

# **SIMULASI NUMERIK POLA SEMPROTAN BAHAN BAKAR BIODIESEL DI RUANG BAKAR MEXICAN HAT DENGAN CFD SOLVER FLUENT 6.3**

**Arya Wulung, Djoko Sungkono Kawano**

Program Pasca Sarjana, Jurusan Teknik Mesin, FTI  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya  
aryawulung@yahoo.com

## **Abstrak**

*Penggunaan bahan bakar alternatif pada motor bakar torak diharapkan dapat menurunkan kadar emisi gas buang dan mengatasi keterbatasan minyak dunia. Biodiesel merupakan bahan bakar nabati dengan properties hampir menyerupai diesel oil dan dapat digunakan pada motor diesel direct injection tanpa perubahan sistem bahan bakarnya. Bahan baku biodiesel yang tersedia di Indonesia diantaranya kelapa, *Jatropha Curcas* dan minyak goreng bekas yang dapat diolah menjadi biodiesel melalui proses esterifikasi. Penelitian numerik menggunakan FLUENT 6.3 ini dilakukan pada model ruang bakar mexican hat untuk mengetahui karakteristik semprotan biodiesel yaitu waktu dan panjang breakup, panjang penetrasi, sudut semprotan, distribusi partikel serta visualisasi semprotan dari ketiga jenis biodiesel tersebut..*

*Perbandingan hasil numerik dan eksperimen menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu peningkatan tekanan ruang bakar akan menghasilkan sudut semprotan lebih besar dan diameter droplet kecil. Biodiesel minyak goreng bekas memiliki droplet berdiameter lebih besar daripada biodiesel Kelapa atau *Jatropha Curcas* karena memiliki tegangan permukaan yang tinggi. Diameter partikel akan berkurang saat penetrasi semakin jauh karena pengaruh gaya aerodinamik yang bekerja pada droplet dan droplet tadi pecah setelah bertumbukan dengan dinding piston. Visualisasi menggunakan FLUENT 6.3 membuktikan awal tumbukan terjadi pada waktu 0,4 ms setelah SOI sedangkan eksperimen mengalami tumbukan pada 0,25 ms setelah SOI dan regim splash hanya terjadi pada biodiesel Minyak Goreng Bekas dengan tekanan injeksi tinggi.*

Kata Kunci : Mexican Hat, biodiesel, karakteristik semprotan

## **Pendahuluan**

Mexican Hat merupakan bentuk ruang bakar yang digunakan pada motor diesel putaran rendah dengan daya besar. Interaksi semprotan bahan bakar dengan dinding piston akan membentuk regim *splash* dan membentuk droplet berdiameter lebih kecil. Pengembangan sumber bahan bakar nabati menciptakan biodiesel yang terbuat dari Kelapa, *Jatropha Curcas* dan Minyak Goreng Bekas dengan propertis beragam. Melalui penelitian secara eksperimen maupun numerik, pengaruh perubahan parameter injeksi dan karakteristik semprotan dalam proses tersebut dapat diketahui lebih akurat. Dalam ruang bakar motor diesel, bahan bakar bertekanan tinggi masuk ke dalam silinder melalui lubang kecil pada nozzle dan membentuk jet yang cepat menyebar menjadi semprotan lalu teratomisasi. Atomisasi akan mengubah bahan bakar cair menjadi jet atau *sheet* (lembaran) tipis, membentuk ligamen (ikatan) dan akhirnya pecah menjadi droplet

dengan pola dan arah tertentu. Menurut Heywood (1988) dan Baumgarten (2006), kondisi injeksi seperti tekanan injeksi, area orifice dan *injection rate* berubah saat injeksi sehingga distribusi ukuran droplet dalam semprotan akan berubah selama periode injeksi. Hal ini menunjukkan proses atomisasi akan berbeda sesuai *spray cone* dan *spray edge* serta lintasan individual droplet tergantung dari ukuran, kecepatan awal dan posisi dalam semprotan. Proses atomisasi tersebut menjelaskan penyebab distribusi ukuran droplet selalu berbeda sesuai posisinya dalam semprotan. Sedangkan Azzopardi (1991) melakukan eksperimen menggunakan kamera kecepatan tinggi untuk mengkaji proses *breakup* pada sebuah droplet tunggal. Hasil eksperimen ini membuktikan angka Weber rendah menyebabkan droplet tipis pada bagian tengah lalu pecah dimulai dari bagian tersebut sedangkan pada Weber tinggi *breakup* dimulai dari tepi droplet.

Pengaruh tekanan *chamber* pada semprotan telah dipelajari Bae dan Kang (2000) serta Hwang et. al. (2003). Penelitian ini memberikan penjelasan bahwa saat densitas gas meningkat maka penetrasi berkurang, sudut bertambah dan semprotan lebih tebal akibat pengaruh aerodinamik antara gas dan semprotan. Penetrasi semprotan semakin bertambah seiring dengan durasi waktu setelah injeksi dan akhirnya bertumbukan dengan dinding piston. Interaksi rumit antara semprotan dengan dinding terjadi saat penetrasi semprotan mengenai dinding piston. Proses yang mungkin terjadi adalah terbentuk *spray* atau lapisan tipis pada dinding. Kedua proses tersebut akan mempengaruhi efisiensi pembakaran dan kadar emisi yang dihasilkan. Lapisan tipis pada dinding dapat meningkatkan kadar emisi karena lapisan tersebut sulit menguap dan hanya terbakar sebagian. Faktor utama yang berperan pada tumbukan semprotan adalah panjang penetrasi dan jarak nozzle dengan dinding. Beberapa penelitian membuktikan pula bahwa tekanan injeksi tinggi, densitas gas rendah dan temperatur tinggi akan meningkatkan penetrasi dan menyebabkan tumbukan.

Untuk mengetahui semprotan bahan bakar lebih rinci maka diperlukan bantuan CFD. Validasi eksperimen dan numerik dilakukan oleh Reitz dan Rutland (1995) dalam penelitian menggunakan motor diesel silinder tunggal Caterpillar 3406. Tipe piston yang digunakan adalah Mexican Hat berdiameter 137,19 mm dan pemodelan KIVA menggunakan submodel untuk mempelajari karakteristik semprotan hingga gas sisa pembakaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan turbulensi yang tepat adalah RNG k- $\epsilon$  karena dapat memprediksi struktur *large-scale* yang terbentuk oleh gerakan *squish* dan *spray*. Pemodelan numerik untuk mempelajari panjang *breakup* dan ukuran droplet pada dua tipe *pressure-swirl atomizer* yang bekerja dalam tekanan *ambient* dilakukan oleh Senecal et. al. (1999) dengan bantuan software KIVA-3V. Dalam penelitian ini persamaan Rosin-Ramler digunakan untuk perhitungan distribusi diameter droplet, persamaan Lagrangian untuk perhitungan jejak droplet dan setiap droplet diasumsikan memiliki propertis kinematik dan termodinamika yang sama. Droplet *collision* dan *coalescence* diselesaikan menggunakan persamaan O'Rourke dan *secondary breakup* menggunakan Taylor Analogy Breakup (TAB) sedangkan persamaan fasa gas menggunakan algoritma Lagrangian-Eulerian (ALE). Fluida kerja yang digunakan adalah Stoddard Solvent sebanyak 14 dan 44 mg. Hasil numerik dari kedua jenis injektor ini serupa dengan eksperimen sebelumnya dan menunjukkan *linear stability analysis* dalam pemodelan *pressure swirl atomizer* dipengaruhi oleh udara dalam *chamber*, tegangan permukaan dan viskositas bahan bakar serta persamaan yang digunakan dalam KIVA-3V tersebut dapat memprediksi penetrasi semprotan, SMD dan visualisasi dengan akurat.

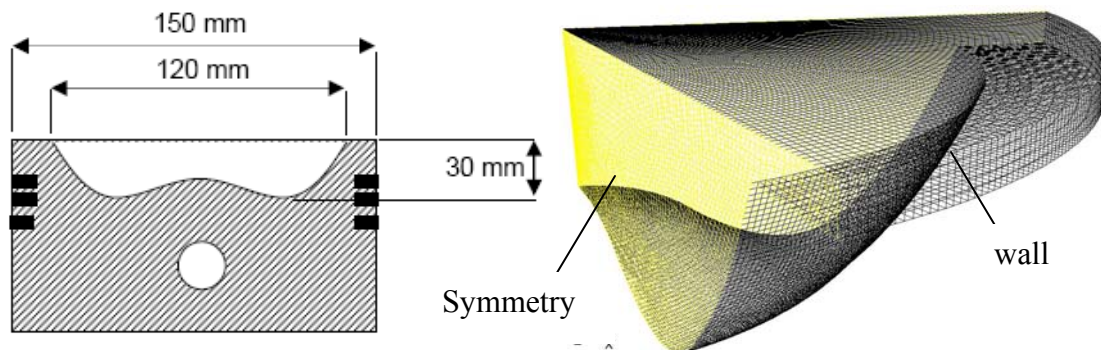
Dalam atomisasi bahan bakar menggunakan *pressure-swirl atomizer*, interaksi antara injektor dengan semprotan bahan bakar merupakan hal yang penting. Schmidt et. al. (1999) memberikan penjelasan akurat mengenai hal tersebut melalui pemodelan yang dikenal dengan Linearized Instability Atomization (LISA) yang bertujuan sebagai prediksi bentuk semprotan dekat *nozzle tip*. LISA memiliki tiga tahap, yaitu pembentukan *film*, lapisan tipis dan atomisasi. Pemodelan ini diterapkan untuk mempelajari penetrasi, sudut, flux massa dan visualisasi semprotan *pressure-swirl injector* berdiameter 560  $\mu\text{m}$  dan 458  $\mu\text{m}$  yang bekerja dalam *ambient pressure* dengan pasokan bahan bakar 56,8, 20 dan 69  $\text{mm}^3$ . Dengan menggunakan TAB sebagai pemodelan *secondary breakup*, RNG k- $\epsilon$  sebagai pemodelan turbulen dan *collision* serta *coalescence* diselesaikan menggunakan metoda O'Rourke. Proses semprotan ini diselesaikan secara *transient* dan membuktikan bahwa prediksi numerik sesuai dengan hasil eksperimen, droplet pada awal injeksi berukuran besar sedangkan pada akhir injeksi terjadi perbedaan antara numerik dan eksperimen yang disebabkan karena *injector closing* tidak dapat diselesaikan dalam kasus *transient*.

Binesh dan Hossainpour (2008) melakukan penelitian secara numerik menggunakan software FIRE dengan tujuan mengurangi emisi dan konsumsi bahan bakar pada motor diesel Catterpillar berdiameter 137,19 mm dan stroke 165,1 mm. Simulasi ini menggunakan nozzle dengan 6 lubang injeksi berdiameter 0,259 mm dan tekanan injeksi maksimum adalah 90 MPa. Model ruang bakar yang digunakan dalam penelitian adalah sebuah submodel dari ruang bakar tipe Mexican Hat, pemodelan turbulen k- $\epsilon$  dan WAVE untuk pemodelan *breakup*. Hasil penelitian tersebut menjelaskan bahwa kontur kecepatan dalam ruang bakar berubah pada setiap sudut poros engkol dan bahan bakar *liquid* memiliki penetrasi terbatas kemudian uap bahan bakar melanjutkan penetrasi tersebut.

### Metodologi

Penelitian ini dilakukan dalam sebuah ruang bakar Mexican Hat menggunakan software FLUENT 6.3 dengan beberapa kondisi, antara lain :

- a. Jarak nozzle tip-dinding piston 58,4 mm.



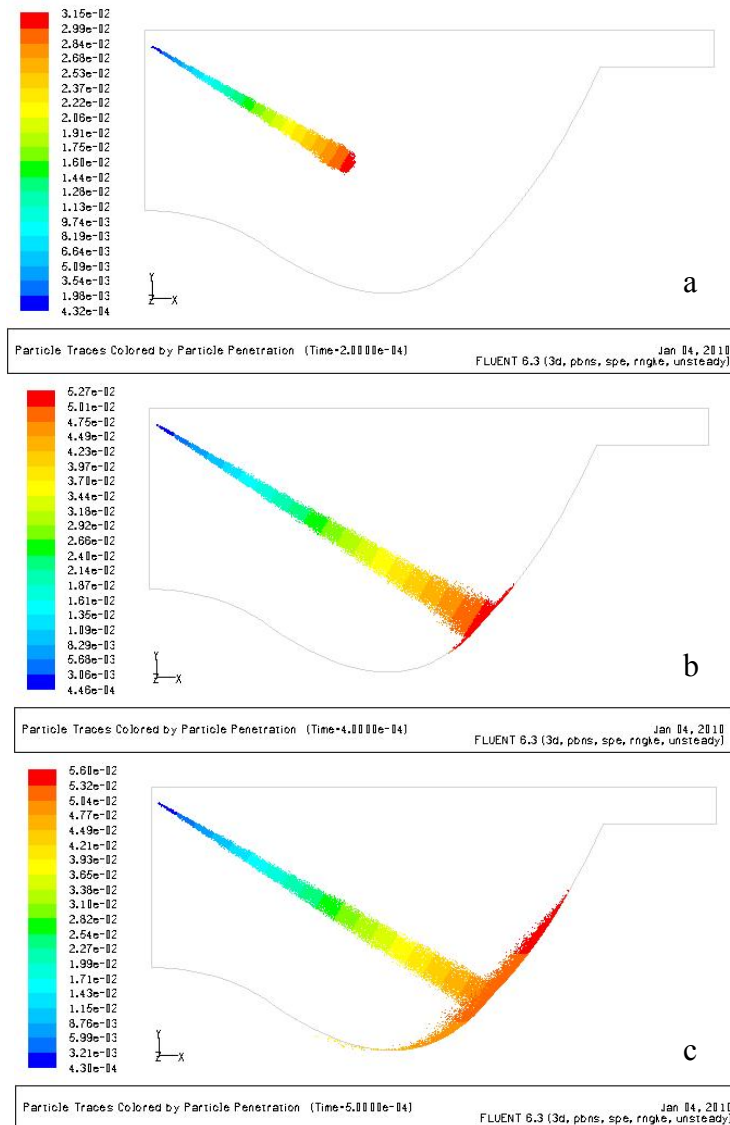
Gambar 1 Geometri ruang bakar tipe Mexican-Hat

- b. Tekanan ruang bakar 1, 3 dan 6 bar.
- c. Tekanan tekanan injeksi 150, 175 dan 200 bar.
- d. Eksperimen Khusna (2009) dilakukan dengan menggunakan *multihole nozzle* lima lubang berdiameter 0,22 mm dan kemiringan semprotan 30°. Oleh karena itu pada penelitian numerik ini injeksi dilakukan pada sebuah submodel, Gambar 1.

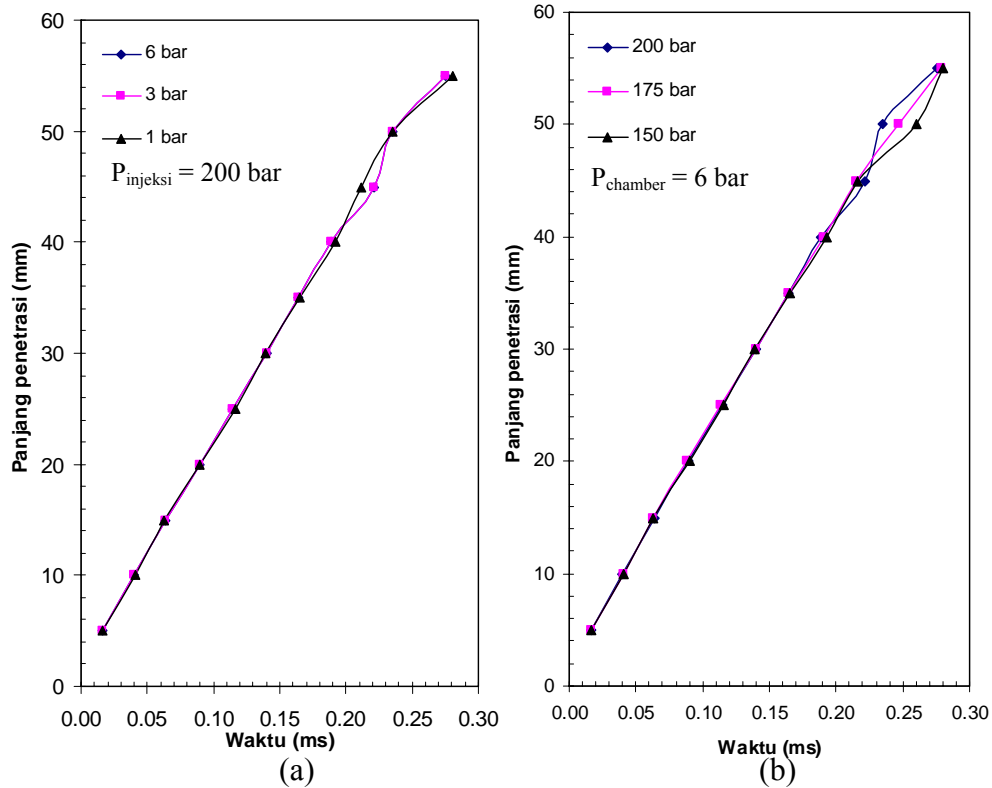
- e. Bahan bakar yang digunakan adalah tiga jenis biodiesel yang terbuat dari Kelapa, Jatropha Curcas dan Minyak Goreng Bekas.
- f. Laju massa bahan bakar selalu berubah karena dipengaruhi densitas dan perbedaan tekanan injeksi dan *chamber*. Pada penelitian ini menggunakan laju massa bahan bakar hasil eksperimen Khusna (2009)

### Hasil dan Pembahasan

Visualisasi semprotan biodiesel pada Gambar 2 menunjukkan evolusi penetrasi biodiesel Minyak Goreng Bekas yang semakin meningkat seiring bertambahnya durasi waktu setelah injeksi. Biodiesel ini mengalami tumbukan pada 0,4 ms sementara pada eksperimen semprotan biodiesel mulai menumbuk dinding piston saat 0,25 ms setelah injeksi.



Gambar 2 Evolusi penetrasi biodiesel MGB  
 Pinj = 200 bar, Pchamber = 6 bar  
 Time after SOI (a) 0,2 ms (b) 0,4 ms (c) 0,5 ms



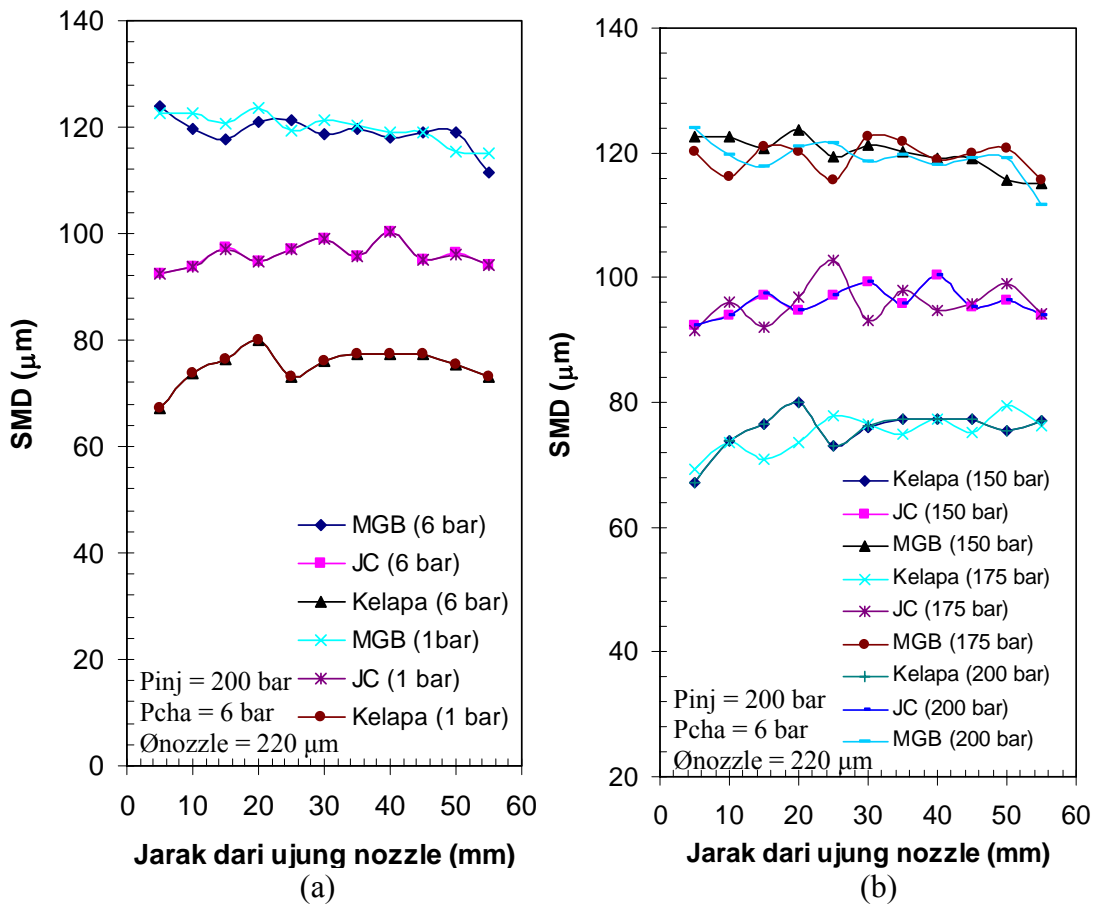
Gambar 3 Perubahan panjang penetrasi

Peningkatan tekanan *chamber* (Gambar 3a) dalam ruang bakar Mexican Hat hanya berpengaruh sedikit pada panjang penetrasi sedangkan perubahan tekanan injeksi pada (Gambar 3b) memberikan pengaruh lebih signifikan. Hal ini terjadi karena perbedaan tekanan antara *chamber* dan tekanan injeksi antara 144 bar hingga 199 bar mampu memberikan momentum lebih besar pada droplet untuk mengatasi gaya aerodinamik yang ditimbulkan udara. Dalam penelitian ini dinding piston berjarak 58,4 mm dari nozzle tip. Tekanan injeksi tinggi memberikan energi besar pada semprotan untuk penetrasi pada arah *downstream* sehingga biodiesel dengan tekanan injeksi 200 bar memiliki penetrasi lebih panjang daripada tekanan lainnya.

Pengukuran distribusi diameter droplet dalam semprotan biodiesel dilakukan menggunakan metoda Sauter Mean Diameter. Tekanan *chamber* tinggi akan memperkecil diameter droplet karena droplet mengalami *secondary breakup* akibat gaya aerodinamik yang ditimbulkan. Semakin kecil tegangan permukaan biodiesel maka biodiesel tersebut akan memiliki droplet yang kecil. Pada penelitian ini biodiesel Kelapa memiliki SMD terkecil 67,1 hingga 80,1  $\mu\text{m}$ . Hal ini terjadi karena biodiesel tersebut memiliki tegangan permukaan 0,0621  $\text{N/m}^2$ , lebih kecil daripada Jatropha Curcas dan Minyak Goreng Bekas. Tegangan permukaan tersebut berguna untuk mempertahankan bentuk droplet Menurut Azzopardi (1991) pada Weber rendah droplet mengalami *breakup* dimulai dari permukaan bagian tengahnya sedangkan pada Weber rendah, proses *breakup* tersebut dimulai pada bagian tepi. Semakin jauh jarak dari nozzle tip maka droplet akan semakin kecil karena droplet tersebut pecah akibat bergesekan dengan udara.

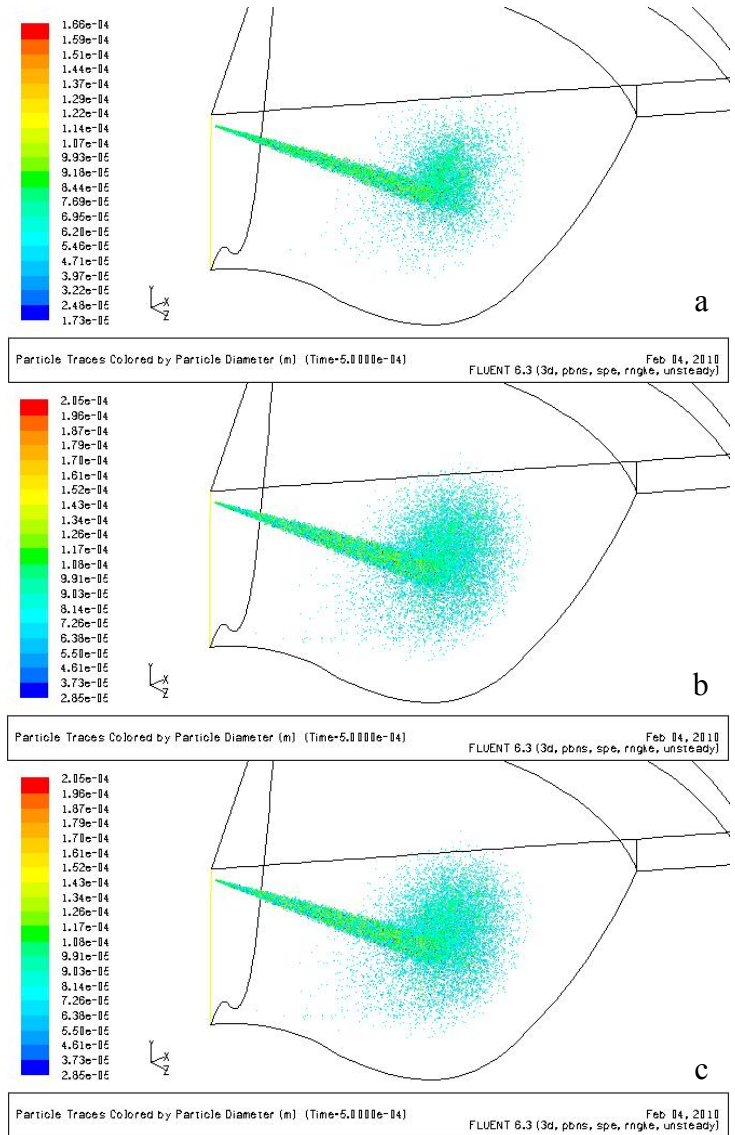
Pada penelitian ini biodiesel Kelapa memiliki diameter droplet terkecil. Diameter tersebut akan semakin berkurang sepanjang arah penetrasi (Gambar 4a dan 4b) akibat

bergesekan dengan udara. Semakin tinggi tekanan *chamber* maka droplet akan semakin kecil, perubahan diameter droplet yang signifikan hanya terjadi pada biodiesel Minyak Goreng Bekas.



Gambar 4 Distribusi droplet

Diameter droplet dipengaruhi pula oleh tekanan injeksi, Gambar 4b peningkatan tekanan injeksi akan memperkecil diameter droplet karena waktu *breakup* lebih singkat dan panjang *breakup* lebih kecil. Injeksi tekanan tinggi akan meningkatkan kecepatan biodiesel saat meninggalkan nozzle, hal ini membentuk droplet berdiameter kecil dengan energi kinetik lebih besar untuk mengatasi gesekan dengan udara dalam ruang bakar. Pada jarak penetrasi 0 hingga 40 mm terjadi fluktuasi perubahan diameter droplet yang disebabkan oleh *collision* dan *coalescence* antar droplet tersebut. Proses ini dijelaskan melalui visualisasi pada Gambar 5, droplet berwarna biru di tengah semprotan menunjukkan droplet berdiameter kecil dan saat tumbukan droplet berwarna biru lebih dominan yang menunjukkan pecahnya droplet akibat tumbukan pada dinding.



Gambar 5 Distribusi droplet pada biodiesel  
 (a) Kelapa (b) Jatropha Curcas (c) Minyak Goreng Bekas

Perilaku semprotan menumbuk dinding pada umumnya dipengaruhi oleh ukuran droplet, kecepatan tumbukan dan kondisi permukaan dinding. Parameter tak berdimensi yang menentukan jenis tumbukan adalah Reynolds Number, Weber Number dan Sommerfeld Number saat menumbuk dinding. Gambar 5 menunjukkan bahwa biodiesel Kelapa, Jatropha Curcas dan Minyak Goreng Bekas dengan jarak nozzle tip-dinding 58,4 mm memiliki regim tumbukan yang beragam. Berdasarkan Naber dan Farell (1988), tumbukan didefinisikan menggunakan angka Weber, angka Weber diatas 130 akan menghasilkan *splash* sedangkan Weber dibawah 130 akan menghasilkan regim *spread*. Pada penelitian ini regim *splash* hanya terjadi pada biodiesel Minyak Goreng Bekas pada tekanan injeksi 175 dan 200 bar. Sedangkan menurut kriteria Mundo et. al. (1995) tumbukan pada penelitian ini berada pada regim *spread*, karena angka Sommerfeld Number (K) berada dibawah 57,7. Gambar tersebut membuktikan Weber Number dan Sommerfeld Number meningkat seiring dengan kenaikan tekanan injeksi. Dengan

demikian semakin tinggi tekanan injeksi, regim tumbukan semakin cenderung membentuk regim *splash*.

Semprotan biodiesel Minyak Goreng Bekas dengan densitas  $915,2 \text{ kg/m}^3$  memiliki energi kinetik lebih besar dan mampu menghasilkan regim *splash* pada jarak tumbukan 58,4 mm dengan tekanan injeksi 175 dan 200 bar, ditandai dengan angka Weber 136,2 dan 148,5. Sedangkan biodiesel Kelapa dan Jatropha Curcas hanya menghasilkan regim *spread* karena energi kinetiknya pada droplet lebih rendah. Regim tumbukan *spread* dan *splash* sangat berpengaruh pada terjadinya proses *breakup* setelah menumbuk dinding. Beberapa literatur menunjukkan bahwa regim tumbukan *splash* akan menghasilkan droplet yang lebih kecil. Nukiyama-Tanasawa membuktikan bahwa setelah terjadi tumbukan, diameter volumetrik rata-rata ( $d_m$ ) memiliki korelasi dengan SMD sebelum menumbuk dinding sebesar,  $d_m = \text{SMD}/2,16$ .

### Daftar Pustaka

- Azzopardi, B. J. (1991), "Atomization Fundamentals", Department of Chemical Engineering, University of Nottingham.
- Bae, C. dan Kang, J. (2007), "Diesel Spray Characteristics of a Common-Rail VCO Nozzle Injector", Proc. Thermofluidynamic Processes in Diesel Engines (THIESEL), hal. 57-66.
- Baumgarten, C., (2006), "Mixture Formation in Internal Combustion Engines", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.
- Binesh, A.R. dan Hossainpour, S. (2008), "Three Dimensional Modelling of Mixture Formation and Combustion in a Direct Injection Heavy-Duty Diesel Engine", Proceeding of World Academy of Science, Engineering and Technology Volume, hal. 207.
- Heywood, J. B. (1988), "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book Company, Singapore.
- Hwang, J.S., HA, J.S. dan No, S. Y. (2003), "Spray Characteristics of DME in Conditions of Common Rail Injection System", International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, No.3, hal. 119.
- Khusna, D. (2009), "Karakteristik Semprotan Menumbuk Dinding Piston Tipe Mexican-Hat dengan Bahan Bakar Biodiesel dalam Ruang Bakar Bertekanan", Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Mundo, C., Sommerfeld, M. dan Tropea C. (1995), "Droplet-Wall Collisions: Experimental Studies of The Deformation and Breakup Process", International Journal Multiphase Flow, Vol. 21, hal. 151-173.
- Naber, J. D. dan Reitz, R. D. (1988), "Modeling Engine Spray/Wall Impingement", SAE 88107.
- Reitz, R. D. dan Rutland, C. J. (1995), "Development and Testing of Diesel Engine CFD Models", Prq Energy Cumhusr. Sri. Vol. 21, hal. 173-196.
- Schmidt, D.P., Nouar, I., Senecal, P.K., Rutland, C.J., Martin, J. K. dan Reitz, R.D. (1999), "Pressure-Swirl Atomization in the Near Field", SAE 1999-01-0496.
- Senecal, P.K., Schmidt, D.P., Nouar, I., Rutland, C.J., Reitz, R.D. dan Corradin M.L. (1999), "Modeling High-Speed Viscous Liquid Sheet Atomization", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, hal.1073-1097.