

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi CFD terhadap karakteristik pembakaran dan emisi gas buang pada mesin diesel dual-fuel hidrogen-metana menggunakan *software* ANSYS Forte *Student*, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi persentase substitusi bahan bakar hidrogen dan metana memberikan pengaruh yang konsisten terhadap karakteristik pembakaran di seluruh matriks parameter injeksi. Hidrogen secara konsisten menghasilkan puncak temperatur silinder dan heat release rate (HRR) tertinggi dibanding metana, akibat reaktivitas dan kecepatan pembakaran hidrogen yang jauh lebih tinggi, sedangkan metana menunjukkan indikasi pembakaran dua tahap (*cool flame*) sebagai karakteristik low-temperature reaction yang tidak dijumpai pada hidrogen. Campuran 50% H₂–50% CH₄ secara umum menempati posisi intermediate di antara kedua bahan bakar murni, meskipun pada beberapa variasi SOI mundur (mendekati TDC) puncak HRR campuran justru dapat melampaui hidrogen akibat efek akumulasi pelepasan panas yang berbeda antar bahan bakar.
2. Peningkatan rasio hidrogen dalam campuran bahan bakar meningkatkan emisi NO_x secara signifikan akibat mekanisme thermal NO_x yang dipicu oleh temperatur pembakaran hidrogen yang lebih tinggi, namun secara bersamaan menekan emisi CO dan UHC hingga mendekati nol karena sifat hidrogen yang bebas karbon. Metana menunjukkan pola sebaliknya, yaitu emisi CO dan UHC yang jauh lebih tinggi. Pemunduran SOI menurunkan Nox namun meningkatkan CO dan UHC akibat waktu oksidasi yang lebih singkat, sementara pemendekan durasi injeksi memperbaiki kelengkapan oksidasi sehingga menurunkan CO dan UHC, meski meningkatkan NO_x akibat intensitas pembakaran yang lebih tinggi.
3. Bahan bakar campuran (50:50 hidrogen – metana) merupakan rasio substitusi yang paling optimal untuk menghasilkan *trade-off* emisi terbaik, karena secara konsisten menurunkan emisi CO dan UHC secara signifikan dibanding

penggunaan 100% metana, sekaligus menghindari lonjakan emisi NO_x yang ekstrem sebagaimana terjadi pada penggunaan 100% hidrogen. Dengan demikian, substitusi parsial hidrogen terbukti mampu menggeser karakteristik pembakaran dan emisi secara proporsional tanpa menimbulkan salah satu trade-off secara ekstrem.

4. Di antara sembilan variasi parameter injeksi yang diuji (A1-A4), variasi A3 (SOI -35° CA bTDC dengan durasi injeksi $10,5^{\circ}$ CA) menunjukkan performa paling optimal ketika menggunakan bahan bakar campuran hidrogen–metana. Variasi ini menghasilkan karakteristik pembakaran yang intensif namun masih berada pada batas yang dapat diterima, ditandai dengan puncak tekanan sebesar 14,03 MPa, temperatur puncak 2.024,33 K, dan puncak laju pelepasan panas (*Heat Release Rate/HRR*) sebesar 1.363,10 J/ $^{\circ}$ CA. Dari sisi emisi, A3 menghasilkan NO_x sebesar 1.503,01 ppm, yang masih lebih rendah dibandingkan hidrogen murni (1.836,87 ppm) tetapi lebih tinggi dibandingkan metana (1.102,55 ppm), menunjukkan bahwa substitusi hidrogen 50% mampu mengendalikan peningkatan NO_x akibat temperatur pembakaran yang lebih tinggi. Di sisi lain, emisi berbasis karbon berhasil ditekan secara signifikan, dengan CO sebesar 447,313 ppm dan UHC sebesar 79,8409 ppm, yang merupakan nilai terendah dibandingkan seluruh variasi campuran pada A1–A4. Rendahnya emisi CO dan UHC menunjukkan bahwa durasi injeksi $10,5^{\circ}$ CA mampu meningkatkan kelengkapan oksidasi melalui laju injeksi yang lebih terkonsentrasi, sehingga pembakaran berlangsung lebih efisien. Dengan demikian, variasi A3 memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan karakteristik pembakaran dan pengendalian emisi, yaitu menghasilkan tekanan, temperatur, dan HRR yang tinggi untuk mendukung performa mesin, sekaligus mempertahankan emisi CO dan UHC pada tingkat yang sangat rendah dengan kenaikan NO_x yang masih dapat ditoleransi. Oleh karena itu, kombinasi SOI -35° CA bTDC, durasi injeksi $10,5^{\circ}$ CA, dan bahan bakar campuran hidrogen–metana (50:50) direkomendasikan sebagai kondisi operasi paling optimal pada penelitian ini.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan penelitian ini, beberapa saran yang dapat diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya antara lain:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melibatkan variasi parameter desain dan operasional mesin lain yang belum dikaji dalam penelitian ini, guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik pembakaran dan emisi pada mesin diesel.
2. Penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas rentang rasio substitusi hidrogen-metana (tidak hanya 100% H₂, 50:50, dan 100% CH₄) guna memperoleh peta trade-off emisi yang lebih rinci dan menemukan rasio substitusi yang benar-benar optimal secara kuantitatif.
3. Variasi putaran mesin (RPM) dan beban operasional disarankan untuk diperluas pada penelitian selanjutnya, mengingat penelitian ini hanya membatasi simulasi pada satu 2 putaran (1.000 dan 1.335 rpm), sehingga pengaruh *dual-fuel* hidrogen-metana pada rentang operasi mesin yang lebih luas belum dapat tergambarkan.
4. Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, sebagian hasil telah/sedang diajukan untuk dipublikasikan dalam bentuk artikel ilmiah pada jurnal ASIIMETRIK, Universitas Pancasila, guna memperluas diseminasi temuan kepada khalayak akademik yang lebih luas.