi menggunakan dua larutan, yaitu HF 2% dan HCl 6M. Perendaman asam berfungsi untuk meningkatkan rasio Si/Al. Dienullah, Tira, dan Padang (2017), perlakuan asam terhadap zeolit akan menyebabkan zeolit bersifat lebih hidrofob (sukar air) sehingga kemampuan penyerapan gas semakin meningkat.

Tahap pertukaran ion menggunakan NH_4Cl 2M. Pertukaran ion berfungsi untuk menukar ion dengan pengotor-pengotor yang masih berada di dalam zeolit setelah tahap dealuminasi sehingga lebih murni lagi. Pertukaran ion terjadi mula-mula antara kation-kation dalam zeolit dan NH_4^+ dari Ammonium Klorida (NH_4Cl). Pertukaran ion bertujuan untuk mengganti semua kation dalam zeolit yang menutupi pori seperti unsur alkali atau alkali tanah, seperti Na^+ , Ca^+ , Mg^+ yang berperan sebagai penyeimbang zeolit yang dapat dipertukarkan dengan kation lain sehingga kation-kation tersebut akan bertukar menjadi NH_4^+ (Budi, Suseno, dan Cahyono 2013). Pertukaran ion ini juga membentuk polimer yang stabil sehingga struktur zeolit menjadi semakin kuat.

Tahap kalsinasi dilakukan untuk mengurangi air dan senyawa organik seperti amoniak. Hasil yang didapat dari kalsinasi adalah perubahan warna semula biru kehijauan menjadi putih bersih dan tekstur yang lebih mudah dihancurkan. Kalsinasi pada suhu 500°C juga dapat meningkatkan luas permukaan sehingga zeolit mampu menyerap gas (Budi, Suseno, dan Cahyono 2013). Selain itu, membentuk struktur zeolit yang teratur sehingga lebih stabil dan lebih tahan pada temperatur reaksi yang cukup tinggi. Berikut gambar perubahan serbuk zeolit murni dan teraktivasi.

Gambar 1. (a) Serbuk Zeolit Murni (b) Serbuk Zeolit Teraktivasi

Uji SEM EDX

Zeolit alam memiliki ukuran yang sangat kecil atau bersifat mikroskopis sehingga tidak dapat dilihat oleh mata. Berikut hasil uji EDX Zeolit murni dan teraktivasi untuk melihat unsur-unsur yang terkandung pada zeolit.

Gambar 2. Hasil Uji EDX Zeolit (a) Murni (b) Teraktivasi

Pada Gambar 2 menjelaskan adanya warna dimiringkan yang mengandung unsur kandungan pada zeolit. Zeolit murni memiliki aneka ragam warna yang menandakan bahwa terdapat kandungan Si, Al, O, Ca, Fe, K, Mg, dan Na. Akan tetapi, ketika zeolit yang teraktivasi menghasilkan *mapping* dengan warna yang senada, yaitu mengandung Si, Al, dan O. Hal ini terjadi akibat adanya aktivasi kimia yang menghilangkan senyawa anorganik (pengotor), seperti Ca, Fe, K, Mg, dan Na yang menyebabkan zeolit semakin selektif dalam melakukan adsorpsi terhadap gas.

Pelet Zeolit

Dalam pembuatan pelet menggunakan tepung tapioka sebagai *binder* (pengikat). Tepung tapioka mengandung amilosa 16%

dan amilopektin 84% (Ratnayake dan Jackson 2003). Amilosa dan amilopektin merupakan polisakarida yang berfungsi untuk pembentukan gel yang lengket dan keras. Perbandingan tepung dan zeolit menggunakan perbandingan sebesar 4:1 gram. Banyaknya tepung yang digunakan agar dapat memperkuat ikatan antarzeolit dan membuat adonan yang kalis sehingga dapat terbentuk pelet yang baik. Gambar 3 adalah pelet zeolit yang sudah dikeringkan dengan oven.

Gambar 3. Pelet Zeolit

Penggunaan tepung tapioka memiliki keunggulan, antara lain biaya yang rendah, biokompatibel, tidak beracun, dan dapat terbiodegradasi. Menurut Syaefudin (2016), tepung tapioka berfungsi untuk menyatukan partikel ke dalam butiran *granulat* sehingga dapat membentuk struktur yang kompak setelah pencetakan.

Uji Kadar Emisi CO dengan Variabel

Zeolit memiliki struktur *honeycomb* (sarang lebah) yang berbeda sesuai dengan jenisnya. Bentuk pori ini dimanfaatkan zeolit untuk melakukan adsorpsi terhadap gas. Emisi CO akan terperangkap di dalam pori yang telah bersih dari pengotor setelah diaktivasi.

Interaksi emisi CO dan pelet zeolit merupakan jenis adsorpsi fisika. Adsorpsi ini terjadi pada gaya tarik antarmolekul fluida (emisi CO) dan permukaan padatan (Pelet zeolit). Gaya Van der Waals terjadi pada saat adsorpsi di permukaan material mikropori timbul sebagai akibat interaksi

dipol-dipol. Interaksi ini terjadi antara permukaan zeolit yang bersifat polar dan molekul emisi CO juga polar (Maleiva, Sitorus, dan Jati 2015). Interaksi gaya Van der Waals memiliki kekuatan interaksi yang lemah (50 kJ/mol) sehingga sewaktu-waktu jika tekanan kecil akan terjadi desorpsi.

Alur CO diadsorpsi oleh pelet zeolit, yaitu mula-mula emisi CO dialirkan melalui knalpot kemudian bertabrakan dengan permukaan zeolit. Setelah itu, adanya perpindahan permukaan dari luar menuju pori-pori lalu akan menempel pori-pori dalam (Pitulima 2018). Pori-pori yang dimiliki zeolit bersifat molekuler *mesh* sehingga dapat menyerap pada ukuran molekul adsorbat yang kecil, seperti emisi CO.

Pada grup perlakuan, uji emisi yang dilakukan menggunakan pelet zeolit sebagai media dalam mengadsorpsi emisi CO. Berikut adalah hasil uji emisi CO dengan variasi lama pengeringan dan putaran mesin (lihat Tabel 1).

Uji kadar emisi CO dilakukan sebanyak tiga kali, baik *pre-test* maupun *post-test*. Hasil tersebut didapatkan rata-rata, kemudian dihitung efisiensi daya adsorpsinya. Adapun hasil persentase efisiensi daya adsorpsi pada Pelet I dan Pelet II dengan massa 40 gram kondisi idle sebesar 32% dan 27%. Sementara itu, pada putaran mesin 1250 rpm menghasilkan sebesar 52% dan 50%.

Adapun kadar air pada masing-masing Pelet I dan Pelet II sebesar 2,22% dan 20,08%. Hasil pengeringan pelet 24 jam mengalami penyusutan air lebih banyak daripada tiga jam. Perlakuan ini juga terjadi pada penelitian menggunakan karbon aktif kayu kelapa lama satu dengan tiga jam pada suhu 900°C terjadi kadar air sebesar 0,19% dan 0,52%. Pada kadar air 0,52% dapat mengadsorpsi larutan iodium

Tabel 1. Hasil Uji Kadar emisi CO dengan Variabel

Lama Pengeringan Pelet	Putaran Mesin (rpm)	Kadar emisi CO											
		Pre				Post				Efisiensi Daya Adsorb CO			
		1	2	3	$\bar{x}$	1	2	3	$\bar{x}$	1	2	3	$\bar{x}$
Pelet I (3 jam)	idle	0,78	0,73	0,77	0,76	0,54	0,55	0,45	0,51	31%	25%	42%	32%
	1250	0,53	0,55	0,54	0,54	0,25	0,28	0,25	0,26	53%	49%	54%	52%
Pelet II (24 jam)	idle	0,79	0,77	0,78	0,78	0,58	0,55	0,59	0,57	27%	29%	24%	27%
	1250	0,55	0,53	0,53	0,54	0,26	0,24	0,30	0,27	53%	55%	43%	50%

sebesar 597,13 mg/g (Polii 2017). Kadar air karbon aktif setelah dikarbonisasi dengan suhu 500°C dan 1000°C menghasilkan sebesar 3% dan 7,7%. Kadar air 7,7% dapat mengadsorpsi larutan iodium sebesar 586,318 mg/g (Idrus, Lapanporo, dan Putra 2013). Kedua penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin lama dan suhu yang tinggi pada aktivasi akan menimbulkan tingginya kadar air dan daya adsorpsi terhadap larutan. Hal ini terjadi akibat adanya penguapan yang meningkatkan luas permukaan sehingga pori-pori juga semakin membuka.

Pada penelitian ini hasil yang didapat bahwa semakin lama pengeringan pelet semakin tinggi pula kadar airnya, tetapi pada penyerapan emisi CO semakin rendah. Pelet I lebih baik dalam penurunan kadar emisi CO daripada Pelet II. Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan pengaruh kadar air terhadap adsorpsi gas dengan larutan.

Adapun faktor yang mendukung terjadinya daya serap zeolit yang telah diaktivasi terhadap gas, yaitu zeolit bersifat selektif, luas permukaan dan volume pori semakin tinggi sehingga emisi CO dapat terperangkap secara optimal. Hasibuan dan Yuliusman (2012) menjelaskan bahwa luas permukaan zeolit alam teraktivasi sebesar 44,29 m²/g. Adapun menurut Maleiva, Sitorus, dan Jati (2015) untuk diameter pori yang diukur sebesar 11,96 Å sehingga diasumsikan bahwa pada zeolit

ini memiliki ukuran pori yang lebih besar daripada CO dengan ukuran molekul sebesar 1,13 Å (Kirk-Othmer 1998) yang menimbulkan CO dapat diturunkan oleh zeolit akibat terperangkap dalam pori. Hal ini dibuktikan dengan penelitian sebelumnya bahwa zeolit alam dapat mengadsorpsi molekul gas dengan lebih selektif, seperti emisi CO yang memiliki ukuran molekul lebih kecil daripada zeolit (Tagliabue dkk. 2009). Hal ini juga serupa dengan penelitian Kurniasari, Djaeni, dan Purbasari (2011) yang menjelaskan bahwa adsorbat yang masuk ke dalam zeolit adalah adsorbat yang memiliki ukuran sama atau lebih kecil daripada ukuran pori zeolit.

Putaran mesin merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap keluaran emisi CO pada kendaraan. Variabel ini dilakukan untuk melihat kondisi kendaraan saat macet dan jalan. Hasil uji emisi yang dihasilkan pada Pelet I dengan volume 76,9 cm³ pada kondisi *idle* dan putaran mesin 1250 sebesar 32% dan 52%, sedangkan pada Pelet II menghasilkan sebesar 27% dan 50%. Pelet I dan Pelet II menghasilkan bahwa pada putaran 1250 menghasilkan efisiensi daya adsorp gas lebih baik daripada saat kondisi *idle*, yaitu 52% dan 50%. Hal ini akibat adanya pengaruh putaran mesin yang menimbulkan emisi CO turun.

Penelitian Syahrani (2006) menjelaskan kondisi *idle* dan putaran 1500 menghasilkan kadar emisi CO sebesar 2,19%

dan 0,77%. Adanya penurunan emisi CO pada putaran sedang (1200–1500) terjadi campuran yang kurang dibanding dengan kondisi *idle*. Pada kondisi tersebut juga *throttle* terbuka sampai $\frac{1}{2}$ bukaan maksimum. Hal ini menimbulkan suhu dalam ruang bakar meningkat sehingga emisi CO menurun

Penelitian lain juga terjadi penurunan emisi CO, dijelaskan pada putaran 500–2500 rpm mengalami penurunan emisi CO, tetapi pada putaran >2500 mengalami peningkatan emisi CO karena mengalami penambahan jumlah campuran bahan bakar dan udara baru akibat kenaikan putaran mesin sehingga terjadi pembakaran yang tidak sempurna (Negara, Suyaba, dan Suarna 2012)

Putaran mesin yang semakin tinggi pada titik tertentu akan mengeluarkan emisi CO yang sedikit dari kendaraan. Hal tersebut membantu dalam melakukan adsorpsi terhadap emisi CO sehingga pelet zeolit semakin optimal dalam melakukan pengendalian emisi CO dari kendaraan.

KESIMPULAN

Hasil persentase efisiensi daya adsorpsi emisi CO yang paling optimal dan rendah secara berurutan terjadi pada massa pelet zeolit sebesar 40 gram, yaitu Pelet I di putaran mesin 1250 rpm sebesar 52% dan Pelet II pada kondisi *idle* sebesar 27%. Dengan demikian, penurunan emisi CO dengan pelet zeolit dipengaruhi oleh putaran mesin kendaraan dan lama pengeringan pelet zeolit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada keluarga, dosen pembimbing, pembimbing di LIPI, dan Laboratorium Fisika LIPI Tangerang yang telah memberikan sarana dan prasarana laboratorium, pegawai FKM Undip, DLH

DKI Jakarta, dan Laboratorium Lingkungan Hidup Daerah (LLHD) DKI Jakarta yang telah memberikan sarana uji emisi gas buang.

DAFTAR ACUAN

- Amri, Fajar Ashari, dan Hari Rudijanto I W. 2016. “Studi Komparasi Emisi Gas CO pada Motor Matic dengan Bahan Bakar Premium dan Pertalite di Kabupaten Magelang Tahun 2016.” *Keslingmas* 35: 152–277.
- Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah Jakarta. 2013. *Pengertian Pencemaran Udara*. Badan Pengelolaan Lingkungan Hidup Daerah Jakarta.
- Badan Pusat Statistik. 2018. *Statistik Indonesia 2018*. Badan Pusat Statistik. <https://doi.org/10.1192/bjp.111.479.1009-a>.
- Budi, Eko Setyo, Ahmad Suseno, dan Bambang Cahyono. 2013. “Modifikasi Zeolit Alam Dengan Surfaktan Heksadesil Trimetil Ammonium Klorida Sebagai Adsorben Ion Nitrat.” *Chem Info* 1 (1): 108–13.
- Dahlan, M Hatta, Eric Junior Pratama, dan Odina Mia. 2016. “Pengaruh Penggunaan Membran Keramik Berbasis Zeolit dan Gypsum terhadap Emisi Gas CO, NOx Kendaraan Bermotor.” *Jurnal Teknik Kimia* 22 (2): 10–18.
- Dallmann, Timothy Ryan. 2013. “Evaluation of Mobile Source by Emissions and Trends.” Berkeley: University of California.
- Dienullah, Muhammad, Hendry Sakke Tira, dan Yesung Allo Padang. 2017. “Pemurnian Biogas Dengan Sistem Berlapis Menggunakan Fe₂O₃ Zeolit Sintetik Dan Zeolit Alam.” *Jurnal Poros* 15 (1): 1–8.
- Fadhil, Haris. 2019. “Data AirVisual: Jakarta Kota Paling Berpolusi di Dunia Pagi Ini.” *DetikNews*. 2019. <https://news.detik.com/berita/d-4639970/data-airvisual-jakarta-kota-paling-berpolusi-di-dunia-pagi-ini>.

- Hasibuan, Rendi Akbar, dan Yuliusman. 2012. “Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO_2 untuk Mereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor.” Universitas Indonesia.
- Idrus, Rosita, Boni Pahlano, Lapanporo, dan Yoga Satria Putra. 2013. “Pengaruh Suhu Aktivasi terhadap Kualitas Karbon Aktif Berbahan Dasar Tempurung Kelapa.” *Prima Fisika* 1 (1): 50–55.
- Irawan, RM. Bagus. 2012. “Rancang Bangun Catalytic Converter Material Substrat Tembaga Berlapis Mangan untuk Mereduksi Emisi Gas Karbon Monoksida Motor Bensin.” Dalam *LPPM Unimus 2012*. Unimus. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Kesnawaty, Debie Ari. 2010. “Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif.” Universitas Indonesia.
- Kirk-Othmer. 1998. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology - Vol 8. Journal of the American Chemical Society*. Fourth. Vol. 26. New York: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1021/ja9656107>.
- Kurniasari, Laeli, Mohammad Djaeni, dan Aprilina Purbasari. 2011. “Aktivasi Zeolit Alam sebagai Adsorben pada Pengering Bersuhu Rendah.” *Reaktor* 13 (3): 178–84. <https://doi.org/10.14710/reaktor.13.3.178-184>.
- Kusuma, I Gusti Bagus Wijaya. 2010. “Alat Penurun Emisi Gas Buang Pada Motor, Mobil, Motor Tempel dan Mesin Pembakaran Tak Bergerak.” *MAKARA of Technology Series* 6 (3): 95–101. <https://doi.org/10.7454/mst.v6i3.123>.
- Maleiva, Lalak Tarbiyaun Nasyin, Berlian Sitorus, dan Dian Rahayu Jati. 2015. “Penurunan Konsentrasi Gas Karbon Monoksida.” *Jkk* 4 (1): 26–33.
- Muziansyah, Devianti, Rahayu Sulistyorini, dan Syukur Sebayang. 2015. “Model Emisi Gas Buangan Kendaraan Bermotor Akibat Aktivitas Transportasi (Studi Kasus: Terminal Pasar Bawah Ramayana Kota Bandar Lampung).” *Jrsdd* 3 (1): 57–70.
- Negara, IP Sastra, IW Budiarta Suyaba, dan IW Suarna. 2012. “Pengaruh Nilai Oktan Bahan Bakar dan Putaran Mesin pada Kendaraan Bermotor terhadap Karakteristik Emisi Gas Buang.” *Ecotrophic*. 2012.
- Notoatmodjo, Soekidjo. 2005. *Metodologi Penelitian Kesehatan*. 5 rev. Jakarta: Rineka Cipta.
- Pangestu, Fajar, Agus Wahyu Widodo, dan Bayu Rahayudi. 2018. “Prediksi Jumlah Kendaraan Bermotor di Indonesia Menggunakan Metode Average-Based Fuzzy Time Series Models.” *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer (J-PTIIK) Universitas Brawijaya* 2 (9): 2923–29.
- Peterson, Eric J, Andrew T DeLaRiva, Sen Lin, Ryan S Johnson, Hua Guo, Jeffrey T Miller, Ja Hun Kwak, et al. 2012. “Catalytic Converter Theory , Operation And.” Dalam *Catalysis Today*, 49:29–34. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.08.028>.
- Pitulima, Janiar. 2018. “Studi Daya Serap Karbon Aktif Batubara terhadap Penurunan Kadar Logam Cu dalam Larutan CuSO_4 .” Dalam *Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Pada Masyarakat*, 1–5.
- Polii, Fahri Ferdinand. 2017. “Pengaruh Suhu dan Lama Aktivasi terhadap Mutu Arang Aktif dari Kayu Kelapa.” *Jurnal Industri Hasil Perkebunan* 12 (2): 21–28. <https://doi.org/10.33104/jihp.v12i2.1672>.
- Prihatma, Yuda. 2009. “Preparasi Zeolit Alam Lampung dengan Metode Dealuminasi dan Kalsinasi Untuk Adsorpsi Gas CO .” Universitas Indonesia.

- Ratnayake, W.S., dan D.S. Jackson. 2003. "STARCH | Sources and Processing." *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*, 5567–72. <https://doi.org/10.1016/b0-12-227055-x/01142-1>.
- Seto, Berlian. 2013. "Perancangan Knalpot Berbasis Sponge Steel untuk Menurunkan Emisi Gas Buang pada Sepeda Motor." Universitas Negeri Semarang.
- Sugiarti. 2009. "Gas Pencemar Udara Dan Pengaruhnya Bagi Kesehatan Manusia." *Jurnal Chemica* 10 (1): 50–58.
- Syaefudin. 2016. "Pembuatan Zeolit Pelet Berbasis Zeolit Alam dan Pati Tepung Beras sebagai Adsorben pada Pembuatan Bioetanol Fuel Grade." Universitas Muhammadiyah Purwokerto.
- Syahrani, Awal. 2006. "Analisa Kinerja Mesin Bensin Berdasarkan Hasil Uji Emisi." *SMARTek* 4 (4): 260–66.
- Tagliabue, Marco, David Farrusseng, Susana Valencia, Sonia Aguado, Ugo Ravon, Caterina Rizzo, Avelino Corma, dan Claude Mirodatos. 2009. "Natural Gas Treating by Selective Adsorption: Material Science and Chemical Engineering Interplay." *Chemical Engineering Journal* 155 (3): 553–66. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.010>.
- Wahono, Satriyo Krido, Roni Maryana, M Kismurtono, Khoirun Nisa, dan C Dewi Poeloengasih. 2010. "Modifikasi Zeolit Lokal Gunung Kidul sebagai Upaya Peningkatan Performa Biogas untuk Pembangkit Listrik." Dalam *Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses 2010*, 1–6. Semarang.
- WHO. 2004. "Environmental Health Criteria 213: Carbon Monoxide." Dalam *Environmental Health Criteria 213 : Carbon Monoxide*, Second, 36–41, 140. USA: Environmental Protection Agency. <https://doi.org/10.22159/ijpps.2016v8i12.14510>.
- Yuliusman. 2016. "Aktivasi Zeolit Alam Lampung sebagai Adsorben Karbon Monoksida Asap Kebakaran." Dalam *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan": Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia*, 1–6. Yogyakarta: UPN Veteran Yogyakarta.