




WHITE PAPER

JANUARY 2021

DAMPAK PENGGUNAAN BIODIESEL KELAPA SAWIT TERHADAP KUALITAS UDARA DI INDONESIA

Jane O'Malley, Stephanie Searle, dan Tenny Kristiana



www.theicct.org
communications@theicct.org
[twitter @theicct](https://twitter.com/theicct)

BEIJING | BERLIN | SAN FRANCISCO | SÃO PAULO | WASHINGTON

icct
THE INTERNATIONAL COUNCIL
ON CLEAN TRANSPORTATION

UCAPAN TERIMA KASIH

Studi ini didukung oleh David and Lucile Packard Foundation dan Norwegian Agency for Development Cooperation (NORAD). Terima kasih kepada Francisco Posada untuk ulasannya.

International Council on Clean Transportation
1500 K Street NW, Suite 650,
Washington, DC 20005

communications@theicct.org | www.theicct.org | [@TheICCT](https://twitter.com/TheICCT)

© 2021 International Council on Clean Transportation

RANGKUMAN EKSEKUTIF

Sejak 2008, produksi dan konsumsi biodiesel kelapa sawit telah mengalami perkembangan sangat signifikan di Indonesia dan saat ini digunakan secara luas di sektor transportasi, industri dan tenaga listrik. Hal ini didorong oleh adanya mandat pencampuran biofuel di dalam negeri dan tingginya permintaan biofuel dari pasar luar negeri. Pada tahun 2019, Indonesia mengambil kebijakan mencampurkan 20% (B20) biodiesel kelapa sawit dengan bahan bakar solar biasa (fosil) dan diperkirakan persentase pencampuran akan terus dinaikkan. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) telah mengumumkan penerapan B30 tahun ini dan berniat untuk meningkatkan target pencampuran hingga B100 atau penggunaan biodiesel murni di masa yang akan datang.

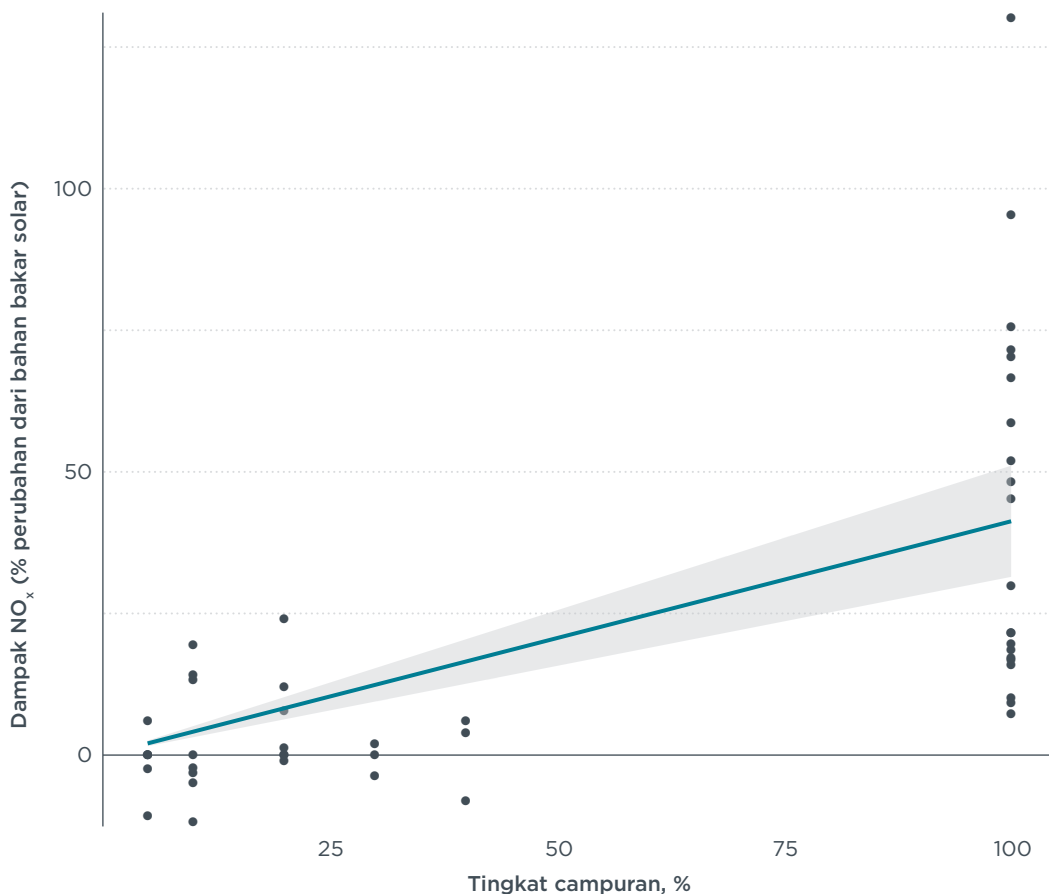
Sementara itu, buruknya kualitas udara menjadi perhatian utama di kota-kota di Indonesia, termasuk di Jakarta. Untuk mengatasi hal ini, pemerintah telah menerapkan standar emisi kendaraan untuk polutan yang membahayakan kesehatan manusia, seperti *nitrogen oxides* (NO_x), *particulate matter* (PM), *unburned hydrocarbons* (HC), dan *carbon monoxide* (CO); standar tersebut menetapkan batas maksimum polutan yang dihasilkan kendaraan. Pemerintah berencana untuk memperbarui standar Euro 2/II yang saat ini berlaku untuk kendaraan diesel menjadi Euro 4/IV yang akan diterapkan secara menyeluruh pada tahun 2022. Dalam studi ini, kami menyelidiki bagaimana tujuan pemerintah untuk meningkatkan pencampuran biodiesel akan berdampak terhadap emisi kendaraan.

Kami melakukan meta-analisis berdasarkan tinjauan literatur dari 132 studi emisi kendaraan yang menguji konsentrasi polutan knalpot untuk NO_x, PM, HC, dan CO. Kami membandingkan emisi gas buang kendaraan dari pembakaran campuran biodiesel dengan emisi dari pengujian identik pada bahan bakar solar untuk menghitung dampak emisi, atau persentase perubahan emisi dari biodiesel dibandingkan dengan bahan bakar solar dasar. Ketika data mencukupi, kami mendapatkan hasil dari subset 28 studi tentang biodiesel kelapa sawit, yang merupakan bahan baku utama di Indonesia.

Kami menjalankan sejumlah regresi linier untuk menguji pengaruh tingkat campuran biodiesel pada emisi gas buang kendaraan untuk berbagai jenis bahan baku, siklus uji emisi, sistem *aftertreatment* gas buang, tingkat sulfur solar, dan sistem injeksi bahan bakar. Berdasarkan pertimbangan terhadap semua data (132 studi), kami menemukan bahwa pembakaran biodiesel kelapa sawit murni (B100) di dalam kendaraan meningkatkan NO_x rata-rata sebesar 8% dibandingkan dengan solar biasa. Peningkatan NO_x ini sebanding dengan tingkat campuran biodiesel; sebagai contoh, kami menemukan B50 meningkatkan NO_x sebesar 4%.

Namun demikian, sebagian dataset merupakan hasil studi yang dilakukan beberapa dekade lalu pada mesin lama dan menggunakan bahan bakar berkualitas rendah. Sementara itu, Indonesia telah memulai transisi ke mesin diesel *common-rail* yang lebih modern dan telah mengumumkan target penerapan batas yang lebih ketat terkait kandungan sulfur dalam bahan bakar. Dengan menyaring data dan hanya menggunakan studi yang mencerminkan kedua perkembangan modern tersebut, kami menemukan bahwa biodiesel kelapa sawit diperkirakan dapat meningkatkan NO_x jauh lebih besar dibandingkan jika kami menganalisis seluruh literatur. Gambar ES1 menunjukkan kompilasi hasil pengujian peningkatan NO_x pada campuran biodiesel kelapa sawit dibandingkan dengan solar biasa, khususnya untuk bahan bakar rendah sulfur (≤ 50 ppm/partikel per juta kandungan sulfur) dan mesin modern. Garis tren dalam gambar menunjukkan statistik peningkatan signifikan pada dampak NO_x dari penggunaan biodiesel relatif terhadap tingkat campuran biodiesel berdasarkan analisis regresi, dan kerucut berbayang pada gambar menunjukkan *standard error*. Berdasarkan data ini, kami memperkirakan emisi NO_x dari mesin diesel modern, termasuk kendaraan yang memenuhi standar emisi Euro 4/IV, meningkat masing-masing sebesar 12%,

17%, dan 41% dengan tingkat campuran B30, B40 dan B100 di Indonesia. Akan tetapi, mengingat besarnya variasi dalam dataset, besarnya dampak NO_x biodiesel yang tepat belum dapat dipastikan.



Gambar ES1. Prediksi dampak NO_x biodiesel kelapa sawit terhadap mesin diesel modern di Indonesia.

Hasil temuan kami menunjukkan bahwa biodiesel kelapa sawit diperkirakan meningkatkan emisi NO_x dibandingkan dengan solar biasa, baik pada mesin kendaraan lama maupun baru dan efeknya lebih terasa pada kendaraan baru dan bahan bakar dengan kandungan sulfur rendah. Selain itu, meskipun biodiesel kelapa sawit dapat memperbaiki emisi HC, CO, dan PM, dibandingkan dengan solar biasa, manfaat tersebut berkurang ketika digunakan pada kendaraan yang lebih modern.

DAFTAR ISI

Rangkuman Eksekutif	i
Pendahuluan	1
Latar belakang	3
Metodologi	4
Hasil dan diskusi	5
Sifat bahan baku FAME	6
Siklus uji emisi.....	9
Pengembangan baru	11
Dampak biodiesel terhadap polusi udara secara keseluruhan di Indonesia	17
Referensi	18
Lampiran A - Tabel rangkuman pembentukan emisi	27
Lampiran B - Daftar studi	28
Lampiran C - Rangkuman siklus uji emisi	34

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara terpadat keempat di dunia dengan jumlah kendaraan yang terus bertambah (Shao, Miller, & Jin, 2020). Biodiesel menjadi bagian penting dalam pasar bahan bakar domestik (sekitar 20%), dan karena besarnya cadangan minyak sawit di dalam negeri, minyak sawit mentah (CPO) menjadi bahan baku utama yang digunakan. Meskipun konsumsi bahan bakar solar di sektor transportasi menurun antara tahun 2010-2015, tren ini telah berbalik (McDonald & Rahmanulloh, 2019). Konsumsi biodiesel juga meningkat dengan cepat. Penggunaannya didukung oleh dana CPO nasional, yang mensubsidi penggunaan biodiesel kelapa sawit dengan menggunakan pungutan yang dikumpulkan dari ekspor minyak sawit dan produk sawit (Rifin, 2010). Mandat pencampuran pertama kali dimasukkan dalam Peraturan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) No. 32, dan nilainya kemudian dinaikkan menjadi 30% pada tahun 2020 berdasarkan Peraturan Kementerian ESDM 12/2015.

Lebih dari setengah penduduk Indonesia tinggal di pusat perkotaan (Organisation for Economic Co-operation and Development & International Energy Agency, 2017) dan kualitas udara menjadi perhatian khusus di daerah padat penduduk dengan mobilitas yang tinggi. Dalam skala global, Indonesia termasuk salah satu negara dengan tingkat kematian tertinggi akibat polusi udara di area terbuka; sebuah studi menemukan bahwa Indonesia menyumbang sepertiga dari seluruh kematian akibat polusi udara di area terbuka di Asia Tenggara pada tahun 2017 (Health Effects Institute, 2019). Greenstone dan Fan memperkirakan bahwa materi partikulat (PM) yang halus mengurangi rata-rata harapan hidup setidaknya 1,2 tahun di seluruh Indonesia (2019). Studi tersebut juga melaporkan bahwa emisi kendaraan menyumbang lebih dari 30% emisi PM halus dan 70% emisi PM yang lebih besar atau kasar di Jakarta antara 2008-2009.

Terdapat bukti yang kuat bahwa *nitrogen oxides* (NO_x), PM, *carbon monoxide* (CO), dan *unburned hydrocarbons* (HC) memiliki dampak yang merugikan terhadap Kesehatan. NO_x berkontribusi pada kabut asap dan pembentukan ozon yang dapat merusak visibilitas dan Kesehatan pernapasan (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2015). Paparan ozon jangka panjang dapat meningkatkan risiko kematian akibat gangguan pernapasan (Jerrett dkk., 2009) sedangkan paparan jangka pendek dapat menyebabkan rawat inap karena asma dan penyakit pernapasan lainnya (Burnett dkk., 2001). Sebuah laporan tentang hubungan antara emisi kendaraan dan kematian memperkirakan bahwa emisi NO_x , sebagai prekursor PM sekunder dan produksi ozon bertanggung jawab atas lebih dari 100.000 kematian prematur di seluruh dunia pada tahun 2015 (Anenberg dkk., 2017). PM, yang juga merupakan produk sampingan dari pembakaran, memiliki keterkaitan pula dengan kematian prematur serta penyakit pernapasan dan kardiovaskular. Senyawa HC yang tidak terbakar seperti formaldehida diklasifikasikan sebagai "*probable human carcinogens*". Sementara paparan CO, sebuah senyawa perantara yang terbentuk selama pembakaran yang tidak sempurna, mempengaruhi kesehatan kardiovaskular karena membatasi kemampuan darah untuk membawa oksigen. Kelompok yang paling rentan terhadap paparan polutan udara ini adalah anak-anak, lansia, dan mereka yang telah memiliki penyakit/kondisi sebelumnya (U.S. Environmental Protection Agency [EPA], 2015).

Untuk mengatasi permasalahan polusi udara, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengadopsi standar emisi Euro 2/II untuk kendaraan berat dan ringan pada tahun 2010 dan 2011 (Peraturan KLHK No. 04/2009). Standar Euro 4/IV diadopsi untuk kendaraan berbahan bakar bensin pada tahun 2018 (No. P.20/MENLHK/SETJEN/KUM.1/3/2017) dan akan diberlakukan untuk kendaraan diesel mulai tahun 2022, setelah tertunda selama satu tahun. Untuk memenuhi standar emisi Euro 4/IV, perubahan pada pasar diesel diharapkan menjadi dua kali lipat: penggunaan teknologi pengontrol emisi yang lebih canggih dan penghapusan secara bertahap solar bersulfur

tinggi. Saat ini, 96,5% bahan bakar solar di pasaran memiliki kandungan sulfur rata-rata 2.500 ppm, berdasarkan standar Euro 4/IV, kandungan sulfur pada bahan bakar dibatasi hingga 50 ppm (Shao dkk., 2020). Selanjutnya, Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi telah menetapkan target BBM 50 ppm per 2025, lebih rendah dari target sebelumnya 500 ppm per 2021 (Keputusan Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi No. 3674K/24/DJM/2006 dan 3675K/24/DJM/2006). Karena target sulfur 2025 akan diterapkan tiga tahun kemudian setelah penerapan standar kendaraan Euro 4/IV yang direncanakan, pelabelan bahan bakar yang tepat pada pompa dan kepatuhan serta penegakan hukum akan sangat penting selama awal tahun penerapan Euro 4/IV.

Seiring dengan penerapan standar emisi kendaraan yang lebih maju, batasan sulfur yang lebih rendah, dan ekspansi biodiesel kelapa sawit di Indonesia, perlu dipahami apa dampak dari peningkatan pencampuran biodiesel kelapa sawit terhadap emisi kendaraan. Studi ini bersumber dari studi ICCT tahun 2018 yang menganalisis dampak pencampuran biodiesel terhadap emisi polutan udara di Indonesia (Searle & Bitnere, 2018). Studi ini merupakan pembaruan dari studi 2018 yang kami lakukan dengan memasukkan 84 studi terbaru tentang kinerja biodiesel dan emisi gas buang, di mana 28 diantaranya dilakukan dengan menggunakan minyak sawit dan sembilan di antaranya dilakukan di Indonesia atau Malaysia, dan hasilnya kami susun ke dalam sebuah meta-analisis. Studi ini juga berfokus pada kondisi mengemudi kendaraan, teknologi kontrol emisi, dan sifat fisikokimia bahan bakar.

LATAR BELAKANG

Penelitian tentang emisi gas buang biodiesel selama lebih dari dua puluh tahun terakhir telah dilakukan secara ekstensif. Environmental Protection Agency/EPA (2002) dari Amerika Serikat menerbitkan studi penting yang melaporkan adanya peningkatan sebesar 2,2% emisi NO_x akibat campuran 20% biodiesel (B20) dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa dan pengurangan emisi HC, CO dan PM di semua tingkat campuran biodiesel. Satu dekade kemudian, temuan EPA didukung oleh analisis yang dilakukan oleh Hoekman dan Robbins (2012). Studi meta-analisis yang mereka lakukan mengikuti metodologi yang serupa yang diterapkan EPA tetap dengan pembatasan data pada mesin empat tak kendaraan sedang dan berat model tahun 1987 ke atas.

Walaupun sebagian besar literatur sepakat bahwa biodiesel meningkatkan emisi NO_x , penyebab tren ini berasal dari berbagai mekanisme teoritis (Hoekman dan Robbins, 2012). Mekanisme yang paling mudah dipahami tentang kemungkinan peningkatan emisi NO_x akibat biodiesel berkaitan dengan waktu injeksi bahan bakar. Biodiesel memiliki kepadatan dan modulus curah yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar biasa dan oleh karena itu, perlu dikompresi ke tingkat yang lebih rendah ketika diinjeksikan ke dalam mesin diesel.¹ Hal ini menjadikan injeksi menjadi lebih cepat dan periode waktu tunggu yang lebih lama ketika bahan bakar memasuki ruang bakar dan saat pembakaran terjadi; pengukuran ini dikenal dengan penundaan pembakaran atau '*ignition delay*'. *Ignition delay* yang berkepanjangan memberikan waktu untuk biodiesel bercampur dengan udara sebelum pembakaran. Semakin besar campuran udara dan bahan bakar akan menyebabkan pembakaran yang lebih cepat dan sempurna, yang diikuti dengan peningkatan tekanan dan suhu pada silinder (Heywood, 1988). Walaupun pembentukan NO_x meningkat secara cepat dengan suhu pembakaran, *ignition delay* sendiri tidak cukup untuk menjelaskan peningkatan NO_x dari campuran biodiesel. Studi telah menemukan bahwa ketika *ignition delay* dikendalikan dengan ketat, baik melalui perubahan mekanis yang menunda waktu injeksi maupun melalui perubahan kimiawi seperti peningkatan angka setana (CN) bahan bakar, campuran biodiesel masih menghasilkan NO_x yang lebih tinggi (Monyem & Gerpen, 2001). Selain itu, dampak dari biodiesel terhadap keberhasilan teknologi pengendalian emisi dan sistem injeksi mesin masih belum dapat dipahami dengan baik.

Studi ini dilakukan berdasarkan sebuah analisis yang dilakukan oleh Searle dan Bitnere (2018) tentang dampak emisi biodiesel di Indonesia. Dari hasil 52 studi literatur yang ada, penulis menemukan bahwa pencampuran biodiesel kelapa sawit meningkatkan pembentukan NO_x dan PM, walaupun menurunkan HC dan CO. Penulis juga memperkirakan bahwa dampak polusi udara yang berbahaya dari biodiesel diperkirakan akan semakin parah seiring dengan beralihnya Indonesia menuju teknologi kendaraan dan mesin yang lebih bersih. Studi yang kami lakukan menyajikan sebuah meta-analisis yang lebih komprehensif berdasarkan studi terhadap sejumlah besar kendaraan dan menganalisis tren di antara karakteristik kendaraan dan bahan bakar secara lebih mendalam. Hasil studi ini kemudian diterapkan dalam konteks Indonesia dengan mempertimbangkan bahan baku utama biodiesel, kondisi mengemudi, dan standar emisi di Indonesia. Sebagian besar studi tentang emisi biodiesel berfokus pada pasar Eropa dan Amerika Utara, namun jika dibandingkan dengan kawasan tersebut, pasar kendaraan di Indonesia cenderung masih didominasi teknologi kendaraan yang lebih tua, menggunakan bahan bakar bersulfur tinggi dan menggunakan bahan baku kelapa sawit daripada kedelai dan *rapeseed*; iklim Indonesia juga lebih hangat (Searle & Bitnere, 2018).

Selain itu, analisis kami lakukan dengan memperhitungkan tren terkini, termasuk penerapan teknologi pengontrol emisi modern, sistem injeksi bahan bakar *common-rail*, dan bahan bakar solar bersulfur rendah (LSD). Selain berfokus pada NO_x , studi yang kami lakukan menganalisis pengaruh biodiesel terhadap emisi HC, CO, dan PM.

¹ Modulus curah atau elastisitas dapat mengukur ketahanan bahan bakar terhadap kompresi.

METODOLOGI

Analisis ini mencakup datapoint dari studi terhadap 132 kinerja biodiesel dan emisi gas buang yang dilakukan antara tahun 1983 dan 2018. Dalam hal ini, biodiesel mengacu pada *Fatty Acid Methyl Esters* (FAME) dan bukan alternatif pengganti solar lainnya seperti *Hydrotreated Vegetable Oil* (HVO). Daftar terperinci dari keseluruhan studi kinerja dapat dilihat pada Lampiran B. Terdapat 28 studi termasuk pengujian pada biodiesel kelapa sawit yang kami analisis sebagai data subset. Apabila data spesifik tentang kelapa sawit tidak memadai atau secara statistik tidak signifikan, kami memasukkan hasil studi dari bahan baku lainnya seperti kedelai, *rapeseed*, dan minyak jelantah (UCO) dan menganalisis dataset lengkap kami. Dataset yang lebih besar dapat memberikan daya statistik yang lebih besar untuk mendeteksi dampak yang signifikan.

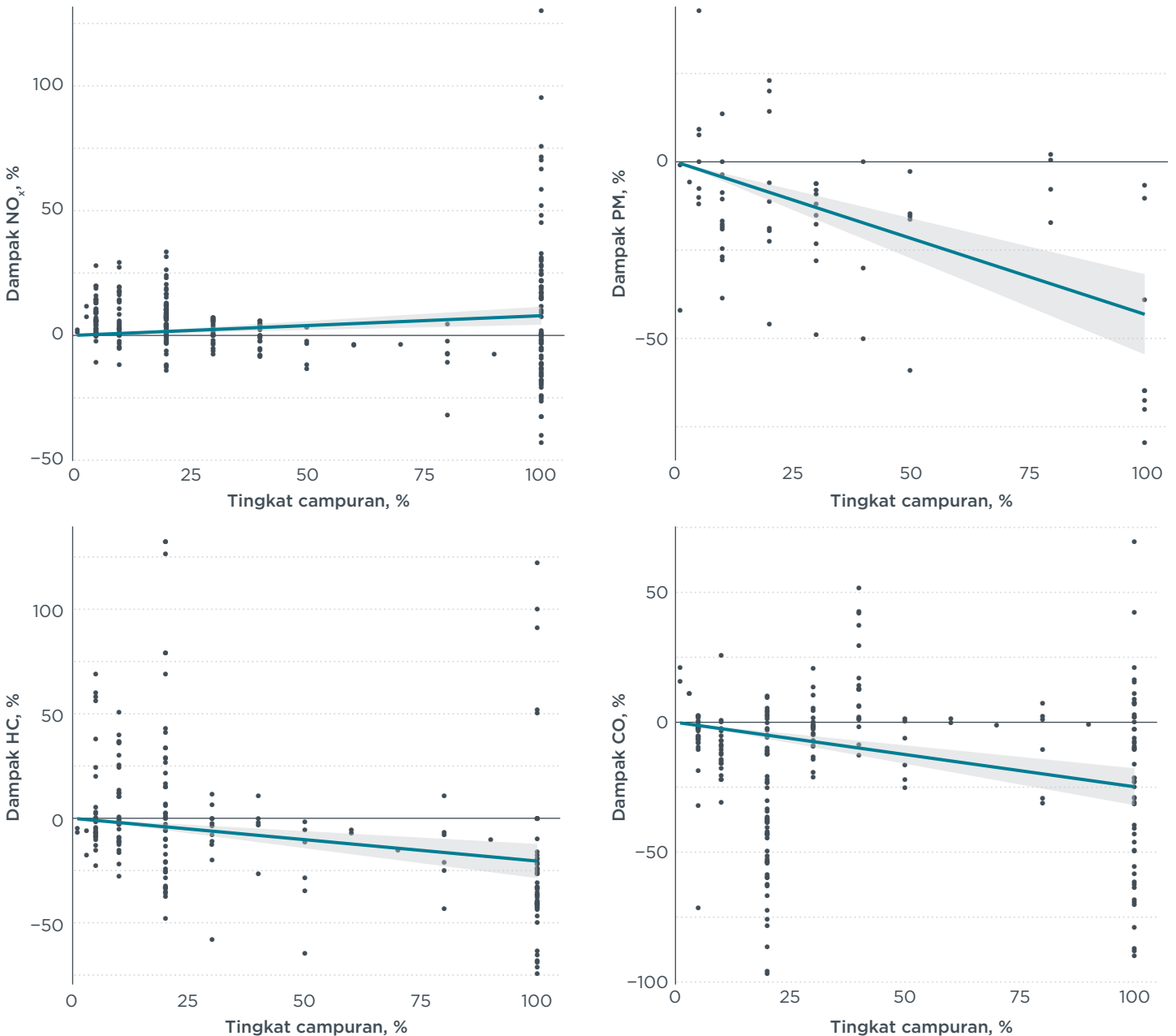
Emisi yang kami analisis dilakukan baik terhadap kendaraan ringan dan kendaraan berat serta mesin silinder tunggal di laboratorium. Meskipun EPA mengabaikan studi tentang mesin silinder tunggal dalam meta-analisisnya tahun 2002, kami menemukan bahwa hasil studinya konsisten dengan mesin kendaraan yang ada di jalan raya. Studi laboratorium dilakukan terhadap kerangka dinamometer dengan berbagai siklus pengujian transien dan kondisi yang tetap. Sebagian besar studi menyertakan beberapa informasi tentang teknologi pengontrol emisi kendaraan/mesin, seperti resirkulasi gas buang dan *selective catalytic reduction* (SCR).

Dari setiap studi, kami mencatat data emisi gas buang untuk solar biasa dan campuran biodiesel beserta sifat bahan bakar yang sesuai, spesifikasi kendaraan, dan kondisi siklus pengujian. Kami menghitung dampak emisi biodiesel menggunakan persentase perubahan konsentrasi polutan dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa. Dengan menghitung persentase alih-alih total perubahan, data dinormalisasi untuk mengontrol setiap variabel perancu. Setelah mengumpulkan semua *data point* yang telah dihitung, kami mencoba serangkaian regresi linier yang mengatur tingkat campuran biodiesel sebagai variabel independen.

Sebagaimana studi yang dilakukan Searle dan Bitnere (2018), kami memperbaiki perpotongan- y di titik 0 dan menginterpretasikan hubungan statistik yang signifikan pada titik $p < 0.05$. Garis tren hanya ada di dalam gambar apabila angkanya signifikan secara statistik. Garis tren positif menunjukkan bahwa campuran biodiesel menghasilkan emisi yang lebih tinggi dibandingkan dengan solar biasa, sedangkan nilai negatif menunjukkan pengurangan emisi dari biodiesel jika dibandingkan dengan solar biasa. Tidak satupun studi dari 132 studi tersebut yang kami hilangkan hasilnya, meskipun banyak hasil yang di luar normal/berbeda hasilnya tetap kami sertakan sebab kemungkinan ada instrumentasi yang salah, kondisi siklus pengujian yang tidak representatif, atau kesalahan manusia. Apabila regresi linier tidak dapat digunakan sebagai model penjelasan yang sesuai, regresi berganda dan tes *analysis of statistical variance* (ANOVA) akan digunakan untuk mendeteksi perbedaan di antara perlakuan yang diberikan.

HASIL DAN DISKUSI

Sesuai dengan dua meta-analisis lain yang dilakukan dalam dua dekade terakhir, kami menemukan bahwa, rata-rata biodiesel kelapa sawit meningkatkan pembentukan NO_x dan menurunkan PM, CO dan HC. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 1. Dengan menggunakan regresi linier pada dampak NO_x dengan tingkat campuran biodiesel yang digunakan pada seluruh dataset, kami menemukan bahwa dampak NO_x biodiesel mencapai 8% untuk 100% biodiesel (B100). Analisis ini memprediksi peningkatan NO_x sebesar 0,8% untuk campuran biodiesel sebesar 10% dibandingkan dengan solar biasa.



Gambar 1. Dampak emisi biodiesel kelapa sawit menurut tingkat campuran

Untuk PM kami memperkirakan pengurangan emisi sebesar 43% dari B100 dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa. Meskipun tren pada PM cukup signifikan, besarnya dampak penggunaan biodiesel terhadap PM lebih tidak pasti jika dibandingkan dengan dampaknya terhadap NO_x . Hal ini ditunjukkan oleh kerucut yang lebih besar yang membungkus garis tren regresi, yang menunjukkan kesalahan standar pada regresi. Penurunan signifikan juga terlihat pada emisi HC dan CO akibat

penggunaan campuran biodiesel. Kami memperkirakan penurunan nilai masing-masing sebesar -20% dan -25% dengan B100 jika dibandingkan dengan solar biasa.

Kami juga menganalisis pengaruh variabel lain terhadap hubungan antara tingkat campuran biodiesel dan emisi polutan udara yang kami bedakan menjadi tiga bagian: sifat bahan baku, kondisi siklus uji kendaraan, dan perkembangan modern di industri diesel. Mengingat minyak sawit adalah bahan baku utama di Indonesia, kami mempersempit hasil studi kami pada sawit saja, apabila tersedia data yang memadai.

SIFAT BAHAN BAKU FAME

Beberapa studi menunjukkan bahwa dampak biodiesel terhadap NO_x menurun dalam penggunaan minyak sawit jika dibandingkan dengan bahan baku lainnya (Kinoshita, Hamasaki, & Jaqin, 2003; Mormino, Verhelst, Sierens, Stevens, & De Meulenaer, 2009). Hal ini diduga karena karakteristik fisik kelapa sawit yang berbeda dari minyak nabati pada umumnya, seperti kedelai, *rapeseed* dan UCO. Hasil studi kami juga menunjukkan tren tersebut dan Tabel 1 menunjukkan bahwa kelapa sawit memiliki dampak terendah terhadap NO_x di seluruh tingkat campuran dibandingkan dengan seluruh bahan baku. Nilai primer yang dilaporkan pada Tabel 1 menunjukkan nilai rata-rata dampak biodiesel terhadap NO_x , dimana hasil dalam tanda kurung mewakili kesalahan standar dari regresi. Data B30 mencerminkan kebijakan jangka pendek di Indonesia, B40 menunjukkan dampak lanjutan terhadap NO_x jika Indonesia meningkatkan persentase campuran wajib, dan B100 menunjukkan besarnya dampak biodiesel.

Dari kumpulan data tersebut, biodiesel dari rapeseed memiliki dampak tertinggi terhadap NO_x yaitu, sebesar 13,4% pada tingkat campuran 100%. Kami juga menyelidiki dampak sifat bahan baku terhadap HC, CO, dan PM.

Tabel 1. Prediksi dampak NO_x sesuai tipe bahan baku biodiesel dan tingkat campuran dengan kesalahan standar di dalam tanda kurung

Dampak NO_x (%)	Kelapa sawit	Rapeseed	Kedelai	UCO
B30	2,4 (1,8 - 2,9)	4,0 (3,6 - 4,4)	2,5 (2,1 - 3,0)	2,5 (2,0 - 3,1)
B40	3,2 (2,4; 3,9)	5,3 (4,8 - 5,9)	3,4 (2,8 - 4,0)	3,4 (2,8 - 3,9)
B100	7,9 (6,1; 9,7)	13,4 (12,0 - 14,7)	8,5 (7,0 - 10,0)	8,4 (7,1 - 9,7)

Perbedaan emisi NO_x antara berbagai bahan baku biodiesel mungkin disebabkan oleh perbedaan sifat fisik, seperti densitas, kekentalan/viskositas, dan CN sebagaimana diperinci pada Tabel 2. Derajat ketidakjenuhan bahan baku dan panjang rantai asam lemak mungkin juga mempengaruhi pembentukan NO_x . Data dua variabel terakhir diambil dari Hoekman dkk. (2012). Parameter lainnya diambil dari tabel sifat dalam tinjauan pustaka dan yang dirata-rata menurut jenis bahan baku.

Tabel 2. Sifat bahan baku FAME

Bahan Baku	Bilangan Setana*	Densitas (kg/m^3) *	Viskositas (mm^2/s) *	Ketidakjenuhan†	Panjang Rantai†
Solar	50,37	0,836	3,08	N/A	N/A
Kedelai	51,29	0,857	3,54	1,50	17,90
Rapeseed	56,45	0,859	4,42	1,31	17,90
UCO	54,64	0,860	4,64	1,06	18,50
Lemak hewani	56,65	0,876	3,83	0,59	17,30
Kelapa sawit	57,81	0,851	5,01	0,62	17,20
Kelapa	58,68	0,875	4,39	0,12	13,40

* Data bersumber dari literatur dirata-rata menurut jenis bahan baku

† Data diambil dari Hoekman dkk. (2012)

Untuk semua bahan baku yang ditinjau disini, biodiesel memiliki CN yang lebih tinggi daripada bahan bakar solar biasa. CN merupakan sifat non-fisik yang merupakan ukuran penyalaan bahan bakar (Graboski, McCormick, Allenman, & Herring, 2003; Hoekman dkk., 2012). CN berbanding terbalik dengan jumlah waktu antara injeksi bahan bakar ke ruang pembakaran dan pembakaran. Dengan demikian, bahan bakar dengan CN yang lebih tinggi akan terbakar lebih cepat. Biodiesel juga memiliki kandungan oksigen yang tinggi, yakni sekitar 10% dan 12% dari beratnya, sedangkan bahan bakar solar biasa tidak mengandung oksigen (Demirbas, 2009). Meskipun bahan bakar beroksigen tinggi memiliki kandungan energi yang lebih rendah, bahan bakar beroksigen mengalami pembakaran yang efisien, mengurangi pembentukan CO, senyawa perantara pembakaran, HC yang tidak terbakar di aliran pembuangan. Oksidasi juga menekan pembentukan PM atau “soot” pada knalpot pembuangan (Wang, Li, Wang, & Reitz, 2016).

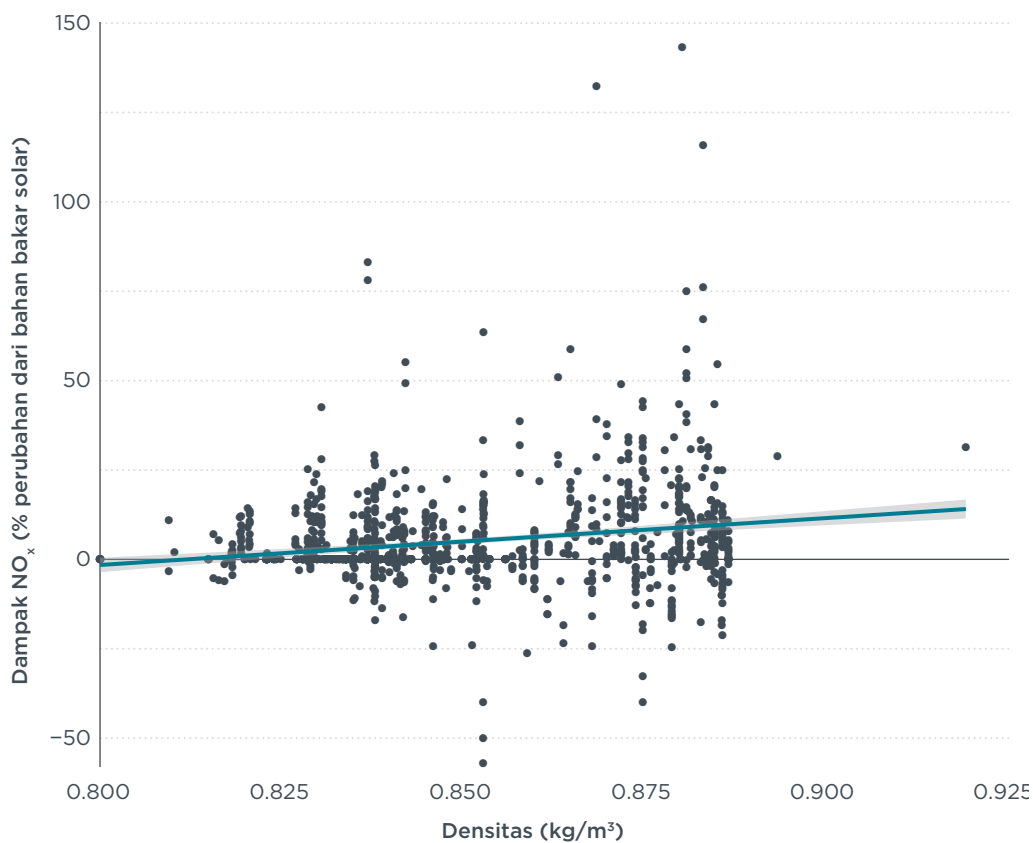
Panjangnya rantai asam lemak dan derajat ketidakjenuhan berperan dalam CN dan viskositas. Derajat rata-rata ketidakjenuhan merupakan fungsi dari profil asam lemak setiap bahan bakar dan dihitung dengan cara mengalikan persentase massa asam lemak dalam FAME dengan jumlah ikatan rangkap karbonnya (Hoekman dkk., 2012). Panjang rantai rata-rata setiap biodiesel juga dihitung dengan cara yang sama, yaitu dengan mengalikan persentase massa asam lemak dengan jumlah karbon atom dalam satu rantai asam lemak yang dijumlahkan dari seluruh profil. Kejenuhan dan panjang rantai juga berkorelasi dengan sifat fisik lainnya. Mishra, Anand, and Mehta (2016) menemukan bahwa peningkatan pada panjang rantai asam lemak dan derajat kejenuhan meningkatkan viskositas dan CN bahan bakar. Bahan bakar yang memiliki kejenuhan yang lebih tinggi berkaitan pula dengan kepadatan bahan bakar yang lebih rendah (Dharma, Ong, Masjuki, Sebayang, & Silitonga, 2016). Sebuah studi percobaan menemukan bahwa bahan baku yang tidak jenuh berkaitan pula dengan pembentukan soot yang lebih tinggi karena adanya ikatan karbon rangkap (Wang, Li dkk., 2016).

Minyak sawit dan kelapa termasuk dalam asam lemak jenuh, sedangkan kedelai serta *rapeseed*, yang juga bahan baku FAME, memiliki tingkat kejenuhan terendah dalam kumpulan data ini. Salah satu alasan mengapa biodiesel kelapa sawit memiliki CN tertinggi dari semua bahan baku yang digunakan dalam studi ini adalah karena tingkat kejenuhannya yang tinggi. CN yang tinggi berarti biodiesel kelapa sawit terbakar lebih cepat daripada bahan bakar lain ketika sampai di ruang bakar, dan ini kemungkinan menghalangi, sampai batas tertentu, *ignition delay* yang lebih lama yang diamati pada biodiesel dibandingkan dengan solar biasa. Karena *ignition delay* yang lebih lama pada biodiesel dianggap sebagai salah satu kontributor utama dampak biodiesel terhadap NO_x, tingginya tingkat kejenuhan pada biodiesel kelapa sawit – dan juga CN – kemungkinan menjelaskan mengapa biodiesel kelapa sawit pada umumnya ditemukan memiliki dampak lebih rendah terhadap NO_x dibandingkan dengan biodiesel yang diproduksi dari bahan baku lainnya.

Biodiesel juga lebih padat dan lebih kental dibandingkan dengan solar biasa. Kedua sifat tersebut memiliki implikasi terhadap efisiensi pembakaran dan sejauh mana bahan bakar menyebar menjadi tetesan yang lebih halus (yaitu atomisasi semprot). Dampak lebih kentalnya bahan bakar pada pembakaran mencapai tiga kali lipat: buruknya atomisasi semprotan yang mengurangi efisiensi pembakaran (Agarwal dkk., 2015), peningkatan panas pada pembakaran (Mirhashemi & Sadrnia, 2020), dan peningkatan tekanan yang cepat di dalam pompa bahan bakar (Lapuerta, Agudelo, Prorok, & Boehman, 2012). Tingginya tekanan dapat menurunkan kompresibilitas bahan bakar sehingga mempercepat waktu injeksi. Mengingat bahwa biodiesel secara keseluruhan meningkatkan emisi NO_x dan bahwa bahan bakar jenuh memiliki viskositas yang cukup tinggi tetapi mengurangi dampak terhadap NO_x, dampak viskositas bahan bakar pada atomisasi semprotan tampaknya bukan merupakan dampak utama pada pembentukan NO_x.

Kepadatan bahan bakar juga terkait dengan sifat pembakaran, meskipun mekanismenya tidak dipahami dengan baik di semua literatur. Kepadatan yang tinggi berkorelasi dengan tingginya aroma dan rendahnya CN, kedua sifat tersebut dapat dikaitkan dengan pembentukan NO_x yang tinggi (Lee, Pedley, & Hobbs, 1998). Lee dkk. (1998) juga menemukan bahwa meskipun tingkat kepadatan rendah bermanfaat besar untuk mengurangi PM dan NO_x , namun juga dapat menyebabkan meningkatnya CO dan HC. Perubahan kepadatan juga mempengaruhi efisiensi volumetrik yang secara khusus relevan dengan mesin berteknologi lama yang tidak dapat mengimbangi perubahan volumetrik saat menginjeksikan bahan bakar ke ruang bakar (Bacha dkk., 2007). Dengan demikian, hubungan antara kepadatan dan emisi mungkin kurang relevan untuk mesin modern yang memiliki kemampuan untuk merespon secara dinamis perubahan waktu injeksi dan laju aliran massa.

Hasil studi kami menunjukkan korelasi positif antara kepadatan dan dampak biodiesel terhadap NO_x (lihat Gambar 2). Untuk biodiesel kelapa sawit, yang memiliki kepadatan terendah dibandingkan dengan bahan baku FAME dalam dataset, dampak terhadap NO_x dapat dimitigasi, akan tetapi masih tetap lebih besar jika dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa. Berbeda dengan hasil temuan Lee et al. (1998), kami menemukan hubungan yang terbalik antara HC, PM, dan kepadatan, dan tidak ada hubungan yang signifikan antara kepadatan dan CO dari seluruh dataset kami.



Gambar 2. Dampak NO_x Biodiesel berdasarkan kepadatan bahan bakar (semua data)

Selain susunan kimiawi bahan baku, kondisi eksternal seperti praktik penyimpanan dan penanganan dapat mengubah sifat fisiknya. Khalid dkk. (2013) menemukan bahwa waktu penyimpanan yang lebih lama meningkatkan viskositas, kepadatan, dan kotoran bahan bakar yang tidak dapat larut dari bahan baku, sekaligus menurunkan nilai yodium, atau derajat kejenuhannya. Untuk minyak sawit, periode penyimpanan yang lebih panjang diperkirakan akan meningkatkan emisi NO_x karena viskositas yang lebih tinggi dan penurunan kejenuhan bahan bakar yang dihasilkan. Khalid dkk. (2013) juga mengamati bahwa tempat penyimpanan yang bersuhu tinggi dapat meniadakan

dampak dari jangka waktu penyimpanan yang lebih panjang dengan mengurangi peningkatan viskositas bahan baku. Namun demikian, tidak diketahui apakah tempat penyimpanan yang bersuhu tinggi, yang biasanya dialami di Indonesia, dapat sepenuhnya mengimbangi degradasi bahan baku yang terjadi di tempat penyimpanan.

Sebagaimana dijelaskan secara terperinci di atas, sifat bahan baku seringkali memiliki dampak yang saling bersaing pada mekanisme pembentukan polutan udara konvensional. Sifat fisik bukanlah satu-satunya parameter yang mempengaruhi pembentukan emisi gas buang; oleh karena itu, kami menyelidiki pengaruh parameter tambahan lainnya, seperti siklus uji emisi dan kualitas solar pada bab berikutnya.

SIKLUS UJI EMISI

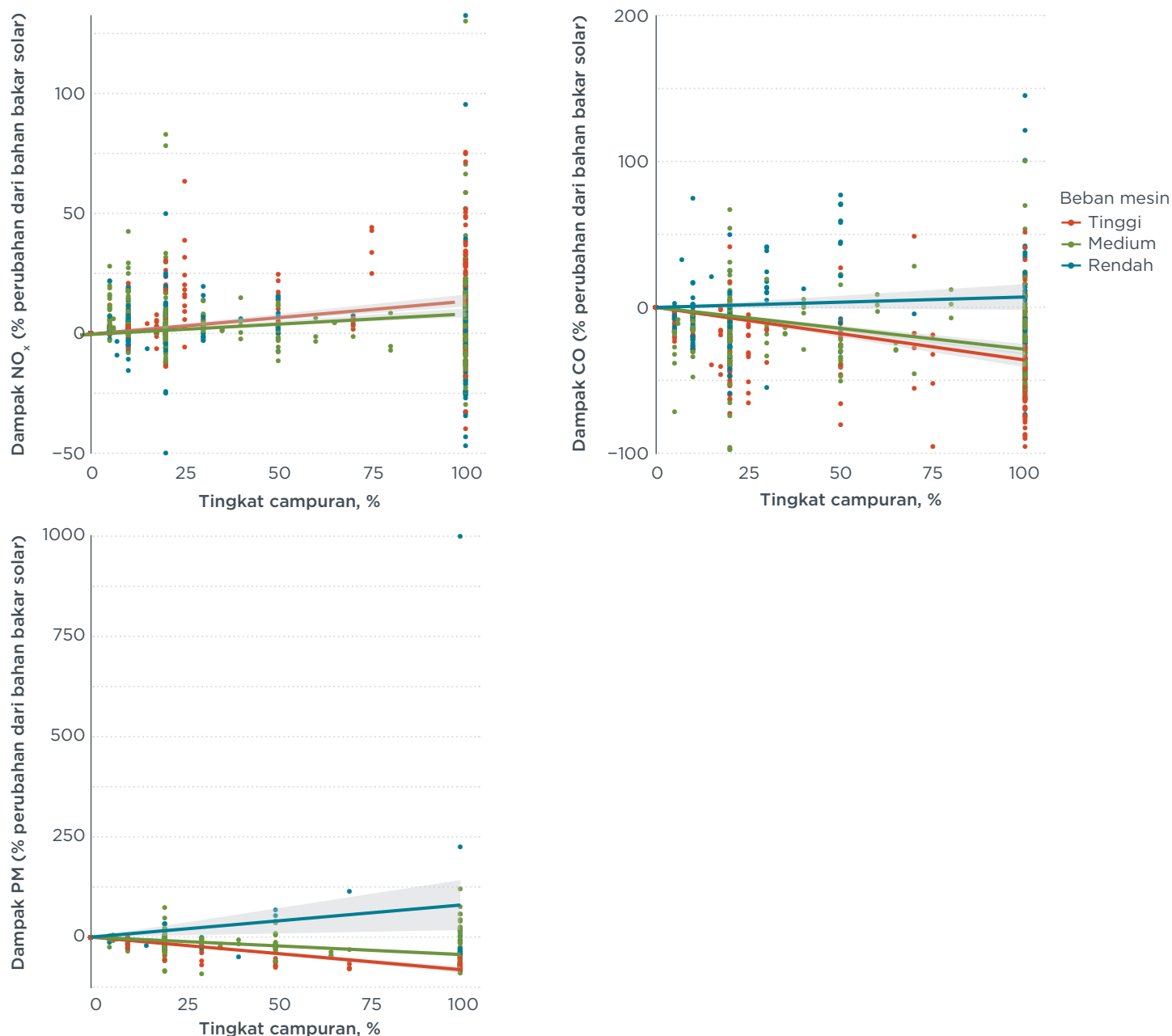
Siklus uji emisi dikembangkan di lingkungan industri dan laboratorium untuk menunjukkan kepatuhan terhadap standar emisi kendaraan. Selain itu, siklus pengujian ini juga sering digunakan oleh para peneliti untuk mengukur emisi polutan udara akibat pembakaran biodiesel. Sebagian besar siklus pengujian mensimulasikan kondisi mengemudi sementara pada kerangka dinamometer dengan mengubah kecepatan mesin dan mengubah beban secara dinamis. Siklus yang paling banyak digunakan yang sesuai dengan peraturan tentang mobil penumpang adalah *New European Driving Cycle* (NEDC). Untuk kendaraan bermesin berat/HDV, digunakan *European Engine Transient Cycle* (ETC) dan *European Stationary Cycle* (ESC) untuk kendaraan yang sesuai dengan standar Euro III - V dan siklus *EPA Federal Transient Procedure* (FTP) digunakan untuk sertifikasi emisi di Amerika Serikat. Beberapa negara Asia, termasuk Indonesia, telah mengadopsi NEDC. Sementara itu, Jepang mengembangkan siklusnya sendiri yang setara dengan NEDC, namun bersama dengan Eropa, mulai mengadopsi *Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure* (WLTP) dalam beberapa tahun yang akan datang (Yang & Rutherford, 2019). Gambaran umum tentang siklus uji emisi yang digunakan dalam dataset studi ini tersedia di Lampiran C.

Dari seluruh studi tentang emisi kendaraan biodiesel, peneliti menemukan bahwa siklus pengujian sangat mempengaruhi laju pembentukan emisi gas buang (Sze, Whinihan, Olson, Schenk, & Sobotowski, 2007; Kaya, Kutlar, & Taskiran, 2018). Siklus pengujian bertujuan untuk menggambarkan kondisi mengemudi di jalan raya, termasuk periode diam/*idling*, akselerasi, perlambatan dan pergerakan. Namun demikian, pengukuran emisi yang dicatat dalam lingkungan laboratorium seringkali lebih rendah dibandingkan dengan hasil di jalan raya karena lingkungan terkendali di dalam laboratorium tidak memperhitungkan variabel eksternal, seperti rute topografi dan pola lalu lintas, dan karena terkadang produsen mobil merancang kendaraan untuk meminimalkan emisi selama siklus pengujian (Brown, Harris, & King, 2000).

Kami mengelompokkan siklus pengujian ke dalam kategori kondisi mengemudi di perkotaan, jalan raya, dan pedesaan berdasarkan *Common Artemis Driving Cycles* (Baldino, Tietge, Muncrief, Bernard, & Mock, 2017; Thompson, Carder, Besch, Thiruvengadam, & McCormick, 2014). Selain itu, kami membuat beberapa asumsi yang berkaitan dengan parameter beban dan kecepatan serta menyesuaikan dengan data siklus pengujian. *Motorway driving* atau mengemudi di jalan raya didefinisikan sebagai periode perjalanan yang panjang dengan beban dan kecepatan yang tinggi, dengan sedikit waktu atau tanpa adanya waktu berhenti/diam, dan akselerasi yang tidak menentu dan periode perlambatan. Mengemudi di daerah pedesaan menunjukkan beberapa kesamaan karakteristik dengan mengemudi di jalan raya, seperti periode perjalanan yang panjang dan kecepatan tinggi, namun kondisi tersebut diselingi dengan periode berhenti dan mengikuti belokan dan sinyal jalan (Wang, Lyons, Clark, Gautam, & Norton, 2000). Mengemudi di perkotaan menunjukkan bagian tertinggi periode berhenti/diam dan percepatan/perlambatan karena arus lalu lintas yang padat. Kondisi perkotaan ditandai dengan kecepatan yang rendah dan beban yang sedang hingga tinggi serta umumnya dikaitkan dengan tenaga kuda yang rendah (Sze dkk., 2007).

Kendaraan dapat menunjukkan beban yang besar dan tenaga kuda yang tinggi selama penggunaan di perkotaan karena beratnya kelas kendaraan dan frekuensi periode akselerasi. Dengan mengumpulkan data dari uji kerangka dinamometer, Sze dkk. (2007) menemukan bahwa mesin menggerakkan tenaga kuda tertinggi ketika berada di kondisi jalan raya dan kondisi mengemudi di pinggiran kota menunjukkan jangkauan menengah.

Data tentang beban mesin, atau torsi, disajikan pada Gambar 3 dalam bentuk persentase berbagai tingkat daya mesin. Beban kendaraan yang rendah mewakili antara 0%, atau kondisi idle dan kapasitas 40%; beban sedang mewakili kapasitas 40% hingga 70%; dan beban mesin yang tinggi mewakili kondisi beban 70% hingga penuh. Kami menemukan dampak biodiesel yang lebih tinggi terhadap NO_x ketika beban mesin lebih tinggi, dan dampak terhadap PM dan CO yang lebih rendah pada beban yang lebih tinggi dengan menggunakan analisis regresi pada semua dataset yang ada. Kami mengamati bahwa tidak ada hubungan yang signifikan antara beban mesin dan dampak biodiesel terhadap HC. Jadi, dapat disimpulkan bahwa untuk biodiesel, kondisi mengemudi dengan beban rendah sejalan dengan rendahnya kenaikan NO_x dan tingginya PM dan CO dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa. Garis tren yang ada bahkan menunjukkan dampak emisi positif terhadap PM dan CO pada beban rendah.



Gambar 3. Dampak emisi menurut beban mesin (semua data)

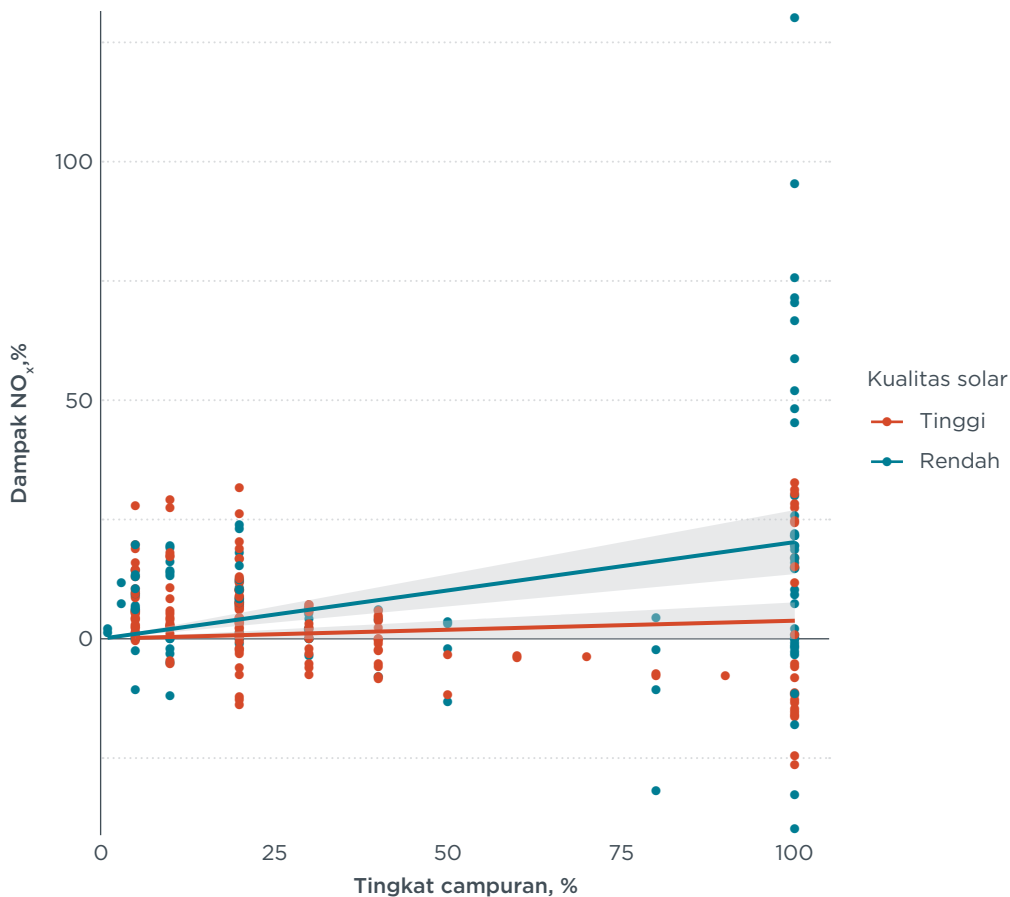
PENGEMBANGAN BARU

Selain sifat bahan baku FAME dan siklus uji emisi, beberapa kemajuan modern dalam industri kendaraan diesel mungkin berkontribusi terhadap perbedaan dampak emisi dalam studi kinerja biodiesel. Hal tersebut termasuk dimulainya fase solar bersulfur rendah, adopsi teknologi pengendalian emisi, dan peralihan industri menuju sistem injeksi bahan bakar langsung *common-rail* (*common-rail direct fuel injection*).

Kandungan sulfur solar

Seiring dengan beralihnya pasar solar Indonesia melalui penerapan standar emisi Euro 4/IV, bahan bakar rendah sulfur (<50 ppm) secara bertahap akan diperkenalkan ke pasar sehingga memungkinkan penggunaan perangkat pengontrol emisi. Perangkat ini memerlukan bahan bakar dengan kandungan sulfur rendah dibandingkan dengan tingkat kandungan yang ada di pasar Indonesia saat ini (2.500 ppm). Misalnya, *exhaust gas recirculation* (EGR) harus menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur 500 ppm atau lebih rendah untuk menghindari korosi pada pipa (Posada, Chambliss, & Blumberg, 2016). *Diesel oxidation catalysts* (DOC) juga membutuhkan bahan bakar dengan 500 ppm atau lebih rendah, sementara itu *diesel particulate filter* (DPF), yang diperkenalkan berdasarkan Euro VI, bekerja paling efektif apabila menggunakan bahan bakar dengan kandungan sulfur maksimum 10 ppm (Xie, Posada, & Minjares, 2020).

Bahan bakar rendah sulfur juga memperburuk dampak NO_x bila dicampur dengan biodiesel. Meskipun para peneliti belum mencapai konsensus tentang mekanisme fenomena tersebut, hubungan antara kualitas bahan bakar dan dampak NO_x biodiesel telah diteliti dan diamati secara luas. Kedua variabel tersebut berbanding terbalik sehingga membandingkan biodiesel dengan LSD akan menghasilkan dampak NO_x biodiesel tertinggi, sementara itu dampak tersebut kurang dapat dilihat bila membandingkan biodiesel dengan solar bersulfur tinggi. Regresi sebelumnya mencakup *data point* dari berbagai tingkat kandungan sulfur pada solar, meminimalkan penggabungan kualitas sulfur dengan variabel independen lainnya. Di bawah ini, kami mendefinisikan solar bersulfur tinggi >50 ppm, sedangkan solar bersulfur rendah didefinisikan sebagai solar yang memiliki kandungan sulfur ≤ 50 ppm. Kami mengamati adanya peningkatan enam kali lipat pada dampak NO_x biodiesel kelapa sawit 100% yang dicampur dengan solar bersulfur tinggi dan LSD (Gambar 4).

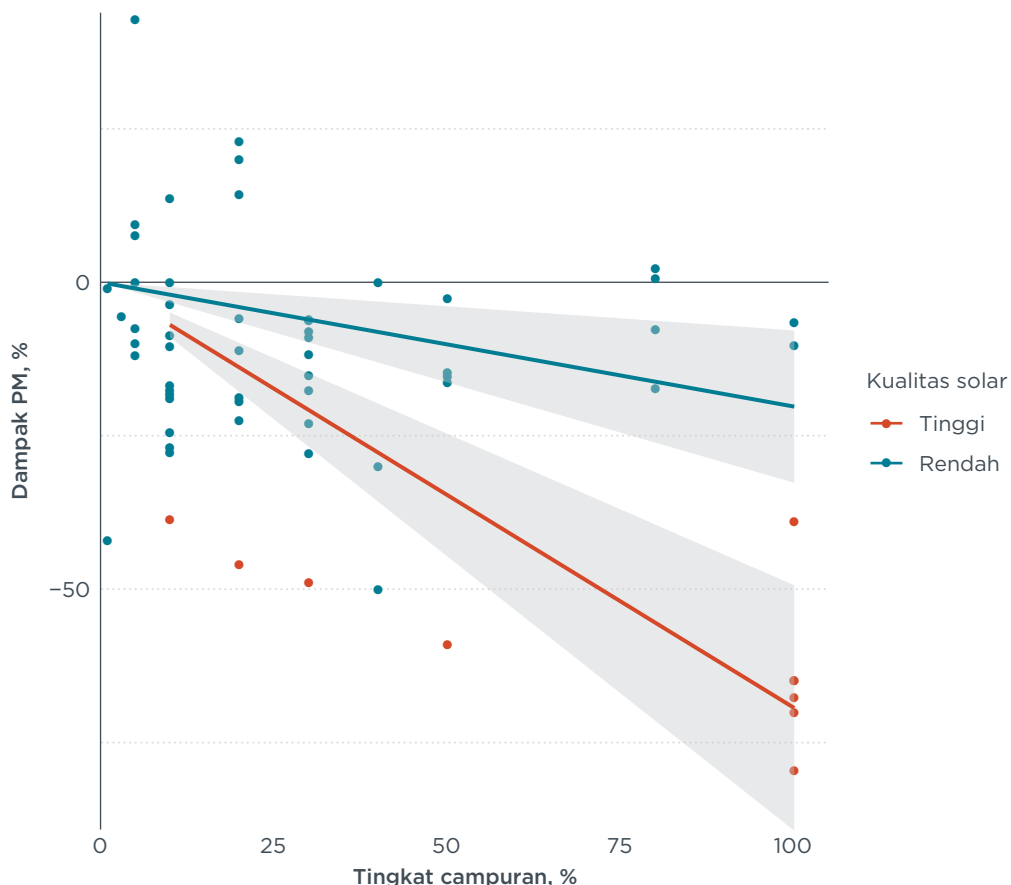


Gambar 4. Dampak biodiesel terhadap NO_x dikelompokkan berdasarkan kualitas solar (kelapa sawit)

Meskipun dalam literatur hubungan antara kandungan sulfur dan pembentukan emisi sering berpusat pada PM, kami mengidentifikasi beberapa studi yang menyelidiki hubungan antara NO_x dan LSD. Alam, Song, Acharya, Borhman, and Miller (2004) melaporkan bahwa LSD memiliki densitas yang lebih rendah dan CN lebih tinggi dibandingkan bahan bakar bersulfur tinggi. Sebagaimana dijelaskan pada Bab I, sifat-sifat tersebut sesuai dengan NO_x yang tereduksi. Karena biodiesel memiliki kepadatan yang lebih tinggi daripada solar biasa, jika dicampur dengan bahan bakar bersulfur rendah, perubahan kepadatan akan relatif lebih besar dibandingkan dengan bahan bakar dengan kandungan sulfur yang lebih tinggi. Dengan demikian, dampak biodiesel terhadap NO_x juga lebih besar apabila dicampurkan ke dalam bahan bakar solar bersulfur rendah karena *baseline* NO_x yang lebih rendah.

Zhu, Zhang, Liu, and Huang (2010) menemukan bahwa LSD memiliki kandungan aromatik yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan solar bersulfur tinggi. Kandungan aromatik rendah ini berkaitan dengan CN yang lebih tinggi, yang mengurangi NO_x , tetapi meningkatkan pembentukan PM; ikatan tersebut dikenal sebagai pertukaran *soot-NOx* (Reijnders, Boot, & de Goey, 2016). *Ignition delay* yang lebih panjang untuk bahan bakar ber-CN rendah, meningkatkan pencampuran bahan bakar-udara yang lebih tinggi dan meningkatkan pembakaran aromatik yang berperan sebagai *soot precursor*. Lebih lanjut lagi, semakin besar CN biodiesel dibandingkan dengan solar biasa dapat mengurangi *ignition delay* dan sebagian dapat mengimbangi peningkatan NO_x oleh biodiesel yang mana dapat dikurangi jika membandingkan biodiesel dengan LSD, karena LSD juga memiliki CN yang cukup tinggi dibandingkan dengan solar bersulfur tinggi. Namun demikian, karena dampak bersaing dari sifat bahan bakar dan mesin lainnya, sulit untuk menentukan kausalitas untuk masing-masing dampak yang ada.

Kami juga mengamati hubungan yang kuat antara kandungan sulfur bahan bakar dan dampak emisi PM dari biodiesel (lihat Gambar 5). Efek ini dipahami dengan baik karena meningkatkan produksi aerosol sulfat selama pembakaran dibandingkan dengan LSD (Heywood, 1988). Akibatnya, manfaat PM dari biodiesel, yang mengandung sedikit atau tidak mengandung sulfur, diperkirakan akan berkurang jika dicampurkan dengan LSD. Meskipun data masih tersebar, ketika melihat hasil dari semua bahan baku, manfaat PM biodiesel berkurang secara signifikan untuk LSD dibandingkan dengan solar bersulfur tinggi. Untuk Indonesia, implikasinya terhadap Kesehatan masyarakat menjadi cukup signifikan seiring dengan digunakannya LSD untuk memenuhi standar emisi Euro 4/IV di Indonesia.



Gambar 5. Dampak PM biodiesel berdasarkan kualitas sulfur solar (kelapa sawit)

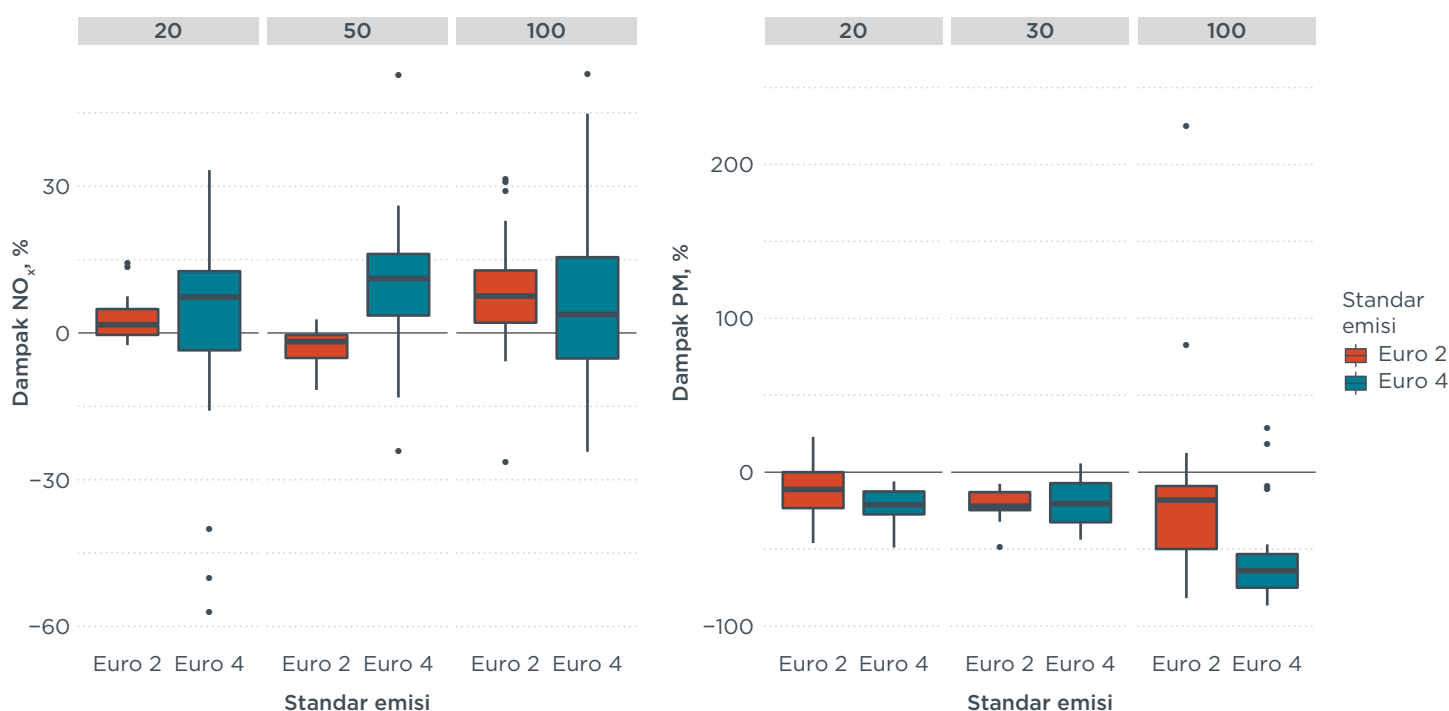
Teknologi pengendalian emisi

Produsen kendaraan telah mengembangkan beberapa teknologi untuk mitigasi NO_x guna memenuhi standar emisi kendaraan yang semakin ketat. *Exhaust gas recirculation* (EGR), merupakan salah satu teknologi pengendali yang paling awal diterapkan pada mesin diesel, dapat mengurangi NO_x dengan cara mendaur ulang kembali sebagian kecil gas buang ke silinder mesin untuk menurunkan suhu pembakaran. Dengan demikian, EGR juga membatasi pembentukan oksigen dan NO_x (López, Jiménez, Aparicio, & Flores, 2009). EGR merupakan cara yang efektif untuk mengurangi emisi dengan cara yang relatif mudah, meskipun ketika bekerja sendiri, tidak cukup efektif untuk memenuhi standar emisi yang lebih baru, seperti Euro 6/VI.

Teknologi pengendali lainnya telah dikembangkan untuk mengurangi emisi polutan konvensional lainnya. Misalnya, standar Euro 4/IV menggabungkan teknologi seperti DOC untuk mengurangi pembentukan HC dan CO (López dkk., 2009). Bersama dengan DPF, DOC juga dapat mengontrol level PM di saluran knalpot. DOC juga dapat digunakan dalam kombinasi dengan sistem lainnya, seperti SCR, untuk mengurangi emisi PM melalui *in-cylinder strategies* (Posada dkk., 2016). Meskipun standar emisi

kendaraan menggunakan teknologi netral bukan preskriptif, serangkaian teknologi umum yang digunakan biasanya adalah kombinasi. Jadi, kami menganggap standar emisi sebagai wakil dari serangkaian/set teknologi pengendali.

Sesuai dengan literatur yang ada, kami menemukan adanya hubungan yang signifikan antara teknologi pengendalian emisi dan dampak emisi biodiesel. Kami tidak mengamati dampak emisi HC dan CO, namun mengamati peningkatan kecil yang positif pada emisi NO_x untuk Euro 4/IV yang berbalik pada tingkat campuran biodiesel 100% (lihat Gambar 6). Akan tetapi, kami mengidentifikasi pengurangan yang cukup besar dari emisi PM untuk campuran biodiesel B20, B30, dan B100 dibandingkan dengan solar pada kendaraan yang sesuai dengan standar Euro 4/IV, dibandingkan dengan kendaraan yang menggunakan standar Euro 2/II (lihat Gambar 6). Czerwinski dkk. (2013) menemukan bahwa biodiesel membantu terjadinya regenerasi DPF dengan mengubah komposisi PM dan struktur *nano primary soot particle* “dan dapat mengurangi suhu yang diperlukan untuk memulai regenerasi” (hal. 2). Meskipun kami tidak memiliki data terbaru yang memadai tentang standar Euro 6/VI, kami memperkirakan Euro 6 dan standar yang lebih baru nantinya akan menunjukkan tren yang sama.



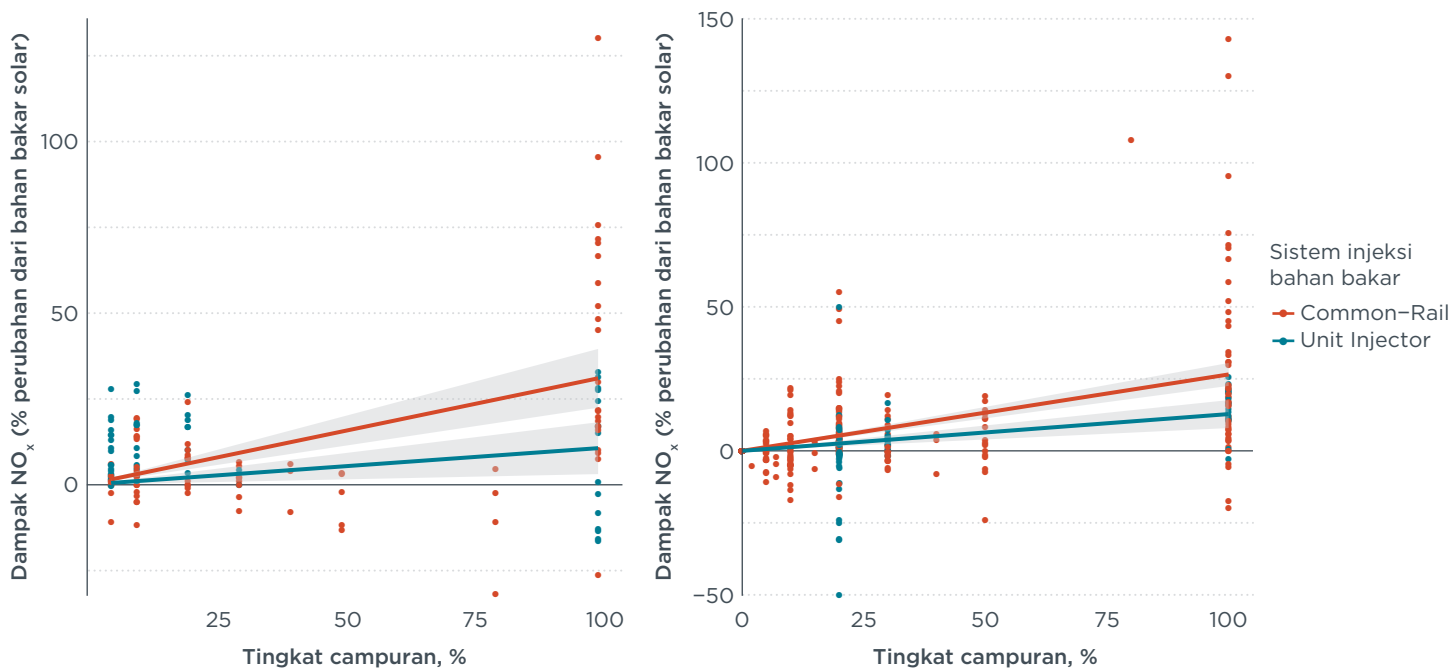
Gambar 6. Kiri:Dampak NO_x biodiesel menurut tingkat campuran biodiesel dan standar emisi (semua data) dan Kanan: dampak PM biodiesel menurut tingkat campuran biodiesel dan standar emisi (semua data)

Sistem injeksi bahan bakar

Kami mengidentifikasi variabel terakhir yang dapat mengubah dampak emisi biodiesel: sistem injeksi bahan bakar. Mesin yang lebih tua menggunakan unit injektor, juga disebut injektor mulut pompa, yang menetapkan satuan pompa bahan bakar ke setiap silinder (Bosch UK, 2009). Unit injektor menawarkan efisiensi tinggi, konsumsi bahan bakar yang rendah, dan injeksi bertekanan rendah pada kecepatan yang rendah. Namun demikian, sistem ini sebagian besar tidak digunakan lagi, digantikan dengan sistem *common-rail direct injection* yang mulai dipakai pada tahun 2000 (Yanowitz & McCormick, 2009).

Yanowitz & McCormick (2009) menyarankan bahwa waktu injeksi bahan bakar kemungkinan terkait dengan jenis peralatan injeksi bahan bakar kendaraan tersebut. Dalam studi mereka, dampak emisi NO_x untuk campuran B20 lebih tinggi pada sistem

common-rail injection dibandingkan dengan injektor unit elektronik, model unit injektor yang dominan sejak pertengahan 1980-an. Meskipun dampak NO_x rata-rata B20 untuk unit injektor mendekati nol, sistem *common-rail* menunjukkan peningkatan NO_x sebesar 4%. Kami mengelompokkan data berdasarkan sistem injeksi bahan bakar dan menjalankan regresi pada seluruh dataset dan subset biodiesel kelapa sawit. Untuk biodiesel kelapa sawit, kami menemukan perbedaan sebesar 66% antara dampak NO_x biodiesel untuk sistem *common-rail* dan unit injektor (lihat Gambar 7, kiri). Terdapat 16 studi yang secara spesifik menjelaskan sistem injeksi bahan bakar yang digunakan dimasukkan pula ke dalam regresi.



Gambar 7. Kiri: Dampak NO_x biodiesel oleh sistem injeksi bahan bakar (kelapa sawit). Kanan: Dampak NO_x biodiesel oleh sistem injeksi bahan bakar hanya untuk solar bersulfur rendah (semua data).

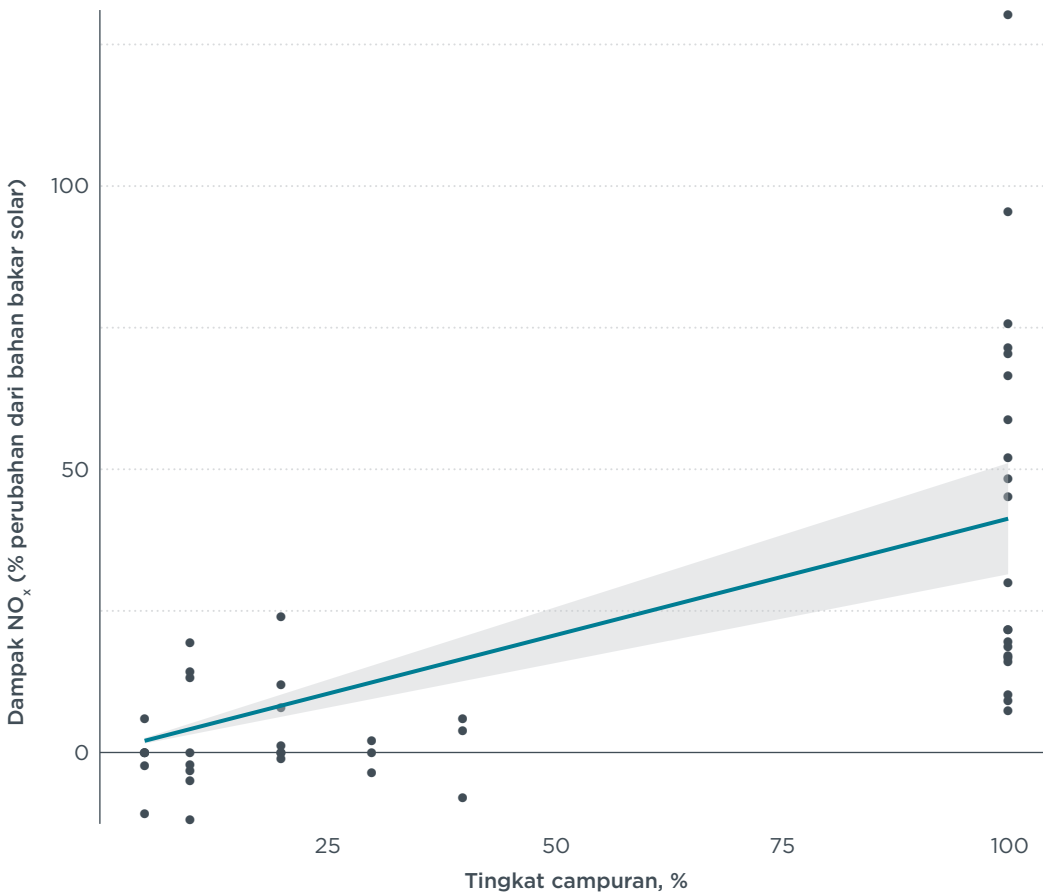
Pengaruh sistem injeksi bahan bakar pada dampak NO_x biodiesel dapat dirancukan dengan penggunaan LSD (Yanowitz (McCormick, 2009)); oleh karenanya kami juga menerapkan regresi lain yang mengontrol tingkat sulfur bahan bakar (lihat Gambar 7, kanan). Kami melakukan regresi pada seluruh dataset karena tidak memadainya data khusus kelapa sawit saat disaring berdasarkan kualitas bahan bakar dan parameter sistem injeksi mesin. Termasuk didalamnya hasil dari campuran LSD saja, kami masih menemukan dampak NO_x biodiesel hampir dua kali lebih besar untuk sistem *common-rail* dibandingkan dengan unit injeksi.

Dampak NO_x yang lebih tinggi dalam sistem injeksi common-rail kemungkinan disebabkan oleh penggunaan injeksi bertekanan tinggi yang melebihi 200 MPa (Xu dkk., 2017). Tekanan tinggi menyebabkan adanya injeksi lanjutan, sehingga memungkinkan tersedianya cukup waktu untuk pencampuran udara-bahan bakar dan dengan demikian pembakaran akan lebih sempurna; namun, kekurangannya adalah meningkatnya NO_x . Kami memperkirakan dampaknya akan menjadi lebih buruk saat menggunakan biodiesel karena akan mempercepat waktu injeksi karena kompresibilitasnya yang rendah. Selama injeksi tekanan tinggi, biodiesel akan memasuki ruang injeksi dengan kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar solar biasa, sebagian besar gaya/tekanan akan diserap dengan mengompresi cairan dan bukan mempercepat waktu injeksi.

Kami mengantisipasi bahwa dampak *common-rail* NO_x akan terus meluas dalam beberapa tahun kemudian seiring dengan transisi armada kendaraan di Indonesia ke model baru yang dilengkapi dengan teknologi.

DAMPAK BIODIESEL TERHADAP POLUSI UDARA SECARA KESELURUHAN DI INDONESIA

Analisis kami menemukan bahwa pencampuran biodiesel kelapa sawit dalam bahan bakar solar dapat meningkatkan emisi NO_x. Efek tersebut terutama terlihat pada solar bersulfur rendah (LSD) dan sistem injeksi *common-rail*. Gambar 8 merangkum peningkatan NO_x dengan pencampuran biodiesel kelapa sawit, dimana dalam studi khususnya menunjukkan kondisi yang lebih modern, termasuk digunakannya solar bersulfur rendah dan sistem injeksi *common-rail*. Tren tersebut secara statistik cukup signifikan dan menunjukkan peningkatan emisi NO_x sebesar 12%, 17%, dan 41% untuk tingkat campuran B30, B40 dan B100 dalam beberapa tahun yang akan datang di Indonesia. Kami juga menemukan bahwa sistem injeksi dan bahan bakar modern dapat mengurangi polutan lainnya dari biodiesel, seperti PM, CO, dan HC apabila dibandingkan dengan bahan bakar solar.



Gambar 8. Dampak biodiesel kelapa sawit terhadap NO_x pada mesin modern

REFERENSI

Referensi yang ditandai dengan tanda bintang menunjukkan studi yang dimasukkan dalam meta-analisis. Informasi tambahan mengenai penelitian tersebut tersedia di Lampiran B.

- *Acevedo, H., & Mantilla, J. (2011). Performance and emissions of a heavy duty diesel engine fuelled with palm oil biodiesel and premium diesel. *Dyna*, 78(170), 152-158. <http://ref.scielo.org/9vhjgg>
- *Adi, G., Hall, C., Tao, B., & Shaver, G. (2012). Diesel engine control strategy for biodiesel blend accommodation independent of fuel fatty acid structure. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(30), 17-24. <https://doi.org/10.3182/20121023-3-FR-4025.00037>
- Agarwal, A. K., Dhar, A., Gupta, J. G., Kim, W. I., Choi, K., Lee, C. S., & Park, S. (2015). Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics. *Energy Conversion and Management*, 91, 302-314. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.004>
- Alam, M., Song, J., Acharya, R., Boehman, A., & Miller, K. (2004). *Combustion and emissions performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engine*. SAE Technical Paper 2004-01-3024. <https://doi.org/10.4271/2004-01-3024>
- *Altun, S. (2011). Performance and exhaust emissions of a DI diesel engine fueled with waste cooking oil and inedible animal tallow methyl esters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 35. <https://doi.org/10.3906/muh-1004-108>
- *Arapaki, N., Bakeas, E., Karavalakis, G., Tzirakis, E., Stournas, S., & Zannikos, F. (2007). *Regulated and unregulated emissions characteristics of a diesel vehicle operating with diesel/biodiesel blends*. SAE Technical Paper 2007-01-0071. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0071>
- Anenberg, S. C., Miller, J., Minjares, R., Du, L., Henze, D. K., Lacey, F., Malley, C. S., Emberson, L., Franco, V., Klimont, Z., & Heyes, C. (2017). Impacts and mitigation of excess diesel-related NO_x emissions in 11 major vehicle markets. *Nature*, 545(7655), 467-471. <https://doi.org/10.1038/nature22086>
- *Arbab, M. I., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Imtenan, S., & Sajjad, H. (2013). *Experimental investigation of optimum blend ratio of jatropha, palm and coconut based biodiesel to improve fuel properties, engine performance and emission characteristics*. SAE Technical Paper 2013-01-2675. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2675>
- *Armas, O., García-Contreras, R., & Ramos, Á. (2013). Impact of alternative fuels on performance and pollutant emissions of a light duty engine tested under the new European driving cycle. *Applied Energy*, 107, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.064>
- Bacha, J., Freel, J., Gibbs, A., Gibbs, L., Hemighaus, G., Hoekman, K., ... Mills, J. (2007). *Diesel fuels technical review*. Chevron Corporation. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>
- *Bakeas, E., Karavalakis, G., Fontaras, G., & Stournas, S. (2011). An experimental study on the impact of biodiesel origin on the regulated and PAH emissions from a Euro 4 light-duty vehicle. *Fuel*, 90(11), 3200-3208. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.018>
- Baldino, C., Tietge, U., Muncrief, R., Bernard, Y., & Mock, P. (2017). *Road tested: Comparative overview of real-world versus type-approval NO_x and CO₂ emissions from diesel cars in Europe*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/road-tested-comparative-overview-real-world-versus-type-approval-nox-and-co2-emissions>
- *Behçet, R. (2011). Performance and emission study of waste anchovy fish biodiesel in a diesel engine. *Fuel Processing Technology*, 92(6), 1187-1194. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.01.012>
- *Behçet, R., Yumrutaş, R., & Oktay, H. (2014). Effects of fuels produced from fish and cooking oils on performance and emissions of a diesel engine. *Energy*, 71, 645-655. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.05.003>
- *Bielaczyc, P., Szczotka, A., Gizynski, P., & Bedyk, I. (2009). *The effect of pure RME and biodiesel blends with high RME content on exhaust emissions from a light duty diesel engine*. SAE Technical Paper 2009-01-2653. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2653>
- Bosch UK. (2009, March 31). "The efficient pump injector unit." <https://web.archive.org/web/20090331184810/http://www.boschautoparts.co.uk/pcDies6.asp?c=2&d=1>
- Brown, J., Harris, D. B., & King, F. G. (2000). Heavy-duty truck test cycles: Combining driveability with realistic engine exercise. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 7(4). <https://doi.org/10.1504/IJHVS.2000.005259>

- Burnett, R. T., Smith-Doiron, M., Stieb, D., Raizenne, M. E., Brook, J. R., Dales, R. E., ... Krewski, D. (2001). Association between ozone and hospitalization for acute respiratory diseases in children less than 2 years of age. *American Journal of Epidemiology*, 153(5), 444–452. <https://doi.org/10.1093/aje/153.5.444>
- *Canakci, M., & Van Gerpen, J. H. (2003). Comparison of engine performance and emissions for petroleum diesel fuel, yellow grease biodiesel, and soybean oil biodiesel. *Transactions of the ASAE*, 46(4), 937–944. <https://doi.org/10.13031/2013.13948>
- *Chang, D. Y. Z., Van Gerpen, J. H., Lee, I., Johnson, L. A., Hammond, E. G., & Marley, S. J. (1996). Fuel properties and emissions of soybean oil esters as diesel fuel. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73(11), 1549–1555. <https://doi.org/10.1007/BF02523523>
- *Chase, C. L., Peterson, C. L., Lowe, G. A., Mann, P., Smith, J. A., & Kado, N. Y. (2000). A 322,000 kilometer (200,000 mile) over the road test with HySEE biodiesel in a heavy duty truck. SAE Technical Paper 2000-01-2647. <https://doi.org/10.4271/2000-01-2647>
- *Chin, J.-Y., Batterman, S. A., Northrop, W. F., Bohac, S. V., & Assanis, D. N. (2012). Gaseous and particulate emissions from diesel engines at idle and under load: Comparison of biodiesel blend and ultralow sulfur diesel fuels. *Energy & Fuels*, 26(11), 6737–6748. <https://doi.org/10.1021/ef300421h>
- *Clark, N., Atkinson, C. M., Thompson, G. J., & Nine, R. D. (1999). *Transient emissions comparisons of alternative compression ignition fuels*. SAE Technical Paper 1999-01-1117. <https://doi.org/10.4271/1999-01-1117>
- *Clark, N. N., & Lyons, D. W. (1999). Class 8 truck emissions testing: Effects of test cycles and data on biodiesel operation. *Transactions of the ASAE*, 42(5), 1211–1220. <https://doi.org/10.13031/2013.13286>
- *Concawe. (2014). *Impact of FAME on the performance of three Euro 4 light-duty diesel vehicles Part 1: Fuel consumption and regulated emissions*. Retrieved from <https://www.concawe.eu/publication/report-no-614/>
- *Czerwinski, J., Dimopoulos Eggenschwiler, P., Heeb, A. N., Astorga-Ilorens, C., Mayer, A., Heitzer, A., ... Liati, A. (2013). *Diesel emissions with DPF & SCR and toxic potentials with biodiesel (RME) blend fuels*. SAE Technical Paper 2013-01-0523. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0523>
- Demirbas, A. (2009). Combustion efficiency impacts of biofuels. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(7), 602–609. <https://doi.org/10.1080/15567030701743718>
- Dharma, S., Ong, H. C., Masjuki, H. H., Sebayang, A. H., & Silitonga, A. S. (2016). An overview of engine durability and compatibility using biodiesel-bioethanol-diesel blends in compression-ignition engines. *Energy Conversion and Management*, 128, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.072>
- *Di, Y., Cheung, C. S., & Huang, Z. (2009). Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil. *Science of The Total Environment*, 407(2), 835–846. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.09.023>
- *Durbin, T. D., Collins, J. R., Norbeck, J. M., & Smith, M. R. (1999). *Evaluation of the effects of alternative diesel fuel formulations on exhaust emission rates and reactivity*. https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Durbin/publication/242519872_Final_Report_Evaluation_of_the_Effects_of_Alternative_Diesel_Fuel_Formulations_on_Exhaust_Emission_Rates_and_Reactivity/links/54ef432a0cf2495330e1cddb3/Final-Report-Evaluation-of-the-Effects-of-Alternative-Diesel-Fuel-Formulations-on-Exhaust-Emission-Rates-and-Reactivity.pdf
- *Durbin, T. D., & Norbeck, J. M. (2002). The effects of biodiesel blends and Arco EC-diesel on emissions from light heavy-duty vehicles. *Environmental Science and Technology*, 36(8), 1686–91. <https://doi.org/10.1021/es011231o>
- *Eckerle, W. A., Lyford-Pike, E. J., Stanton, D. W., LaPointe, L. A., Whitacre, S. D., & Wall, J. C. (2008). Effects of methyl ester biodiesel blends on NO_x emissions. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1(1), 102–118. <https://doi.org/10.4271/2008-01-0078>
- *Farzaneh, M., Zietsman, J., Perkinson, D. G., & Spillane, D. L. (2006). *School bus biodiesel (B20) NO_x emissions testing*. Texas Transportation Institute. Retrieved from <https://airquality.tti.tamu.edu/files/2010/11/School-Bus-Biodiesel-B20-NOx-Emissions-Testing1.pdf>
- *Fontaras, G., Karavalakis, G., Kousoulidou, M., Tzamkiozis, T., Ntziachristos, L., Bakeas, E., Stournas, S., & Samaras, Z. (2009). Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles. *Fuel*, 88(9), 1608–1617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.02.011>
- *Fontaras, G., Kousoulidou, M., Karavalakis, G., Tzamkiozis, T., Pistikopoulos, P., Ntziachristos, L., ... Samaras, Z. (2010). Effects of low concentration biodiesel blend application on modern passenger cars. Part 1: Feedstock impact on regulated pollutants, fuel consumption and particle emissions. *Environmental Pollution*, 158(5), 1451–1460. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.12.033>

- *Frank, B. P., Tang, S., Lanni, T., Rideout, G., Beregszaszy, C., Meyer, N., ... Evans, J. (2004). *A study of the effects of fuel type and emission control systems on regulated gaseous emissions from heavy-duty diesel engines*. SAE Technical Paper 2004-01-1085. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1085>
- *Gautam, R., Kumar, N., & Sharma, P. (2013). *Comparative assessment of performance, emission and combustion characteristics of blends of methyl and ethyl ester of jatropha oil and diesel in compression ignition engine*. SAE Technical Paper 2013-01-2664. <https://doi.org/10.4271/2013-01-2664>
- Ge, J., Yoon, S., Kim, M., & Choi, N. (2016). Application of canola oil biodiesel/diesel blends in a common rail diesel engine. *Applied Sciences*, 7(1), 34. <https://doi.org/10.3390/app7010034>
- *Geng, L., Chen, Y., Chen, X., & Lee, C. F. (2019). Study on combustion characteristics and particulate emissions of a common-rail diesel engine fueled with n-butanol and waste cooking oil blends. *Journal of the Energy Institute*, 92(3), 438–449. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.05.004>
- *Graboski, M., Ross, J., & McCormick, R. (1996). *Transient Emissions from no. 2 diesel and biodiesel blends in a DDC6 Series engine*. SAE Technical Paper 961166. <https://doi.org/10.4271/961166>
- *Graboski, M. S., McCormick, R. L., Alleman, T. L., & Herring, A. M. (2003). *Effect of biodiesel composition on engine emissions from a DDC Series 60 diesel engine: Final report; Report 2 in a series of 6*. <https://doi.org/10.2172/15003583>
- Greenstone, M., & Fan, Q. (Claire). (2019). *Indonesia's Worsening Air Quality and its Impact on Life Expectancy*. <https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2019/03/Indonesia-Report.pdf>
- *Guido, C., Beatrice, C., & Napolitano, P. (2013). Application of bioethanol/RME/diesel blend in a Euro5 automotive diesel engine: Potentiality of closed loop combustion control technology. *Applied Energy*, 102, 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.08.051>
- *Haas, M. J., Scott, K. M., Alleman, T. L., & McCormick, R. L. (2001). Engine performance of biodiesel fuel prepared from soybean soapstock: A high quality renewable fuel produced from a waste feedstock. *Energy & Fuels*, 15(5), 1207–1212. <https://doi.org/10.1021/ef010051x>
- *Han, M., Cho, K., Sluder, C. S., & Wagner, R. M. (2008). *Soybean and coconut biodiesel fuel effects on combustion characteristics in a light-duty diesel engine*. SAE Technical Paper 2008-01-2501. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2501>
- *Hansen, K. F., & Jensen, M. G. (1997). *Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a DI diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (RME)*. SAE Technical Paper 971689. <https://doi.org/10.4271/971689>
- Health Effects Institute. (2019). *State of Global Air 2019*. Retrieved from https://www.stateofglobalair.org/sites/default/files/soga_2019_report.pdf
- *Hearne, J., Toback, A., Akers, J., Hesketh, R. P., & Marchese, A. J. (2005). *Development of a new composite school bus test cycle and the effect of fuel type on mobile emissions from three school buses*. SAE Technical Paper 2005-01-1616. <https://doi.org/10.4271/2005-01-1616>
- Heywood, J. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Ceniceros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>
- Hoekman, S. K., & Robbins, C. (2012). Review of the effects of biodiesel on NO_x emissions. *Fuel Processing Technology*, 96, 237–249. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.12.036>
- *Holden, B., Jack, J., Miller, D. W., & Durbin, D. T. (2006). *Effect of Biodiesel on Diesel Engine Nitrogen Oxide and Other Regulated Emissions*. 110.
- Jerrett, M., Burnett, R. T., Pope, C. A., Ito, K., Thurston, G., Krewski, D., ... Thun, M. (2009). Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine*, 360(11), 1085–1095. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0803894>
- *Kalam, M. A., & Masjuki, H. H. (2008). Testing palm biodiesel and NPAA additives to control NO_x and CO while improving efficiency in diesel engines. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), 1116–1122. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.02.009>
- *Karavalakis, G., Alvanou, F., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009a). Regulated and unregulated emissions of a light duty vehicle operated on diesel/palm-based methyl ester blends over NEDC and a non-legislated driving cycle. *Fuel*, 88(6), 1078–1085. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.003>
- *Karavalakis, G., Tzirakis, E., Zannikos, F., Stournas, S., Bakeas, E., Arapaki, N., & Spanos, A. (2007). *Diesel/soy methyl ester blends emissions profile from a passenger vehicle operated on the European and the Athens driving cycles*. SAE Technical Paper 2007-01-4043. <https://doi.org/10.4271/2007-01-4043>
- *Karavalakis, G., Jiang, Y., Yang, J., Durbin, T., Nuottimäki, J., & Lehto, K. (2016). Emissions and fuel economy evaluation from two current technology heavy-duty trucks operated on HVO and FAME blends. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 9(1), 177–190. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0876>

- *Karavalakis, G., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009b). Effects of diesel/biodiesel blends on regulated and unregulated pollutants from a passenger vehicle operated over the European and the Athens driving cycles. *Atmospheric Environment*, 43(10), 1745-1752. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.033>
- *Karavalakis, G., Stournas, S., & Bakeas, E. (2009c). Light vehicle regulated and unregulated emissions from different biodiesels. *Science of The Total Environment*, 407(10), 3338-3346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.063>
- *Karavalakis, G., Bakeas, E., Fontaras, G., & Stournas, S. (2011). Effect of biodiesel origin on regulated and particle-bound PAH (polycyclic aromatic hydrocarbon) emissions from a Euro 4 passenger car. *Energy*, 36(8), 5328-5337. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.06.041>
- *Kawano, D., Ishii, H., & Goto, Y. (2008). *Effect of biodiesel blending on emission characteristics of modern diesel engine*. SAE Technical Paper 2008-01-2384. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2384>
- *Kaya, T., Kutlar, O., & Taskiran, O. (2018). Evaluation of the effects of biodiesel on emissions and performance by comparing the results of the New European Drive Cycle and Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle. *Energies*, 11(10), 2814. <https://doi.org/10.3390/en11102814>
- Khalid, A., Tamaldin, N., Jaat, M., Ali, M. F. M., Manshoor, B., & Zaman, I. (2013). Impacts of biodiesel storage duration on fuel properties and emissions. *Procedia Engineering*, 68, 225-230. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.12.172>
- *Kinoshita, E., Hamasaki, K., & Jaqin, C. (2003). *Diesel combustion of palm oil methyl ester*. SAE Technical Paper 2003-01-1929. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1929>
- *Kinoshita, E., Myo, T., Hamasaki, K., Tajima, H., & Kun, Z. R. (2006). *Diesel combustion characteristics of coconut oil and palm oil biodiesels*. SAE Technical Paper 2006-01-3251. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3251>
- *Kinoshita, E., Ueda, Y., & Takata, S. (2011). *Combustion characteristics of a DI diesel engine with palm oil butyl and isobutyl esters*. SAE Technical Paper 2011-01-1937. <https://doi.org/10.4271/2011-01-1937>
- *Knothe, G., Sharp, C. A., & Ryan, T. W. (2006). Exhaust emissions of biodiesel, petrodiesel, neat methyl esters, and alkanes in a new technology engine. *Energy & Fuels*, 20(1), 403-408. <https://doi.org/10.1021/ef0502711>
- *Koszalka, G., Hunicz, J., & Niewczas, A. (2010). A Comparison of Performance and Emissions of an Engine Fuelled with Diesel and Biodiesel. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(2), 77-84. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/26272921>
- *Kousoulidou, M., Fontaras, G., Ntziachristos, L., & Samaras, Z. (2009). *Evaluation of biodiesel blends on the performance and emissions of a common-rail light-duty engine and vehicle*. SAE Technical Paper 2009-01-0692. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0692>
- *Krahl, J., Munack, A., Schröder, O., Stein, H., Herbst, L., Kaufmann, A., & Bünger, J. (2005). *The influence of fuel design on the exhaust gas emissions and health effects*. SAE Technical Paper 2005-01-3772. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3772>
- *Krahl, J., Knothe, G., Munack, A., Ruschel, Y., Schröder, O., Hallier, E., Westphal, G., & Bünger, J. (2009). Comparison of exhaust emissions and their mutagenicity from the combustion of biodiesel, vegetable oil, gas-to-liquid and petrodiesel fuels. *Fuel*, 88(6), 1064-1069. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.11.015>
- *Krahl, J., Munack, A., Ruschel, Y., Schröder, O., & Bünger, J. (2008). *Exhaust gas emissions and mutagenic effects of diesel fuel, biodiesel and biodiesel blends*. SAE Technical Paper 2008-01-2508. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2508>
- *Lahane, S., & Subramanian, K. A. (2015). Effect of different percentages of biodiesel-diesel blends on injection, spray, combustion, performance, and emission characteristics of a diesel engine. *Fuel*, 139, 537-545. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.036>
- *Lance, D. L., Goodfellow, C. L., Williams, J., Bunting, W., Sakata, I., Yoshida, K., Taniguchi, S., & Kitano, K. (2009). The impact of diesel and biodiesel fuel composition on a Euro V HSDI engine with advanced DPNR emissions control. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2(1), 885-894. <https://doi.org/10.4271/2009-01-1903>
- Lapuerta, M., Agudelo, J. R., Prorok, M., & Boehman, A. L. (2012). Bulk modulus of compressibility of diesel/biodiesel/HVO blends. *Energy & Fuels*, 26(2), 1336-1343. <https://doi.org/10.1021/ef201608g>
- *Lapuerta, M., Herreros, J. M., Lyons, L. L., García-Contreras, R., & Briceño, Y. (2008). Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions. *Fuel*, 87(15-16), 3161-3169. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.05.013>
- Lee, R., Pedley, J., & Hobbs, C. (1998). *Fuel quality impact on heavy duty diesel emissions:- A literature review*. SAE Technical Paper 982649. <https://doi.org/10.4271/982649>
- *Leevijit, T., & Prateepchaikul, G. (2011). Comparative performance and emissions of IDI-turbo automobile diesel engine operated using degummed, deacidified mixed crude palm oil-diesel blends. *Fuel*, 90(4), 1487-1491. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.013>

- *Lešnik, L., Vajda, B., Žunič, Z., Škerget, L., & Kegl, B. (2013). The influence of biodiesel fuel on injection characteristics, diesel engine performance, and emission formation. *Applied Energy*, 111, 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.010>
- *Li, H., Andrews, G. E., & Balsevich-Prieto, J. L. (2007). *Study of emission and combustion characteristics of RME B100 biodiesel from a heavy duty DI diesel engine*. SAE Technical Paper 2007-01-0074. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0074>
- *Lim, C., Lee, J., Hong, J., Song, C., Han, J., & Cha, J.-S. (2014). Evaluation of regulated and unregulated emissions from a diesel powered vehicle fueled with diesel/biodiesel blends in Korea. *Energy*, 77, 533–541. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.09.040>
- *Liotta, F. J., & Montalvo, D. M. (1993). *The effect of oxygenated fuels on emissions from a modern heavy-duty diesel engine*. SAE Technical Paper 932734. <https://doi.org/10.4271/932734>
- *López, J. M., Jiménez, F., Aparicio, F., & Flores, N. (2009). On-road emissions from urban buses with SCR+Urea and EGR+DPF systems using diesel and biodiesel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.07.004>
- *Luján, J. M., Bermúdez, V., Tormos, B., & Pla, B. (2009). Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II). *Biomass and Bioenergy*, 33(6–7), 948–956. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.02.003>
- *Macor, A., Avella, F., & Faedo, D. (2011). Effects of 30% v/v biodiesel/diesel fuel blend on regulated and unregulated pollutant emissions from diesel engines. *Applied Energy*, 88(12), 4989–5001. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.045>
- *Marshall, W., Schumacher, L. G., & Howell, S. (1995). *Engine exhaust emissions evaluation of a Cummins L10E when fueled with a biodiesel blend*. SAE Technical Paper 952363. <https://doi.org/10.4271/952363>
- *Martini, G., Astorga, C., & Farfaletti, A. (2007). *Effect of biodiesel fuels on pollutant emissions from EURO 3 LD diesel vehicles (1)*. European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. Retrieved from <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/effect-biodiesel-fuels-pollutant-emissions-euro-3-ld-diesel-vehicles-1>
- *Mazzoleni, C., Kuhns, H., Moosmuller, H., Witt, J., Nussbaum, N., Oliverchang, M., ... Watson, J. (2007). A case study of real-world tailpipe emissions for school buses using a 20% biodiesel blend. *Science of The Total Environment*, 385(1–3), 146–159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.018>
- *McCormick, R. L., Alvarez, J. R., & Graboski, M. S. (2003). *NO_x solutions for biodiesel: Final report; Report 6 in a series of 6*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://doi.org/10.2172/15003586>
- *McCormick, R. L., Williams, A., Ireland, J., Brimhall, M., & Hayes, R. R. (2006). *Effects of biodiesel blends on vehicle emissions: Fiscal year 2006 annual operating plan milestone 10.4*. National Renewable Energy Laboratory (NREL). <https://doi.org/10.2172/894987>
- *McCormick, R. L., Ross, J. D., & Graboski, M. S. (1997). Effect of several oxygenates on regulated emissions from heavy-duty diesel engines. *Environmental Science & Technology*, 31(4), 1144–1150. <https://doi.org/10.1021/es9606438>
- *McCormick, R. L., Tennant, C. J., Hayes, R. R., Black, S., Ireland, J., McDaniel, T., ... Sharp, C. A. (2005). *Regulated emissions from biodiesel tested in heavy-duty engines meeting 2004 emission standards*. SAE Technical Report 2005-01-2200. <https://doi.org/10.4271/2005-01-2200>
- McDonald, G., & Rahmanulloh, A. (2019). *Indonesia Biofuels Annual Report 2019*. Retrieved from <https://www.fas.usda.gov/data/indonesia-biofuels-annual-4>
- *McGill, R., Storey, J., Wagner, R., Irick, D., Aakko, P., Westerholm, M., Nyland, N., & Lappi, M. (2003). *Emission performance of selected biodiesel fuels*. SAE Technical Paper 2003-01-1866. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1866>
- *Mirhashemi, F. S., & Sadriani, H. (2020). NO_x emissions of compression ignition engines fueled with various biodiesel blends: A review. *Journal of the Energy Institute*, 93(1), 129–151. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.04.003>
- *Mishra, S., Anand, K., & Mehta, P. S. (2016). Predicting the cetane number of biodiesel fuels from their fatty acid methyl ester composition. *Energy & Fuels*, 30(12), 10425–10434. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b01343>
- *Mizushima, N., & Takada, Y. (2014). *Evaluation of environmental impact of biodiesel vehicles in real traffic conditions*. Retrieved from https://amftcp.org/app/webroot/files/file/Annex%20Reports/AMF_Annex_38-2.pdf
- *Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Atabani, A. E., Fattah, I. M. R., & Mobarak, H. M. (2014). Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and palm oil based biodiesel in a diesel engine. *Industrial Crops and Products*, 53, 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.011>

- Monyem, A., & Gerpen, J. H. V. (2001). The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions. *Biomass and Bioenergy*, 20(4), 317–325.
- *Mormino, I., Verhelst, S., Sierens, R., Stevens, C. V., & De Meulenaer, B. (2009). *Using vegetable oils and animal fats in diesel engines: Chemical analyses and engine tests*. SAE Technical Paper 2009-01-0493. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0493>
- *Nabi, Md. N., Akhter, Md. S., & Zaglul Shahadat, M. Md. (2006). Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel-biodiesel blends. *Bioresource Technology*, 97(3), 372–378. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.013>
- *Nanthagopal, K., Ashok, B., Saravanan, B., Korah, S. M., & Chandra, S. (2018). Effect of next generation higher alcohols and Calophyllum inophyllum methyl ester blends in diesel engine. *Journal of Cleaner Production*, 180, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.167>
- *Ng, J.-H., Ng, H. K., & Gan, S. (2011). Engine-out characterisation using speed-load mapping and reduced test cycle for a light-duty diesel engine fuelled with biodiesel blends. *Fuel*, 90(8), 2700–2709. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.034>
- *Ng, J.-H., Ng, H. K., & Gan, S. (2012). Characterisation of engine-out responses from a light-duty diesel engine fuelled with palm methyl ester (PME). *Applied Energy*, 90(1), 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.028>
- *Nikanjam, M., Rutherford, J., Byrne, D., Lyford-Pike, E. J., & Bartoli, Y. (2009). *Performance and emissions of diesel and alternative diesel fuels in a modern heavy-duty vehicle*. SAE Technical Paper 2009-01-2649. <https://doi.org/10.4271/2009-01-2649>
- *Nuszkowski, J., Thompson, G. J., Tincher, R., & Clark, N. (2008). *Heat release and emission characteristics of B20 biodiesel fuels during steady state and transient operation*. SAE Technical Paper 2008-01-1377. <https://doi.org/10.4271/2008-01-1377>
- *Olatunji, I., Wayne, S., Gautam, M., Clark, N., Thompson, G., McKain, D., Sindler, P., & Nuszkowski, J. (2010). *Biodiesel blend emissions of a 2007 medium heavy duty diesel truck*. SAE Technical Paper 2010-01-1968. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1968>
- Organisation for Economic Co-operation and Development & International Energy Agency. (2017). *International comparison of light-duty vehicle fuel economy: Indonesia*. Retrieved from https://www.globalfuelconomy.org/media/461034/asia_indonesia.pdf
- *Ozsezen, A. N., & Canakci, M. (2010). The emission analysis of an IDI diesel engine fueled with methyl ester of waste frying palm oil and its blends. *Biomass and Bioenergy*, 34(12), 1870–1878. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.024>
- *Ozsezen, A. N., & Canakci, M. (2011). Determination of performance and combustion characteristics of a diesel engine fueled with canola and waste palm oil methyl esters. *Energy Conversion and Management*, 52(1), 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.049>
- *Pala-En, N., Sattler, M., Dennis, B. H., Chen, V. C. P., & Muncrief, R. L. (2013). Measurement of emissions from a passenger truck fueled with biodiesel from different feedstocks. *Journal of Environmental Protection*, 04(08A), 74–82. <https://doi.org/10.4236/jep.2013.48A1010>
- *Payri, F., Macián, V., Arrègle, J., Tormos, B., & Martínez, J. (2005). *Heavy-duty diesel engine performance and emission measurements for biodiesel (from cooking oil) blends Used in the ECOBUS project*. SAE Technical Paper 2005-01-2205. <https://doi.org/10.4271/2005-01-2205>
- *Peterson, C. L., & Reece, D. L. (1996). *Emissions testing with blends of esters or rapeseed oil fuel with and without a catalytic converter*. SAE Technical Paper 961114. <https://doi.org/10.4271/961114>
- *Peterson, C. L., Taberski, J. S., Thompson, J. C., & Chase, C. L. (2000). The effect of biodiesel feedstock on regulated emissions in chassis dynamometer tests of a pickup truck. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1371–1381. <https://doi.org/10.13031/2013.3034>
- Posada, F., Chambliss, S., & Blumberg, K. (2016). *Costs of emission reduction technologies for heavy-duty diesel vehicles*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/costs-emission-reduction-technologies-heavy-duty-diesel-vehicles>
- *Proc, K., Barnitt, R., Hayes, R. R., Ratcliff, M., McCormick, R. L., Ha, L., & Fang, H. L. (2006). *100,000-mile evaluation of transit buses operated on biodiesel blends (B20)*. SAE Technical Paper 2006-01-3253. <https://doi.org/10.4271/2006-01-3253>
- *Prokopowicz, A., Zaciera, M., Sobczak, A., Bielaczyc, P., & Woodburn, J. (2015). The Effects of neat biodiesel and biodiesel and HVO blends in diesel fuel on exhaust emissions from a light duty vehicle with a diesel engine. *Environmental Science & Technology*, 49(12), 7473–7482. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00648>
- *Purcell, D. L., McClure, B. T., McDonald, J., & Basu, H. N. (1996). Transient testing of soy methyl ester fuels in an indirect injection, compression ignition engine. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 73(3), 381–388. <https://doi.org/10.1007/BF02523435>

- *Rahman, S. M. A., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Abedin, M. J., Sanjid, A., & Sajjad, H. (2013). Production of palm and Calophyllum inophyllum based biodiesel and investigation of blend performance and exhaust emission in an unmodified diesel engine at high idling conditions. *Energy Conversion and Management*, 76, 362–367. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.061>
- *Rakopoulos, C. D., Rakopoulos, D. C., Hountalas, D. T., Giakoumis, E. G., & Andritsakis, E. C. (2007). Performance and emissions of bus engine using blends of diesel fuel with bio-diesel of sunflower or cottonseed oils derived from Greek feedstock. *Fuel*, 87(2), 147–157. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.011>
- *Rantanen, L., Mikkonen, S., Nylund, L., Kociba, P., Lappi, M., & Nylund, N. (1993). *Effect of fuel on the regulated, unregulated and mutagenic emissions of DI diesel engines*. SAE Technical Paper 932686. <https://doi.org/10.4271/932686>
- *Reijnders, J., Boot, M., & de Goey, P. (2016). Impact of aromaticity and cetane number on the soot-NOx trade-off in conventional and low temperature combustion. *Fuel*, 186, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.08.009>
- *Rifin, A. (2010). The effect of export tax on Indonesia's crude palm oil (CPO) export competitiveness. *Asean Economic Bulletin*, 27(2), 173–184. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/41317117>
- *Rizwanul Fattah, I. M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Mofijur, M., & Abedin, M. J. (2014). Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends. *Energy Conversion and Management*, 79, 265–272. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.024>
- *Ropkins, K., Quinn, R., Beebe, J., Li, H., Daham, B., Tate, J., ... Andrews, G. (2007). Real-world comparison of probe vehicle emissions and fuel consumption using diesel and 5% biodiesel (B5) blend. *Science of The Total Environment*, 376(1–3), 267–284. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.11.021>
- *Rose, K. D., Samaras, Z., Jansen, L., Clark, R., Elliott, N., Fontaras, G., ... Kalogirou, M. (2010). Impact of biodiesel blends on fuel consumption and emissions in Euro 4 Compliant Vehicles. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(2), 142–164. <https://doi.org/10.4271/2010-01-1484>
- *Roy, M. M., Wang, W., & Bujold, J. (2013). Biodiesel production and comparison of emissions of a DI diesel engine fueled by biodiesel-diesel and canola oil-diesel blends at high idling operations. *Applied Energy*, 106, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.057>
- *Schumacher, L., Borgelt, S. C., Hires, W. G., Wetherell, W., & Nevils, A. (1996). *100,000 miles of fueling 5.9L Cummins engines with 100% biodiesel*. SAE Technical Paper 962233. <https://doi.org/10.4271/962233>
- *Schumacher, L. G. (1994). *Fueling diesel engines with blends of methyl ester soybean oil and diesel fuel*. Retrieved from <http://web.missouri.edu/~schumacher/ASAED94.htm>
- Searle, S., & Bitnere, K. (2018). *Compatibility of mid-level biodiesel blends in vehicles in Indonesia*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/compatibility-mid-level-biodiesel-blends-vehicles-indonesia>
- *Serdari, A., Fragioudakis, K., Teas, C., Zannikos, F., Stournas, S., & Lois, E. (1999). Effect of biodiesel addition to diesel fuel on engine performance and emissions. *Journal of Propulsion and Power*, 15(2), 224–231. <https://doi.org/10.2514/2.5416>
- *Serrano, L., Lopes, M., Pires, N., Ribeiro, I., Cascão, P., Tarelho, ... Borrego, C. (2015). Evaluation on effects of using low biodiesel blends in a EURO 5 passenger vehicle equipped with a common-rail diesel engine. *Applied Energy*, 146, 230–238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.063>
- Shao, Z., Miller, J., & Jin, L. (2020). *Soot-free road transport in Indonesia: A cost-benefit analysis and implications for fuel policy*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/soot-free-road-transport-indonesia-cost-benefit-analysis>
- *Sharp, C. (1994). *Transient emissions testing of biodiesel and other additives in a DDC series 60 engine*. Retrieved from <https://afdc.energy.gov/files/pdfs/2956.pdf>
- *Sharp, C. A. (1996). *Emissions and lubricity evaluation of rapeseed derived biodiesel fuels*. https://archive.org/stream/emissionslubrici1996shar/emissionslubrici1996shar_djvu.txt
- *Sharp, C. A., Howell, S. A., & Jobe, J. (2000). *The effect of biodiesel fuels on transient emissions from modern diesel engines, part I regulated emissions and performance*. SAE Technical Paper 2000-01-1967. <https://doi.org/10.4271/2000-01-1967>
- *Sharp, C. A., Ryan, T. W., & Knothe, G. (2005). *Heavy-duty diesel engine emissions tests using special biodiesel fuels*. SAE Technical Paper 2005-01-3671. <https://doi.org/10.4271/2005-01-3671>
- *Shen, X., Shi, J., Cao, X., Zhang, X., Zhang, W., Wu, H., & Yao, Z. (2018). Real-world exhaust emissions and fuel consumption for diesel vehicles fueled by waste cooking oil biodiesel blends. *Atmospheric Environment*, 191, 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.08.004>

- *Sinha, S. K., & Kumar, N. (2019). *Utilization of blends of biodiesel and higher alcohols in a small capacity diesel engine*. SAE Technical Paper 2019-01-0580. <https://doi.org/10.4271/2019-01-0580>
- *Souligny, M., Graham, L., Rideout, G., & Hosatte, P. (2004). *Heavy-duty diesel engine performance and comparative emission measurements for different biodiesel blends used in the Montreal BIOBUS project*. SAE Technical Paper 2004-01-1861. <https://doi.org/10.4271/2004-01-1861>
- Spataru, A., & Romig, C. (1995). *Emissions and engine performance from blends of soya and canola methyl esters with ARB #2 diesel in a DDC 6V92TA MUI engine*. <https://doi.org/10.4271/952388>
- *Starr, M. E. (1997). *Influence on transient emissions at various injection timings, using cetane improvers, bio-diesel, and low aromatic fuels*. SAE Technical Report 972904. <https://doi.org/10.4271/972904>
- *Sze, C., Whinihan, J. K., Olson, B. A., Schenk, C. R., & Sobotowski, R. A. (2007). *Impact of Test Cycle and Biodiesel Concentration on Emissions*. SAE Technical Paper 2007-01-4040. <https://doi.org/10.4271/2007-01-4040>
- *Tadano, Y. S., Borillo, G. C., Godoi, A. F. L., Cichon, A., Silva, T. O. B., Valebona, F. B., Errera, M. R., Penteado Neto, R. A., Rempel, D., Martin, L., Yamamoto, C. I., & Godoi, R. H. M. (2014). Gaseous emissions from a heavy-duty engine equipped with SCR aftertreatment system and fuelled with diesel and biodiesel: Assessment of pollutant dispersion and health risk. *Science of The Total Environment*, 500-501, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.08.100>
- *Tatur, M., Nanjundaswamy, H., Tomazic, D., Thornton, M., & McCormick, R. L. (2009). Biodiesel effects on U.S. light-duty Tier 2 engine and emission control systems—Part 2. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2(1), 88-103. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0281>
- Thompson, G. J., Carder, D. K., Besch, M. C., Thiruvengadam, A., & Kappanna, H. K. (2014). *In-use emissions testing of light-duty diesel vehicles in the United States*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/use-emissions-testing-light-duty-diesel-vehicles-us>
- *Tian, J., Xu, H., Ghafourian, A., Liu, D., Tan, C., & Shuai, S.-J. (2013). Transient emissions characteristics of a turbocharged engine fuelled by biodiesel blends. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 6(2), 457-465. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1302>
- *Tompkins, B. T., Esquivel, J., & Jacobs, T. J. (2009). *Performance parameter analysis of a biodiesel-fuelled medium duty diesel engine*. SAE Technical Paper 2009-01-0481. <https://doi.org/10.4271/2009-01-0481>
- *Tzirakis, E., Karavalakis, G., Zannikos, F., & Stournas, S. (2007). *Impact of diesel/biodiesel blends on emissions from a diesel vehicle operated in real driving conditions*. SAE Technical Paper 2007-01-0076. <https://doi.org/10.4271/2007-01-0076>
- *Ullman, T. L., Hare, C. T., & Baines, T. M. (1983). *Heavy-duty diesel emissions as a function of alternate fuels*. SAE Technical Paper 830377. <https://doi.org/10.4271/830377>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2002). *A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions* (EPA420-P-02-001). Retrieved from <https://nepis.epa.gov>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). *Criteria Air Pollutants*. In *America's Children and the Environment*, 3rd ed. (p. 22). Retrieved from <https://www.epa.gov/americaschildrenenvironment>
- *Usta, N. (2005). An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Energy Conversion and Management*, 46(15-16), 2373-2386. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.12.002>
- *van Niekerk, A. S., Drew, B., Larsen, N., & Kay, P. J. (2019). Influence of blends of diesel and renewable fuels on compression ignition engine emissions over transient engine conditions. *Applied Energy*, 255, 113890. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113890>
- *Wallington, T. J., Anderson, J. E., Kurtz, E. M., & Tension, P. J. (2016). Biofuels, vehicle emissions, and urban air quality. *Faraday Discussions*, 189, 121-136. <https://doi.org/10.1039/C5FD00205B>
- *Wang, W. G., Lyons, D. W., Clark, N. N., Gautam, M., & Norton, P. M. (2000). Emissions from nine heavy trucks fuelled by diesel and biodiesel blend without engine modification. *Environmental Science & Technology*, 34(6), 933-939. <https://doi.org/10.1021/es981329b>
- Wang, Z., Li, L., Wang, J., & Reitz, R. D. (2016). Effect of biodiesel saturation on soot formation in diesel engines. *Fuel*, 175, 240-248. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.048>
- *Wirawan, S. S., Tambunan, A. H., Djamin, M., & Nabetani, H. (2008). The effect of palm biodiesel fuel on the performance and emission of the automotive diesel engine. *Engineering International*, 13.
- *Wu, F., Wang, J., Chen, W., & Shuai, S. (2009). A study on emission performance of a diesel engine fuelled with five typical methyl ester biodiesels. *Atmospheric Environment*, 43(7), 1481-1485. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.12.007>

- Xie, Y., Posada, F., & Minjares, R. (2020). *Diesel sulfur content impacts on Euro VI soot-free vehicles: Considerations for emerging markets*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/diesel-sulfur-content-soot-free-emerging-markets>
- Xu, Q., Xu, M., Hung, D., Wu, S., Dong, X., Ochiai, H., ... Jin, K. (2017). *Diesel spray characterization at ultra-high injection pressure of DENSO 250 MPa common rail fuel injection system*. SAE Technical Paper 2017-01-0821. <https://doi.org/10.4271/2017-01-0821>
- Yang, Z., & Rutherford, D. (2019). *Japan 2030 fuel economy standards*. Retrieved from the International Council on Clean Transportation, <https://theicct.org/publications/japan-2030-fuel-economy-standards>
- Yanowitz, J., & McCormick, R. L. (2009). Effect of biodiesel blends on North American heavy-duty diesel engine emissions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 111(8), 763–772. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200800245>
- *Yasin, M. H. M., Paruka, P., Mamat, R., Yusop, A. F., Najafi, G., & Alias, A. (2015). Effect of low proportion palm biodiesel blend on performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine. *Energy Procedia*, 75, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.145>
- *Yoshida, K., Taniguchi, S., Kitano, K., Tsukasaki, Y., Hasegawa, R., & Sakata, I. (2008). *Effects of RME30 on exhaust emissions and combustion in a diesel engine*. SAE Technical Paper 2008-01-2499. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2499>
- *Zhu, L., Cheung, C. S., Zhang, W. G., & Huang, Z. (2010). Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol. *Science of The Total Environment*, 408(4), 914–921. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.078>
- *Zhu, L., Zhang, W., Liu, W., & Huang, Z. (2010). Experimental study on particulate and NO_x emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends. *Science of The Total Environment*, 408(5), 1050–1058. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.056>

LAMPIRAN A – TABEL RANGKUMAN PEMBENTUKAN EMISI

Panah ke atas menunjukkan peningkatan pada mesin atau variabel properti bahan bakar.

Karakteristik mesin		
Variabel	Efek utama	Mekanisme
↑ Penundaan pembakaran	Peningkatan NO _x Penurunan HC, CO, PM	Penundaan pembakaran, atau periode antara injeksi bahan bakar dan pembakaran bahan bakar, meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar di dalam ruang bakar. Penundaan yang berkepanjangan dapat meningkatkan efisiensi pembakaran, akan tetapi juga menyebabkan peningkatan tekanan dan suhu dalam waktu cepat ketika pembakaran terjadi.
↑ Tekanan injeksi	Peningkatan NO _x Penurunan HC, CO	Tekanan tinggi dapat meningkatkan pembakaran, namun juga mempercepat waktu injeksi dan menaikkan suhu dalam silinder.
↑ Waktu injeksi	Penurunan NO _x Peningkatan HC, CO, PM	Kebalikan dari penundaan pembakaran, waktu injeksi yang lambat dapat mengurangi terjadinya pencampuran udara-bahan bakar dan suhu serta tekanan yang tinggi yang terjadi di ruang bakar.

Sifat bahan bakar		
Variabel	Efek utama	Mekanisme
↑ Bilangan setana	Penurunan NO _x	Bilangan setana yang tinggi dapat dikaitkan dengan kecepatan pembakaran dan, pada gilirannya, mengurangi terjadinya pencampuran udara-bahan bakar dan suhu.
↑ Aromatik	Peningkatan NO _x	Tingginya kadar aromatik dapat dikaitkan dengan kepadatan yang tinggi dan CN yang rendah. Kandungan aromatik yang tinggi juga dapat dikaitkan dengan suhu api adiabatik yang tinggi.
↑ Derajat kejenuhan	Penurunan NO _x , PM	Bahan bakar dengan tingkat kejenuhan yang tinggi (yang memiliki ikatan tunggal) seperti kelapa sawit dan kelapa cenderung memiliki CN yang lebih tinggi sehingga lebih mudah terbakar. Bahan bakar tersebut juga dapat dikorelasikan dengan viskositas yang tinggi dan kepadatan/densitas yang rendah.
↑ Densitas	Peningkatan NO _x , PM	Bahan bakar dengan tingkat kepadatan yang tinggi dapat dikaitkan dengan aromatik yang tinggi dan CN yang rendah. Bahan bakar yang padat juga memiliki efisiensi volumetrik yang tinggi, dimana dapat meningkatkan suhu dalam silinder.
↑ Viskositas	Peningkatan NO _x , HC, CO	Viskositas yang tinggi dapat menyebabkan peningkatan tekanan dan injeksi lanjutan. Kondisi dimana terjadi tekanan tinggi juga dapat meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar. Namun, bahan bakar dengan viskositas yang tinggi juga menghasilkan tetesan berdiameter besar yang dapat menghalangi penguapan dan pembakaran yang sempurna.
↑ Modulus curah	Peningkatan NO _x Penurunan HC, CO, PM	Modulus curah berbanding terbalik dengan kompresibilitas, sehingga bahan bakar dengan modulus curah yang tinggi memiliki kompresibilitas yang rendah dan tiba di ruang bakar lebih awal.
↑ Kandungan sulfur solar	Peningkatan PM	Pembakaran bahan bakar bersulfur tinggi menghasilkan aerosol sulfat, yakni salah satu komponen dari PM. Bahan bakar bersulfur tinggi juga dikaitkan dengan aromatik yang tinggi dan CN yang tereduksi.

LAMPIRAN B – DAFTAR STUDI

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
Acevedo & Mantilla (2011)	Kolombia	Mesin HDV	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NO _x , PM (omitted), HC, CO
Adi dkk. (2012)	Amerika Serikat	Mesin	Kedelai dingin	Steady-state test	—	NO _x , PM
Alam dkk. (2004)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	AVL 8-Mode	Tier 2	NO _x , PM, HC, CO
Altun (2011)	Turki	Mesin LDV	UCO, Lemak hewani	Steady-state test	—	NO _x , CO
Arapaki dkk. (2007)	Yunani	LDV	UCO	NEDC	Euro 3	NO _x , PM, HC, CO
Arbab dkk. (2013)	Malaysia	Mesin	Kelapa sawit, Campuran Kelapa sawit/Jarak pagar/ Kelapa	Steady-state test	—	NO _x , HC, CO
Armas dkk. (2013)	Spanyol	LDV	Lemak hewani	EUDC, NEDC	Euro 4	NO _x , HC, CO
Bakeas dkk. (June 2011)	Yunani/Italia	LDV	Kedelai, Kelapa sawit, UCO	Artemis Urban, Road, Motorway, NEDC	Euro 4	NO _x , PM, HC, CO
Behçet (2011)	Turki	Mesin	Minyak Ikan	Steady-state test	—	NO _x , HC, CO
Behçet dkk. (2014)	Turki	Mesin	Minyak ikan, UCO	Steady-state test	—	NO _x , HC, CO
Bielaczyc dkk. (2009)	Polandia	LDV	Rapeseed	UDC, EUDC	Euro 4	NO _x , PM, HC, CO
Canakci & Van Gerpen (2003)	Amerika Serikat	Mesin HDV	UCO, Kedelai	Steady-state test	—	NO _x , HC, CO
Chang dkk. (1996)	Amerika Serikat	Mesin HDV	Kedelai	Steady-state test	—	NO _x , PM, HC, CO
Chase dkk. (2000)	Amerika Serikat	HDV	<i>Rapeseed Ethyl Ester</i> (REE), Minyak nabati	FTP Transient	Tier 1	NO _x , PM, HC, CO
Chin dkk. (2012)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	Steady-state test	Tier 2	NO _x , PM, CO
Clark dkk. (1999)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP	Tier 1	NO _x , PM, HC, CO
Clark & Lyons (1999)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	WVU 5 peak truck cycle	Tier 1	NO _x , PM, HC, CO
Concawe (2014)	Jerman	HDV	Rapeseed	Steady-state test	—	NO _x , PM, HC, CO
Czerwinski dkk. (2013)	Cina	Mesin HDV	UCO	Steady-state test	—	NO _x , PM, HC
Di dkk. (2009)	Amerika Serikat	HDV	FAME	FTP	Tier 1	NO _x , HC, CO
Durbin dkk. (1999)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, UCO	FTP	Tier 1	NO _x , PM, HC, CO
Durbin & Norbeck (2002)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	UDDS (6k), HWY55	Tier 2	NO _x
Eckerle dkk. (2008)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, FAME	Siklus mengemudi di jalan raya (Perkotaan, Pedesaan)	Tier 1	NO _x
Farzaneh dkk. (2006)	Malaysia	Mesin	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NO _x , HC, CO
Fontaras dkk. (2009)	Yunani	LDV	Kedelai	Artemis Urban, Road; UDC	Euro 2	NO _x , PM, HC, CO
Fontaras dkk. (2010)	Yunani	LDV	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i> , Minyak bunga matahari, UCO, Kedelai	Artemis Urban, Road, Motorway; UDC	Euro 3	NO _x , PM, HC

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
Frank dkk. (2004)	Amerika Serikat	HDV	FAME	FTP	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Ge dkk. (2017)	Korea	LDV	Rapeseed	Steady-state test	—	NOx, PM, CO
Geng dkk. (2019)	Amerika Serikat /Cina	Mesin HDV	UCO	Steady-state test	—	NOx
Graboski dkk. (1996)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Composite)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Graboski dkk. (2003)	Amerika Serikat	HDV	Methyl-lard, methyl-soy, methyl-canola, methyl inedible tallow, methyl edible tallow, methyl-low free fatty acid grease, methyl-high free fatty acid grease, methyl-laurate (C12:0), methyl-palmitate (C16:0), methyl-stearate (C18:0), methyl-oleate (C18:1), methyl-linoleate C18:2), methyl linolenate (C18:3), methyl soy (soyagold), 1:2 M-terate: M-linseed, methyl-hydrogenated soy, ethyl-stearate (C18:0), ethyl-linoleate (C18:2), ethyl-linseed, ethyl-soy, ethyl-hydrogenated soy	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Gautam (2013)	India	Mesin	Jarak pagar	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Guido (2013)	Italia	Mesin LDV	Rapeseed	Open/closed loop operating modes	Euro 5	NOx, PM, HC, CO
Haas (2001)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, Sabun	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Han dkk. (2008)	Amerika Serikat	LDV	Kedelai, Kelapa	Ad-hoc operating points/Misc.	—	NOx, PM, HC, CO
Hansen & Jensen (1997)	Denmark	HDV	Rapeseed	5-mode test (subset of ECE R49)	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Hearne (2005)	Amerika Serikat	HDV	FAME	Rowan University Composite School Bus Cycle (RUCSBC)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Holden dkk. (2011)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, UCO	FTP Transient, US06, AVL 8-Mode, In-Use Test	Tier 1, Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Kalam & Masjuki (2008)	Malaysia	HDV	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Karavalakis dkk. (2007)	Yunani	LDV	Kedelai	Athens Driving Cycle	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Karavalakis dkk. (2009a)	Yunani	HDV	Kelapa sawit	UDC, NEDC, ADC	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Karavalakis dkk. (2009b)	Yunani	LDV	Kedelai	UDC, NEDC, ADC	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Karavalakis dkk. (2009c)	Yunani	LDV	Rapeseed, Kelapa sawit	NEDC, UDC, ADC	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Karavalakis dkk. (2011)	Yunani	LDV	Kelapa sawit, Kedelai, Campuran Rapeseed dengan minyak bunga matahari dan UCO	Artemis (full), NEDC	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Karavalakis dkk. (2016)	Amerika Serikat	LDV	UCO	UDDS, HHDDT Transient	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Kawano dkk. (2008)	Jepang	LDV	Rapeseed	JE05 Mode Test	Euro 5	NOx, PM, HC, CO

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
Kaya dkk. (2018)	Turki	LDV	FAME (tidak spesifik)	NEDC, WLTC	Euro 5	NOx, HC, CO
Kinoshita dkk. (2003)	Jepang	Mesin	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Kinoshita dkk. (2006)	Jepang	Mesin	Kelapa sawit, Kelapa, <i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Kinoshita dkk. (2011)	Jepang	Mesin	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx
Knothe dkk. (2006)	Amerika Serikat	HDV	Methyl soyate (commercial biodiesel), methyl oleate, methyl pamate, methyl laurate (technical biodiesel)	FTP Transient	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Koszalka dkk. (2010)	Polandia	HDV	FAME	13-mode ESC test	Tier 2	NOx, HC, CO
Kousoulidou dkk. (2009)	Yunani	LDV	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	NEDC; <i>Artemis Urban, Road, Motorway</i>	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Krahl dkk. (2005)	Jerman	HDV	<i>Rapeseed</i> , Campuran <i>Rapeseed/Kedelai/Kelapa sawit</i>	13-mode ESC test	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Krahl dkk. (2008)	Jerman	HDV	<i>Rapeseed</i>	13-mode ESC test	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Krahl dkk. (2009)	Jerman	HDV	<i>Rapeseed</i>	13-mode ESC test	Euro 3	NOx, PM, CO
Lahane dkk. (2015)	India	Mesin	Karanja	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Lance dkk. (2009)	Amerika Serikat /Jepang	LDV	Jarak pagar, Kelapa, <i>Rapeseed</i>	NEDC	Euro 4	NOx, HC, CO
Lapuerta dkk. (2008)	Spanyol	LDV	UCO, Minyak bunga matahari	Various SS operating points	Euro 4	NOx, PM
Leevijit & Prateepchaikul (2011)	Thailand	Mesin	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NOx, CO
Lesnik dkk. (2013)	Slovenia	Mesin HDV	<i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx, CO
Li dkk. (2007)	Eropa	HDV	<i>Rapeseed</i>	23 kW Hot-Start SS	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Lim dkk. (2014)	Korea	LDV	Kedelai, UCO, Jarak pagar, Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	NEDC	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Liotta & Montalvo (1993)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Lopez dkk. (2009)	Spanyol	HDV	FAME (tidak spesifik)	Transient Cycle	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Lujan dkk. (2009)	Spanyol	LDV	FAME (tidak spesifik)	NEDC	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Macor dkk. (2011)	Italia	LDV	<i>Rapeseed</i>	UDC, Artemis Urban	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Marshall dkk. (1995)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP retarded timing	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Martini dkk. (2007)	Italia/EU Joint Research Centre	LDV	50/50 Kedelai dan Bunga matahari, Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	NEDC, EUDC	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Mazzoleni dkk. (2007)	Amerika Serikat	HDV	FAME	On-road Driving Cycle	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
McCormick dkk. (1997)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
McCormick dkk. (2003)	Amerika Serikat	HDV	UCO, Kedelai	FTP Transient (Composite)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
McCormick dkk. (2005)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, UCO, <i>Rapeseed</i> , Lemak hewani	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM
McCormick et al. (2006)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	City-Suburban Heavy Vehicle Cycle (CSHVC), UDDS, RUCSBC, Freeway Cycle	Tier 1, Tier 2	NOx, PM, HC, CO
McGill dkk. (2003)	Amerika Serikat	LDV, HDV	Rapa	FTP 75, AVL 8-Mode	Tier 1, Euro 2	NOx, PM
Mizushima & Takada (2014)	Jepang	HDV	FAME	JE05 "ED12" transient test cycle	Euro 5	NOx, PM
Mofijur dkk. (2014)	Malaysia	LDV	Kelapa sawit, Minyak M. oleifera	Steady-state test	Euro 2	NOx, HC, CO
Mormino dkk. (2009)	Belgia	LDV	Lemak hewani, Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx, HC
Nabi dkk. (2006)	Bangladesh	Mesin	Minyak neem	Steady-state test	—	NOx, CO
Nathangopal dkk. (2018)	India	Mesin	Nyamplung/ <i>Calophyllum inophyllum</i>	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Ng dkk. (2011)	Malaysia	LDV	Kelapa sawit	Steady-state (perwakilan dari kondisi di jalan)	—	NOx, HC, CO
Ng dkk. (2012)	Malaysia	Mesin	Kelapa sawit, Kedelai, Kelapa	7-mode ESC test	Euro 2	NOx, HC, CO
Nikanjam dkk. (2009)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	UDDS	Tier 2	NOx, HC, CO
Nuszkowski dkk. (2008)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, Lemak hewani, Biji kapas	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Olatunji dkk. (2010)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai, Lemak hewani	Steady-state test	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Ozsezen & Canakci (2010)	Turki	HDV	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Ozsezen & Canakci (2011)	Turki	Mesin	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i>	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Pala-En dkk. (2013)	Amerika Serikat	HDV	<i>Rapeseed</i> , UCO, Lemak hewani, Kedelai	UDDS, <i>On-road</i> (jalan raya, arteri, <i>idling</i>)	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Payri dkk. (2005)	Spanyol	HDV	UCO	Steady-state test	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Peterson (2000)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Peterson & Reece (1996)	Amerika Serikat	HDV	<i>Rapeseed</i> Ethyl Ester (REE)	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Proc dkk. (2006)	Amerika Serikat	HDV	FAME	City-Suburban Heavy Vehicle Cycle (CSHVC)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Prokopowicz dkk. (2015)	Polandia	LDV	<i>Rapeseed</i>	NEDC, UDC, EUDC	Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Purcell dkk. (1996)	Amerika Serikat	LDV	Kedelai	Heavy Duty Transient (US Bureau of Mines)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Purcell dkk. (1996)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	Transient Cycle (US Bureau of Mines)	Euro 1	NOx, PM, HC, CO
Rahman dkk. (2013)	Malaysia	Mesin	Kelapa sawit, Nyamplung/ <i>Calophyllum inophyllum</i>	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Rakopoulos dkk. (2008)	Yunani	HDV	Minyak bunga matahari, Biji kapas	Steady-state test	—	NOx, HC, CO

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
Rantanen & Mikkonen (1993)	Finlandia	HDV	Rapeseed	13-mode ESC test	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Rizwanal Fattah (2014)	Amerika Serikat	HDV	Rapeseed	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Ropkins dkk. (2007)	Britania Raya	LDV	Rapeseed	UDC, EUDC, FTP 75	Euro 1	NOx
Rose dkk. (2010)	Eropa	LDV	Rapeseed	NEDC, UDC, EUDC	Euro 4	NOx, HC, CO
Roy dkk. (2013)	Kanada	Mesin HDV	Rapeseed	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Schumacher dkk. (1994)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Schumacher dkk. (1996)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Sedari dkk. (1999)	Yunani	LDV, Mesin	Minyak bunga matahari	On-road idling, Steady-state	Euro 1	NOx
Serrano dkk. (2015)	Portugal	LDV	Kedelai	NEDC, UDC, EUDC	Euro 5	NOx
Sharp (1994)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Sharp (1996)	Amerika Serikat	HDV	Rapeseed	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Sharp dkk. (2000)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Sharp, Ryan, & Knothe (2005)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Shen dkk. (2018)	Cina	LDV	Rapeseed	PEMS (Non Highway/ Highway Driving)	Euro 3, Euro 4	NOx, PM, HC, CO
Sinha and Kumar (2019)	India	Mesin	Jarak pagar	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Souigny dkk. (2004)	Kanada	HDV	Lemak hewani, UCO, Lemak nabati	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Spataru and Romig (1995)	Amerika Serikat	HDV	Rapeseed	FTP Transient (Hot Start)	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Starr (1997)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	FTP Transient	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Sze dkk. (2007)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	HWY, FTP, WHTC, UDDC (6k, 28k)	Tier 2	NOx, PM, HC, CO
Tadano dkk. (2014)	Brazil	HDV	Kedelai	13-Mode ESC test	Euro 5	NOx
Tatur dkk. (2009)	Amerika Serikat	LDV	Kedelai	FTP 75, HWFET	Euro 4	NOx, HC, CO
Tian dkk. (2013)	Cina	LDV	Rapeseed	Bervariasi	—	NOx, PM, HC
Tompkins dkk. (2009)	Amerika Serikat	Mesin	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NOx
Tzirakis dkk. (2007)	Yunani	LDV	UCO	On-road (urban driving)	Euro 4	NOx, CO
Ullman dkk. (1983)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	1979 13-mode Federal Test Procedure	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Usta (2005)	Turki	Mesin	Minyak biji tembakau	Steady-state test	—	NOx, CO
van Niekerk dkk. (2019)	Britania Raya	LDV	FAME (tidak spesifik)	WLTC	Euro 4	NOx, CO
Wallington dkk. (2016)	Amerika Serikat	LDV	Butyl Nonanoate	FTP 75, HWFET, US06	Euro 4	NOx, PM, HC, CO

Studi	Lokasi	Tipe kendaraan	Bahan baku FAME	Siklus pengujian	Standar emisi	Polutan
Wang dkk. (2000)	Amerika Serikat	HDV	Kedelai	WVU 5 peak truck cycle	Tier 1	NOx, PM, HC, CO
Wirawan dkk. (2008)	Indonesia	LDV	Kelapa sawit	UDC and EUDC	Euro 2	NOx, PM, HC, CO
Wu dkk. (2009)	Cina	Mesin HDV	Kelapa, <i>Rapeseed</i> , Kedelai, Kelapa sawit, UCO	Steady-state test	Euro 3	NOx, PM, HC, CO
Yasin dkk. (2015)	Malaysia/Iran	LDV	Kelapa sawit	Steady-state test	—	NOx, HC, CO
Yoshida dkk. (2008)	Jepang	LDV	Rapeseed	NEDC	Euro 5	NOx, PM, HC, CO
Zhu, Cheung dkk. (2010)	Cina	Mesin HDV	UCO	Steady-state test	Euro 5	NOx, PM, HC, CO
Zhu, Zhang dkk. (2010)	Cina	HDV	Kelapa sawit, <i>Rapeseed</i> , UCO	Steady-state test	—	NOx

LAMPIRAN C – RANGKUMAN SIKLUS UJI EMISI

Siklus pengujian	Deskripsi	Lokasi penyesuaian	Tipe kendaraan	Kecepatan rata-rata (km/jam)	Komentar
FTP	Heavy-duty engine certification cycle	Amerika Serikat	HDV	30	Sesuai/patuh pada Kode Peraturan Federal 40 CFR 86
UDDS (6k, 28k)	Urban Dynamometer Driving Schedule	Amerika Serikat	HDV	30,4	—
AVL 8-Mode	Steady State (SS) test yang dikembangkan oleh AVL	Amerika Serikat	HDV	—	Mode 8 SS (sebanding dengan FTP test)
WHTC	World Harmonized Transient Cycle	Internasional	HDV	—	Dikembangkan oleh kelompok teknis dari UN ECE GRPE
NEDC	New European Driving Cycle	Eropa / Internasional	LDV	33,35	Sebelumnya MVEG-A cycle (4 runs of UDC, one run of EUDC)
ECE R-49	Siklus pengujian yang diperkenalkan melalui Peraturan ECE No. 49	Eropa / Internasional	HDV	—	Prosedur 13-mode SS (digunakan untuk sertifikasi mesin berat dalam Euro II)
ESC	European Stationary Cycle	Eropa / Internasional	HDV	—	Prosedur 13-mode SS yang menggantikan R-49 test (Dimulai pada tahap Euro III)
UDC	Urban Driving Cycle	Eropa	LDV	18,35	Juga disebut ECE-15
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle	Eropa	LDV	62,59	Mewakili sifat mengemudi di perkotaan yang agresif
Artemis Driving Cycle (Perkotaan)	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems	Eropa	LDV	17,7	Analisis statistik kondisi mengemudi yang sebenarnya di Uni Eropa
Artemis Driving Cycle (Jalan pedesaan)	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems	Eropa	LDV	57,5	Analisis statistik kondisi mengemudi yang sebenarnya di Uni Eropa
Artemis Driving Cycle (Jalan tol)	Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems	Eropa	LDV	96,9	Analisis statistik kondisi mengemudi yang sebenarnya di Uni Eropa
CSHVC	City-Suburban Heavy Vehicle Cycle	Amerika Serikat	HDV	22,77	Dikembangkan oleh Vehicle Emissions Testing Laboratory dari West Virginia University (WVU)
WVU 5-Peak/5-Mile Cycles	Siklus yang dikembangkan oleh Vehicle Emissions Testing Laboratory dari West Virginia University	Amerika Serikat	HDV	48,3	Dikembangkan di WVU; Dalam siklus 5 mil, kendaraan mencapai kecepatan tertinggi dengan akselerasi tinggi
JE-05	Siklus transien yang diperkenalkan melalui standar emisi 2005	Jepang	HDV	26,94	—