

Simulasi Pengaruh Sudut Injeksi dan Bentuk Kepala Piston Terhadap Pembakaran Mesin Diesel Dengan OpenFOAM

Tri Agung Rohmat^{1,a} Gunawan Aneva²

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, Indonesia 55262

² Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No.2 Yogyakarta, Indonesia 55262

^atriagung_rohmat@ugm.ac.id

Abstrak

Penelitian tentang fenomena dalam mesin diesel, terutama tentang metode injeksi bahan bakar dan geometri *piston head*, membuka kemungkinan peningkatan kinerja mesin diesel. Penelitian secara eksperimen memerlukan alat yang rumit dan biaya yang besar. Di sisi lain, perkembangan *computational fluid dynamics* (CFD) yang sangat cepat dan telah mencapai tingkat kepercayaan yang tinggi membuat penelitian tentang mesin diesel lebih marak. Ansys CFX, Ansys Fluent, Star-CD, Flow3D, dan semacamnya merupakan paket software komersial yang banyak digunakan. Kelemahan dari software-software ini adalah mahalnya lisensi. Untuk menghilangkan kendala ini banyak peneliti beralih ke software *open source*, salah satunya adalah OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*). Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi pembakaran 3 dimensi dalam mesin diesel dengan piston bergerak menggunakan OpenFOAM. Sebagai parameter penelitian adalah sudut injeksi dan bentuk kepala piston. Hasilnya menunjukkan bahwa variasi sudut injeksi memberi pengaruh signifikan terhadap distribusi bahan bakar. Bertambahnya kemiringan sudut injeksi mengakibatkan bahan bakar lebih tersebar sehingga pembakaran lebih merata di seluruh ruang bakar. Adapun variasi bentuk kepala piston memberi pengaruh terhadap distribusi bahan bakar pada *intake stroke* pada saat mendekati TDC. Bentuk kepala piston dapat mengontrol arah distribusi bahan bakar ketika mencapai piston.

Kata kunci : mesin diesel, CFD, sudut injeksi, kepala piston, OpenFOAM

PENDAHULUAN

Pemanfaatan *computational fluid dynamics* (CFD) dalam berbagai bidang seperti desain, *troubleshooting*, maupun desain ulang membuat banyak perusahaan software mengembangkan software komersial CFD. Ansys CFX, Ansys Fluent, Star-CD, Flow3D merupakan contoh software CFD yang banyak digunakan dengan masing-masing keunggulannya. Kesamaan dari software ini adalah harga lisensi yang mahal yang tidak terjangkau oleh sebagian besar perguruan tinggi dan lembaga riset Indonesia, dan biasanya hanya dimiliki oleh perusahaan-perusahaan besar. Sesuai dengan harganya, software-software ini menawarkan kemudahan kepada usernya dengan menyediakan *graphical user interface* (GUI) yang *user friendly*. Kemudahan ini bahkan membuat seseorang yang tidak mempunyai pengetahuan dasar tentang CFD pun dapat mengoperasikannya. Pada dua titik ini software-software komersial ini tidak cocok

sebagai sarana pembelajaran CFD karena dapat mematikan kemampuan *program coding*.

Salah satu software alternatif adalah OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*). OpenFOAM adalah software solver numerik problem mekanika (termasuk CFD) berbasis C++ bersifat *open source*, dan dibuat oleh Open CFD Ltd dengan lisensi di bawah GNU Public License. Karena sifatnya *open source* maka keberadaannya menarik minat para pengguna CFD sehingga pemakainya di seluruh dunia semakin hari semakin banyak. Hal ini bisa dilihat dari banyaknya anggota forum diskusi OpenFOAM di situs www.cfd-online.com.

OpenFOAM menyediakan banyak *solver*, *utilities*, dan *library* yang telah dikonfigurasi dan dapat digunakan seperti yang dilakukan oleh aplikasi komersial. Dikarenakan OpenFOAM merupakan aplikasi *open source*, maka pengguna dapat mengakses kode-kode program, struktur dan hierarki desainnya

sehingga *solver*, *utilities* dan *library*nya dapat dikembangkan lebih jauh sehingga seorang pengguna bisa membuat *solver* dan *utilities* yang baru sesuai dengan kebutuhannya

Di dalam OpenFOAM juga terdapat banyak *plugins*, misalnya ParaFOAM untuk memvisualisasikan data hasil dan ParaView sebagai pembuat geometri dan pembentuk mesh. ParaView juga merupakan sebuah *geometry converter* yang dapat digunakan secara luas untuk melakukan konversi dari geometri yang didapatkan dari aplikasi komersial.

Di lain pihak, penelitian mesin diesel terkendala dengan peralatan yang rumit dan mahal [1]~[3]. Untuk mengetahui bagaimana pola aliran dan distribusi temperatur dalam silinder perlu sistem alat optik yang canggih dan modifikasi silinder maupun piston [4], [5]. Oleh karena itu pada kesempatan ini pengaruh sudut injeksi dan pengaruh bentuk kepala piston akan diteliti secara numerik dengan menggunakan OpenFOAM.

METODE PENELITIAN

Mesin diesel yang diteliti mempunyai spesifikasi sebagai berikut.

1. Ruang bakar : Direct Injection
2. Bore x Stroke : 93 x 92 mm
3. Volume : 660 cc
4. Rasio kompresi : 16,8
5. Putaran mesin : 2000 rpm
6. Time injeksi : 27° BTDC
7. Tekanan Injeksi : 18,143 MPa

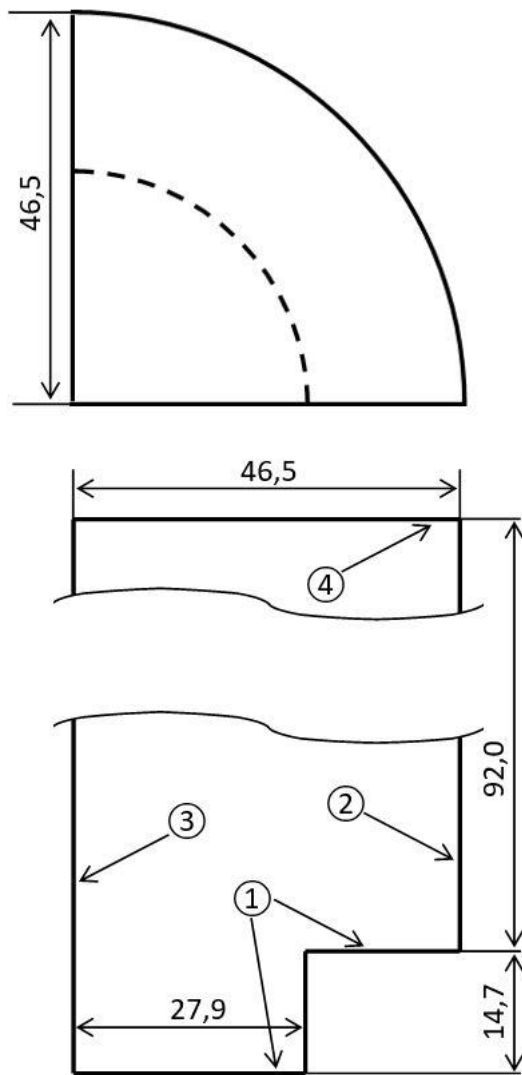
Sebagai parameter penelitian adalah sudut injeksi yang divariasikan 0° dan 60°. Dengan posisi injektor di tengah-tengah kepala silinder, maka sudut injeksi 0° membentuk injeksi vertikal ke bawah, dan sudut injeksi 60° membentuk injeksi dengan sudut 60° dengan sumbu aksial.

Kemudian sebagai parameter kedua adalah bentuk kepala piston. Dengan spesifikasi mesin seperti di atas maka dibuat model 1/4 bagian seperti ditunjukkan Gambar 1 (a) dan (b) dimana masing-masing menunjukkan geometri A dan geometri B. Geometri A mempunyai kepala piston dengan lembah (*groove*) sederhana, adapun geometri B mempunyai lembah yang lebih kompleks.

Kepala piston dapat bergerak vertikal sesuai dengan kecepatan putaran mesin.

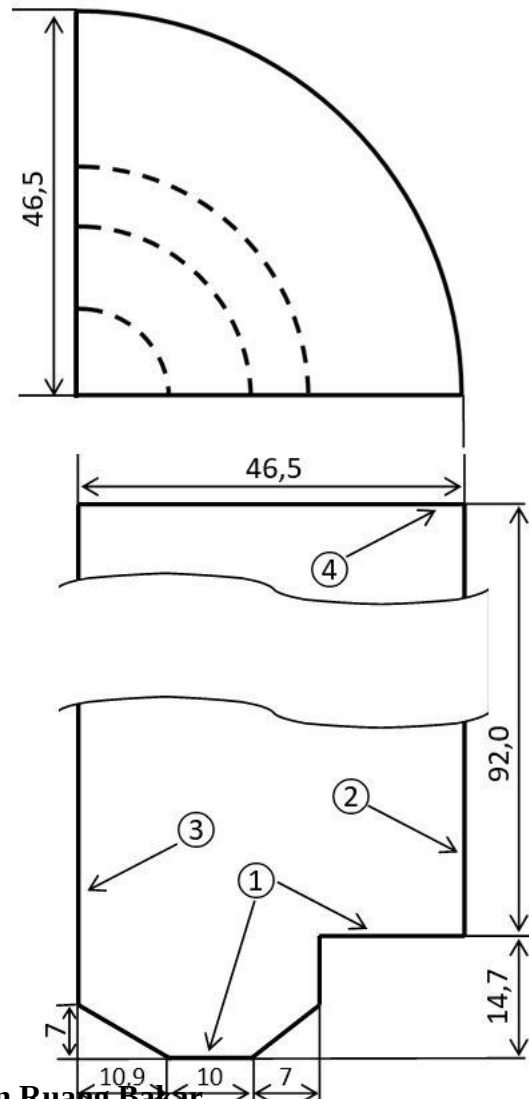
OpenFOAM terbagi ke dalam 2 kategori yaitu *solver* yang didesain untuk menyelesaikan masalah tertentu dalam mekanika, dan *utilities* yang didesain untuk melakukan perintah berupa manipulasi data. Penggunaan OpenFOAM mengharuskan pengguna memilih dan menyusun modul (berupa file) dan mengeditnya sesuai kebutuhan. Struktur direktori dasar dari setiap kasus OpenFOAM minimal terdiri dari *system*, *constant* dan *time*. Direktori *system* paling tidak memiliki 3 data yang menentukan *solver* yang dipilih. *fvSolution* yang berisi persamaan *solver*, toleransi dan berbagai algoritma lain yang di set untuk proses running. *fvSchemes* berisi skema diskretisasi yang dipilih untuk digunakan sewaktu eksekusi. *controlDict* berisi kontrol waktu serta informasi penyimpanan. Direktori *constant* terdiri dari data properti fisik terkait kasus yang dibahas. Adapun semua deskripsi dari data mesh yang pada subdirektori *polyMesh* seperti *blockMeshDict*, *faces*, *owner*, *neighbour* dan *points* yang merupakan hasil preprocessing. Direktori *time* berisi data nilai awal dan kondisi batas yang harus ditentukan oleh pengguna untuk mendefinisikan suatu masalah dan juga berisi data hasil dari setiap iterasi disesuaikan dengan pengaturan pada *controlDict* [6], [7].

OpenFOAM menyediakan *solver* untuk simulasi pembakaran dalam mesin diesel yaitu *dieselFoam* dan *dieselEngineFoam*. *dieselFoam* merupakan *solver* yang dapat menyelesaikan simulasi pada mesin diesel, dimana pada ruang bakar telah terdapat udara, injektor diletakkan pada bagian tengah atas ruang bakar dan bahan bakar $C_{14}H_{30}$ diinjeksikan kemudian menguap dan terbakar. Sedangkan pada *dieselEngineFoam* simulasi dilakukan dengan kondisi piston bergerak. Keduanya simulasi dilakukan dalam 3 dimensi.



(a) Geometri A

buang. Oleh karena itu, di sini tidak ada inlet atau outlet, kecuali injektor.



(b) Geometri B

Gambar 1 Pemodelan Ruang Bakar

(1) Kepala Piston, (2) Dinding Silinder (3) Bidang Simetris (4) Kepala Silinder

Kondisi Perhitungan

Syarat batas dinding yang digunakan adalah adiabatik. Adapun kondisi batas untuk injector bisa ditemukan di file /constant/injetorProperties seperti Gambar 2. Dari *code* ini dapat dilihat bahwa injektor berada 0,69 mm dari puncak ruang bakar dan diinjeksikan ke arah $-y$. Diameter nosel, *coefisien discharge nozzle*, massa, temperature yang akan diinjeksikan dan jumlah *parcel* yang akan diinjeksikan juga tersedia. Pada simulasi ini menggunakan satu buah injector. Notasi X pada program di atas menjelaskan fraksi massa. Pada penelitian ini belum dapat dilakukan bukaan katup hisap maupun katup

```
injectorType          unitInjector;
unitInjectorProps
{
    position           (2.0e-5 1.0e-5 0.106);
    direction           (0.5 0.5 -0.31529879);
    diameter            2.50e-4;
    Cd                  0.78;
    mass                7.32e-6;
    temperature         350.0;
    nParcels            30000;
    X
    (
        1.0
    );
    massFlowRateProfile
    (
        (-27.0 1)
        (-10.00 1)
    );
}
```

Gambar 2 Contoh Coding *Injector Properties*

Laju injeksi bahan bakar dihitung berdasar perbedaan tekanan antara tekanan injektor dan tekanan dalam silinder. Adapun waktu injeksi diset selama 17° crank angle (CA) atau sekitar 1,6 ms, dari -27 sampai -10 CA, dengan laju aliran massa rata-rata 0,0055 kg/s. Parameter ini ditulis dalam *massFlowRateProfile* yang berisi informasi tentang laju aliran massa dari bahan bakar yang bervariasi sesuai waktu. Hal ini dilakukan dalam rangka untuk mensimulasikan pembukaan dan penutupan injektor. Pada *massFlowRateProfile* kolom sebelah kiri menunjukkan sudut engkol dan sebelah kanan merupakan fraksi massa. Ada beberapa tipe injektor yang dapat digunakan, namun pada simulasi ini digunakan *unitInjector*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ditunjukkan dengan 2 macam variabel, yaitu fraksi massa dan temperatur. Hasil penelitian ditunjukkan dari pergerakan langkah naik dan turun piston pada posisi -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , dan 15° CA (*crank angle*). Gambar diambil pada bidang XZ dengan potongan 45° antara sumbu X dan Y. Pengaruh Variasi Sudut Injeksi

Gambar 3 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan kontur konsentrasi bahan bakar $C_{14}H_{30}$ dengan sudut injeksi 0° dan 60° . Dari hasil visualisasi ini dapat dilihat bahwa bahan bakar relatif lebih terdistribusi merata dengan sudut injeksi 60° dari pada injeksi bahan bakar arah lurus vertikal ke bawah (0°). Pada sudut injeksi 0° bahan bakar lebih terkonsentrasi pada bagian tengah ruang bakar. Bahan bakar setelah menumbuk dinding kepala silinder kemudian menyebar ke samping, tetapi masih tetap berada di sekitar kepala piston. Adapun pada sudut injeksi 60° bahan bakar langsung menyebar ke bagian pinggir kepala silinder. Pada sudut injeksi 60° terlihat konsentrasi bahan bakar lebih rendah yaitu dengan nilai tertinggi $0,1071 \text{ g/m}^3$. Untuk sudut injeksi 0° konsentrasi tertinggi didapatkan $0,5421 \text{ g/m}^3$. Hal ini menunjukkan untuk sudut injeksi 60° lebih menyebar pada lembah dari ruang bakar dan tidak terkonsentrasi pada satu bagian sehingga konsentrasinya lebih rendah. Hal ini disebabkan dengan sudut injeksi 60° jangkauan injeksi lebih jauh sehingga difusi

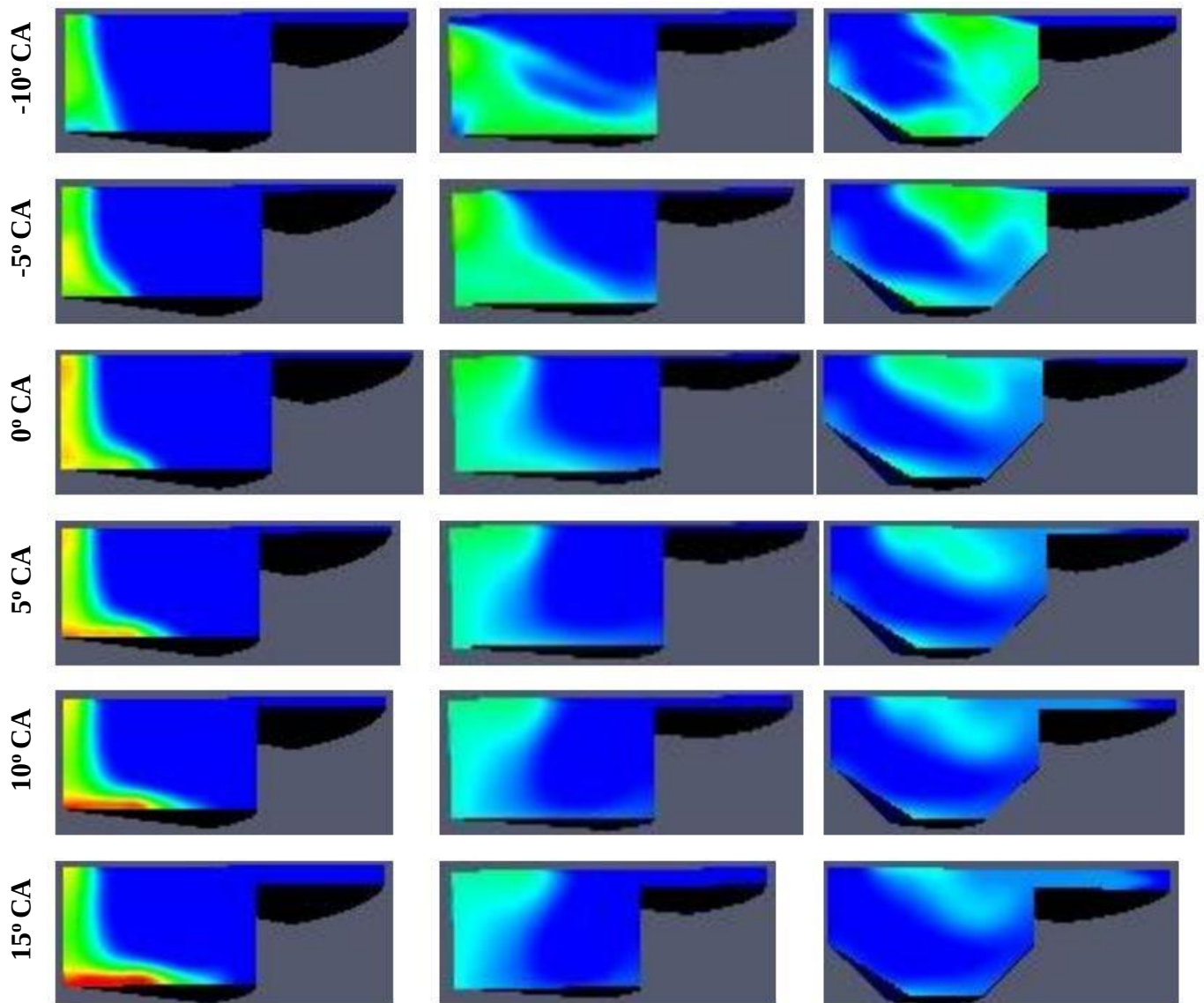
bahan bakar ke udara dan difusi udara ke bahan bakar menjadi lebih intensif

Gambar 4 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan kontur temperatur dalam silinder mesin dengan sudut injeksi 0° dan 60° . Dari Gambar ini dapat dilihat bahwa daerah bertemperatur tinggi yang merupakan indikator adanya proses pembakaran lebih merata pada sudut injeksi 60° seperti yang terlihat pada gambar (a). Sedangkan untuk sudut injeksi 0° terlihat bahwa proses pembakaran lebih terkonsentrasi pada bagian tepi dari distribusi bahan bakar. Sedangkan pada bagian dari pusat distribusi bahan bakar bahkan tidak mengalami proses pembakaran karena konsentrasi oksigen yang terlalu rendah. Ini merupakan ciri dari pembakaran difusi. Hal ini sangat berbeda dengan mesin bensin dimana pembakaran terjadi pada seluruh ruang bakar.

Pada sudut injeksi 60° pembakaran lebih merata disebabkan oleh lebih meratanya distribusi bahan bakar sehingga bahan bakar bercampur dengan udara lebih baik sebelum proses pembakaran. Setelah mencapai *auto-ignition temperature*, maka campuran bahan bakar dan udara terbakar dengan daerah yang lebih luas.

Pengaruh Variasi Geometri Ruang Bakar

Gambar 3 (b) dan (c) masing-masing menunjukkan kontur konsentrasi bahan bakar $C_{14}H_{30}$ dengan sudut injeksi 60° masing-masing untuk geometri A dan geometri B. Dari gambar ini dapat dilihat bahwasanya distribusi bahan bakar pada jenis geometri B seperti yang ditunjukkan pada gambar lebih merata dari jenis geometri A. Ini karena pantulan aliran bahan bakar setelah menumbuk dinding lembah piston yang miring lebih tersebar pada geometri B dibandingkan dengan geometri A. Pada geometri A bahan bakar terkumpul pada kepala piston, adapun pada geometri B relatif terkonsentrasi sampai kepala silinder. Keadaan pada geometri B tentunya tidak menguntungkan karena dapat membuat bahan bakar mengalir keluar silinder melalui lubang buang.



(a) Geometri A, Sudut Injeksi 60° (b) Geometri A, Sudut Injeksi 60° (c) Geometri A, Sudut Injeksi 60°

Gambar 3 Kontur Konsentrasi Bahan Bakar

Secara kuantitatif geometri A menghasilkan konsentrasi maksimal $0,1072 \text{ g/m}^3$, sedangkan geometri B lebih kecil yaitu $0,0646 \text{ g/m}^3$.

Gambar 4 (a) dan (b) masing-masing menunjukkan kontur temperatur dalam silinder mesin dengan sudut injeksi 60° masing-masing untuk geometri A dan geometri B. Dari gambar ini terlihat bahwa pembakaran dengan geometri B lebih merata ke seluruh bagian silinder mesin. Akibatnya dapat dilihat geometri A menghasilkan temperatur maksimum sebesar 1613 K, sedangkan pada geometri B lebih rendah yaitu 1411 K. Dengan temperatur yang lebih rendah geometri B diprediksikan menghasilkan NOx lebih rendah dibandingkan dengan geometri A.

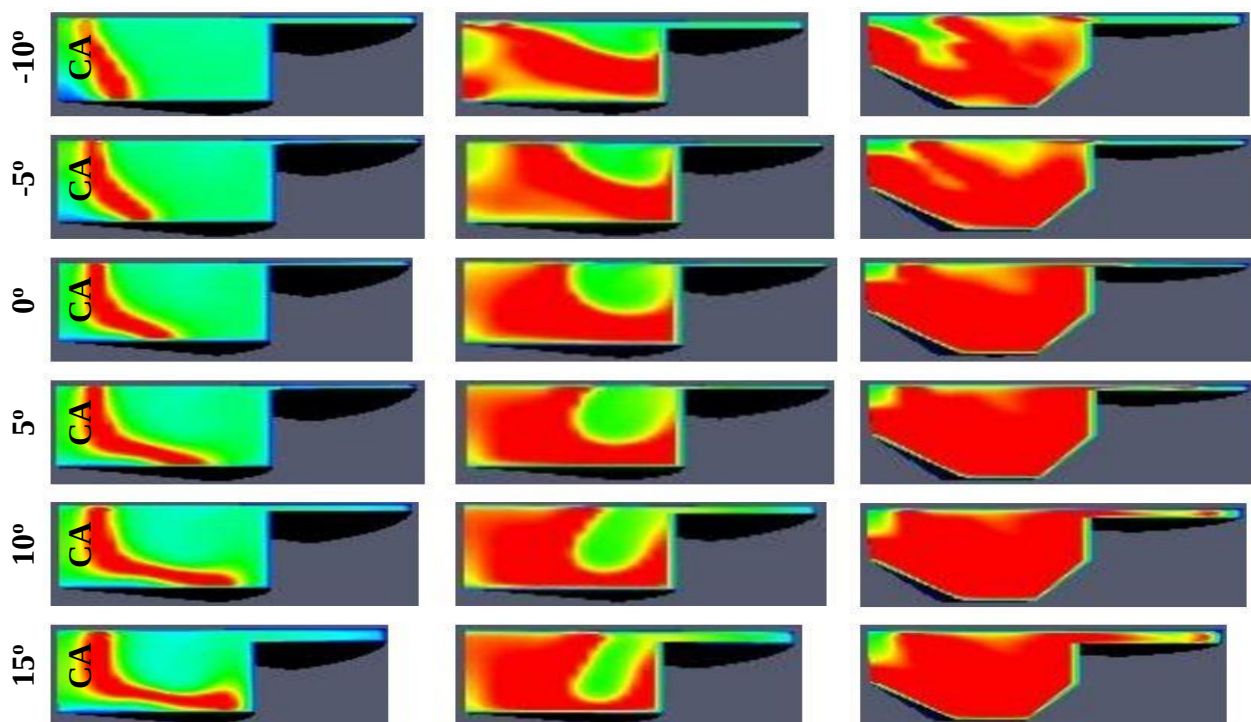
KESIMPULAN

1. OpenFOAM dapat mensimulasikan fenomena pembakaran dalam mesin diesel.
2. Variasi sudut injeksi memberi pengaruh signifikan terhadap distribusi bahan bakar yaitu dengan bertambahnya kemiringan dapat memperlebar luasan proses pembakaran.
3. Variasi bentuk kepala piston juga dapat memberi pengaruh signifikan terhadap distribusi bahan bakar.

Kedepannya perlu dikembangkan modul yang dapat memperhitungkan pengaruh bukaan katup hisap dan buang.

REFERENSI

- [1] Das, S., Chang, S., and Kirwan, J., SAE Technical Paper 2009-01-1488, 2009.
- [2] Agudelo, J., Agudelo, A., and Benjumea, P., 2009, Study of Diesel Spray Using Computational Fluid Dynamics, Thesis, Universidad de Antioquia, Medellin.
- [3] De Risi, A., Manieri, D.F., and Laforgia, D., 2008, A Theoretical Investigation on the Effects of Combustion Chamber Geometry and Engine Speed on Soot and NOx Emissions, Thesis, Università degli Studi di Lecce.
- [4] Hung, D.L.S and Zhu, G.G., J.R., 2007, SAE Technical Paper 2007-01-1411.
- [5] Bates, S.C., 1988, SAE Technical Paper 880520.
- [6] -, OpenFOAM Version 1.5 User Guide, 2008, Free Software Foundation, Inc.
- [7] -, OpenFOAM Version 1.5 Programmer's Guide, 2008, Free Software Foundation, Inc.



(a) Geometri A, Sudut Injeksi 60° (b) Geometri A, Sudut Injeksi 60° (c) Geometri A, Sudut Injeksi 60°