

## SIMULASI NUMERIK I : PENGARUH TEKANAN INJEKSI TERHADAP KARAKTERISTIK SEMPROTAN BIODIESEL MINYAK GORENG BEKAS

I Gede Teddy Prananda Surya

Teknik Mesin Universitas Udayana

Jl. Raya Kampus UNUD, Kampus Bukit Jimbaran, Jimbaran  
Kabupaten Badung, Bali, Indonesia

teddyps@gmail.com

### Abstrak

Mexican Hat adalah jenis ruang bakar yang banyak digunakan pada motor diesel putaran rendah agar menghasilkan daya yang besar. Penetrasi semprotan diawali dengan primary breakup yang terjadi pada nozzle tip akibat pengaruh bentuk nozzle serta tekanan injeksi kemudian dilanjutkan dengan secondary breakup saat berinteraksi dengan udara dalam ruang bakar. Bentuk kepala piston Mexican hat yang cekung bertujuan untuk memecah droplet menjadi berukuran lebih kecil setelah tumbukan. Hasil penelitian menggunakan FLUENT 6.2 ini membuktikan bahwa peningkatan tekanan injeksi akan mempersingkat waktu breakup dan panjang breakup sedangkan regim splash saat semprotan biodiesel Minyak Goreng Bekas menumbuk dinding piston hanya terjadi pada tekanan injeksi 1750 dan 200 bar. Droplet kecil muncul akibat tekanan injeksi yang tinggi.

Kata kunci : penetrasi semprotan, biodiesel, tekanan injeksi

### PENDAHULUAN

Semprotan bahan bakar dalam ruang bakar motor diesel merupakan faktor utama yang mengendalikan efisiensi pembakaran serta kadar emisi gas buang. Dalam motor diesel berukuran besar, *mixing rate* harus berlangsung dalam waktu singkat sehingga diperlukan semprotan dengan momentum dan energi yang cukup. Oleh karena itu umumnya motor diesel jenis ini menggunakan pompa injeksi common rail dan bowl-in piston. Pada bowl-in piston, panjang penetrasi dipengaruhi oleh jarak antara nozzle-piston bowl dan karakteristik semprotan tersebut selalu berubah jika menggunakan injeksi tekanan tinggi, durasi injeksi lama atau densitas gas rendah maka semprotan bahan bakar akan mengenai dinding piston.

Bae dan Kang [[1]] melakukan eksperimen semprotan bahan bakar pada nozzle tipe VCO dan Sac dengan lima lubang dan sudut inklinasi 152°. Eksperimen ini berlangsung pada ruang bakar berisi nitrogen dan bertekanan 30 bar. Nozzle VCO yang digunakan memiliki diameter lubang 0,176 dan 0,144 mm sedangkan Sac berdiameter 0,146 mm. Hasil penelitian Bae dan Kang menggunakan kamera CCD

menunjukkan bahwa penetrasi semprotan VCO dan Sac memiliki pola yang serupa, yaitu saat densitas gas meningkat maka penetrasi menurun dan semprotan lebih tebal akibat pengaruh aerodinamik antara gas dan semprotan. Sudut semprotan bertambah jika menggunakan tekanan injeksi tinggi dan pada awal semprotan, droplet dibentuk dari ligamen-ligamen di tepi semprotan.

Prediksi penetrasi spray tip biodiesel dapat dilakukan menggunakan persamaan empirik dari Hiroyasu dan Arai [[2]] yang menjelaskan bahwa penetrasi bahan bakar terdiri dari dua tahap. Tahap pertama saat awal injeksi ( $t=0$ , *needle* mulai terbuka) dan berakhir saat liquid jet yang keluar dari nozzle mulai pecah ( $t=t_{break}$ ). Pada awal injeksi, jarak pergeseran *needle*, laju massa dan kecepatan bahan bakar sangat kecil serta jet break-up pertama terkadang tidak terjadi, persamaan (1). Sedangkan pada tahap kedua ( $t>t_{break}$ ), spray tip terdiri dari droplet dan kecepatan tip lebih rendah daripada tahap pertama. Spray tip akan penetrasi menuju gas karena timbul droplet baru yang berenergi lebih tinggi pada daerah wake. Semakin panjang penetrasi maka energi yang diperlukan droplet baru pada tip semakin kecil, persamaan (2)

$$0 < t < t_b \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$S = 0,39 \left( \frac{2\Delta p}{\rho_l} \right)^{0,5} t$$

$$t < t_b \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$S = 2,95 \left( \frac{\Delta p}{\rho_a} \right)^{0,25} (d_o t)^{0,5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{dimana, } t_b = 28,65 \frac{\rho_l d_o}{(\rho_a \Delta p)^{0,5}}$$

- $\Delta p$  : perbedaan tekanan injeksi (pascal)  
 $\rho_l$  : massa jenis liquid ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_a$  : massa jenis ambient ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $d_o$  : diameter nozzle (m)  
 $t$  : waktu (s)

Interaksi bahan bakar dengan udara melibatkan banyak parameter dan dapat disimulasikan untuk mendapatkan visualisasi yang akurat mengenai karakteristik semprotan secara mikroskopik atau maskroskopik. Binesh dan Hossainpour [[3]] 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 serupa dengan eksperimen, kontur kecepatan dalam ruang bakar berubah untuk setiap perubahan sudut poros engkol dan visualisasi membuktikan fasa *liquid* memiliki panjang penetrasi yang terbatas dan uap bahan bakar melanjutkan penetrasi tersebut.

Dan dkk [[4],[5]] melakukan penelitian secara numerik menggunakan program KIVA II dengan TAB sebagai metoda perhitungan breakup dan k- $\epsilon$  untuk pemodelan turbulen. Pengujian pertama menggunakan semprotan dengan tekanan injeksi rendah 16,2 Mpa dan pengujian selanjutnya pada tekanan injeksi tinggi, 77 Mpa. Hasil simulasi ini serupa dengan eksperimen dan yang membuktikan bahwa distribusi spatial droplet saat atomisasi lebih homogen jika tekanan injeksi tinggi. Perbandingan hasil eksperimen dan numerik dilakukan pula oleh Park dan Lee [[6]] untuk mempelajari struktur semprotan, penetrasi, SMD dan distribusi kecepatan dalam ruang bakar motor diesel. Ekperimen dilakukan dengan menggunakan Doppler Particle Analyzer dan untuk analisa proses atomisasi

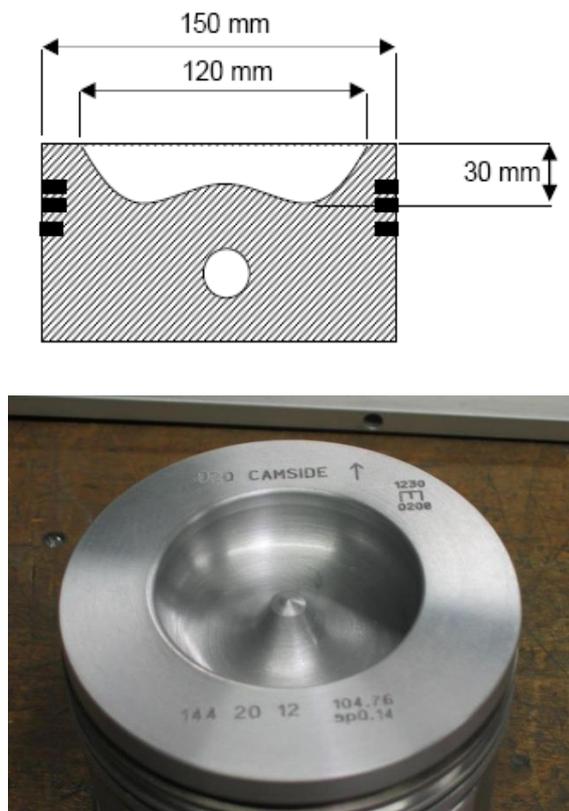
digunakan software KIVA-3 dengan TAB untuk pemodelan breakup. Pompa injeksi yang digunakan adalah tipe common rail dan tekanan injeksi yang digunakan 60 Mpa, 70 Mpa dan 80 Mpa. Melalui penelitian tersebut dibuktikan bahwa tekanan injeksi tinggi akan meningkatkan kecepatan droplet sekitar nozzle dan terus bertambah bersamaan dengan waktu injeksi. Tekanan injeksi tinggi akan menaikkan kecepatan droplet sekitar pusat nozzle dan menyebabkan spray tip semakin lancip. Distribusi SMD tetap pada arah aksial, dan distribusi menurun pada jarak yang lebih jauh dari center. SMD berkurang jika tekanan injeksi tinggi karena kecepatan relatif tinggi menciptakan drag tinggi antara droplet dan gas.

Interaksi semprotan yang terjadi dengan dinding saat semprotan mengenai kepala piston. Proses yang terjadi adalah terbentuk semprotan 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. Dalam hal ini faktor yang berperan 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. Bai dan Gosman [**Error! Reference source not found.**] menjelaskan tiga model tumbukan semprotan pada dinding yaitu model pertama, Stick dimana droplet bahan bakar mencapai dinding lokasi tumbukan dan selanjutnya menguap. Model kedua, Reflect dimana droplet yang menumbuk dinding dipantulkan dengan komponen kecepatan tangensial dan kecepatan normal tidak berubah tetapi komponen kecepatan normal memiliki arah berlawanan. Model ketiga, Jet diasumsikan bahwa droplet meninggalkan lokasi tumbukan secara tangensial terhadap permukaan menyerupai *liquid jet*. Alasan penggunaan analogi jet ini karena aliran didekat lokasi tumbukan mendekati aliran kontinyu yang mana dapat dianggap bersifat sebagai *liquid jet*. Karakteristik semprotan menumbuk dinding diklasifikasikan menurut beberapa regim yang kriterianya ditentukan oleh beberapa parameter tak berdimensi seperti Reynolds Number, Weber Number dan Sommerfeld Number saat menumbuk dinding

## METODOLOGI

Penelitian kali ini dilakukan menggunakan software FLUENT 6.2 pada submodel ruang bakar

Mexican Hat, gambar 1. Bahan bakar yang digunakan adalah biodiesel Minyak Goreng Bekas dengan densitas  $915,2 \text{ kg/m}^3$  (pada  $15^\circ\text{C}$ ), viskositas kinematik  $37,53 \text{ mm}^2/\text{s}$  (pada  $40^\circ\text{C}$ ) dan tegangan permukaan  $0,073 \text{ N/m}$ . Bahan bakar ini dipilih karena dapat mengalami *splash* saat tumbukan dan pemodelan turbulen menggunakan RNG k- $\epsilon$  karena dapat memprediksi struktur large-scale yang terbentuk oleh gerakan squish dan spray.



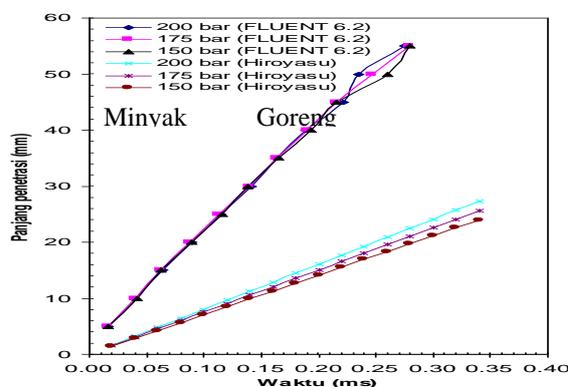
Gambar 1 Pemodelan ruang bakar tipe Mexican Hat

Biodiesel tersebut diinjeksikan menggunakan nozzle berdiameter 0,22 mm dengan laju massa biodiesel 5,9 gr/s, tekanan injeksi 150, 175 dan 200 bar pada ruang bakar berisi udara bertekanan 6 bar dalam durasi injeksi selama 0,5 ms. Sedangkan interaksi semprotan dengan dinding piston memiliki angka Weber 123, 136 dan 148 sehingga pemodelan *secondary breakup* menggunakan WAVE.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penetrasi biodiesel (gambar 3, 4 dan 5) merupakan parameter makroskopik untuk menunjukkan karakteristik sebuah semprotan dalam ruang bakar Mexican Hat. Proses ini diawali saat meninggalkan *nozzle*, biodiesel *film* mengalami *breakup* dan membentuk ligamen-ligamen hingga droplet. Metoda atomisasi tersebut dikenal dengan Linearized Instability Sheet Atomization (LISA) dan FLUENT 6.2 mensimulasikannya menggunakan Pressure-Swirl Atomizer. Evolusi penetrasi pada tekanan 150, 175 dan 200 bar (gambar 3, 4 dan 5) menunjukkan peningkatan penetrasi dalam durasi setelah awal injeksi (Start of Injection) dan awal tumbukan berjarak 58,4 mm dari nozzle tip terjadi pada 0,4 ms setelah SOI hingga membentuk regim spread atau splash.

Persamaan (1) dan (2) menegaskan bahwa sebelum *breakup*, panjang penetrasi dipengaruhi oleh perbedaan tekanan injeksi dan chamber, densitas biodiesel serta perubahan waktu. Sedangkan setelah *breakup*, panjang penetrasi hanya dipengaruhi oleh perbedaan tekanan injeksi dengan chamber dan densitas udara. Perbedaan kecepatan relatif antara droplet dan udara akan memberikan gaya aerodinamik yang menyebabkan momentum droplet berkurang dan terjadi *secondary breakup*.

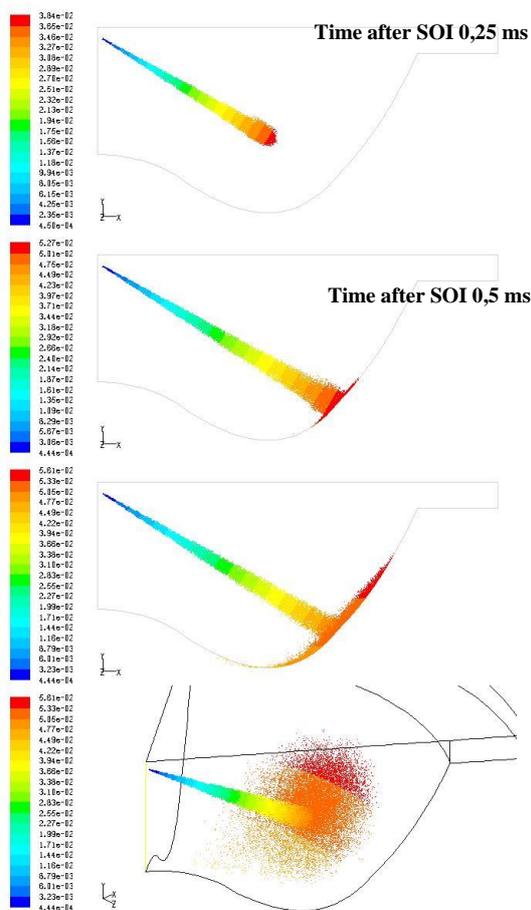


Gambar 2 Visualisasi penetrasi pada biodiesel MGB tekanan 150 bar

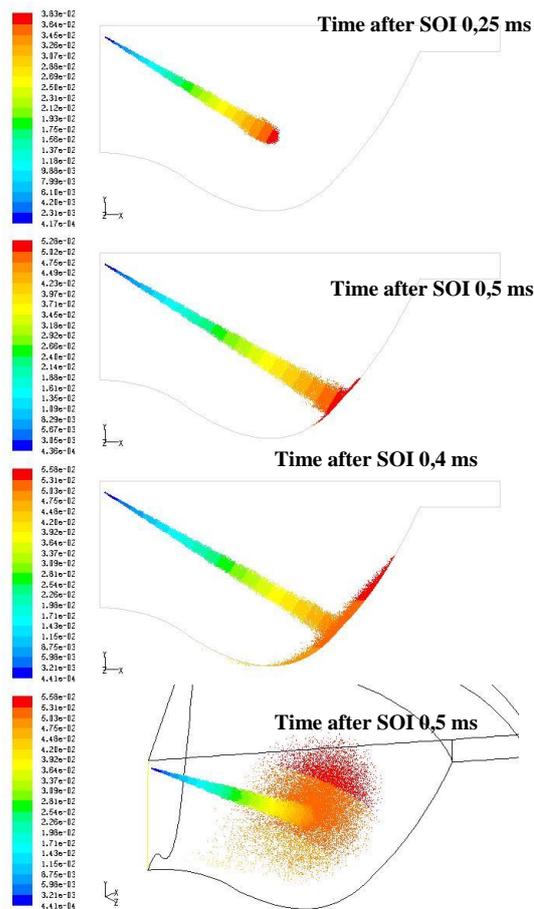
Oleh karena itu penetrasi biodiesel bertambah pada injeksi tekanan tinggi karena perbedaan tekanan antara chamber dan tekanan injeksi sangat tinggi menciptakan droplet berdiameter kecil dengan momentum lebih besar sehingga mampu mengatasi gaya aerodinamik yang ditimbulkan udara.

Gambar 2, Pemodelan semprotan biodiesel memiliki hasil yang serupa dengan persamaan (1) yaitu durasi penetrasi yang lama akan meningkatkan

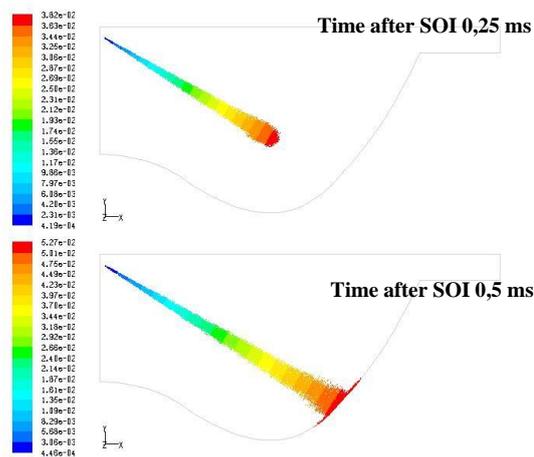
panjang penetrasi pada arah *downstream*. Sedangkan tekanan injeksi tinggi akan memperbesar sudut semprotan saat *primary breakup* dan meningkatkan panjang penetrasi karena droplet memiliki momentum lebih besar untuk mengatasi gaya aerodinamik. Berdasarkan persamaan (1) semprotan ini mengalami *breakup* pada 0,727 ms setelah SOI dengan panjang breakup 58,6 mm sedangkan hasil simulasi menjelaskan bahwa *breakup* telah terjadi saat semprotan berlangsung. Hal ini terjadi karena kecepatan biodiesel saat keluar dari nozzle selalu berubah sehingga memerlukan penelitian lebih lanjut untuk menentukan koefisiennya.

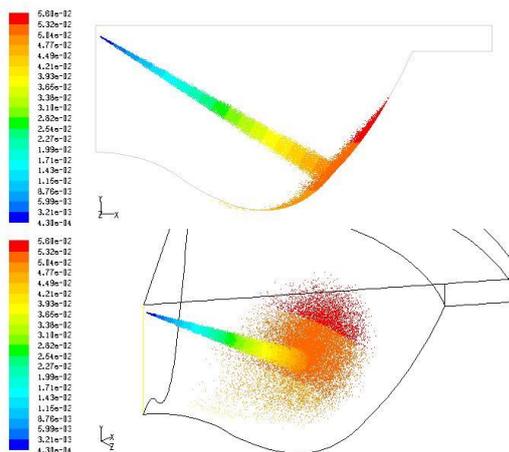


Gambar 3 Visualisasi penetrasi pada biodiesel MGB tekanan 150 bar



Gambar 4 Visualisasi penetrasi pada biodiesel MGB tekanan 175 bar





**Gambar 5 Visualisasi penetrasi pada biodiesel MGB tekanan 200 bar**

Biodiesel dengan tekanan injeksi 150 bar memerlukan 2,8 ms untuk penetrasi sejauh 55 mm pada arah axial sedangkan tekanan injeksi 200 bar dapat menempuhnya dengan waktu lebih singkat 2,76 ms (gambar 3 dan 5) Proses ini terjadi karena tekanan injeksi tinggi akan menambah momentum droplet untuk mengatasi gaya aerodinamik yang ditimbulkan udara.

## KESIMPULAN

Biodiesel merupakan sumber bahan bakar terbaik untuk mengurangi ketergantungan terhadap minyak bumi. Melalui proses esterifikasi dapat diproduksi biodiesel dengan propertis dan parameter injeksi yang menyerupai diesel fuel sehingga memiliki regim *splash* saat menumbuk kepala piston Mexican Hat. Pemodelan numerik pada submodel Mexican Hat memberikan hasil yang serupa dengan persamaan empirik yang dikembangkan Hiroyasu [2] dan membuktikan bahwa biodiesel Minyak Goreng Bekas memiliki penetrasi dan sudut yang meningkat

bersamaan dengan durasi setelah SOI serta tekanan injeksi optimum untuk menciptakan regim *splash* adalah 175 dan 200 bar. Sudut semprotan mengalami perubahan semakin bertambah seiring dengan meningkatnya tekanan injeksi, kemudian tekanan injeksi tinggi akan membentuk droplet berukuran kecil dengan momentum besar yang sanggup mengatasi gaya aerodinamik saat penetrasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bae, C. dan Kang, J., "Diesel Spray Characteristics of a Common-Rail VCO Nozzle Injector," pp57-66, Proc. Thermofluidynamic Processes in Diesel Engines (THIESEL), Valencia, 2007.
- [2] Hiroyasu, H. dan Arai, M., "Structures of fuel spray in diesel engines". SAE Paper No. 900475, 1990.
- [3] Binesh, A.R. dan Hossainpour, S., "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, 31 July 2008, hal. 207, 2008.
- [4] Dan, T., Takagishi, S., Senda, J. dan Fujimoto, H., "Organized Structure & Motion in Diesel Spray", SAE 970641, 1997.
- [5] Dan, T., Yamamoto, T., Senda, J. dan Fujimoto, H., "Effect of Ambient Gas Properties for Characteristics of Non-Reacting Diesel Spray", SAE paper offer No. 97P-52, 1997.
- [6] Park, S. W. dan Lee, C. S., "Macroscopic Structure and Atomization Characteristics of High-Speed Diesel Spray", International Journal of Automotive Technology, Vol. 4, hal. 157, 2003.
- [7] Bai, C. and Gosman, A. D., "Development of Methodology for Spray Impingement Simulation, SAE 950283, 1995.