

Simulasi Numerik Sistem Injeksi Bertingkat Pada Ruang Bakar Mesin Diesel Caterpillar 3406

Bambang Sudarmanta, Soeharto dan Sampurno

Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS

Kampus ITS, Jalan Arief Rahman Hakim Keputih-Sukolilo Surabaya, 60111

Telp.: (031) 5946230; Faks.: (031) 5922941; E-mail: sudarmanta@me.its.ac.id

Abstrak

Dilakukan simulasi numerik sistem injeksi single dan sistem injeksi 2-tingkat untuk pembentukan semprotan bebas, pembakaran semprotan bebas, dan pembakaran pada ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406. Hal ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana perbedaan karakteristik semprotan, pembakaran dan pembentukan emisi gas NO antar sistem injeksi single dan sistem injeksi 2-tingkat. Simulasi numerik dilakukan menggunakan software Fluent. Variasi sistem injeksi meliputi injeksi single dan injeksi 2-tingkat (25-75, 50-50, 75-25). Simulasi dilakukan pada 2 kondisi yaitu semprotan bebas dan pada ruang bakar Caterpillar 3406 engine. Pada semprotan bebas injeksi dimodelkan sebagai *discrete phased* dengan injektor *pressure-swirl-atomizer*.

Sedangkan injeksi untuk simulasi pembakaran pada semprotan bebas dan pada ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406 dimodelkan sama dengan injeksi semprotan bebas, tetapi temperatur udara pada *velocity inlet* diinisiasikan pada temperatur tinggi. Pada pembentukan emisi gas NO dimodelkan pada *thermal NO* dengan *reburn spesies*.

Hasil dari simulasi numerik dibedakan pada karakteristik semprotan, pembakaran dan pembentukan emisi NO. Panjang penetrasi pada injeksi 2-tingkat lebih panjang pada durasi yang sama dibanding dengan injeksi single dengan kenaikan 13,40%. Distribusi *Sauter Mean Diameter (SMD)* pada injeksi 2-tingkat juga lebih rendah 4,53% dibanding dengan injeksi single. Pada simulasi pembakaran semprotan bebas, injeksi 2-tingkat mengalami penurunan temperatur 77,19% dibanding injeksi single. Sehingga fraksi massa NO injeksi 2-tingkat juga menurun 5,90% dari injeksi single. Pada simulasi pembakaran di ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406, temperatur injeksi 2-tingkat mengalami penurunan 1,47% dari injeksi single. Sehingga fraksi massa NO juga mengalami penurunan sebesar 32,22% dari injeksi single.

Keywords: Injeksi single, Injeksi 2-tingkat, semprotan, pembakaran, pembentukan emisi.

Pendahuluan

Salah satu permasalahan pada pengoperasian mesin diesel adalah proses pembakaran mesin diesel yang terjadi serentak sehingga berpotensi menghasilkan gas NO. Untuk mengurangi emisi gas-gas polutan ini, diperlukan suatu *treatment* pada mesin diesel, dimana *treatment* bisa dilakukan sebelum pembakaran terjadi (*before combustion*), pada saat pembakaran terjadi (*on combustion*) dan setelah pembakaran terjadi (*after combustion*).

Treatment pada saat pembakaran terjadi salah satunya adalah pengontrolan semprotan pada *injection nozzle*. Pada kondisi standar, mesin diesel menggunakan sistem injeksi single dengan sekali semprotan bahan bakar. Injeksi bahan bakar ini bisa dimodifikasi menjadi sistem injeksi bertingkat sehubungan untuk mengurangi emisi gas buang terutama NO.

Reitz, et al. [1] melakukan eksperimen terhadap mesin diesel Caterpillar 3406 pada sistem injeksi single dan sistem injeksi bertingkat dengan variasi persentase total bahan bakar yang diinjeksikan dan variasi total durasi injeksi. Pada eksperimen tersebut didapatkan bahwa sistem injeksi bertingkat dapat mengurangi mekanisme pembentukan emisi NOx dan

soot pada ruang bakar selama durasi injeksi dan hasilnya hampir sama dengan durasi injeksi yang diperpendek.

Nehmer dan Reitz [2] juga melakukan eksperimen untuk mencari efek dari sistem injeksi bertingkat terhadap emisi soot dan NOx menggunakan mesin diesel Caterpillar silinder tunggal. Mereka memvariasikan jumlah total bahan bakar pada injeksi tahap pertama dari 10 persen sampai 75 persen dari jumlah total bahan bakar yang diinjeksikan. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa dengan injeksi bertingkat terjadi pengurangan emisi NOx dan soot.

Tow et al. [3] melanjutkan studi dari Nehmer dan Reitz [2] menggunakan mesin yang sama dan menyertakan *dwell time* yang berbeda-beda di antara tahap injeksi serta menambahkan sistem injeksi tiga tingkat pada eksperimennya. Mereka menemukan bahwa pada beban mesin yang tinggi (75%), partikulat dapat dikurangi oleh sistem injeksi tiga tingkat dengan tidak ada peningkatan emisi NOx yang terbentuk. Mereka juga menemukan bahwa sistem injeksi tiga tingkat juga dapat mengurangi emisi NOx dan soot pada beban ringan dan berat. Kesimpulan yang lain dari Tow et al. [3] adalah

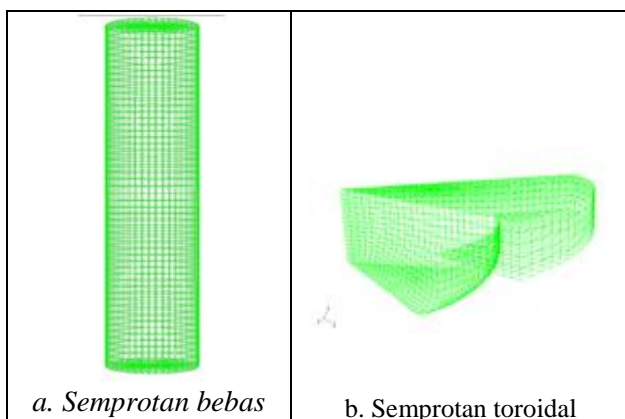
bahwa *dwell time* di antara tahap injeksi sangat penting untuk mengontrol pembentukan soot. *Dwell time* yang optimum dari eksperimen mereka pada sistem injeksi bertingkat didapatkan selama 10 derajat putaran engkol pada 75% beban dan 1600 put/menit pada kondisi kerja mesin eksperimennya.

Pada artikel ini, simulasi akan memvariasikan tingkat injeksi bahan bakar sehingga dapat diketahui bagaimana efeknya terhadap pembentukan semprotan, pembakaran dan pembentukan emisi terutama NO. Simulasi numerik menggunakan software Fluent dapat digunakan untuk mensimulasikan karakteristik semprotan bahan bakar, pembakaran dan pembentukan emisi polutan terutama NO.

Metoda Numerik

Pemodelan numerik didasarkan pada metodologi *FLUENT 6.3.26 code*. *FLUENT code* didasarkan pada pendekatan *finite volume* dimana *computational domain* dibagi kedalam kontrol volume melalui *computational mesh*. *Governing equations* untuk persamaan kontinuitas, momentum dan spesies kimia untuk gas dan semprotan droplet, bersama dengan persamaan keadaan dihitung untuk masing-masing *mesh cell*. Set persamaan yang dihasilkan, kemudian diselesaikan secara numerik untuk mendapatkan karakteristik semprotan makro berupa proses pengembangan, penetrasi, dan sudut penyebaran semprotan dan karakteristik semprotan mikro berupa diameter droplet rata-rata (*SMD*) dan kecepatan droplet, serta pembakaran dan pembentukan emisi.

1. **NUMERICAL GRID.** Numerical grid diimpor dari *GAMBIT 2.3.16 code* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Numeric Grid model geometri chamber

2. **INITIAL CONDITIONS.** Tekanan silinder, densitas spesies, *turbulent kinetic energy* diasumsikan uniform pada saat permulaan perhitungan. Rata-rata tekanan dan suhu didalam chamber pada permulaan perhitungan dikondisikan sebesar 1 bar dan 30 °C. Sedangkan *initial turbulent kinetic energy* diambil 1 m²/s².

3. **NUMERICAL MODELS.** Numerical Models *FLUENT code* yang digunakan dalam penelitian ini meliputi spray, viscous, solver, linearisasi dan diskret phase.

a. Spray Models

Pemodelan proses injeksi dimaksudkan sebagai proses atomisasi bahan bakar yang keluar dari injektor menuju chamber. Proses atomisasi menghasilkan semprotan *droplet* bahan bakar yang ditunjukkan oleh satu *set computational parcels*, masing-masing mengandung sejumlah droplet dengan properti yang sama (kecepatan, ukuran, suhu, densitas, dan lain-lain). Dalam penelitian ini, dimodelkan terjadi *droplet collision and break-up*. Model *wave break-up* ini digunakan untuk mensimulasikan proses *droplet break-up* akibat gaya aerodinamis yang terjadi pada kecepatan tinggi, yaitu $We > 100$ (Han dan Reitz, 1995; Sudarmanta et al, 2006).

b. Viscous Model

Pengaruh turbulensi dalam skala kecil dimodelkan secara tidak langsung dalam framework *Reynolds* rata-rata, menggunakan *RNG k-ε turbulence model* yang dihubungkan dengan dinding (Han dan Reitz, 1995). Model ini bekerja lebih baik ketika terjadi laju kenaikan tekanan yang tinggi dalam aliran, sehingga lebih sesuai dibandingkan dengan *k-ε standart model*.

c. Solver model

Solver model untuk menyelesaikan persamaan-persamaan numerik dengan menggunakan *Segregated solver*, yaitu *governing equation* diselesaikan secara berurutan (terpisah satu dengan lainnya).

d. Linierisasi model.

Persamaan non linier *governing equations* dilinierkan guna menghasilkan sistem persamaan untuk membuat *dependent variable* di setiap *computational cell*. Linearisasi model dilakukan secara *implicit* yaitu variabel yang tidak diketahui di setiap *computational cell*-nya dikalkulasi menggunakan persamaan yang menghubungkan harga variabel yang telah dan belum diketahui, yang letak selnya bersebelahan.

e. Discret phase model.

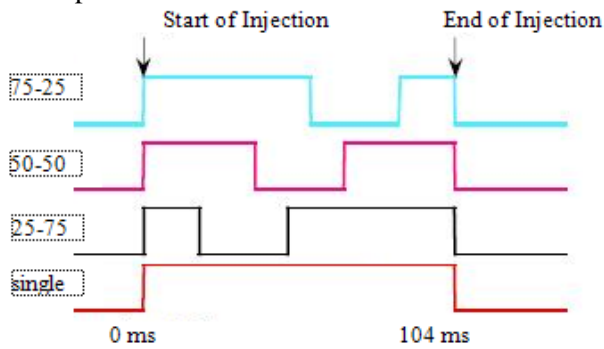
Dalam artikel ini disimulasikan fase diskrit berupa *droplet* yang mengalir dan terdispersi bersama fase kontinyu.

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Semprotan Bebas

Karakteristik semprotan bebas dengan simulasi CFD ini dilakukan pada tekanan injeksi 150 bar. Variabel yang divariasikan adalah durasi injeksi seperti yang terlihat pada Gambar 2. Pada hasil simulasi yang dibandingkan adalah: panjang penetrasi, dan *SMD*. Pada karakteristik semprotan bebas ini juga

disimulasi pembakaran untuk semprotan bebas. Skema dari injeksi single dan injeksi 2-tingkat dapat dilihat pada Gambar 2.

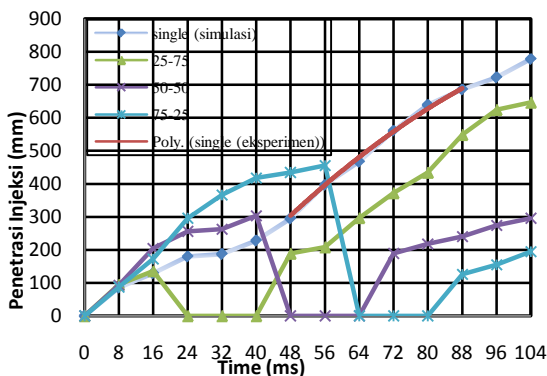


Gambar 2. Skema percobaan injeksi single dan 2-tingkat

Maksud dari injeksi 2-tingkat 75-25 seperti pada Gambar 4.1 adalah ketika durasi total injeksi 104 ms dipotong waktu jeda (*dwell time*) 24 ms, kemudian sisa durasi dibagi menjadi 2 yaitu 25% dan 75%. Hal tersebut juga berlaku untuk injeksi 2-tingkat 50-50 dan 25-75.

Penetrasi Semprotan

Variasi pada laju penetrasi semprotan disebabkan oleh proses atomisasi yang random dan ketidakraturan ujung semprotan karena turbulensi sehingga diperlukan pengukuran rata-rata panjang penetrasi. Pengaruh gaya gesekan udara pada semprotan bahan bakar menyebabkan ketidakraturan pada permukaan cairan yang pada awalnya masih teratur sehingga menghasilkan ligamen yang tidak stabil. Seiring dengan kenaikan kecepatan *jet*, ukuran ligamen yang terbentuk menjadi lebih kecil dan lebih cepat memisah (*collapse*) menjadi *droplet*.



Gambar3. Penetrasi injeksi pada $P_i = 150$ bar

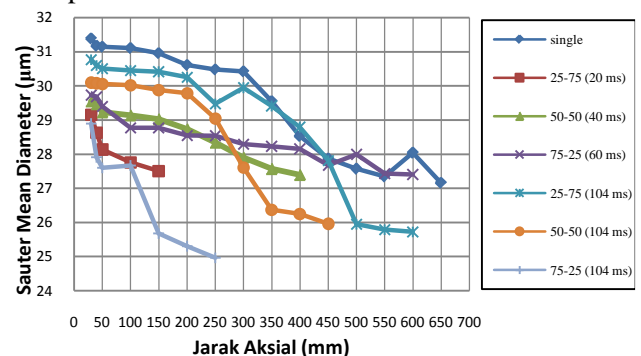
Pada injeksi 2-tingkat, injeksi bahan bakar solar diselesaikan dalam 2 tahap. Pada injeksi 2-tingkat 25-75, bahan bakar solar diinjeksikan pada tahap pertama dengan durasi 20 ms. Kemudian terdapat *dwell time* selama 24 ms, dilanjutkan pada tahap kedua yang diselesaikan selama 60 ms yang berakhir pada detik ke-104 ms. Sehingga penetrasi injeksi tahap kedua lebih panjang daripada tahap pertama seperti diperlihatkan oleh grafik penetrasi pada Gambar 3. Hasil penetrasi injeksi tahap kedua

pada 104 ms hampir sama dengan penetrasi injeksi single pada 80 ms. Hal ini dikarenakan adanya *dwell time* 24 ms antara injeksi tahap pertama dan kedua, jumlah sisa massa bahan bakar yang tertahan oleh *dwell time* diinjeksikan pada tahap kedua. Pada injeksi 50-50, panjang penetrasi antara injeksi pertama dan kedua hampir sama, akan tetapi pada hasil simulasinya lebih pendek pada penetrasi tahap kedua. Karena tekanan *ambient* pada injeksi tahap kedua sedikit lebih besar dibandingkan injeksi tahap pertama disebabkan oleh adanya *dwell time* yang memberikan kesempatan terhadap partikel-partikel bahan bakar hasil injeksi tahap pertama untuk menyebar. Sedangkan pada injeksi 2-tingkat 75-25, penetrasi dari injeksi tahap kedua pada waktu 104 ms ternyata lebih panjang daripada injeksi single pada 20 ms, meskipun durasi injeksinya adalah sama. Hal ini dikarenakan laju aliran massa pada injeksi 2-tingkat yang lebih besar dibandingkan injeksi single.

Sauter Mean Diameter

Sauter Mean Diameter (SMD) merupakan metode yang dipakai untuk menghitung diameter rata-rata *droplet*. Distribusi SMD hasil simulasi numerik ditunjukkan pada Gambar 4. Sesaat setelah keluar nozzle ($t=0$) *jet liquid* mempunyai diameter awal yang diasumsikan sama dengan diameter nozzle ($d_j = 0,55$ mm). *Jet* mengalami ketidakstabilan karena adanya gangguan. *Jet* kemudian berdeformasi menjadi *sheet* dan dilanjutkan dengan deformasi *sheet* menjadi ligamen. Pada akhirnya, ligamen akan mengalami *breakup* menjadi *droplet* yang berukuran lebih kecil. Disamping mengalami *breakup*, *droplet* juga dapat mengalami tumbukan (*collision*) antar *droplet* yang dapat menyebabkan pemecahan atau penggabungan *droplet*.

Pemecahan *droplet* menghasilkan *droplet* baru berukuran lebih kecil sedangkan penggabungan *droplet* menghasilkan *droplet* baru berukuran lebih besar. Pada jarak aksial 30–100 mm dari ujung nozzle, SMD menurun drastis. Pada jarak tersebut lebih didominasi oleh peristiwa *droplet breakup* menjadi *droplet* berukuran lebih kecil. Sedangkan pada jarak 100-700 mm, terjadi peristiwa *breakup* dan tumbukan *droplet* secara random sehingga dihasilkan SMD yang berfluktuasi, akan tetapi cenderung menurun meskipun tidak stabil.



Gambar 4. Distribusi SMD injeksi single dan 2-tingkat

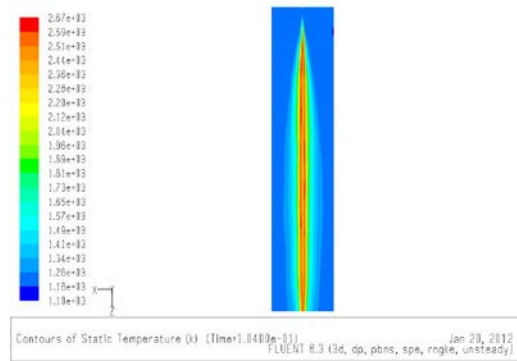
Menjelang akhir durasi injeksi, diameter partikel bahan bakar akan semakin mengecil, sehingga terlihat pada Gambar 4. akan terlihat menurun pada akhir injeksi. Fenomena tersebut terjadi baik pada injeksi single maupun pada injeksi 2-tingkat. Pada grafik tersebut juga ditunjukkan bahwa distribusi SMD partikel untuk injeksi 2-tingkat lebih rendah dibandingkan dengan injeksi 1-tingkat. Hal ini dikarenakan tekanan injeksi yang lebih besar menyebabkan kecepatan semprotan menjadi bertambah pula, sehingga atomisasi pun dapat menyebabkan diameter partikel menjadi lebih kecil.

Pembakaran pada semprotan bebas

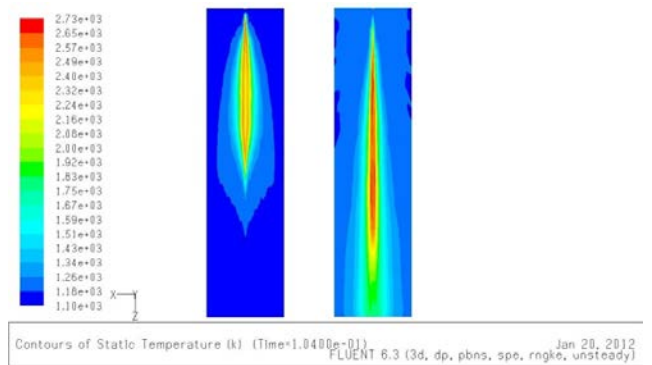
Pada proses pembakaran, bahan bakar diinjeksikan ke dalam udara panas bertemperatur 1200 K pada inisiasi. Kemudian dengan cepat partikel-partikel bahan bakar tersebut yang berada di tepi-tepi injeksi akan menguap. Setelah itu uap bahan bakar terbakar seketika setelah melalui rentang waktu tertentu, sehingga terjadi *autoignition*. Kenaikan temperatur akibat pembakaran uap bahan bakar di tepi-tepi injeksi ini juga akan menguapkan partikel-partikel bahan bakar selanjutnya ke arah titik pusat injeksi. Kemudian dengan rentang waktu tertentu pula akan terjadi *autoignition*. Hal ini berlanjut seterusnya ke arah titik pusat injeksi, sehingga pembakaran pun berlangsung secara kontinyu sampai semua partikel bahan bakar diharapkan dapat terbakar.

Gambar 5 s/d 8 menunjukkan bagaimana countur temperatur pada saat pembakaran itu terjadi pada injeksi single dan 2-tingkat. Guna menyebabkan terjadinya penguapan pada partikel bahan bakar, maka diperlukan panas dari udara di sekitar injeksi bahan bakar. Panas lapisan udara tipis yang digunakan untuk penguapan partikel-partikel bahan bakar di tepi injeksi menyebabkan temperatur lapisan udara yang menyelimuti injeksi menjadi lebih rendah. Lapisan udara tipis tersebut juga akan mengambil panas pada lapisan udara berikutnya dan seterusnya.

Pada Gambar 6 s/d 8 ditunjukkan bagaimana penetrasi injeksi dapat mempengaruhi kontur temperatur pembakaran. Semakin panjang penetrasi injeksi maka kontur temperatur yang tinggi akan semakin menyebar luas. Sementara itu, kontur temperatur pada injeksi tahap kedua terlihat lebih menyebar dari pada injeksi tahap pertama. Hal ini diakibatkan karena pembakaran pada waktu *dwel time* menyebabkan temperatur menjadi tinggi, sehingga bahan bakar yang diinjeksikan pada tahap kedua akan langsung terjadi penguapan kemudian dengan cepat terbakar.

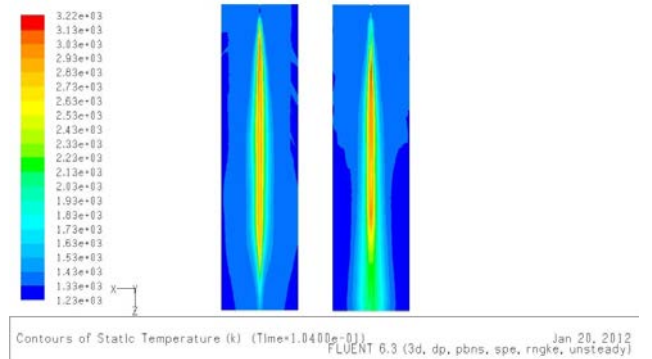


Gambar 5. Contour temperatur injeksi single pada 104 ms



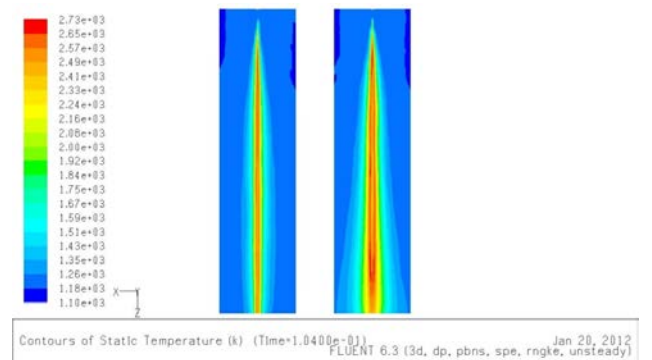
a. 20 ms b. 104 ms

Gambar 6. Contour temperatur injeksi 2-tingkat 25-75



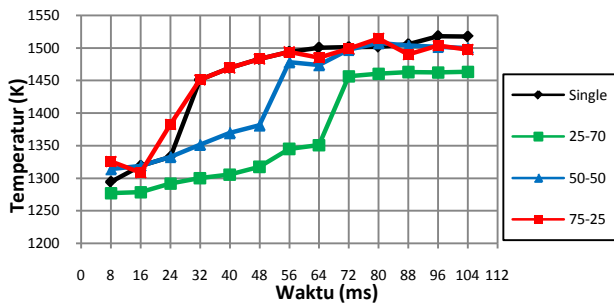
a. 20 ms b. 104 ms

Gambar 7. Contour temperatur injeksi 2-tingkat 50-50



a. 20 ms b. 104 ms

Gambar 8. Contour temperatur injeksi 2-tingkat 75-25



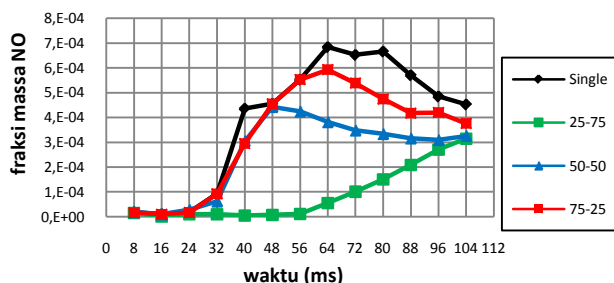
Gambar 9. Distribusi temperatur pembakaran semprotan bebas

Gambar 9 menunjukkan bahwa laju kenaikan temperatur berbanding lurus dengan bertambahnya waktu. Hal ini diakibatkan oleh laju kenaikan temperatur dipengaruhi oleh bertambahnya laju aliran massa dari bahan bakar solar yang diinjeksikan. Semakin banyak bahan bakar yang diinjeksikan maka akan semakin banyak pula pembakaran sporadis oleh terbakar sendirinya partikel (*autoignition*), sehingga menaikkan temperatur injeksi. Pada grafik tersebut terlihat, bahwa *dwel time* dapat menurunkan temperatur pembakaran sehingga pada laju kenaikan temperatur pada injeksi 2-tingkat lebih rendah dibandingkan injeksi single.

Emisi NO pada pembakaran semprotan bebas

Pada temperatur yang tinggi, NO biasanya terbentuk pada temperatur di atas 1600°C (2900°C), mekul nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) pada udara pembakaran saling memisahkan diri pada atomnya masing-masing dan berpartisipasi pada sebuah rangkaian pembakaran. Proses terjadinya emisi NO ini disebut juga sebagai *Thermal NO*.

Meskipun demikian, pada simulasi ini diinisiasikan temperatur pada 1200 K karena disesuaikan dengan properties bahan bakar yang digunakan. Akan tetapi pada hasil simulasi sudah terbentuk NO dengan fraksi massa yang sangat rendah. Sehingga terlihat bagaimana perbedaan laju emisi NO antara injeksi single dengan injeksi 2-tingkat. Distribusi fraksi massa NO dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Distribusi NO pada pembakaran semprotan bebas

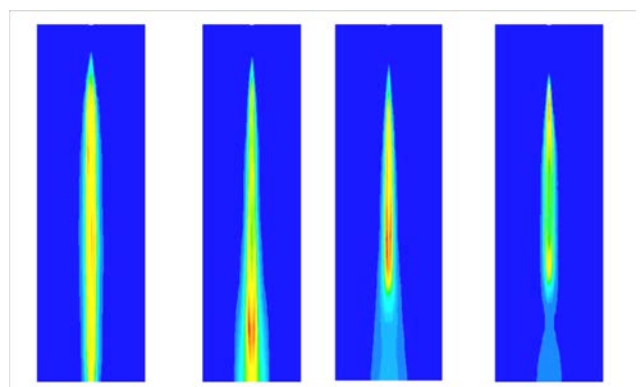
Berdasarkan Gambar 10 dapat dilihat bahwa pembakaran pada injeksi 1-tingkat memiliki nilai tertinggi. Laju kenaikan fraksi massa NO terendah terdapat pada injeksi 2-tingkat 25-75. Hal ini sesuai

dengan distribusi temperatur yang diperlihatkan oleh Gambar 6, dimana grafik distribusi temperatur fungsi waktu untuk injeksi 2-tingkat 25-75 adalah yang paling rendah diantara keempat grafik lainnya.

Dengan distribusi temperatur yang rendah menyebabkan terbentuknya emisi NO pun menjadi rendah. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya *dwel time* antara injeksi tahap pertama dan injeksi tahap kedua pada injeksi 2-tingkat. Adanya *dwel time* memberikan kesempatan kepada bahan bakar yang telah diinjeksikan pada injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna, sebelum kemudian diinjeksi bahan bakar pada tahap kedua. Sehingga tidak terjadi kenaikan temperatur secara signifikan pada waktu *dwel time* tersebut yang menyebabkan rendahnya emisi NO yang terbentuk. Seperti yang terjadi pada injeksi 2-tingkat 25-75 dan 50-50.

Hal ini berbeda dengan injeksi pada single yang berlangsung secara kontinu. Tidak adanya *dwel time* menyebabkan pembakaran berlangsung sangat singkat untuk setiap laju aliran massa bahan bakar. Sehingga kenaikan temperatur pun terjadi secara signifikan. Pada injeksi 2-tingkat 75-25, emisi NO yang terbentuk hampir mendekati pada injeksi single. Hal ini dikarenakan laju kenaikan temperatur pada injeksi 2-tingkat 75-25 hampir sama dengan injeksi single. *Dwel time* yang berlangsung selama 24 ms setelah 60 ms injeksi bahan bakar tahap pertama, tidak cukup untuk membakar sempurna semua partikel bahan bakar yang telah diinjeksikan sebelum kemudian injeksi tahap kedua dimulai. Kontur NO hasil simulasi pada injeksi single dan injeksi 2-tingkat diperlihatkan pada Gambar 8.

Pada Gambar 11, terlihat bahwa kontur fraksi massa NO terbesar terkonsentrasi pada pusat injeksi. Hal ini dikarenakan tingginya distribusi partikel bahan bakar pada pusat injeksi sehingga menyebabkan temperatur akibat pembakaran di sekitar daerah tersebut sangat tinggi. Juga terlihat bahwa nilai NO pada injeksi single memiliki nilai terbesar dari keempat tingkat injeksi. Sedangkan pada injeksi 2-tingkat emisi NO dengan konsentrasi fraksi massa tertinggi berada pada injeksi 2-tingkat 75-25, dan terendah pada injeksi 2-tingkat 25-75.



Gambar 11. Kontur NO pada injeksi single semprotan bebas

Simulasi pembakaran mesin diesel Caterpillar 3406

Simulasi CFD pada Fluent 6.3.26 dilakukan dengan domain ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406 dengan bentuk *mexican hat* yang dipotong 60° ke arah radial. Simulasi dilakukan pada 4 skema, yaitu injeksi single (single -10), injeksi 2-tingkat pada 75-8-25, 50-8-50, dan 25-8-75 dengan durasi injeksi total 3 ms selama 28° poros engkol.

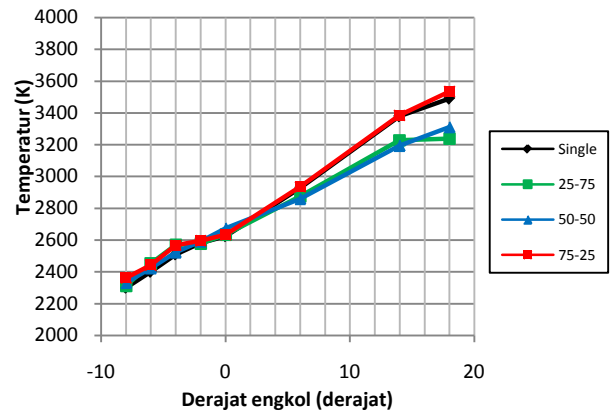
Sama seperti pembakaran pada semprotan bebas, kenaikan temperatur pada ruang bakar mengakibatkan penguapan pada partikel-partikel bahan bakar pada tepi-tepi injeksi. Selanjutnya terjadi *autoignition* yaitu terbakar sendirinya partikel-partikel bahan bakar di tepi injeksi yang kemudian memicu terjadinya penguapan pada partikel-partikel bahan bakar selanjutnya ke arah pusat injeksi. Penguapan dan pembakaran terus berlanjut secara beruntun sampai pada pusat injeksi.

Perbedaan antara pembakaran pada semprotan bebas dan pembakaran pada ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406 ini adalah bentuk ruang bakar, kondisi tekanan, kecepatan udara dan temperatur pada ruang bakar. Bahan bakar diinjeksikan selama 28° mulai dari 10° BTDC sampai pada 18° ATDC. pada waktu tertentu, partikel bahan bakar akan menumbuk dinding ruang bakar sehingga partikel-partikel tersebut akan berpecah membentuk suatu aliran swirl.

Peristiwa tumbukan tersebut sangat berguna untuk menyebarkan partikel-partikel bahan bakar sehingga diharapkan pembakaran tidak homogen. Tumbukan partikel-partikel bahan bakar pada dinding ruang bakar yang bertemperatur tinggi juga merupakan inisiasi terjadinya penguapan partikel bahan bakar secara cepat. Kemudian setelah rentang waktu tertentu uap bahan bakar akan terbakar. Pembakaran akan terus berlanjut sampai akhir injeksi karena lapisan uap bahan bakar akan terus terbentuk akibat tumbukan secara terus menerus. Sehingga menyebabkan terjadinya kenaikan temperatur ruang bakar akibat pembakaran dari awal injeksi sampai pada akhir pembakaran. Distribusi temperatur selama injeksi berlangsung ditunjukkan pada Gambar 12.

Berdasarkan Gambar 12 dapat diamati bahwa terjadi kenaikan temperatur secara signifikan terhadap derajat poros engkol yang terus naik juga. Naiknya temperatur yang semakin tinggi mengakibatkan partikel-partikel bahan bakar yang diinjeksikan semakin mudah untuk terbakar dengan cepat. Mengakibatkan kenaikan laju temperatur secara cepat, sehingga periode yang disebut sebagai

controlled combustion ini dapat berlangsung sampai akhir pada temperatur tertinggi siklus.

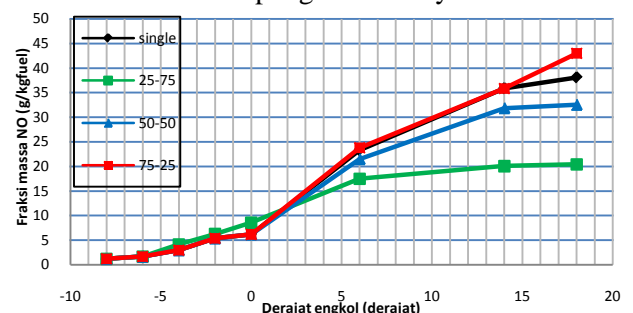


Gambar 12. Temperatur pembakaran hasil simulasi numerik

Pada Gambar 12 juga dapat diamati bahwa laju kenaikan dari injeksi 2-tingkat 25-75 adalah yang paling rendah dibandingkan yang lainnya. Sama seperti pada pembakaran semprotan bebas, *dwel time* setelah injeksi tahap pertama memberikan kesempatan yang cukup untuk bahan bakar dari injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna. Kenaikan temperatur selama *dwel time* ini juga dapat digunakan untuk menguapkan partikel-partikel bahan bakar pada injeksi tahap kedua yang kemudian akan langsung terbakar. *Visualisasi* Kenaikan temperatur per derajat engkol dapat diamati pada Lampiran.

Emisi NO pembakaran pada mesin diesel

Distribusi emisi NO hasil simulasi numerik pada pembakaran di ruang bakar Caterpillar 3406 engine dapat dilihat pada Gambar 13. Berdasarkan Gambar 13, dapat dilihat bahwa pembakaran pada injeksi 1-tingkat memiliki nilai tertinggi. Laju kenaikan fraksi massa NO terendah terdapat pada injeksi 2-tingkat 25-75. Hal ini sesuai dengan distribusi temperatur yang diperlihatkan oleh Gambar 12, dimana grafik distribusi temperatur fungsi waktu untuk injeksi 2-tingkat 25-75 adalah yang paling rendah diantara keempat grafik lainnya.

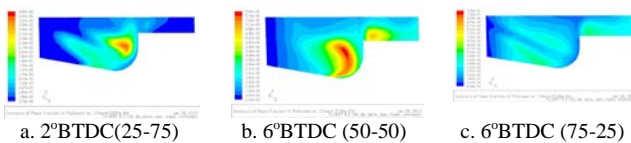


Gambar 13. Distribusi NO pada ruang bakar

Dengan distribusi temperatur yang rendah menyebabkan terbentuknya emisi NO pun menjadi rendah. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya *dwel time* antara injeksi tahap pertama dan injeksi tahap

kedua pada injeksi 2-tingkat. Adanya *dwell time* memberikan kesempatan kepada bahan bakar yang telah diinjeksikan pada injeksi tahap pertama untuk terbakar lebih sempurna, sebelum kemudian diinjeksi bahan bakar pada tahap kedua. Sehingga tidak terjadi kenaikan temperatur secara signifikan pada waktu *dwell time* tersebut yang menyebabkan rendahnya emisi NO yang terbentuk. Seperti yang terjadi pada injeksi 2-tingkat 25-75 dan 50-50.

Hal ini berbeda dengan injeksi pada single yang berlangsung secara kontinyu. Tidak adanya *dwell time* menyebabkan pembakaran berlangsung sangat singkat untuk setiap laju aliran massa bahan bakar. Sehingga kenaikan temperatur pun terjadi secara signifikan. Pada injeksi 2-tingkat 75-25, emisi NO yang terbentuk hampir mendekati pada injeksi single. Hal ini dikarenakan laju kenaikan temperatur pada injeksi 2-tingkat 75-25 hampir sama dengan injeksi single. *Dwell time* yang berlangsung selama 8° setelah 5° injeksi bahan bakar tahap pertama, tidak cukup untuk membakar sempurna semua partikel bahan bakar yang telah diinjeksikan sebelum kemudian injeksi tahap kedua dimulai. Formasi pembentukan NO pada *dwell time* ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Pembentukan NO di ruang bakar dg *dwell time*

Kesimpulan

Hasil dari simulasi numerik dibedakan pada karakteristik emisi semprotan, pembakaran dan pembentukan emisi NO. Panjang penetrasi pada injeksi 2-tingkat lebih panjang pada durasi yang sama dibandingkan dengan injeksi single dengan kenaikan 13,40%. Distribusi *Sauter Mean Diameter (SMD)* pada injeksi 2-tingkat juga lebih rendah 4,53% dibandingkan dengan injeksi single. Pada simulasi pembakaran semprotan bebas, injeksi 2-tingkat mengalami penurunan temperatur 77,19% dibandingkan injeksi single. Sehingga fraksi massa NO injeksi 2-tingkat juga menurun 5,90% dari injeksi single. Pada simulasi pembakaran di ruang bakar mesin diesel Caterpillar 3406, temperatur injeksi 2-tingkat mengalami penurunan 1,47% dari injeksi single. Sehingga fraksi massa NO juga mengalami penurunan sebesar 32,22% dari injeksi single.

Ucapan Terimakasih

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Dirjen DIKTI melalui LPPM ITS yang telah memberikan pendanaan

terhadap penelitian Strategis Nasional tahun 2012 yang berjudul “Pengembangan prototipe mesin biodiesel dengan ruang bakar toroidal dan sistem injeksi bertingkat untuk pengendalian konsumsi bahan bakar dan emisi NO_x”, dimana artikel ini merupakan bagian dari penelitian tersebut. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Ichwan Fatmahardi yang telah membantu penyelesaian penelitian ini.

Referensi

1. Han, Z., Uludogan, A., Hampson, G. J., & Reitz, R. D., *Mechanism of Soot and NO_x Emission Reduction Using Multiple-Injection in a Diesel Engine*, SAE Paper 960633, (1996)
2. Nehmer, D. A., & Reitz, R. D., *Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions*, SAE Paper 940668, (1994)
3. Tow, T., *Reducing Particulates and NO_x Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy Duty D.I. Diesel Engine*, SAE Paper 940897, (1994)
4. Borman G. L., & Ragland, K. W., *Combustion Engineering*. International Edition, WCB/McGraw Hill, Singapore, (1998)
5. Seneschall, J., *Automatic System For Visualization and Characterization of High Pressure Diesel Spray*. *Proceedings of PSFVIP-4 June 3-5, 2003, Chamonix, France*, (2003)
6. Payri, F., Benajes, J., Margot, X., & Gil, A., *CFD Modeling of The In-Cylinder Flow In Direct-Injection Diesel Engines*. Elsevier, (2003)
7. Stone, R., *Introduction to Internal Combustion Engine*, 3rd Edition, SAE Inc, Warrendale, Pa, USA, (1999)
8. Bartok, W., & Sarofim, A. F., *Fossil Fuel Combustion – A Source Book*, John Willey and Sons Inc, USA, (1989)
9. Bari, S., *Effect of Preheating of Crude Palm Oil (CPO) on Injection System, Performance and Emission of a Diesel Engine*, School of Mech. Eng., Universiti Sains Malaysia, Renewable Energy, Pergamon, 27 p.339-351, (2002)
10. Seang-wock, L., *Effect of diesel fuel characteristics on spray and combustion in a diesel engine*, JSAE Review, 23 p.407 – 414, (2002)