



PROTEKSI ISI LAPORAN AKHIR PENELITIAN DOSEN PEMULA

Dilarang menyalin, menyimpan, memperbanyak sebagian atau seluruh isi proposal ini dalam bentuk apapun kecuali oleh pengusul dan pengelola administrasi pengabdian kepada masyarakat

LAPORAN AKHIR 2024

Rencana Pelaksanaan Penelitian Dosen Pemula: tahun 2024 s.d. tahun 2024

1. JUDUL PENELITIAN

Pemodelan mesin Diesel Dual Fuel (DDF) bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen

Bidang Fokus	Tema	Topik (jika ada)	Prioritas Riset
Energi	Teknologi Substitusi Bahan Bakar	Teknologi pendukung konversi ke bahan bakar gas (BBG)	Green Economy

Rumpun Ilmu Level 1	Rumpun Ilmu Level 2	Rumpun Ilmu Level 3
ILMU TEKNIK	ILMU KETEKNIKAN INDUSTRI	Teknik Mesin

Skema Penelitian	Strata (Dasar/Terapan/Pengembangan)	Nilai SBK	Target Akhir TKT	Lama Kegiatan
Penelitian Dosen Pemula	Riset Dasar	50.000.000	2	1 Tahun

2. IDENTITAS PENGUSUL

Nama, Peran	Jenis	Program Studi/Bagian	Bidang Tugas	ID Sinta
AINI LOSTARI 0731108701 Ketua Pengusul Universitas Qomaruddin	Dosen	Teknik Mesin	Berkoordinasi dengan anggota untuk pembagian tugas dan memastikan pelaksanaan penelitian berjalan sesuai dengan timeline	6649148
NOVI INDAH RIANI 0717119007 Anggota Universitas Qomaruddin	Dosen	Teknik Mesin	Melakukan pemodelan dan simulasi untuk pengambilan data	6798749
KUNTANG WINANGUN 0721049002 Anggota Universitas Muhammadiyah Ponorogo	Dosen	Teknik Mesin	Menulis artikel jurnal nasional bereputasi sebagai luaran dari penelitian	5977794

3. MITRA KERJASAMA PENELITIAN (Jika Ada)

Pelaksanaan penelitian dapat melibatkan mitra kerjasama yaitu mitra kerjasama dalam melaksanakan penelitian, mitra sebagai calon pengguna hasil penelitian, atau mitra investor

Mitra	Nama Mitra	Dana
-------	------------	------

4. LUARAN DAN TARGET CAPAIAN

Luaran Wajib

Tahun Luaran	Kategori Luaran	Jenis Luaran	Status target capaian	Keterangan
1	Artikel di Jurnal	Artikel di Jurnal Bereputasi Nasional Terindeks SINTA 1-4	Accepted/Published	https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo/index

5. ANGGARAN

Rencana Anggaran Biaya penelitian mengacu pada PMK dan buku Panduan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat yang berlaku.

Total RAB 1 Tahun Rp42.110.000,00

Tahun 1 Total Rp42.110.000,00

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Pengumpulan Data	HR Pembantu Lapangan	HR pembantu lapangan untuk survey ke industri	OH	10	80.000	800.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Uang harian rapat di luar kantor	Uang harian rapat diluar kantor	OH	10	140.000	1.400.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya Publikasi artikel di Jurnal Bereputasi Nasional	Paket publikasi sinta 3	Paket	1	2.315.000	2.315.000
Sewa Peralatan	Peralatan penelitian	Komputer untuk simulasi	Unit	1	10.500.000	10.500.000
Pengumpulan Data	Uang Harian	Uang harian survey	OH	4	410.000	1.640.000
Pengumpulan Data	Uang Harian	Uang harian rapat	OH	10	140.000	1.400.000
Analisis Data	Transport Lokal	Transportasi lokal taksi	OK (kali)	5	233.000	1.165.000
Pengumpulan Data	Penginapan	Penginapan perjalanan dinas	OH	3	650.000	1.950.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Penyimpan data hardisk	Unit	1	1.500.000	1.500.000
Pengumpulan Data	Biaya konsumsi	Konsumsi rapat persiapan penelitian	OH	10	70.000	700.000
Bahan	ATK	Peralatan paket ATK	Paket	1	1.500.000	1.500.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya konsumsi rapat	Konsumsi rapat	OH	10	100.000	1.000.000
Pengumpulan Data	HR Pembantu Peneliti	HR pembantu peneliti	OJ	100	25.000	2.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Benwidit	Unit	2	2.700.000	5.400.000
Analisis Data	Uang Harian	Uang harian rapat diluar kantor	OH	10	140.000	1.400.000
Pengumpulan Data	Honorarium narasumber	HR Narasumber dari industri	OJ	3	900.000	2.700.000
Analisis Data	Honorarium narasumber	HR narasumber FGD	OJ	3	900.000	2.700.000
Analisis Data	HR Pengolah Data	HR pengolah data	P (penelitian)	1	1.540.000	1.540.000

*. KEMAJUAN PENELITIAN

A. RINGKASAN

Emisi gas buang dari kendaraan merupakan penyebab polusi nomor 2 setelah industri. Oleh sebab itu, pemerintah menargetkan net zero emission pada tahun 2060. Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi bahan bakar minyak adalah dengan menggunakan biodiesel. Akan tetapi, penggunaan biodiesel masih memiliki banyak dampak kurang baik terhadap performa kendaraan yaitu terjadinya penurunan kinerja mesin. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas buang tanpa menurunkan kinerja mesin yaitu dengan penambahan gas hidrogen. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi untuk mengetahui fenomena yang terjadi didalam ruang bakar mesin diesel satu silinder

meliputi tekanan silinder panas dampak pembakaran pada emisi gas buang. Tahapan dalam penelitian ini terdiri dari pre processing, processing dan post processing. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan penambahan gas hidrogen dapat meningkatkan panas dalam ruang pembakaran, dampak peningkatan panas adalah peningkatan tekanan silinder, temperatur ruang bakar, emisi NO, dan emisi CO. Sedangkan emisi HC dan soot mengalami penurunan dengan penambahan gas hidrogen pada bahan bakar biodiesel

B. KATA KUNCI

Simulasi; Diesel Dual Fuel; Gas hidrogen; Biodiesel; Karakteristik pembakaran

Pengisian poin C sampai dengan poin H mengikuti template berikut dan tidak dibatasi jumlah kata atau halaman namun disarankan ringkas mungkin. Dilarang menghapus/memodifikasi template ataupun menghapus penjelasan di setiap poin.

C. HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN: Tuliskan secara ringkas hasil pelaksanaan penelitian yang telah dicapai sesuai tahun pelaksanaan penelitian. Penyajian meliputi data, hasil analisis, dan capaian luaran (wajib dan atau tambahan). Seluruh hasil atau capaian yang dilaporkan harus berkaitan dengan tahapan pelaksanaan penelitian sebagaimana direncanakan pada proposal. Penyajian data dapat berupa gambar, tabel, grafik, dan sejenisnya, serta analisis didukung dengan sumber pustaka primer yang relevan dan terkini.

PENDAHULUAN

Energi terbarukan telah menjadi sorotan dalam beberapa tahun terakhir karena meningkatnya kesadaran global akan dampak lingkungan dari pembakaran bahan bakar fosil seiring dengan meningkatnya permintaan energi [1], [2]. Pada peraturan pemerintah dan secara global sepakat untuk menurunkan pemanasan global yang disebabkan salah satunya dari emisi gas buang [3], [4]. Pemanfaatan biodiesel sebagai pengganti minyak diesel sudah dipertimbangkan sesuai target campuran biodiesel dengan minyak diesel sebagaimana Permen ESDM No. 12/2015, yaitu 30% untuk kurun waktu 2020-2025 [5]. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dapat diproduksi dari bahan nabati yang ada di alam seperti minyak kelapa sawit (Crude Palm Oil). Biodiesel dari CPO diketahui ramah lingkungan [2], [6], [7]. Kandungan oksigen dalam biodiesel sebesar 9%-12% memiliki keuntungan diantaranya: menurunkan emisi asap, CO, HC, Exhaust Gas Temperature [8], [9]. Hidrogen (H₂) memiliki masa depan yang menjanjikan baik sebagai energi ramah lingkungan maupun sebagai sumber bahan bakar. Kelebihan bahan bakar hydrogen diantaranya adalah: flammable, rendah densitas, dan tinggi nilai kalor [10]–[12]. Sehingga diperlukan teknologi Diesel Dual Fuel (DDF) pada mesin diesel untuk mengaplikasikan kedua jenis bahan bakar tersebut. Pada mesin DDF dirancang sebagai mesin yang menggunakan bahan bakar ganda, bahan bakar biodiesel sebagai pematik (pilot) dan bahan bakar hidrogen sebagai bahan bakar utama.

Pada penelitian yang telah dilakukan [13] melakukan penelitian untuk mengetahui emisi dan karakteristik pembakaran pada mesin diesel dengan menggunakan bahan bakar campuran diesel dan biodiesel dari rosela. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan bahan bakar biodiesel dengan beban kendaraan dan tekanan injeksi bahan bakar. Penelitian menurut [14] dengan tema cairan semprotan atomasi, droplet, breakup, tabrakan droplet dan penguapan pada mesin Caterpillar heavy-duty diesel engine menggunakan simulasi CFD 3D. Mesin memiliki spesifikasi 137,19 mm bore, 165,1 mm stroke, nozzle injector 6 lubang, diameter injector 0.259 mm dan tekanan injeksi 90 Mpa. Dengan submodel mirip mixican-hat, pemodelan turbulen $k-\epsilon$. Hasil yang diperoleh melihat bahwa simulasi CFD bisa dijadikan data untuk mendesain mesin pembakaran dalam, analisa kerja mesin dan optimasi. Hasil dari penelitian Menurut [15] menggunakan mode bahan bakar ganda hidrogen dan biodisel *Madhuca Longifolia*, hasilnya EGT meningkat secara signifikan karena pelepasan energi yang lebih tinggi pada saat pembakaran hidrogen. Emisi NO juga meningkat dari 289 ppm dengan HES 0% menjadi 465 ppm dengan HES 6,5%. Peningkatan kadar NO disebabkan oleh laju pembakaran hidrogen tercepat, yang menaikkan suhu di dalam silinder yang akhirnya meningkatkan emisi NO.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang sudah diuraikan diatas, maka focus penelitian ini adalah melakukan pemodelan (simulasi) tentang bahan bakar biodiesel yang dicampurkan dengan gas hidrogen masih belum banyak dilakukan. Beberapa penelitian masih menggunakan campuran biodiesel dengan bahan bakar minyak, pada penelitian ini penggunaan biodiesel 100% diterapkan pada mesin diesel. Dari hal tersebut peneliti melakukan pengembangan pada mesin diesel dual fuel, empat langkah, satu silinder, berbahan bakar biodiesel crude palm oil

(CPO) B100 dan gas hidrogen dengan pengaturan parameter ratio bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen agar didapatkan kinerja dan emisi gas buang yang minimum pada mesin diesel.

METODE

Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) berupa Ansys Forte Student Edition pada mesin diesel satu silinder dengan beban konstan 1500 rpm. Penelitian terdiri dari tiga tahapan, yaitu *pre processing*, *processing* dan *post processing*.

1. *Pre processing*

Pada tahap ini memasukkan data-data berupa pembuatan geometri hingga penentuan kondisi batas. Adapun geometri yang diinputkan untuk simulasi yaitu:

Tabel 1. Geometri untuk simulasi

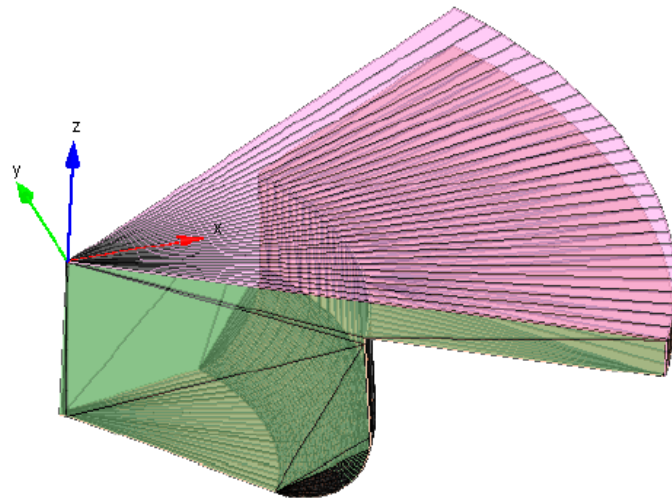
No	Parameter	Spesifikasi
1	Tipe Piston	Diamond DI800
2	Kecepatan Mesin	1500 rpm
3	Diameter x langkah piston	82 x 87 mm
4	Tipe piston	<i>Bowl-in-piston</i>
5	Kapasitas silinder	411 cc
6	Rasio kompresi	18:1
7	Tekanan injeksi	220 kg/cm ²
8	Waktu injeksi pilot	13 ⁰
9	Durasi katup hisap	Buka 30 ⁰ sebelum TMA Tutup 50 ⁰ sesudah TMA
10	Durasi katup buang	Buka 55 ⁰ sebelum TMB Tutup 35 ⁰ sesudah TMA
11	Daya mesin	8HP

Sedangkan parameter awal untuk simulasi adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Parameter awal simulasi

No	Parameter	Spesifikasi
1	Temperatur awal	362 K
2	Temperatur <i>liner</i>	500 K
3	Temperatur <i>head</i>	500 K
4	Temperatur piston	500 K
5	EGR	0%

Penentuan meshing pada simulasi ini ditunjukkan pada gambar 1, dimana sektor mesh 60⁰ ruang bakar pada posisi *Top Dead Center* (TDC). Untuk mengurangi proses *running*, maka simulasi dilakukan pada sistem tertutup dari intake valve closed/IVC pada -165°CA bTDC hingga exhaust valve open/EVO pada 125°CA aTDC (after Top Dead Center) [16]



Gambar 1. Model ruang bakar dengan sektor mesh 60⁰

Setelah proses *meshing*, maka perlu dilakukan tahapan validasi sebelum *running* simulasi dijalankan.

2. *Processing*

Setelah proses *meshing*, langkah selanjutnya adalah tahapan *processing*. Pada tahap ini memasukkan *operating condition* dan validasi sebelum *running* simulasi dijalankan. Bahan bakar yang digunakan pada simulasi ini adalah Biodiesel yang karakteristik bahan bakar dapat dilihat pada table 4. Bahan bakar biodiesel yang digunakan memiliki kemurnian 100%. Sedangkan bahan bakar hidrogen yang digunakan memiliki kemurnian 99.99% dengan kode UHP. Berikut ini adalah tabel kondisi mesin yang akan diteliti:

Tabel 3. Kondisi operasi mesin

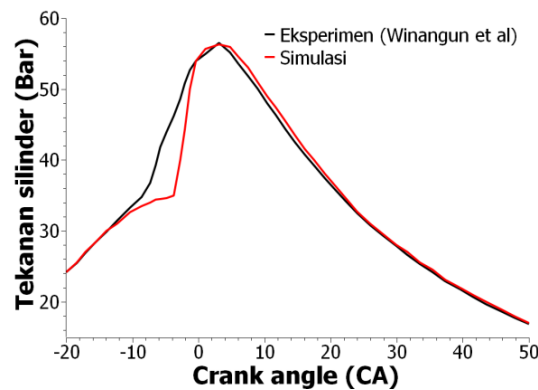
Titik Uji	Putaran Mesin (rpm)	Waktu injeksi(<i>crank angle before TDC</i>)
1	1500	13
2	1500	15
3	1500	17
4	1500	19
5	1500	21
6	1500	23

Table 4. Spesifikasi bahan bakar biodiesel CPO dan hydrogen

No	Properties	Biodiesel CPO	Hidrogen
1	Massa Jenis pada 15°C (Kg/m ³)	875	0,085
2	Viskositas Kinematic 40°C (mm ² /s (cSt))	4,5	0
3	Angka Setana (Min)	58	5-10
4	Titik Nyala (mangkok tertutup) (°C, Min)	140	
5	Titik Kabut (°C, Max)	15,4	
6	<i>Lower Heat Value</i> (kJ/kg)	39.910	119.810
7	<i>Auto Ignition Temperature</i> (°C)	>101	585
8	<i>Stoichiometric Air-Fuel Ratio</i>	12,5	34,3

Setelah penentuan kondisi mesin, diperlukan validasi untuk memastikan bahwa *meshing* serta geometri yang telah dibuat sudah benar. Adapun validasi dilakukan dengan

penelitian milik Winangun et al [21] pada tekanan silinder terhadap *crank angle*.



Gambar 3. Perbandingan tekanan pembakaran antara eksperimen dan simulasi pada putaran mesin 1500 rpm dan waktu injeksi 13⁰ CA bTDC

3. *Post processing*

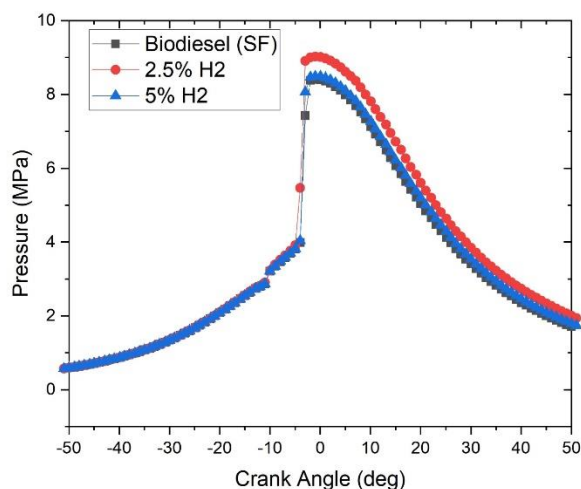
Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah *post processing* dimana proses menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh. Adapun data yang akan diambil antara lain pengaruh tekanan silinder terhadap *crank angle*, temperatur gas terhadap *crank angle*, dan analisis emisi terhadap *crank angle*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pembahasan penelitian ini difokuskan untuk membahas *pressure*, temperatur dan emisi yang dihasilkan oleh mesin diesel satu silinder berbahan bakar biodiesel dan hidrogen.

Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen pada tekanan silinder terhadap *crank angle*

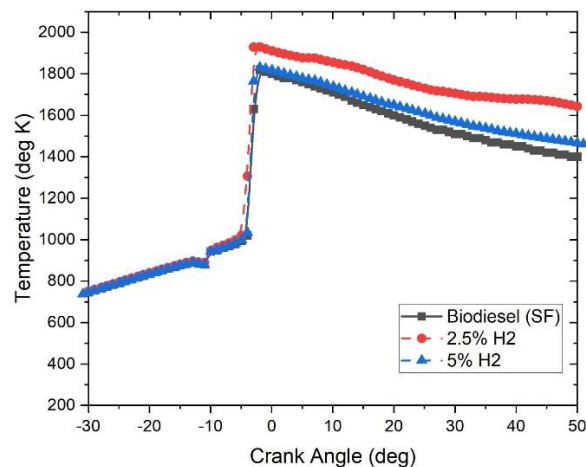
Pada gambar 4, menunjukkan pengaruh tekanan terhadap *crank angle* pada mesin diesel satu silinder. Peningkatan tekanan maksimum terjadi pada *crank angle* -7⁰ sebelum TDC. Nilai tekanan maksimum pada variasi campuran biodiesel dan hidrogen 2,5%. Hal ini dikarenakan saat waktu injeksi mendekati TDC, waktu penundaan pengapian menjadi lebih pendek. Sehingga campuran bahan bakar akan terbakar lebih cepat, penambahan hidrogen berdampak pada peningkatan panas pada saat proses pembakar sehingga meningkatkan temperatur pembakaran dan tekanan silinder [17], [18].



Gambar 4. Grafik tekanan silinder terhadap *crank angle*

Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen pada temperatur silinder terhadap *crank angle*

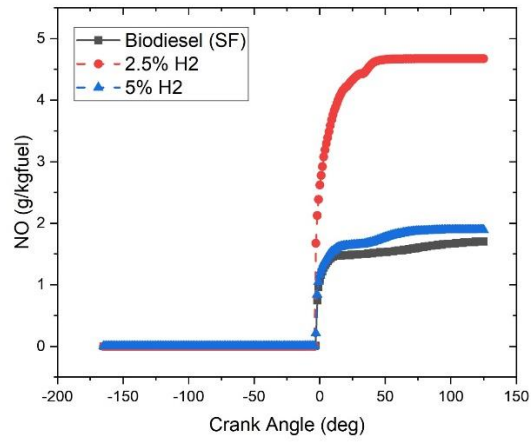
Hasil dari peningkatan temperatur pada mesin diesel satu silinder. Penambahan gas hidrogen menyebabkan peningkatan temperatur pembakaran, nilai kalor hidrogen yang 3x lipat dari bahan bakar biodiesel mengakibatkan peningkatan temperatur pembakaran yang ada di dalam ruang bakar [1], [19]. Pada gambar 5 terlihat dengan ditambahkan konsentrasi hidrogen maka temperatur juga ikut meningkat. Peningkatan tertinggi pada konsentrasi hidrogen 2.5%. Nilai temperatur tertinggi ditunjukkan pada gambar 5 sebesar 1950 K dengan campuran 2,5% hidrogen. Peningkatan tekanan silinder berdampak pada peningkatan temperatur dalam ruang bakar. Peningkatan tertinggi pada posisi TDC, karena saat itu adalah puncak pembakaran berlangsung.



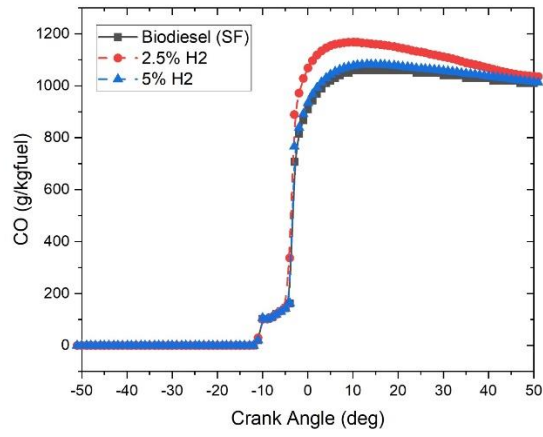
Gambar 5. Grafik temperatur terhadap *crank angle*

Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen terhadap emisi kendaraan

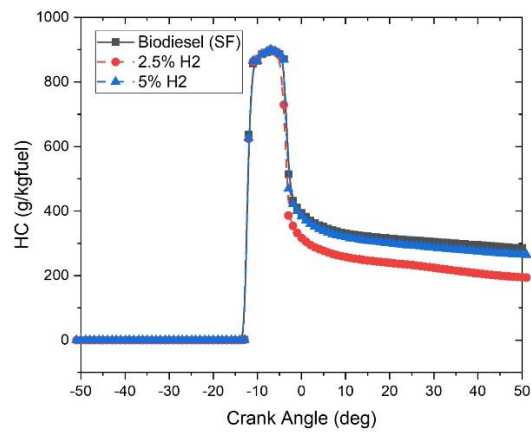
Beberapa emisi yang dihasilkan dari pencampuran biodiesel dan hidrogen pada mesin diesel satu silinder adalah nitrogen oksida, karbon monoksida dan hidrogen oksida. Gambar 6 (a) menunjukkan bahwa emisi NO tertinggi pada variasi campuran hidrogen 2,5 %. Hal ini dikarenakan partikel bahan bakar yang terbakar tetap berada di dalam silinder dan panas yang dilepaskan dari dinding silinder juga meningkatkan suhu silinder sehingga menghasilkan pembentukan NO [20]. Sedangkan kenaikan signifikan pada emisi karbonmonoksida (CO) untuk ketiga variasi hampir sama dimana sebelum TDC, emisi CO naik hingga 1100 g/kg.fuel. Ketika waktu injeksi lebih dimajukan, maka akan meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar karena tersedia lebih banyak waktu untuk proses pencampuran. Oleh karena itu hal ini juga menyebabkan emisi CO dan HC yang lebih rendah.



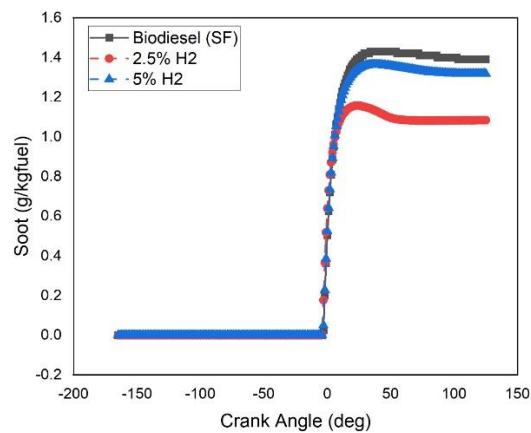
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Grafik emisi terhadap *crank angle* (a) NO_x; (b) CO; (c) HC; (d) Soot

Mirip dengan emisi CO, pembentukan jelaga berbasis bahan bakar harus dikurangi seiring dengan peningkatan substitusi hidrogen karena merupakan bahan bakar bebas karbon. Seperti yang diharapkan, emisi jelaga menurun seiring dengan peningkatan persentase induksi H₂ pada sebagian besar kondisi pengoperasian mesin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 d. Umumnya, sejumlah besar pembentukan jelaga terjadi pada nyala api difusi selama fase pembakaran yang dikontrol oleh pencampuran. Dengan berlanjutnya proses pembakaran dan masuknya oksigen, di wilayah dengan suhu yang cukup tinggi, jelaga akan teroksidasi dan tingkat emisi jelaga akan turun [21]. Jadi sebaliknya, pembakaran yang kurang menonjol terjadi selama fase pembakaran difusi dan tingkat pelepasan panas puncak yang lebih rendah ditemukan selama injeksi utama, yang mengakibatkan lebih banyak pembentukan jelaga dan mengarah pada sedikit peningkatan pada tingkat emisi jelaga secara keseluruhan.

KESIMPULAN

Simulasi multidimensi dilakukan untuk mempelajari secara numerik kinerja, pembakaran, dan karakteristik emisi mesin diesel berbantuan hidrogen. Hidrogen diasumsikan diinduksi melalui intake manifold dengan 0%, 2,5%, 5%, dibandingkan bahan bakar biodiesel. Mekanisme reaksi yang dikembangkan divalidasi terhadap hasil eksperimen dengan induksi H₂ 0%. Kesepakatan yang baik antara hasil simulasi dan hasil eksperimen telah diperoleh.

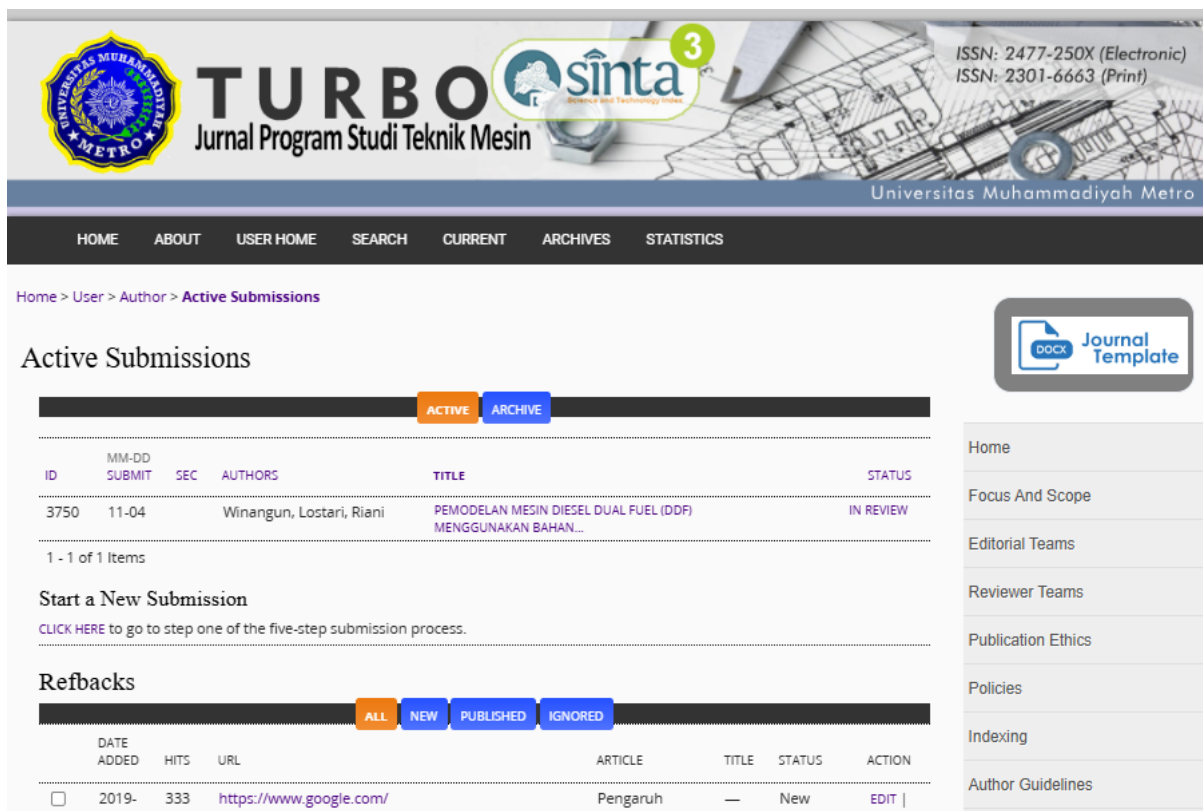
Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan mesin konstan dan kondisi beban mesin tetap memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran dan emisi mesin diesel dengan penambahan gas hidrogen. Misalnya, peningkatan tekanan silinder dan temperature pada penambahan hidrogen 2.5%, yang selanjutnya dibuktikan dengan peningkatan emisi NO, CO, serta penurunan emisi HC dan soot. Hal ini karena pada kecepatan mesin rendah, lebih banyak bahan bakar campuran dan hidrogen dinyalakan dan dibakar selama injeksi pilot (untuk injeksi ganda) atau selama tahap awal injeksi utama (untuk injeksi tunggal), yang mempercepat laju pelepasan panas dan laju kenaikan tekanan. Namun, kelemahan dari pembakaran yang terbukti ini adalah sedikit peningkatan emisi NO_x pada kecepatan mesin yang lebih rendah. Namun demikian, hal ini dapat dengan mudah diatasi dengan penggunaan teknik EGR. Dalam hal emisi, emisi HC dan jelaga terbukti berkurang pada sebagian besar kondisi pengoperasian mesin karena sifat hidrogen yang "bebas karbon". Lebih jauh, pada kecepatan dan kondisi beban mesin tetap, tidak ada perubahan nyata pada kinerja mesin, pembakaran, dan

karakteristik emisi yang diamati. Oleh karena itu, dapat disarankan bahwa pada kecepatan mesin rendah dan kondisi beban parsial, induksi H₂ sebesar 2.5% dapat diperkenalkan untuk mengoptimalkan kinerja mesin, sedangkan pada kecepatan mesin tinggi dan kondisi beban tinggi, induksi H₂ mungkin tidak bermanfaat.

Sesuai luaran wajib pada penelitian PDP ini yaitu berupa jurnal nasional sinta 3 yang sudah terbit di TURBO.

D. STATUS LUARAN: Tuliskan jenis, identitas dan status ketercapaian setiap luaran wajib dan luaran tambahan (jika ada) yang dijanjikan. Jenis luaran dapat berupa publikasi, perolehan kekayaan intelektual, atau luaran lainnya yang telah dijanjikan pada proposal. Uraian status luaran harus didukung dengan bukti kemajuan ketercapaian luaran sesuai dengan luaran yang dijanjikan. Lengkapi isian jenis luaran yang dijanjikan serta mengunggah bukti dokumen ketercapaian luaran melalui BIMA.

Sesuai dengan yang dijanjikan pada proposal penelitian dosen pemula tahun 2024 yang berjudul “Pemodelan mesin Diesel Dual Fuel (DDF) bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen” yaitu artikel yang diterbitkan di jurnal terakreditasi nasional sinta 3. Maka luaran wajib pada penelitian ini adalah diterbitkan di jurnal terakreditasi nasional sinta 3 di jurnal TURBO, penerbit Universitas Muhammadiyah Metro dengan link: <https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo/index>. Status luaran wajib adalah “**in review**” seperti yang tertera pada gambar 7.



Gambar 7. Status luaran wajib PDP 2024

E. PERAN MITRA: Tuliskan realisasi kerjasama dan kontribusi Mitra baik *in-kind* maupun *in-cash* serta mengunggah bukti dokumen pendukung sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Bukti dokumen realisasi kerjasama dengan Mitra dapat diunggah melalui BIMA.

Catatan:

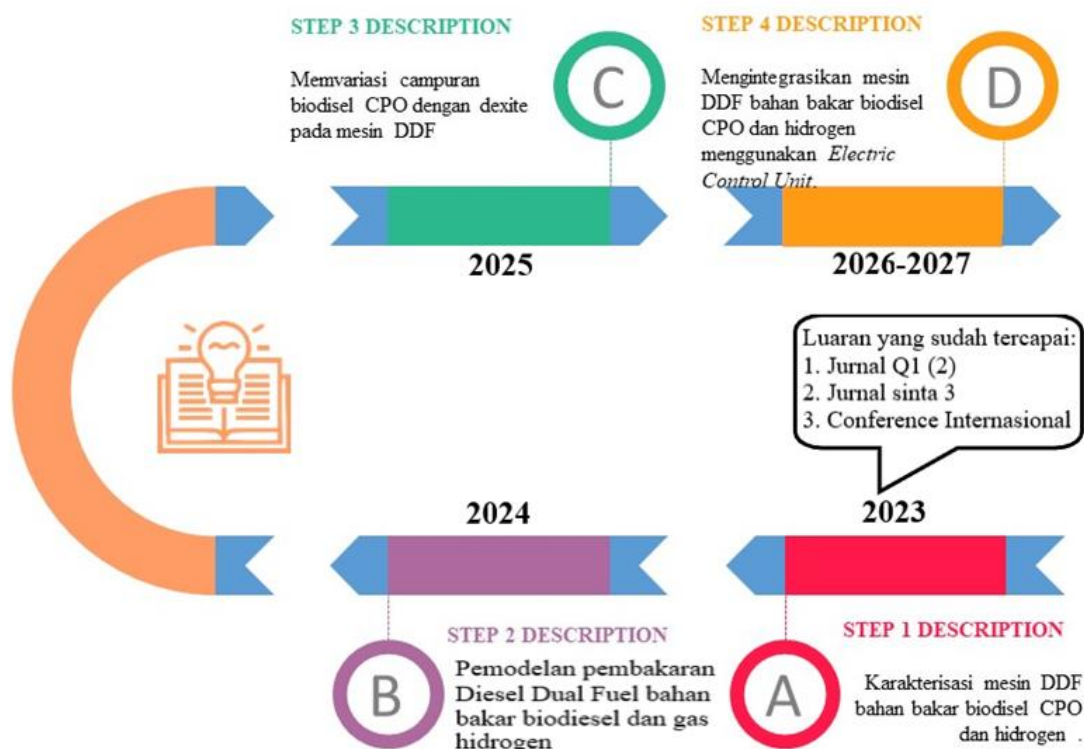
Bagian ini wajib diisi untuk penelitian terapan, untuk penelitian dasar (Fundamental, Pascasarjana, PKDN, Dosen Pemula) boleh mengisi bagian ini (tidak wajib) jika melibatkan mitra dalam pelaksanaan penelitiannya

F. KENDALA PELAKSANAAN PENELITIAN: Tuliskan kesulitan atau hambatan yang dihadapi selama melakukan penelitian dan mencapai luaran yang dijanjikan, termasuk penjelasan jika pelaksanaan penelitian dan luaran penelitian tidak sesuai dengan yang direncanakan atau dijanjikan.

Pada saat dimulai penelitian ini belum ada kendala yang membuat penelitian terhambat, meskipun anggota peneliti kami berbeda afiliasi namun kami masih bisa berkomunikasi melalui media online dan sesekali tatap muka. Begitu pula dengan mencapai luaran wajib, kami juga tidak ada kendala yang menghambat tercapainya luaran wajib penelitian dosen pemula. Namun ketika membuat laporan keuangan ada sedikit kendala dalam penyesuaian format, karena tidak ada format yang baku dari panduan penelitian maupun dari kampus.

G. RENCANA TAHAPAN SELANJUTNYA: Tuliskan dan uraikan rencana penelitian selanjutnya berdasarkan indikator luaran yang telah dicapai, rencana realisasi luaran wajib yang dijanjikan dan tambahan (jika ada) di tahun berikutnya serta *roadmap* penelitian keseluruhan. Pada bagian ini diperbolehkan untuk melengkapi penjelasan dari setiap tahapan dalam metoda yang akan direncanakan termasuk jadwal berkaitan dengan strategi untuk mencapai luaran seperti yang telah dijanjikan dalam proposal. Jika diperlukan, penjelasan dapat juga dilengkapi dengan gambar, tabel, diagram, serta pustaka yang relevan. Jika laporan kemajuan merupakan laporan pelaksanaan tahun terakhir, pada bagian ini dapat dituliskan rencana penyelesaian target yang belum tercapai.

Rencana tahap selanjutnya yang akan kami laksanakan untuk penelitian ini sesuai dengan Gambar 8 tentang roadmap penelitian dari tahun 2023 hingga tahun 2027. Pada tahun 2024 ini, kami melakukan pemodelan pembakaran Diesel Dual Fuel (DDF) dengan bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen. Luaran pada penelitian tahun 2024 ini adalah artikel karya ilmiah yang di submit pada jurnal bereputasi nasional Sinta 3. Kemudian penelitian dilanjutkan pada tahun 2025, dengan melakukan variasi komposisi campuran biodiesel dengan bahan bakar minyak pada mesin DDF. Target luaran pada penelitian tahun 2025 adalah jurnal bereputasi nasional sinta 2. Kemudian penelitian dilanjutkan pada tahun 2026 hingga tahun 2027 dengan mengintegrasikan mesin diesel konvensional dengan menambahkan control unit untuk mengontrol aliran gas hidrogen yang masuk pada silinder. Pengujian dilakukan pada mesin diesel satu silinder dengan parameter pengujian meliputi karakteristik performa mesin dan emisi gas buang. target luaran pada tahun tersebut adalah artikel karya ilmiah yang diterbitkan pada jurnal internasional.



Gambar 8. Roadmap penelitian

H. DAFTAR PUSTAKA: Penyusunan Daftar Pustaka berdasarkan sistem nomor sesuai dengan urutan pengutipan. Hanya pustaka yang disitasi pada laporan kemajuan yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka.

- [1] J. A. V. Godiño, M. T. García, and F. J. J. E. Aguilar, “Experimental investigation and modelling of biodiesel combustion in engines with late direct injection strategy,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7476–7487, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.05.279.
- [2] F. Zacherl, C. Wopper, P. Schwanzler, and H.-P. Rabl, “Potential of the Synthetic Fuel Oxymethylene Ether (OME) for the Usage in a Single-Cylinder Non-Road Diesel Engine: Thermodynamics and Emissions,” *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7932, 2022, doi: 10.3390/en15217932.
- [3] P. V. Elumalai *et al.*, “Combustion and emission behaviors of dual-fuel premixed charge compression ignition engine powered with n-pentanol and blend of diesel/waste tire oil included nanoparticles,” *Fuel*, vol. 324, no. PB, p. 124603, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124603.
- [4] I. C. Setiawan and M. Setiyo, “Renewable and Sustainable Green Diesel (D100) for Achieving Net Zero Emission in Indonesia Transportation Sector,” *Automot. Exp.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, 2022, doi: 10.31603/ae.6895.
- [5] et. a. Bagaskara A., “Indonesia Energy Transition Outlook 2023,” Jakarta, 2022. [Online]. Available: www.irena.org.
- [6] M. S. Gad, A. S. El-Shafay, and H. M. Abu Hashish, “Assessment of diesel engine performance, emissions and combustion characteristics burning biodiesel blends from *jatropha* seeds,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 147, pp. 518–526, 2021, doi:

10.1016/j.psep.2020.11.034.

- [7] T. N. V. Pankaj Shrivastava, "Effect of fuel injection pressure on the characteristics of CI engine fuelled with biodiesel from Roselle oil.pdf," *Fuel*, vol. 265, p. 117005, 2020.
- [8] W. Maawa, "Effect of Emulsified Palm Oil Biodiesel-Diesel Blends to the Combustion Characteristics of Compression Ignition Engine," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 469, no. 1. 2019, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012080.
- [9] R. Balasubramanian, "Experimental investigation on the effects of compression ratio on performance, emissions and combustion characteristics of a biodiesel-fueled automotive diesel engine," *Biofuels*, 2019, doi: 10.1080/17597269.2018.1558840.
- [10] S. S. Halewadimath, N. R. Banapurmath, V. S. Yaliwal, and ..., "Effect of manifold injection of hydrogen gas in producer gas and neem biodiesel fueled CRDI dual fuel engine," ... *Journal of Hydrogen* Elsevier, 2022, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007492?casa_token=4irLStJRzGgAAAAA:OkOfGNB-ZW02I-HqqBiNamz8pEUmtvZtBGyGYITaySyJCis6PI3jxUHwDh4j_YDHRkR3qo4SQ9Y.
- [11] S. Vadlamudi, S. K. Gugulothu, J. K. Panda, B. Deepanraj, and P. R. V. Kumar, "Paradigm analysis of performance and exhaust emissions in CRDI engine powered with hydrogen and Hydrogen/CNG fuels: A green fuel approach under different injection strategies," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.277.
- [12] B. Niethammer, C. Mayer, T. Claus, and C. Weber, "Direct Injection for Hydrogen Combustion Engines," *MTZ Worldw.*, vol. 83, no. 11, pp. 28–33, 2022, doi: 10.1007/s38313-022-0846-0.
- [13] Z. Liu *et al.*, "Multi-objective optimization of the performance and emission characteristics for a dual-fuel engine with hydrogen addition," *Fuel*, vol. 332, no. P2, p. 126231, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126231.
- [14] N. Gültekin and M. Ciniviz, "Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression-ignition engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. November, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.
- [15] B. Subramanian and V. Thangavel, "Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25479–25492, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.280.
- [16] D. Yuvenda, B. Sudarmanta, A. Wahjudi, and O. Muraza, "Improved combustion performances and lowered emissions of CNG-diesel dual fuel engine under low load by optimizing CNG injection parameters," *Fuel*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120301976>.
- [17] S. Verma, "A renewable pathway towards increased utilization of hydrogen in diesel engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 8, pp. 5577–5587, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.213.
- [18] S. V. Karthic, M. Senthil kumar, P. Pradeep, and S. Vinoth Kumar, "Assessment of hydrogen-based dual fuel engine on extending knock limiting combustion," *Fuel*, vol. 260, no. October 2019, p. 116342, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116342.

- [19] K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, "The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, no. November 2022, p. 102755, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102755.
- [20] K. Bayramođlu and S. Yılmaz, "Emission and performance estimation in hydrogen injection strategies on diesel engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29732–29744, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.135.
- [21] S. Nag, P. Sharma, A. Gupta, and A. Dhar, "Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 23, pp. 12163–12175, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.120.

POSTER HASIL PENELITIAN PDP

Judul Penelitian: Pemodelan mesin Diesel Dual Fuel (DDF) bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen

Aini Lostari, Kuntang Winangun, Novi Indah Riani

1. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Qomaruddin, Jl. Raya Bungah No. 1, Bungah, Gresik, Indonesia
2. Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Jl. Budi Utomo No. 10 Ponorogo, Indonesia

Skema : Penelitian Dosen Pemula (PDP)

Dana : Rp 42.110.000

Tahun Pelaksanaan : 2024

TKT akhir : 2

Luaran : Terbit di jurnal terakreditasi sinta 3 dengan link

<https://ojs.ummetro.ac.id/index.php/turbo/article/view/3750/pdf>



RINGKASAN

Emisi gas buang dari kendaraan merupakan penyebab polusi nomor 2 setelah industri. Oleh sebab itu, pemerintah menargetkan net zero emission pada tahun 2060. Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi bahan bakar minyak adalah dengan menggunakan biodiesel. Akan tetapi, penggunaan biodiesel masih memiliki banyak dampak kurang baik terhadap performa kendaraan yaitu terjadinya penurunan kinerja mesin. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas buang tanpa menurunkan kinerja yaitu dengan penambahan gas hidrogen. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi untuk mengetahui fenomena yang terjadi didalam ruang bakar mesin diesel satu silinder meliputi tekanan silinder panas dampak pembakaran pada emisi gas buang. Tahapan dalam penelitian ini terdiri dari pre processing, processing dan post processing. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan penambahan gas hidrogen dapat meningkatkan panas dalam ruang pembakaran, dampak peningkatan panas adalah peningkatan tekanan silinder, temperatur ruang bakar, emisi NO, dan emisi CO. Sedangkan emisi HC dan soot mengalami penurunan dengan penambahan gas hidrogen pada bahan bakar biodiesel.

Kata kunci: Simulasi; Diesel Dual Fuel; Gas hidrogen; Biodiesel; Karakteristik pembakaran

METODOLOGI

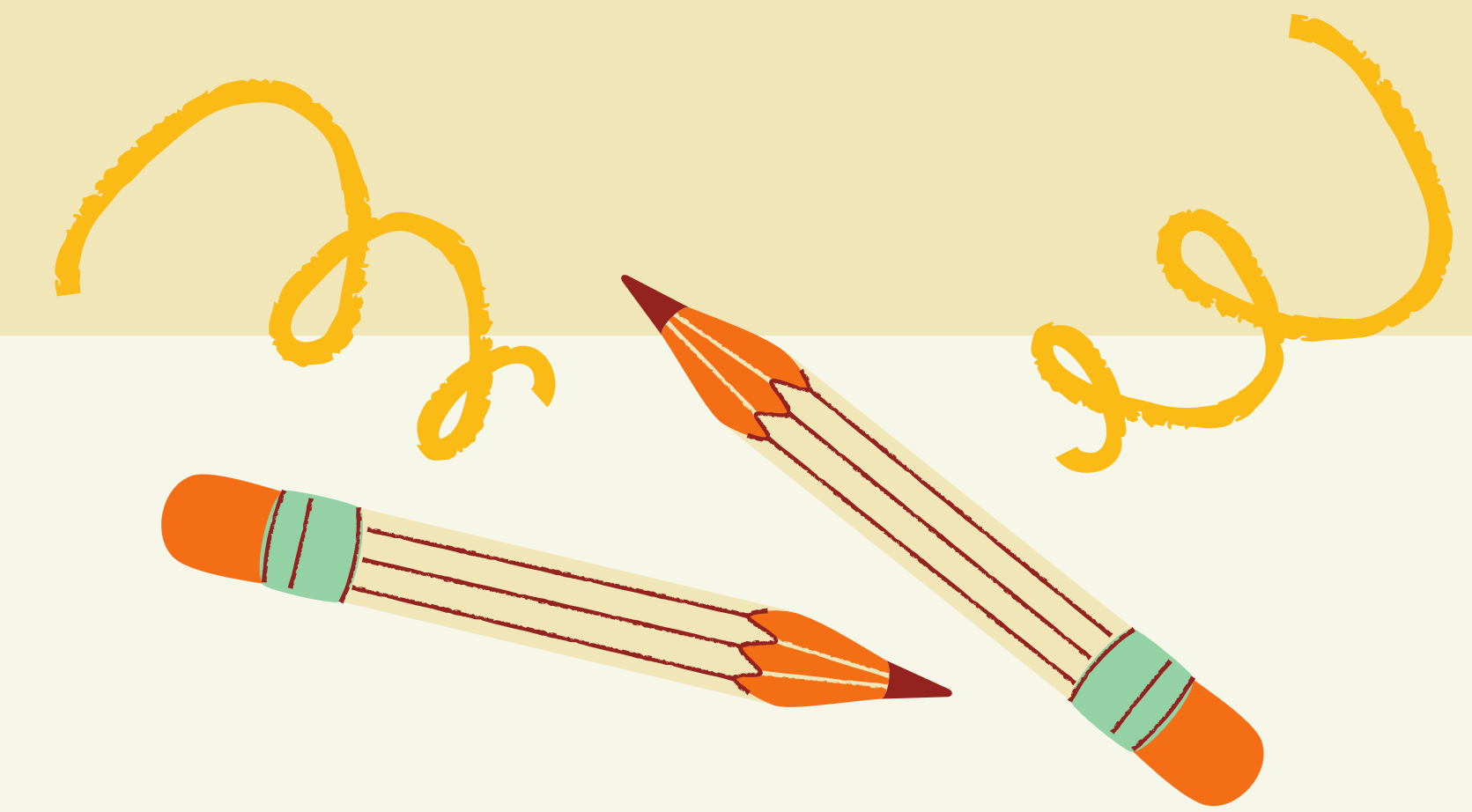
Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik menggunakan software Computational Fluid Dynamics (CFD) berupa Ansys Forte Student Edition pada mesin diesel satu silinder dengan beban konstan 1500 rpm. Penelitian terdiri dari tiga tahapan, yaitu pre processing, processing dan post processing.

Tabel 1. Geometri untuk simulasi

No	Parameter	Spesifikasi
1	<u>Tipe Piston</u>	single piston
2	<u>Kecepatan Mesin</u>	1500 rpm
3	<u>Diameter x langkah piston</u>	82 x 87 mm
4	<u>Tipe piston</u>	Bowl-in-piston
5	<u>Kapasitas silinder</u>	411 cc
6	<u>Rasio kompresi</u>	18:1
7	<u>Tekanan injeksi</u>	220 kg/cm ²
8	<u>Waktu injeksi pilot</u>	13 ^o

HASIL

Pada pembahasan penelitian ini difokuskan untuk membahas pressure, temperatur dan emisi yang dihasilkan oleh mesin diesel satu silinder berbahan bakar biodiesel dan hidrogen.



ANALISIS

Simulasi multidimensi dilakukan untuk mempelajari secara numerik kinerja, pembakaran, dan karakteristik emisi mesin diesel berbantuan hidrogen. Hidrogen diasumsikan diinduksi melalui intake manifold dengan 0%, 2,5%, 5%, dibandingkan bahan bakar biodiesel. Mekanisme reaksi yang dikembangkan divalidasi terhadap hasil eksperimen dengan induksi H₂ 0%. Kesepakatan yang baik antara hasil simulasi dan hasil eksperimen telah diperoleh.

Tabel 2. Parameter awal simulasi

No	Parameter	Spesifikasi
1	<u>Temperatur awal</u>	362 K
2	<u>Temperatur liner</u>	500 K
3	<u>Temperatur head</u>	500 K
4	<u>Temperatur piston</u>	500 K
5	<u>EGR</u>	0%

Tabel 3. Kondisi operasi mesin

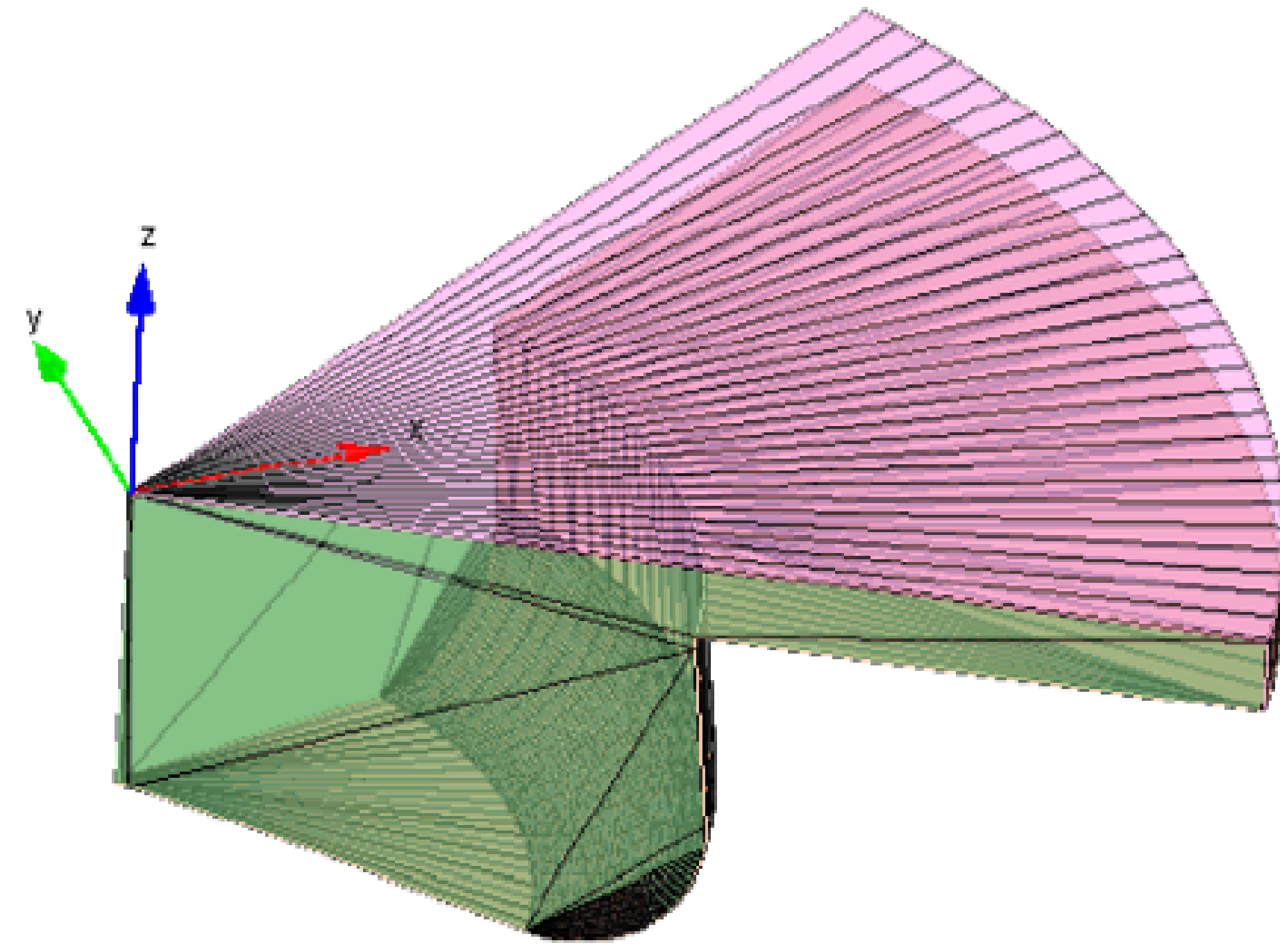
Titik Uji	Putaran Mesin (rpm)	Waktu injeksi (crank angle before TDC)
1	1500	13
2	1500	15
3	1500	17
4	1500	19
5	1500	21
6	1500	23

KESIMPULAN

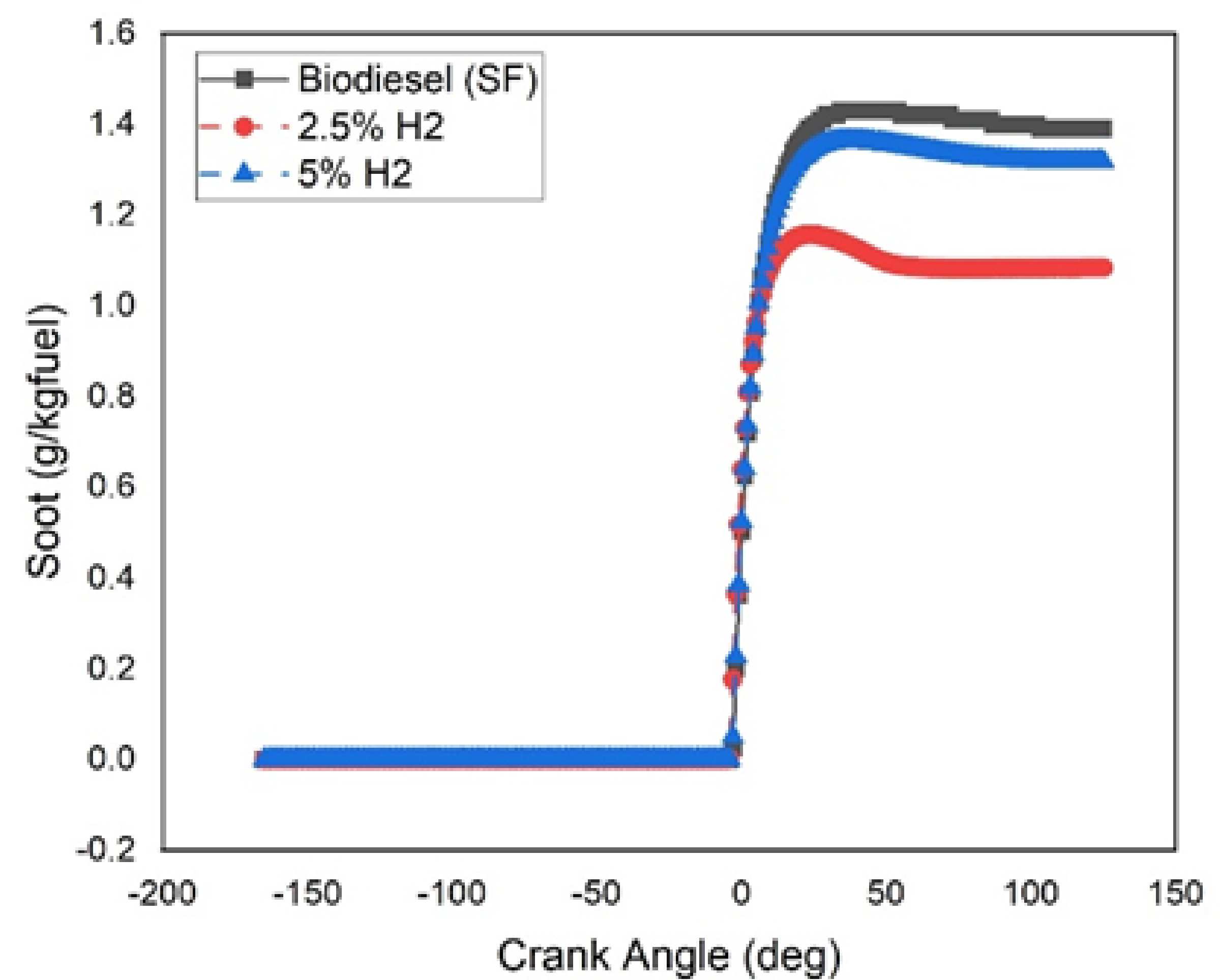
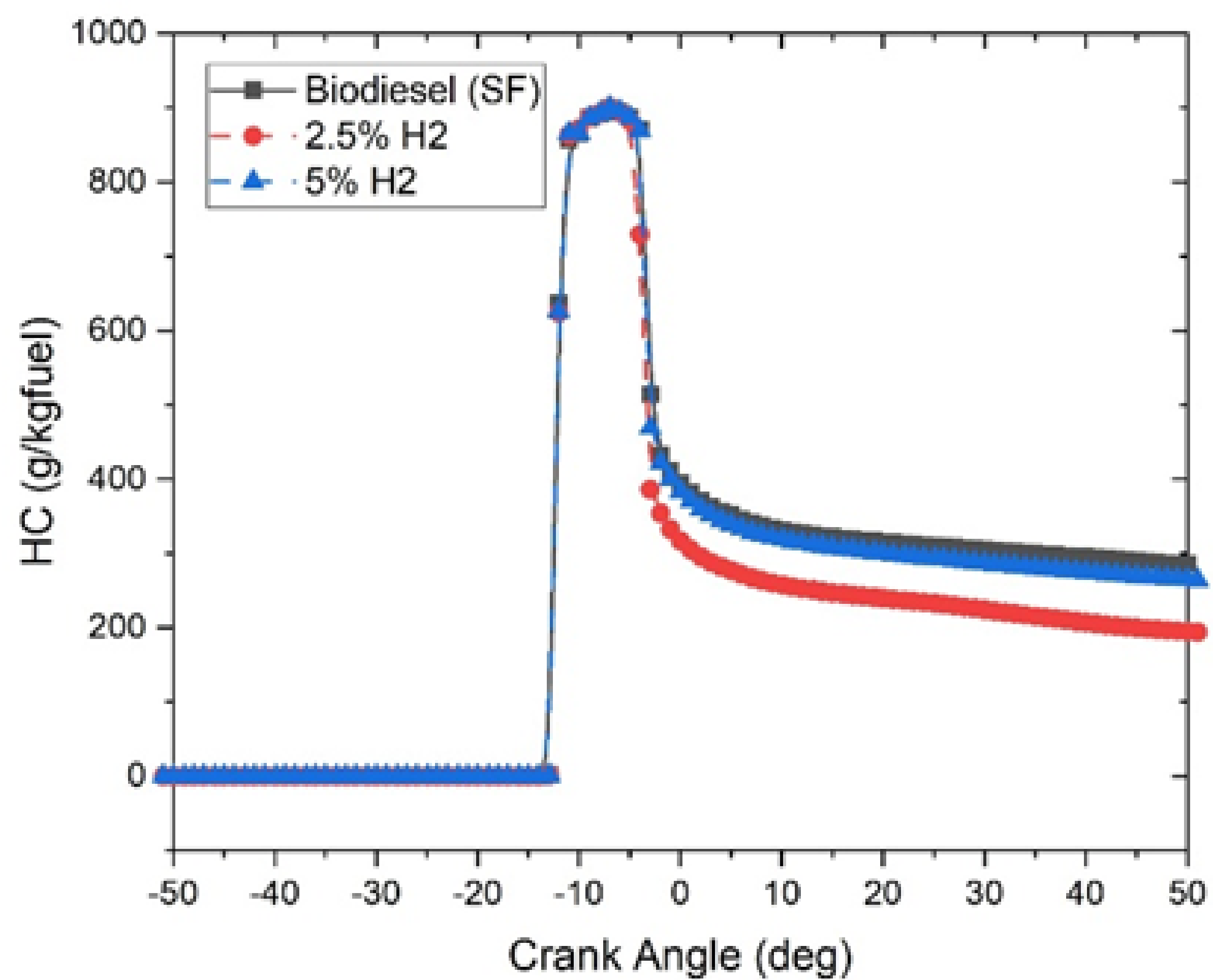
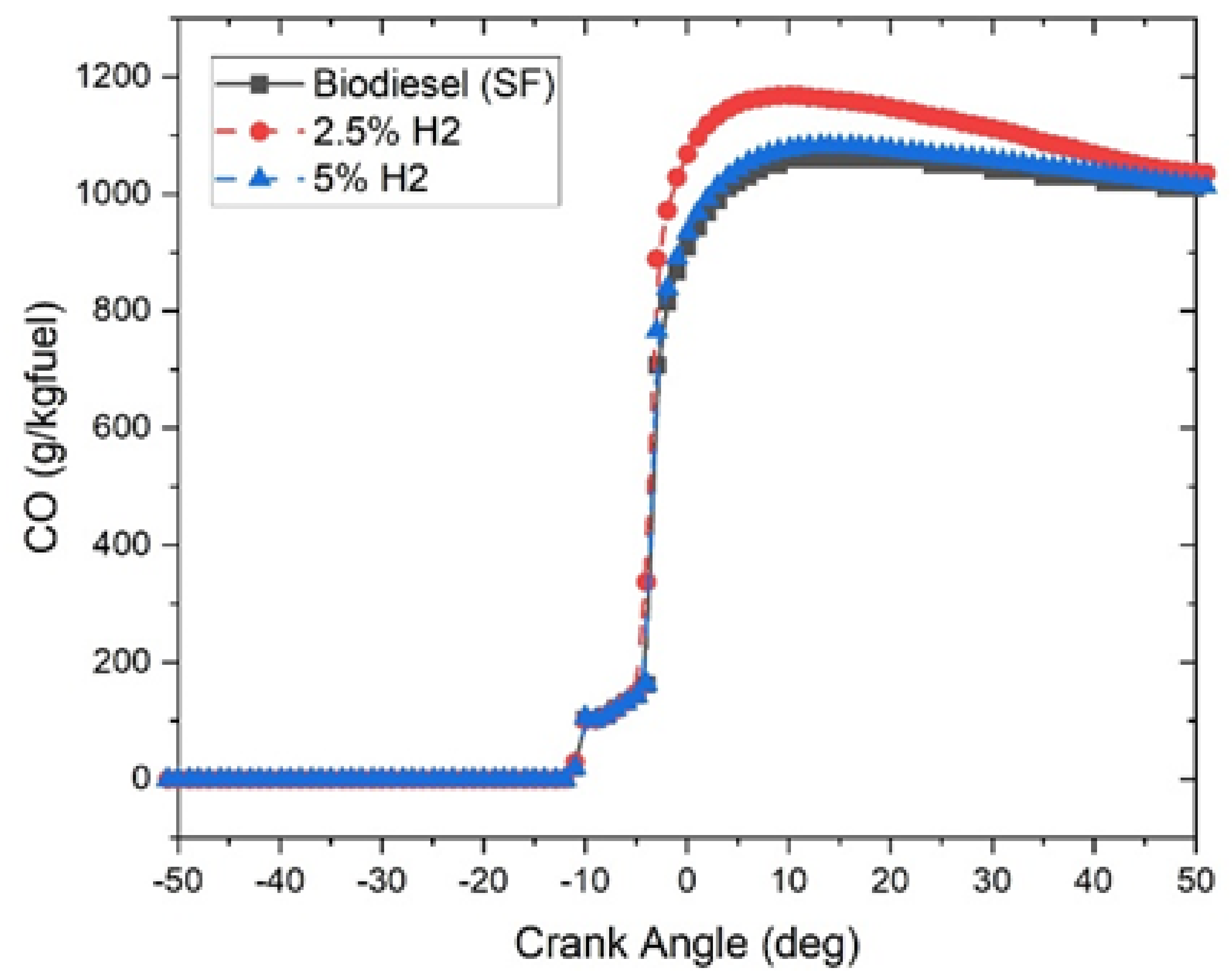
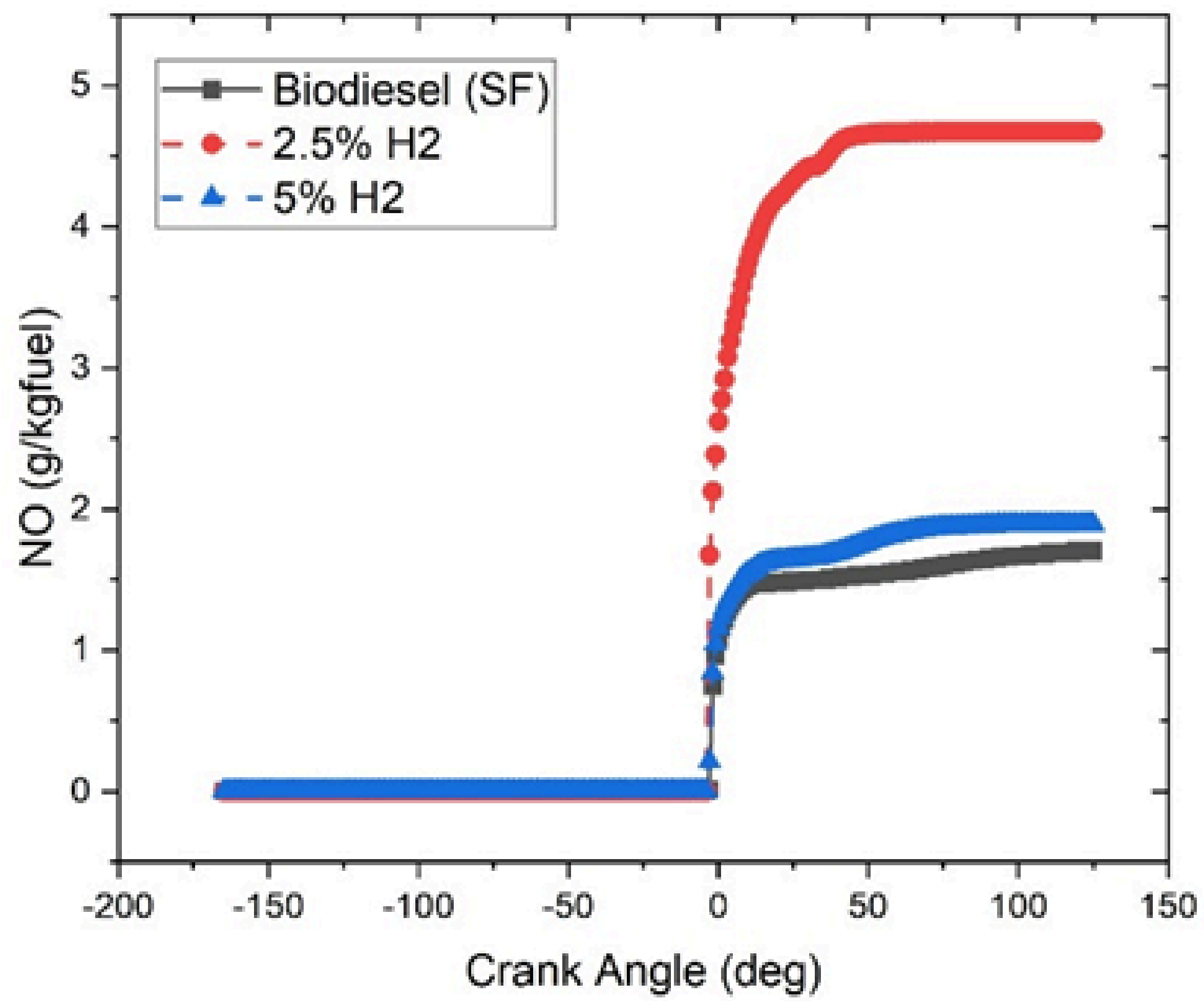
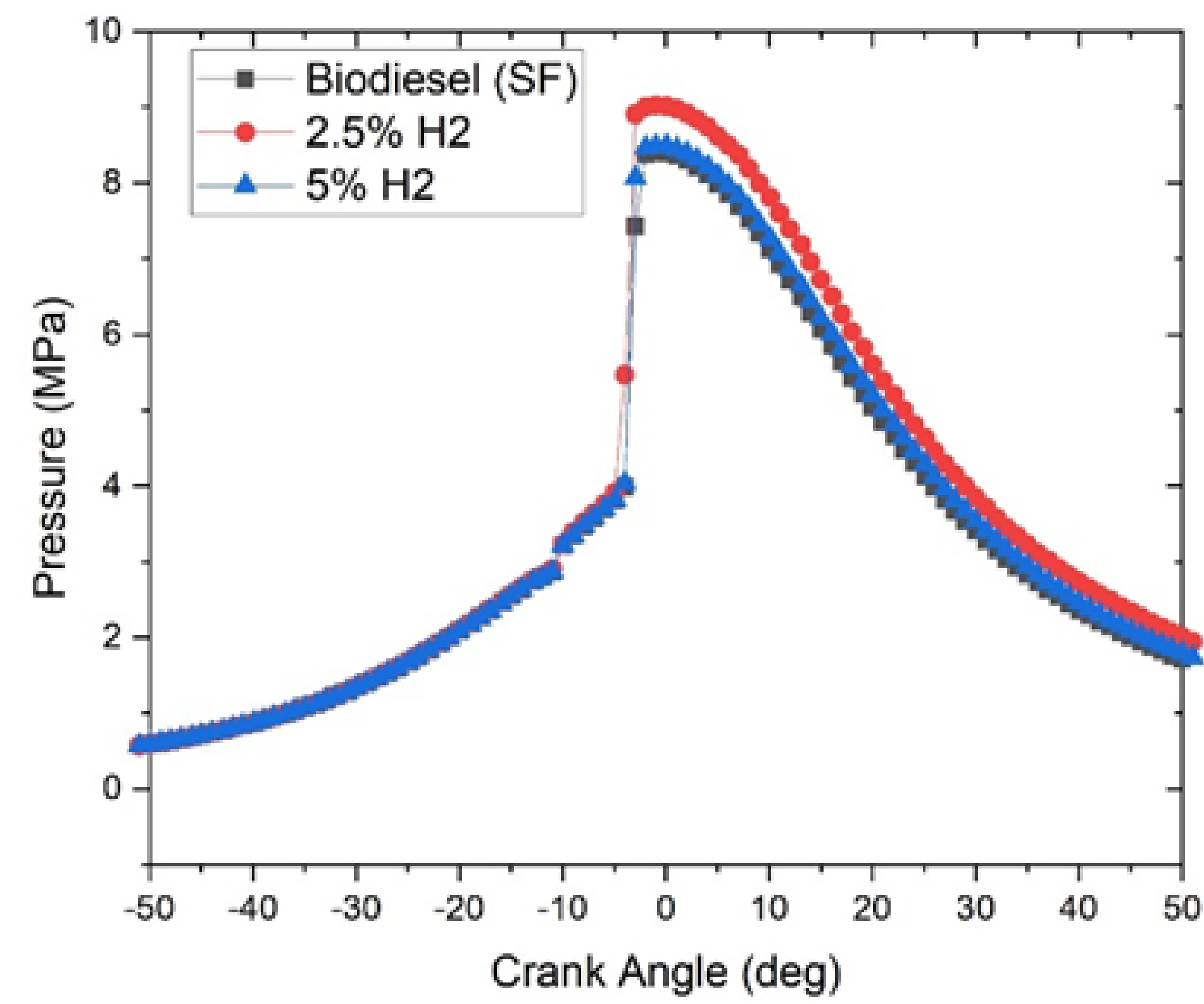
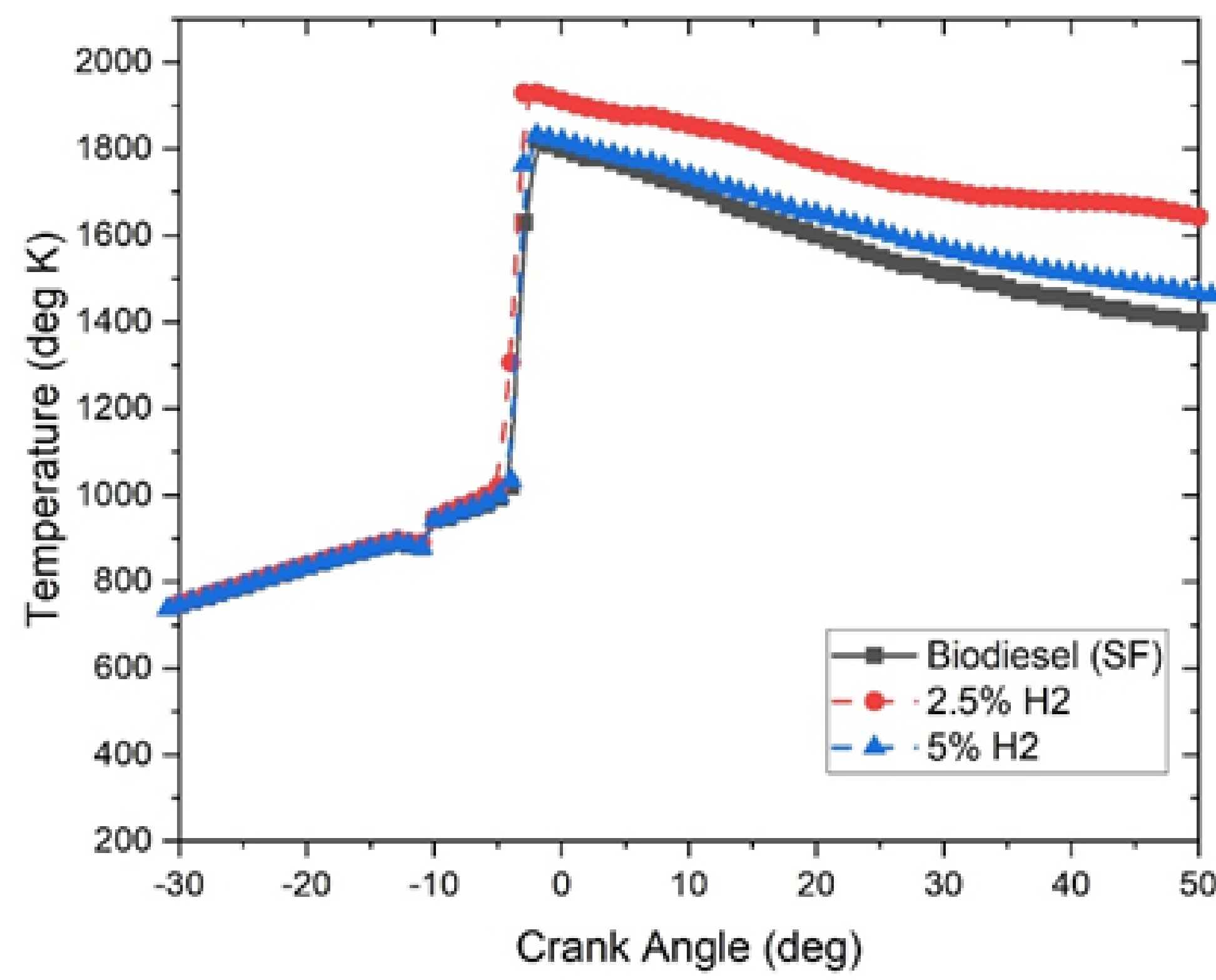
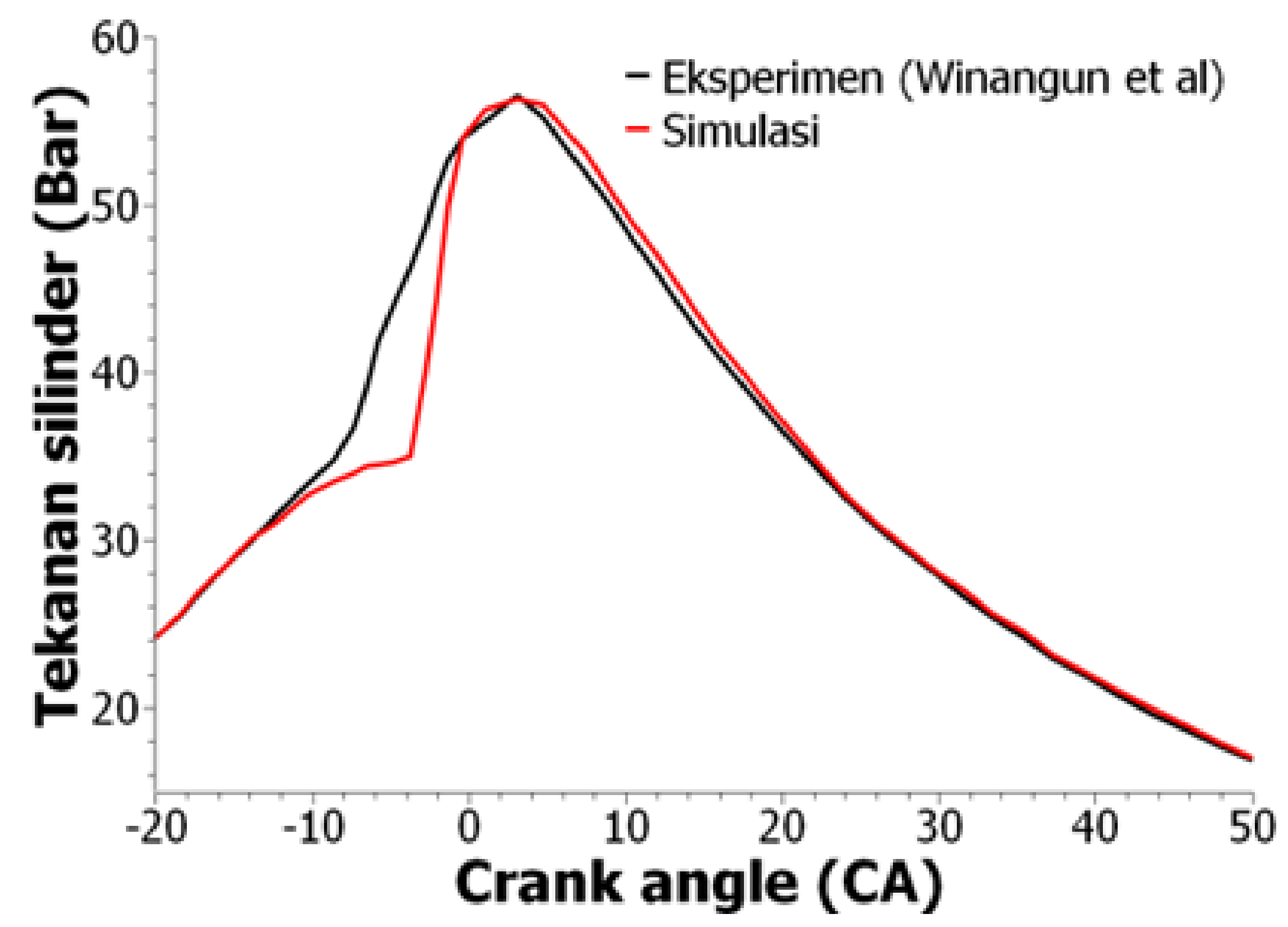
Kesimpulan hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan mesin konstan dan kondisi beban mesin tetap memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran dan emisi mesin diesel dengan penambahan gas hidrogen. Misalnya, peningkatan tekanan silinder dan temperature pada penambahan hidrogen 2.5%, yang selanjutnya dibuktikan dengan peningkatan emisi NO, CO, serta penurunan emisi HC dan soot. Namun, kelemahan dari pembakaran yang terbukti ini adalah sedikit peningkatan emisi NOx pada kecepatan mesin yang lebih rendah.



BAGAN



Gambar 1. Model ruang bakar dengan sektor mesh 60°



Pemodelan Mesin *Diesel Dual Fuel* (DDF) Menggunakan Bahan Bakar Biodiesel dan Gas Hidrogen

Aini Lostari¹, Kuntang Winangun^{2*}, Novi Indah Riani³

^{1,3} Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Qomaruddin, Jl. Raya Bungah No. 1, Bungah, Gresik, Indonesia

² Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Ponorogo, Jl. Budi Utomo No. 10 Ponorogo, Indonesia

*Corresponding author: kuntang@umpo.ac.id

Abstract

Vehicle exhaust emissions are the second largest cause of pollution after industry. Therefore, the government is targeting net zero emissions by 2060. One way to reduce fuel consumption is to use biodiesel. However, the use of biodiesel still has many negative impacts on vehicle performance, namely decreased engine performance. One way to reduce exhaust emissions without reducing engine performance is by adding hydrogen gas. This study was conducted with a simulation that aims to determine the phenomena that occur in the combustion chamber of a single-cylinder diesel engine, the data obtained from the simulation include cylinder pressure, combustion chamber temperature, heat from the impact of combustion on and exhaust emissions of a single-cylinder engine with biodiesel and hydrogen fuels. The stages in this study consist of pre-processing, processing and post-processing. The results of this study indicate that the addition of hydrogen gas can increase the heat in the combustion chamber, the impact of increased heat is an increase in cylinder pressure, combustion chamber temperature, NO emissions, and CO emissions. While HC and soot emissions decreased with the addition of hydrogen gas to biodiesel fuel.

Abstrak

Emisi gas buang dari kendaraan merupakan penyebab polusi nomor 2 setelah industri. Oleh sebab itu, pemerintah menargetkan net zero emission pada tahun 2060. Salah satu cara untuk mengurangi konsumsi bahan bakar minyak adalah dengan menggunakan biodiesel. Akan tetapi, penggunaan biodiesel masih memiliki banyak dampak kurang baik terhadap performa kendaraan yaitu terjadinya penurunan kinerja mesin. Salah satu cara untuk mengurangi emisi gas buang tanpa menurunkan kinerja mesin yaitu dengan penambahan gas hidrogen. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi yang bertujuan untuk mengetahui fenomena yang terjadi didalam ruang bakar mesin diesel satu silinder, data yang diperoleh dari simulasi meliputi tekanan silinder, temperatur ruang bakar, dan emisi gas buang mesin satu silinder dengan bahan bakar biodiesel dan hidrogen. Tahapan dalam penelitian ini terdiri dari pre processing, processing dan post processing. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa dengan penambahan gas hidrogen dapat meningkatkan panas dalam ruang pembakaran, dampak peningkatan panas adalah peningkatan tekanan silinder, temperatur ruang bakar, emisi NO, dan emisi CO. Sedangkan emisi HC dan soot mengalami penurunan dengan penambahan gas hidrogen pada bahan bakar biodiesel.

Kata kunci: Simulasi; Diesel Dual Fuel; Gas hidrogen; Biodiesel; Karakteristik pembakaran.

1. Pendahuluan

Energi terbarukan telah menjadi sorotan dalam beberapa tahun terakhir karena meningkatnya kesadaran global akan dampak lingkungan dari pembakaran bahan bakar fosil seiring dengan meningkatnya permintaan energi [1], [2]. Pada peraturan pemerintah dan secara global sepakat untuk menurunkan pemanasan global yang disebabkan salah satunya dari emisi gas buang [3], [4]. Pemanfaatan biodiesel sebagai pengganti minyak diesel sudah dipertimbangkan sesuai target campuran

biodiesel dengan minyak diesel sebagaimana Permen ESDM No. 12/2015, yaitu 30% untuk kurun waktu 2020-2025 [5]. Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif yang dapat diproduksi dari bahan nabati yang ada di alam seperti minyak kelapa sawit (Crude Palm Oil). Biodiesel dari CPO diketahui ramah lingkungan [2], [6], [7]. Kandungan oksigen dalam biodiesel sebesar 9%-12% memiliki keuntungan diantaranya: menurunkan emisi asap, CO, HC, *Exhaust Gas Temperature* [8], [9]. Hidrogen (H₂) memiliki masa depan yang menjanjikan baik sebagai energi ramah

Formatte

lingkungan maupun sebagai sumber bahan bakar. Kelebihan bahan bakar hydrogen diantaranya adalah: flammable, rendah densitas, dan tinggi nilai kalor [10]–[12]. Sehingga diperlukan teknologi *Diesel Dual Fuel* (DDF) pada mesin diesel untuk mengaplikasikan kedua jenis bahan bakar tersebut. Pada mesin DDF dirancang sebagai mesin yang menggunakan bahan bakar ganda, bahan bakar biodiesel sebagai pematik (pilot) dan bahan bakar hydrogen sebagai bahan bakar utama.

Pada penelitian yang telah dilakukan [13] melakukan penelitian untuk mengetahui emisi dan karakteristik pembakaran pada mesin diesel dengan menggunakan bahan bakar campuran diesel dan biodiesel dari rosela. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan bahan bakar biodiesel dengan beban kendaraan dan tekanan injeksi bahan bakar. Penelitian menurut [14] dengan tema cairan semprotan atomasi, droplet, breakup, tabrakan droplet dan penguapan pada mesin *Catterpillar heavy-duty diesel engine* menggunakan simulasi CFD 3D. Mesin memiliki spesifikasi 137,19 mm bore, 165,1 mm stroke, nozzle injector 6 lubang, diameter injector 0.259 mm dan tekanan injeksi 90 MPa. Dengan submodel mirip *mixican-hat*, pemodelan turbulen *k-ε*. Hasil yang diperoleh melihat bahwa simulasi CFD bisa dijadikan data untuk mendesain mesin pembakaran dalam, analisa kerja mesin dan optimasi. Hasil dari penelitian Menurut [15] menggunakan mode bahan bakar ganda hydrogen dan biodisel *Madhuca Longifolia*, hasilnya EGT meningkat secara signifikan karena pelepasan energi yang lebih tinggi pada saat pembakaran hydrogen. Emisi NO juga meningkat dari 289 ppm dengan HES 0% menjadi 465 ppm dengan HES 6,5%. Peningkatan kadar NO disebabkan oleh laju pembakaran hydrogen tercepat, yang menaikkan suhu di dalam silinder yang akhirnya meningkatkan emisi NO.

Berdasarkan penelitian terdahulu yang sudah diuraikan diatas, maka focus penelitian ini adalah melakukan pemodelan (simulasi) tentang bahan bakar biodiesel

yang dicampurkan dengan gas hydrogen masih belum banyak dilakukan. Beberapa penelitian masih menggunakan campuran biodiesel dengan bahan bakar minyak, pada penelitian ini penggunaan biodiesel 100% diterapkan pada mesin diesel. Dari hal tersebut peneliti melakukan pengembangan pada mesin diesel dual fuel, empat langkah, satu silinder, berbahan bakar biodiesel crude palm oil (CPO) B100 dan gas hydrogen dengan pengaturan parameter ratio bahan bakar biodiesel dan gas hydrogen agar didapatkan kinerja dan emisi gas buang yang minimum pada mesin diesel. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan diantaranya [16]–[19].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara simulasi numerik menggunakan *software Computational Fluid Dynamics* (CFD) berupa Ansys Forte Student Edition pada mesin diesel satu silinder dengan beban konstan 1500 rpm. Penelitian terdiri dari tiga tahapan, yaitu *pre processing*, *processing* dan *post processing*.

1. Pre processing

Pada tahap ini memasukkan data-data berupa pembuatan geometri hingga penentuan kondisi batas. Adapun geometri yang diinputkan untuk simulasi yaitu:

Tabel 1. Geometri untuk simulasi

No	Parameter	Spesifikasi
1	Tipe Piston	single piston
2	Kecepatan Mesin	1500 rpm
3	Diameter x langkah piston	82 x 87 mm
4	Tipe piston	<i>Bowl-in-piston</i>
5	Kapasitas silinder	411 cc
6	Rasio kompresi	18:1
7	Tekanan injeksi	220 kg/cm ²
8	Waktu injeksi pilot	13 ⁰

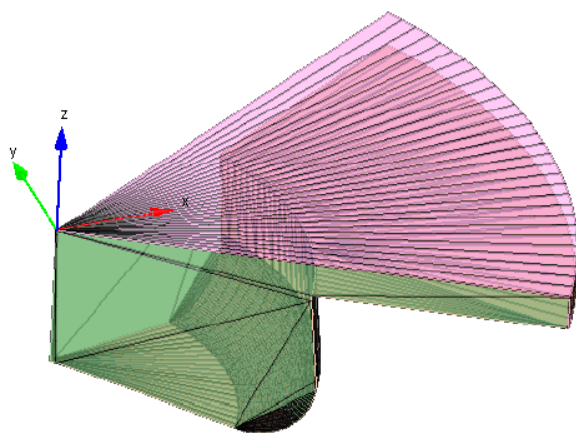
Sedangkan parameter awal untuk simulasi adalah sebagai mana table 2 di bawah ini.

Penentuan meshing pada simulasi ini ditunjukkan pada gambar 1, dimana sektor mesh 60⁰ ruang bakar pada posisi *Top Dead Center* (TDC). Untuk mengurangi proses

running, maka simulasi dilakukan pada sistem tertutup dari intake valve closed/IVC pada -165°CA bTDC hingga exhaust valve open/EVO pada 125°CA aTDC (after Top Dead Center) [20].

Tabel 2. Parameter awal simulasi

No	Parameter	Spesifikasi
1	Temperatur awal	362 K
2	Temperatur liner	500 K
3	Temperatur head	500 K
4	Temperatur piston	500 K
5	EGR	0%



Gambar 1. Model ruang bakar dengan sektor mesh 60°

Setelah proses *meshing*, maka perlu dilakukan tahapan validasi sebelum *running* simulasi dijalankan.

Tabel 3. Kondisi operasi mesin

Titik Uji	Putaran Mesin (rpm)	Waktu injeksi (crank angle before TDC)
1	1500	13
2	1500	15
3	1500	17
4	1500	19
5	1500	21
6	1500	23

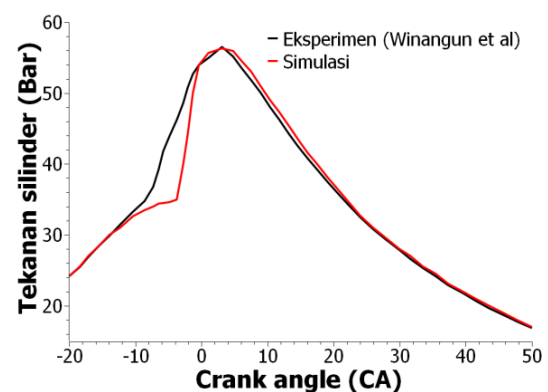
2. Processing

Setelah proses *meshing*, langkah selanjutnya adalah tahapan *processing*. Pada tahap ini memasukkan *operating condition* dan validasi sebelum *running*

simulasi dijalankan. Bahan bakar yang digunakan pada simulasi ini adalah Biodiesel yang karakteristik bahan bakar dapat dilihat pada table 4. Bahan bakar biodiesel yang digunakan memiliki kemurnian 100%. Sedangkan bahan bakar hidrogen yang digunakan memiliki kemurnian 99.99% dengan kode UHP. Tabel 3 adalah kondisi mesin yang akan diteliti.

Table 4. Spesifikasi bahan bakar biodiesel CPO dan hydrogen

Properties	Biodiesel	Hidrogen
Massa Jenis pada 15°C (Kg/m^3)	875	0,085
Viskositas	4,5	0
Kinematic 40°C (mm^2/s (cSt))		
Angka Setana (Min)	58	5-10
Titik Nyala (mangkok tertutup) ($^{\circ}\text{C}$, Min)	140	
Titik Kabut ($^{\circ}\text{C}$, Max)	15,4	
Lower Heat Value (kJ/kg)	39.910	119.810
Auto Ignition Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	>101	585
Stoichiometric Air-Fuel Ratio	12,5	34,3



Gambar 3. Perbandingan tekanan pembakaran antara eksperimen dan simulasi pada putaran mesin 1500 rpm dan waktu injeksi 13°CA bTDC

Setelah penentuan kondisi mesin, diperlukan validasi untuk memastikan bahwa *meshing* serta geometri yang telah

dibuat sudah benar sebagaimana ditampilkan gambar 3. Adapun validasi dilakukan dengan penelitian lain [21] pada tekanan silinder terhadap *crank angle*.

3. Post processing

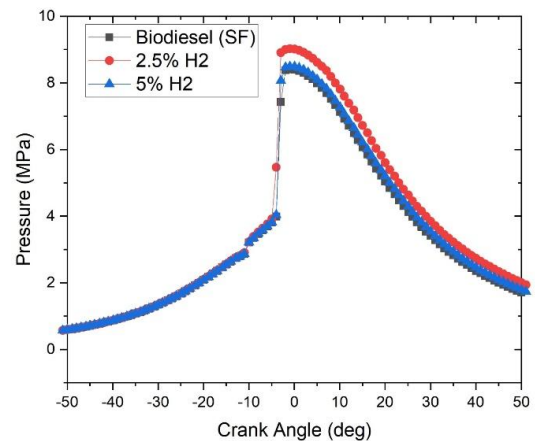
Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah *post processing* dimana proses menampilkan hasil serta analisa terhadap hasil yang diperoleh. Adapun data yang akan diambil antara lain pengaruh tekanan silinder terhadap *crank angle*, temperatur gas terhadap *crank angle*, dan analisis emisi terhadap *crank angle*.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada pembahasan penelitian ini difokuskan untuk membahas *pressure*, temperatur dan emisi yang dihasilkan oleh mesin diesel satu silinder berbahan bakar biodiesel dan hidrogen.

3.1. Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen pada tekanan silinder terhadap *crank angle*

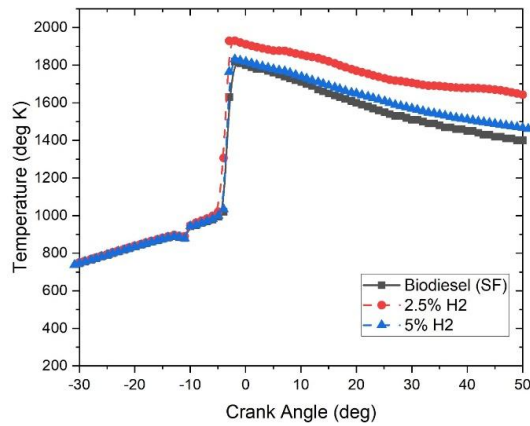
Pada gambar 4, menunjukkan pengaruh tekanan silinder terhadap *crank angle* pada mesin diesel satu silinder. Peningkatan tekanan maksimum terjadi pada *crank angle* -7° sebelum TDC. Seperti tahapan proses pembakaran pada mesin disel, *ignition delay period* tahapan ini merupakan periode atau rentang waktu yang dibutuhkan bahan bakar ketika saat pertama kali bahan bakar diinjeksikan. Tahap berikutnya *Uncontrolled Combustion* Proses ini menyebabkan kenaikan tekanan yang sangat besar. Nilai tekanan silinder maksimum pada variasi campuran biodiesel dan hidrogen 2,5%. Hal ini dikarenakan saat waktu injeksi mendekati TDC, waktu penundaan pengapian menjadi lebih pendek. Sehingga campuran bahan bakar akan terbakar lebih cepat, penambahan hidrogen berdampak pada peningkatan panas pada saat proses pembakar sehingga meningkatkan temperatur pembakaran dan tekanan silinder [21], [22].



Gambar 4. Grafik tekanan silinder terhadap *crank angle*

3.2. Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen pada temperatur silinder terhadap *crank angle*

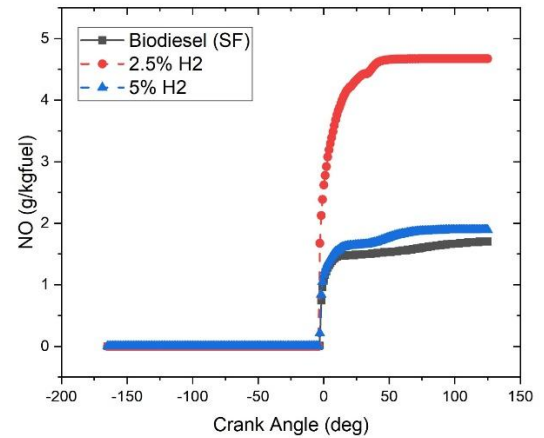
Hasil dari peningkatan temperatur pada mesin diesel satu silinder. Penambahan gas hidrogen menyebabkan peningkatan temperatur pembakaran, nilai kalor hidrogen yang tiga kali lipat dari bahan bakar biodiesel mengakibatkan peningkatan temperatur pembakaran yang ada di dalam ruang bakar [1], [18]. Proses pembakaran yang dimulai masuknya udara dan gas hidrogen, kemudian penyemprotan bahan bakar ke ruang, pada saat kompresi temperatur meningkat secara signifikan yang menyebabkan proses pembakaran. Pada gambar 5 terlihat dengan ditambahkan konsentrasi hidrogen maka temperatur juga ikut meningkat. Peningkatan tertinggi pada konsentrasi hidrogen 2.5%. Nilai temperatur tertinggi ditunjukkan pada gambar 5 sebesar 1950 K dengan campuran 2,5% hidrogen. Peningkatan tekanan silinder berdampak pada peningkatan temperatur dalam ruang bakar. Peningkatan tertinggi pada posisi TDC, karena saat itu adalah puncak pembakaran berlangsung.



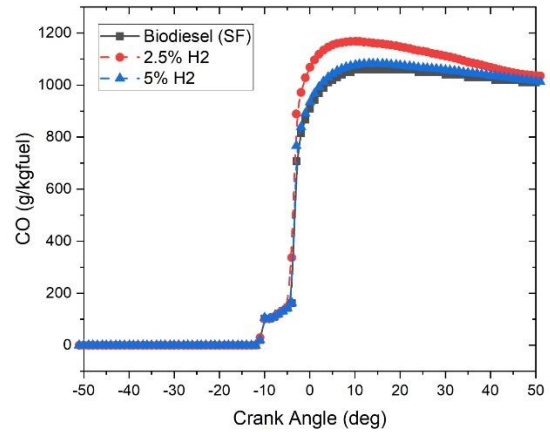
Gambar 5. Grafik temperatur terhadap *crank angle*

3.3. Pengaruh campuran biodiesel dan hidrogen terhadap emisi kendaraan

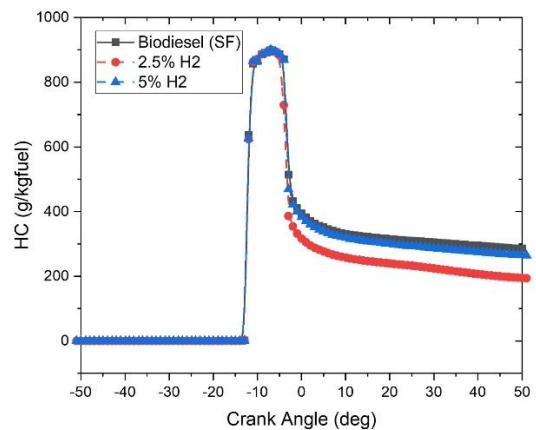
Beberapa emisi yang dihasilkan dari pencampuran biodiesel dan hidrogen pada mesin diesel satu silinder adalah nitrogen oksida (NO), karbon monoksida (CO), dan hidrogen oksida (HC). Gambar 6 (a) menunjukkan bahwa emisi NO tertinggi pada variasi campuran hidrogen 2,5 %. Hal ini dikarenakan partikel bahan bakar yang terbakar tetap berada di dalam silinder dan panas yang dilepaskan dari dinding silinder juga meningkatkan suhu silinder sehingga menghasilkan pembentukan NO [23]. Pembentukan emisi NO disebabkan karena panas di dalam ruang bakar meningkat, hal tersebut diklarifikasi dengan gambar 5 yang menjelaskan temperatur tertinggi pada ruang bakar adalah campuran bahan bakar biodiesel dengan tambahan hidrogen 2.5%. Sedangkan kenaikan signifikan pada emisi karbonmonoksida (CO) untuk ketiga variasi hampir sama dimana sebelum TDC, emisi CO naik hingga 1100 g/kg.fuel. Ketika waktu injeksi lebih dimajukan, maka akan meningkatkan pencampuran udara-bahan bakar karena tersedia lebih banyak waktu untuk proses pencampuran. Oleh karena itu hal ini juga menyebabkan emisi CO dan HC yang lebih rendah.



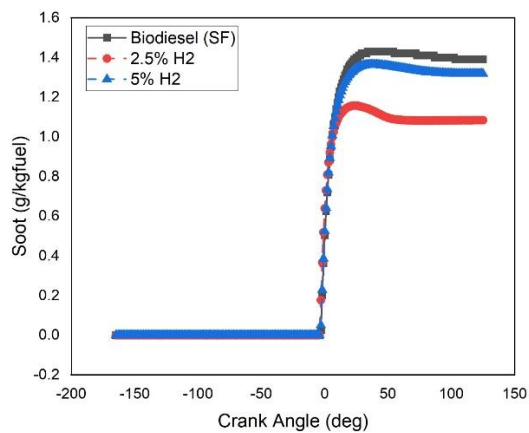
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Grafik emisi terhadap *crank angle* (a) NOx; (b) CO; (c) HC; (d) Soot

Mirip dengan emisi CO, pembentukan jelaga berbasis bahan bakar harus dikurangi seiring dengan peningkatan substitusi hidrogen karena merupakan bahan bakar bebas karbon. Seperti yang diharapkan, emisi jelaga menurun seiring dengan peningkatan persentase induksi H₂ pada sebagian besar kondisi pengoperasian mesin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6 d. Umumnya, sejumlah besar pembentukan jelaga terjadi pada nyala api difusi selama fase pembakaran yang dikontrol oleh pencampuran. Dengan berlanjutnya proses pembakaran dan masuknya oksigen, di wilayah dengan suhu yang cukup tinggi, jelaga akan teroksidasi dan tingkat emisi jelaga akan turun [24]. Jadi sebaliknya, pembakaran yang kurang menonjol terjadi selama fase pembakaran difusi dan tingkat pelepasan panas puncak yang lebih rendah ditemukan selama injeksi utama, yang mengakibatkan lebih banyak pembentukan jelaga dan mengarah pada sedikit peningkatan pada tingkat emisi jelaga secara keseluruhan. Emisi soot tertinggi pada bahan bakar biodiesel, namun emisi soot menurun signifikan pada penambahan gas hidrogen. Hal tersebut disebabkan karena hidrogen tidak membawa molekul karbon yang menyebabkan sisa pembakaran membentuk jelaga.

4. Kesimpulan

Simulasi multidimensi dilakukan untuk mempelajari secara numerik proses pembakaran dan karakteristik emisi mesin diesel berbantuan hidrogen. Hidrogen diasumsikan diinduksi melalui intake manifold dengan 0%, 2,5%, 5%, dibandingkan bahan bakar biodiesel. Mekanisme reaksi yang dikembangkan divalidasi terhadap hasil eksperimen dengan induksi H₂ 0%. Kesepakatan yang baik antara hasil simulasi dan hasil eksperimen telah diperoleh.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kecepatan mesin konstan dan kondisi beban mesin tetap memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik pembakaran dan emisi mesin diesel dengan penambahan gas hidrogen. Misalnya, peningkatan tekanan silinder dan temperature pada penambahan hidrogen 2.5%, yang selanjutnya dibuktikan dengan peningkatan emisi NO, CO, serta penurunan emisi HC dan soot. Hal ini karena pada kecepatan mesin rendah, lebih banyak bahan bakar campuran dan hidrogen dinyalakan dan dibakar selama injeksi pilot (untuk injeksi ganda) atau selama tahap awal injeksi utama (untuk injeksi tunggal), yang mempercepat laju pelepasan panas dan laju kenaikan tekanan. Namun, kelemahan dari pembakaran yang terbukti ini adalah sedikit peningkatan emisi NO. Dalam hal emisi, emisi HC dan jelaga terbukti berkurang pada sebagian besar kondisi pengoperasian mesin karena sifat hidrogen yang "bebas karbon". Lebih jauh, pada kecepatan dan kondisi beban mesin tetap, tidak ada perubahan nyata pada kinerja mesin, pembakaran, dan karakteristik emisi yang diamati. Oleh karena itu, dapat disarankan bahwa kondisi beban parsial, induksi H₂ sebesar 2.5% dapat diperkenalkan untuk mengoptimalkan kinerja mesin.

Ucapan terimakasih

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kemdikbudristek Dikti yang telah mendanai penelitian ini melalui program hibah Penelitian Dosen Pemula 2024.

Referensi

- [1] J. A. V. Godiño, M. T. García, and F. J. J. E. Aguilar, "Experimental investigation and modelling of biodiesel combustion in engines with late direct injection strategy," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 7476–7487, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.05.279.
- [2] F. Zacherl, C. Wopper, P. Schwanzer, and H.-P. Rabl, "Potential of the Synthetic Fuel Oxymethylene Ether (OME) for the Usage in a Single-Cylinder Non-Road Diesel Engine: Thermodynamics and Emissions," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 7932, 2022, doi: 10.3390/en15217932.
- [3] P. V. Elumalai *et al.*, "Combustion and emission behaviors of dual-fuel premixed charge compression ignition engine powered with n-pentanol and blend of diesel/waste tire oil included nanoparticles," *Fuel*, vol. 324, no. PB, p. 124603, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2022.124603.
- [4] I. C. Setiawan and M. Setiyo, "Renewable and Sustainable Green Diesel (D100) for Achieving Net Zero Emission in Indonesia Transportation Sector," *Automot. Exp.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–2, 2022, doi: 10.31603/ae.6895.
- [5] et. a. Bagaskara A., "Indonesia Energy Transition Outlook 2023," Jakarta, 2022. [Online]. Available: www.irena.org.
- [6] M. S. Gad, A. S. El-Shafay, and H. M. Abu Hashish, "Assessment of diesel engine performance, emissions and combustion characteristics burning biodiesel blends from jatropha seeds," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 147, pp. 518–526, 2021, doi: 10.1016/j.psep.2020.11.034.
- [7] T. N. V. Pankaj Shrivastava, "Effect of fuel injection pressure on the characteristics of CI engine fuelled with biodiesel from Roselle oil.pdf," *Fuel*, vol. 265, p. 117005, 2020.
- [8] W. Maawa, "Effect of Emulsified Palm Oil Biodiesel-Diesel Blends to the Combustion Characteristics of Compression Ignition Engine," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 469, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/469/1/012080.
- [9] R. Balasubramanian, "Experimental investigation on the effects of compression ratio on performance, emissions and combustion characteristics of a biodiesel-fueled automotive diesel engine," *Biofuels*, 2019, doi: 10.1080/17597269.2018.1558840.
- [10] S. S. Halewadimath, N. R. Banapurmath, V. S. Yaliwal, and ..., "Effect of manifold injection of hydrogen gas in producer gas and neem biodiesel fueled CRDI dual fuel engine," ... *Journal of Hydrogen* Elsevier, 2022, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007492?casa_token=4irLStJRzGgAAAAA:OkOfGNB-ZW02I-HqqBiNamz8pEUmtvZtBGyGYITaySyJCis6PI3jxUHwDh4j_YDHRkR3qo4SQ9Y.
- [11] S. Vadlamudi, S. K. Gugulothu, J. K. Panda, B. Deepanraj, and P. R. V. Kumar, "Paradigm analysis of performance and exhaust emissions in CRDI engine powered with hydrogen and Hydrogen/CNG fuels: A green fuel approach under different injection strategies," *Int. J. Hydrogen Energy*, no. xxxx, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.277.
- [12] B. Niethammer, C. Mayer, T. Claus, and C. Weber, "Direct Injection for Hydrogen Combustion Engines," *MTZ Worldw.*, vol. 83, no. 11, pp. 28–33, 2022, doi: 10.1007/s38313-022-0846-0.

- [13] Z. Liu *et al.*, “Multi-objective optimization of the performance and emission characteristics for a dual-fuel engine with hydrogen addition,” *Fuel*, vol. 332, no. P2, p. 126231, 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126231.
- [14] N. Gültekin and M. Ciniviz, “Examination of the effect of combustion chamber geometry and mixing ratio on engine performance and emissions in a hydrogen-diesel dual-fuel compression-ignition engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, no. November, 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.155.
- [15] B. Subramanian and V. Thangavel, “Experimental investigations on performance, emission and combustion characteristics of Diesel-Hydrogen and Diesel-HHO gas in a Dual fuel CI engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 46, pp. 25479–25492, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.06.280.
- [16] K. Winangun, A. Setiyawan, B. Sudarmanta, I. Puspitasari, and E. L. Dewi, “Investigation on properties biodiesel-hydrogen mixture on the combustion characteristics of diesel engine,” *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, no. August, p. 100445, 2023, doi: 10.1016/j.cscee.2023.100445.
- [17] K. Winangun, A. Setiyawan, B. Sudarmanta, and G. Asrofi, “Penggunaan bahan bakar terbarukan (biodiesel-hidrogen) pada mesin diesel dual fuel untuk mendukung energy transition di Indonesia,” *TURBO*, vol. 12, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [18] K. Winangun, A. Setiyawan, and B. Sudarmanta, “The combustion characteristics and performance of a Diesel Dual-Fuel (DDF) engine fueled by palm oil biodiesel and hydrogen gas,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, no. November 2022, p. 102755, 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102755.
- [19] and B. S. Kuntang Winangun, Atok Setiyawan, “Effects of additional hydrogen and biodiesel crude palm oil on performance and exhaust gas emissions of one cylinder diesel engine,” in *AIP Conference Proceedings*, 2023, no. May 2021.
- [20] D. Yuvenda, B. Sudarmanta, A. Wahjudi, and O. Muraza, “Improved combustion performances and lowered emissions of CNG-diesel dual fuel engine under low load by optimizing CNG injection parameters,” *Fuel*, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120301976>.
- [21] S. Verma, “A renewable pathway towards increased utilization of hydrogen in diesel engines,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 8, pp. 5577–5587, 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.213.
- [22] S. V. Karthic, M. Senthil kumar, P. Pradeep, and S. Vinoth Kumar, “Assessment of hydrogen-based dual fuel engine on extending knock limiting combustion,” *Fuel*, vol. 260, no. October 2019, p. 116342, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116342.
- [23] K. Bayramoğlu and S. Yılmaz, “Emission and performance estimation in hydrogen injection strategies on diesel engines,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 57, pp. 29732–29744, 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.135.
- [24] S. Nag, P. Sharma, A. Gupta, and A. Dhar, “Experimental study of engine performance and emissions for hydrogen diesel dual fuel engine with exhaust gas recirculation,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 23, pp. 12163–12175, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.120.

SURAT PERNYATAAN TANGGUNG JAWAB BELANJA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : AINI LOSTARI S.Si., M.T

Alamat : SUNGON LEGOWO BUNGAH

berdasarkan Surat Keputusan Nomor 0459/E5/PG.02.00/2024 dan Perjanjian / Kontrak Nomor 068/SP2H/PT/LL7/2024.476.06/A.2/UQ.7/MoU/VI/2024 mendapatkan Anggaran Penelitian Pemodelan mesin Diesel Dual Fuel (DDF) bahan bakar biodiesel dan gas hidrogen Sebesar Rp.42.110.000

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Biaya kegiatan Penelitian di bawah ini meliputi :

No	Uraian	RAB 100%	Realisasi
1	Bahan Pembelian ATK untuk perlengkapan penelitian dan FGD, pembelian domain, hosting, dan hardisk penyimpanan data,	Rp.8.400.000	Rp.8.000.000
2	Pengumpulan Data HR Narasumber FGD, HR Narasumber ahli bidang simulasi, biaya konsumsi rapat dengan ahli dan anggota peneliti, HR Peneliti dan HR pembantu peneliti, dan HR pembantu lapangan, survei alat penelitian (penginapan dan sewa kendaraan)	Rp.11.690.000	Rp.14.204.000
3	Analisis Data Analisis data simulasi dan HR narasumber terkait hasil penelitian simulasi DDF, HR pengola data	Rp.8.205.000	Rp.6.525.000
4	Sewa Peralatan Penyewaan komputer untuk simulasi diesel dual fuel	Rp.10.500.000	Rp.7.800.000
5	Pelaporan Luaran Wajib laporan penelitian dan luaran wajib sinta 3, HR kesekretariatan	Rp.3.315.000	Rp.5.581.000
6	Lain-lain	Rp.0	Rp.0
Realisasi (100 %)			Rp.42.110.000

2. Jumlah uang tersebut pada angka 1, benar-benar dikeluarkan untuk pelaksanaan kegiatan Penelitian dimaksud.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Gresik, 22-12-2024,

Ketua



AINI LOSTARI S.Si., M.T
NIP/NIPK 3525107110870001