

INVESTIGASI ALIRAN FLUIDA PADA ELEMEN INJEKTOR BERBASIS PUSARAN UNTUK ENJIN ROKET CAIR

Arif Nur Hakim

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Pos El : arif.nurhakim@lapan.go.id

Abstrak

Investigasi terhadap aliran fluida pada elemen injektor telah dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran propelan untuk mengoptimalkan injektor mesin roket cair ECX1000H yang telah dikembangkan sebelumnya. Investigasi dilakukan dengan eksperimen terhadap kinerja 6 injektor berbasis pusaran untuk mengetahui pola pengkabutannya dan juga dengan simulasi CFD untuk menganalisa struktur aliran dalam elemen injektor. 3 injektor yang mempunyai sudut inlet (sudut terhadap arah nosel mesin) masing-masing 90°, 60°, 45° diuji untuk melihat pengaruh dari sudut inlet injektor oksidator terhadap kinerjanya dan 3 buah lagi dilakukan untuk melihat pengaruh sudut outlet injektor oksidator. Injektor ini mempunyai sudut outlet masing-masing 90°, 60°, 45° juga. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin kecil sudut inlet akan menyebabkan semakin kecil sudut sebaran oksidator dan semakin besar debitnya. Sudut 90° memberikan debit yang terkecil karena mempunyai kehilangan tekanan yang paling besar. Sementara, sudut outlet tidak memberikan pengaruh pada debit namun menyebabkan sebaran lebih besar pada sudut yang kecil. Pada aliran fuel, pola pengkabutan akan lebih bagus ketika jumlah lubang inlet injektor lebih banyak dan pendeknya jarak inlet ke outlet akan mempengaruhi tingkat pengkabutan dan homogenitas spray.

Kata kunci: mesin roket cair, injektor dua basis pusaran, karakteristik pengkabutan

Abstract

Investigation of fluid flow through the injector elements has been conducted to identify the flow characteristics of propellant flow to optimize the injector of liquid rocket engine, ECX1000H, previously developed. Investigation was carried out experimentally on the performance of 6 swirl injector to identify the spray pattern and also with CFD simulations to analyze the structure of the flow in the injector elements. 3 injectors with inlet angle (angle to the direction of the engine nozzle) 90°, 60°, 45°, respectively, have been tested to see the effect of the angle of the inlet to the oxidizer injector performance and 3 injectors with outlet angle of 90°, 60°, 45°, respectively, have been conducted to see the effect of oxidizer injector outlet angle. The test results showed that smaller angle of the inlet will distribute more oxidizer with narrow spread. 90° angle gives smallest mass flow rate because it has highest pressure loss. Meanwhile, the outlet angle does not give effect to the mass flow rate but cause greater spread in a small angle. In the flow of fuel, spray pattern will be great when the number of holes more injector inlet and the short distance to the inlet outlet will affect the level and homogeneity spray.

Keywords : liquid rocket engine, double base swirl injector, spray characteristic

1. PENDAHULUAN

Salah satu komponen yang menjadi kunci utama dalam pengembangan roket cair adalah injektor yang bertugas mensuplai oksidator dan fuel ke dalam ruang bakar. Injektor berfungsi sebagai alat untuk melakukan proses pengkabutan atau atomisasi propelan, yaitu proses untuk mengubah fuel dan oksidator menjadi droplet atau butiran sekecil-kecilnya yang sekaligus mencampurnya sebelum dilakukan pembakaran. Desain injektor yang optimal akan menghasilkan kinerja pembakaran yang baik, yang stabil dalam berbagai kondisi operasional. Injektor tersebut juga sekaligus akan membuat lingkungan yang pas buat dinding ruang bakar dan dinding injektor itu sendiri sehingga mampu bertahan pada kondisi tekanan dan termal yang tinggi. Desain yang baik juga menentukan apakah injektor tersebut mudah dibuat atau tidak.

Saat ini, berbagai konfigurasi injektor roket cair telah dikembangkan di berbagai negara maju untuk memperoleh injektor yang efisien dan mampu menghasilkan pembakaran yang stabil. Beberapa jenis injektor yang telah dikembangkan di berbagai negara di antaranya adalah injektor berbasis impinging stream, shower head stream dan injektor berbasis pusaran [1]. Pada umumnya negara barat menggunakan jenis impinging stream untuk roket cairnya sedangkan negara timur yang dipelopori oleh Rusia menggunakan tipe injektor berbasis pusaran. Tipe injektor impinging stream adalah tipe injektor yang menggunakan tabrakan antar semburan propelan untuk mempercepat terjadinya pengkabutan. Tipe impinging stream ini telah mengalami berbagai perkembangan seperti yang telah dipublikasikan oleh

Shin-Jae Kang et al. [2] yang meneliti karakteristik pengkabutan injektor tipe double impinging stream F-O-O-F. Selain itu, juga dipublikasikan evaluasi mengenai impinging stream vortex chamber concepts (ISVC) oleh Huu Trinh et al [3]. LAPAN sendiri telah merancang dan menguji injektor bertipe *impinging stream* untuk propelan asam nitrat – kerosen yang digunakan baik pada enjin ECX300H yang dirancang mampu menghasilkan gaya dorong maksimum 300 kgf, maupun pada enjin ECX1000H dengan gaya dorong maksimum 1000 kgf. Namun dari hasil pengujian enjin ECX300H, diketahui bahwa untuk menghasilkan gaya dorong maksimumnya diperlukan tekanan gas yang cukup tinggi [4], yang berarti efisiensi injektor dalam mensuplai propelan masih rendah. Kemudian, dalam pengembangan enjin dengan gaya dorong yang lebih tinggi, struktur injektor menjadi sangat penting karena akan mempengaruhi arsitektur injektor yang berpengaruh langsung pada jumlah dan distribusi lubang injektor. Model injektor yang telah dikembangkan seperti yang dapat dilihat pada gambar 1-1 sulit dikembangkan untuk enjin dengan gaya dorong di atas 2 tonf. Kesulitan-kesulitannya khususnya dalam distribusi orifis, karena keterbatasan ruang. Selain itu, distribusi aliran propelan sebelum orifis dipastikan tidak seragam sehingga debit yang keluar dari injektor pun tidak sama. Distribusi aliran yang tidak sama dapat menyebabkan ketidakstabilan pembakaran, yang dalam kasus terburuk akan menyebabkan vibrasi tekanan dan *heat transfer* yang sangat tinggi yang dapat menyebabkan kerusakan struktur enjin yang fatal [5].

Tipe injektor yang umum digunakan saat ini dibagi menjadi dua, yaitu impinging stream dan swirl [1]. Tipe impinging stream banyak dipengaruhi oleh diameter lubang injektor, sudut injektor, bentuk ujung injektor dan lain-lain. Sedangkan pada tipe swirl, parameter yang sering dijadikan acuan adalah kecepatan radial dan kecepatan aksial. Kecepatan ini dapat dibentuk oleh geometri dasar elemen injektor. Pola aliran yang berbasis pusaran (swirl) masih terus dikembangkan hingga saat ini, baik untuk propelan gas-cair [6][7][8] maupun untuk cair-cair [9][10], karena aliran ini memberikan pengkabutan yang bagus namun masih memiliki kelemahan cenderung tidak stabil ketika dilakukan kontrol aliran (throttling). Penelitian dasar elemen injektor berbasis pusaran yang menggunakan propelan cair-cair belum banyak dilakukan. Referensi tentang ini juga sangat sedikit. Injektor berbasis pusaran ini umumnya menggunakan kombinasi gas dan cair dengan pemanfaatan gas untuk menimbulkan pengkabutan propelan. Sedangkan untuk cair-cair umumnya menggunakan tipe impinging stream ataupun shower head. Namun dengan bertambahnya debit propelan, performa injeksi dan pengkabutan mengalami penurunan, sehingga perlu dirancang khusus, injektor yang mampu mengalirkan debit tinggi dan stabil dalam throttling.

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh database kinerja elemen injektor berdasarkan parameter tertentu dan memperoleh rancangan injektor yang mampu mengalirkan propelan dalam debit yang tinggi dan stabil pada saat throttling.



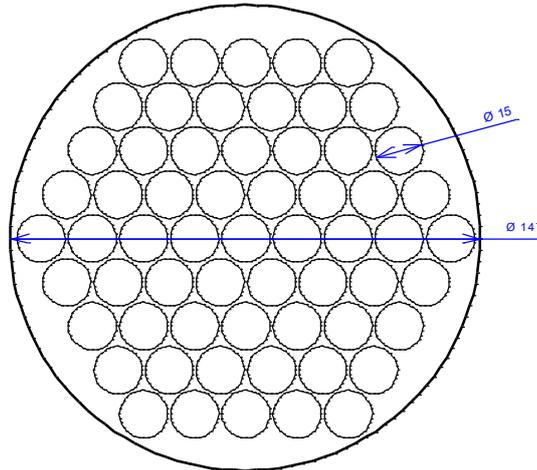
Gambar 1-1 Model injektor yang dikembangkan LAPAN; Injektor ECX300H (kiri), injektor ECX1000H (tengah) dan injektor ECX300H yang terpasang pada enjinnya.

2. METODOLOGI

2.1. Pendekatan Dengan Elemen Injektor

Dari hasil pengembangan injektor sebelumnya, dapat diketahui bahwa struktur injektor yang telah dikembangkan sulit untuk dilakukan peningkatan debit propelan. Dalam dimensi mesin ECX1000H, kluster injektor sulit diperbanyak lagi pada ruang yang ada. Sehingga perlu dikembangkan struktur baru injektor berbasis elemen yang mudah dicopot dan dipasang kembali. Distribusi elemen injektor pada mesin ECX1000H diilustrasikan seperti pada gambar 2-1. Selama ini injektor ECX1000H maksimum hanya mampu mengakomodasi paling banyak 38 kluster yang masing-masing terdiri dari 1 lubang fuel dan 3 lubang oksidator dan 15 kluster yang masing-masing terdiri dari 1 lubang fuel dan 2 lubang oksidator. Dengan struktur yang baru injektor mampu memberikan ruang pada 61 elemen injektor.

Untuk lebih mempermudah pemahaman karakteristik aliran injektor, fokus penelitian ini lebih ditujukan pada penelitian aliran dan karakteristik elemen injektor secara individual. Pada penelitian ini, tipe elemen injektor difokuskan pada tipe swirl karena mempunyai keunggulan pada mixing dan pengkabutan yang bagus, serta mempunyai pressure drop yang rendah. Penelitian akan difokuskan pada pengaruh perubahan sudut inlet elemen nosel dalam merubah kecepatan axial dan pengaruh perubahan jumlah inlet elemen nosel dalam menambah gaya centrifugal. Untuk mengatur sudut tabrakan antara oksidator dan fuel, akan dilakukan modifikasi ujung outlet elemen injektor. Selain itu, untuk mengetahui kinerja pengkabutannya, akan diteliti pengaruh lebar celah injektor terhadap pengkabutan.



Gambar 2-1 Distribusi elemen injektor pada mesin ECX1000H

2.2. PENGUJIAN DENGAN EKSPERIMEN

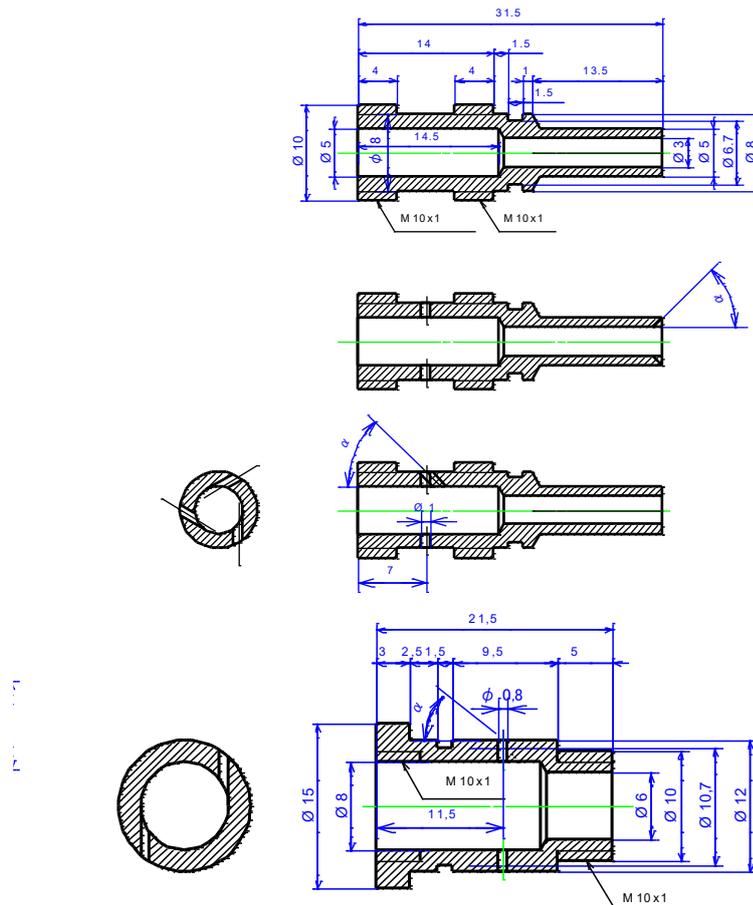
Hasil rancangan elemen injektor yang akan diuji ditunjukkan pada gambar 2-2. Elemen injektor terdiri dari 3 komponen, yaitu casing luar untuk fuel, casing dalam untuk oksidator dan cap penutup di bagian manifold. Lubang inlet injektor oksidator mempunyai diameter 1 mm sebanyak 3 buah, sedangkan untuk fuel ada dua jenis, yaitu elemen injektor dengan lubang berjumlah 2 dan diameter 0,8 mm dan elemen injektor dengan lubang berjumlah 3 dan diameter 1 mm. Total luas lubang injektor ini disesuaikan dengan total luas lubang cluster injektor yang telah digunakan sebelumnya, yaitu injektor tipe impinging stream dengan lubang oksidator 3 buah diameter 1 mm dan lubang fuel 1 buah diameter 1 mm.

Pada tahap awal, elemen injektor dibuat dengan variasi sudut inlet dan outlet oksidator. Masing-masing variasi sudutnya adalah 90° (tegak lurus terhadap arah nosel), 60° dan 45° . Injektor fuel dibuat satu macam dengan sudut inlet 90° . Ilustrasi injektor oksidator dan fuel dapat dilihat pada gambar 2-3. Elemen injektor yang telah terpasang padaudukan injektor yang siap diuji ditunjukkan pada gambar 2-4. Elemen injektor yang telah terpasang pada dudukannya kemudian dirangkai dengan skema seperti pada gambar 2-5. Sebagai oksidator dan fuel masing-masing digunakan air dan kerosen.

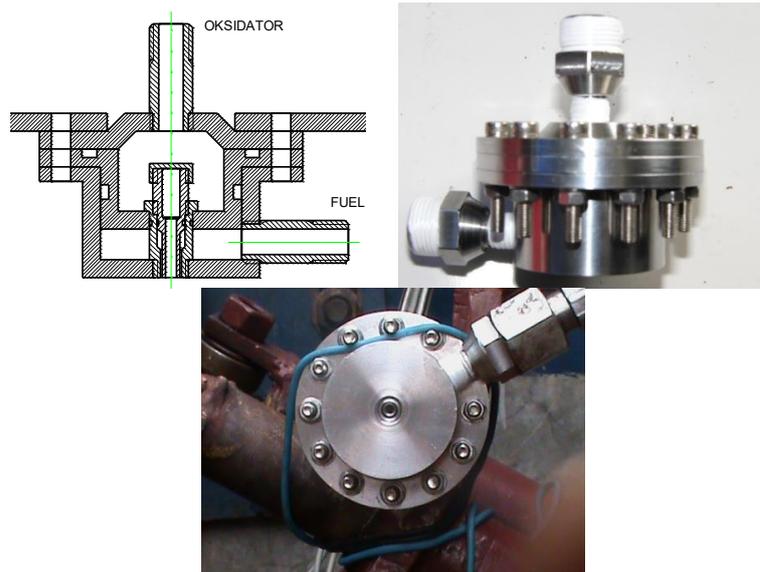
Propelan tersebut disuplai ke elemen injektor menggunakan gas nitrogen dengan tekanan 10 bar. Pengukuran debit dilakukan dengan mengukur volume fluida yang diinjeksikan dan waktu injeksi. Data visual diambil dengan high speed camera untuk mengetahui pola aliran propelan. Rangkuman konfigurasi elemen injektor yang diuji dapat dilihat pada tabel 2-1. Total elemen injektor yang telah diuji ada 6 buah.



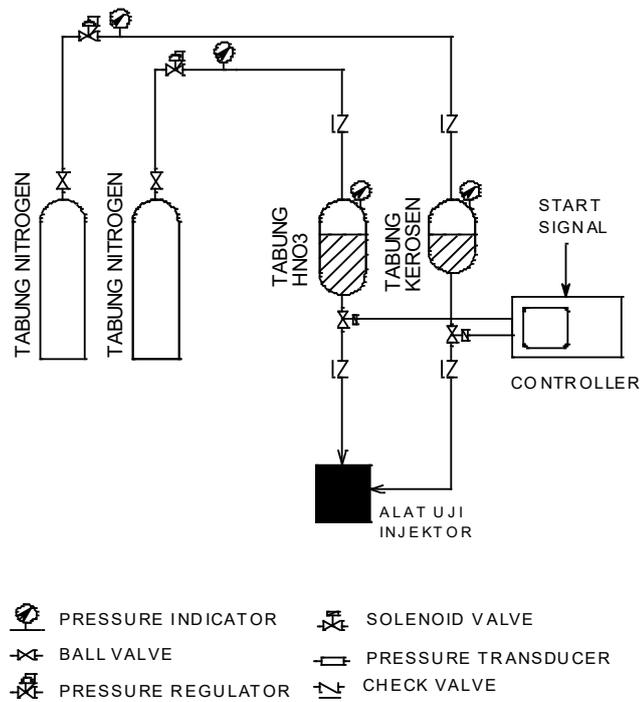
Gambar 2-2 Elemen injektor yang diuji (atas) dan komponen elemen injektor (bawah)



Gambar 2-3 Dimensi komponen elemen injektor oksidator (atas) dan fuel (bawah)



Gambar 2-4 Elemen injektor dalam keadaan terpasang



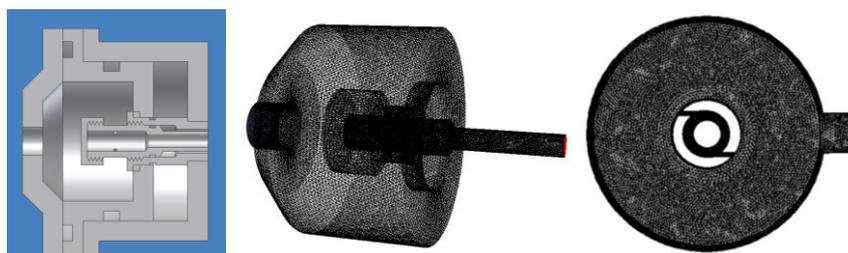
Gambar 2-5 Skema pengujian

Tabel 2-1 Konfigurasi elemen injektor

Nama Injektor	Sudut inlet		Sudut outlet	
	Fuel	Oksidator	Fuel	Oksidator
Injektor A	90°	90°	90°	90°
Injektor F	90°	60°	90°	90°
Injektor B	90°	45°	90°	90°
Injektor D	90°	90°	90°	90°
Injektor C	90°	90°	90°	60°
Injektor E	90°	90°	90°	45°

2.3. Analisa Aliran CFD

Simulasi aliran fluida dengan menggunakan perangkat lunak CFD dilakukan untuk mengetahui karakteristik aliran fluida di dalam elemen injektor, terutama pada karakteristik kecepatan dan pusaran pada outlet injektor maupun pada penampang tengah. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software fluent yang umum digunakan dan cukup populer untuk menganalisa karakteristik fluida. Simulasi dilakukan dengan pemodelan 3 dimensi aliran dengan didasarkan pada geometri alat uji dan injektornya. Model alat uji 3 dimensi dan meshingnya ditunjukkan pada gambar 2-6. Simulasi dilakukan pada kasus injeksi oksidator dengan 6 model injektor dan injeksi fuel dengan satu konfigurasi. 3 injektor mempunyai konfigurasi sudut inlet masing-masing 90, 60 dan 45 derajat. 3 injektor lainnya mempunyai konfigurasi sudut outlet masing-masing juga 90, 60 dan 45 derajat. Simulasi menggunakan fluida asam nitrat 100 persen dengan masukan aliran massa 0,104 kg/detik dan tekanan awal dan suhu masing masing sebesar 10 bar dan 300 K. Propelan cair diasumsikan memenuhi seluruh ruang yang ada di model uji dan tidak terdapat gas di dalamnya.



Gambar 2-6 Geometri dan meshing elemen injektor; Meshing

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji pengkabutan dilakukan untuk mengetahui kinerja elemen injektor. Parameter yang ingin diketahui dalam uji pengkabutan yang utama adalah tingkat pengkabutan itu sendiri dan sebaran fluida yang diinjeksi. Tingkat pengkabutan biasanya diukur dari besar kecilnya ukuran droplet propelan yang diinjeksi. Semakin kecil ukuran droplet yang diinjeksi, semakin bagus tingkat pengkabutannya sehingga semakin mudah terjadinya reaksi antara oksidator dan fuel. Selain ukuran droplet, sebaran fluida juga sangat berpengaruh karena akan menentukan apakah akan terjadi percampuran fuel oksidator yang bagus atau tidak. Sebaran fluida, baik fuel maupun oksidator, yang tepat akan menghasilkan mixing yang bagus sehingga terjadi pembakaran yang bagus. Selain itu, sebaran fluida dapat dirancang sedemikian rupa sehingga percampuran dan pembakaran terjadi di daerah yang tidak terlalu dekat dengan permukaan injektor untuk mengurangi terjadinya kerusakan material injektor akibat panas yang diterima langsung dari pembakaran.

Gambar 3-1 menunjukkan hasil pengkabutan dari tiga injektor oksidator dengan variabel sudut outlet injektor sebesar 90°, 60°, 45°. Dari gambar tersebut terlihat tingkat pengkabutan ketiga injektor tersebut cukup bagus dibanding dengan pengkabutan model impinging stream yang dilakukan sebelumnya. Dari pengukuran sudut pada gambar tersebut, dapat diketahui sudut bukaan pancaran injeksi terbesar diperoleh pada injektor dengan sudut outlet 45° yaitu sebesar 83°, disusul berturut turut oleh injector dengan sudut outlet sebesar 60° dan 90°, dengan sudut bukaan pancaran masing-masing sebesar 78° dan 73°. Di satu sisi dari pengukuran debit diperoleh angka 0,072 liter/detik, 0,080 liter/detik dan 0,74 liter/detik untuk sudut outlet 90°, 60°, 45°. Angka-angka tersebut diambil dari satu sampling dan terlihat tidak beraturan. Sehingga sulit diambil satu kesimpulan tanpa menambah lebih banyak lagi sampling untuk pengukuran masing-masing sudut. Secara teori, bukaan sudut di outlet injektor hanya akan berpengaruh pada sudut bukaan pancarannya saja, tidak berpengaruh pada debit karena lubang inlet dan tekanan pengumpannya tetap. Seperti ditunjukkan pada gambar 2-3, semakin kecil sudut outlet akan mengurangi panjang bagian silinder dan permukaan geseknya sehingga akan mengurangi pressure drop dan meningkatkan debit fluida. Namun, perubahan panjangnya kecil sehingga perbedaan debitnya juga tidak signifikan, dan tidak dapat disimpulkan bahwa perbedaan sudut outlet pada elemen-elemen tersebut mempengaruhi debit propelan. Secara umum, dari foto masih

tampak pengkabutannya masih belum merata dengan terlihatnya perbedaan warna yang dibatasi oleh garis garis. Ini diperkirakan disebabkan oleh ketidakpresisian dari manufakturnya.

Gambar 3-2 menunjukkan foto hasil pengujian pada injektor oksidator dengan variabel sudut inlet 90° , 60° , 45° . Dari foto tersebut dapat diukur sudut pancaran yang dihasilkan masing-masing sebesar 77° , 72° , 67° dan dari pengukuran debit dapat diketahui masing-masing mengeluarkan debit 0,067 liter per detik, 0,085 liter per detik dan 0,095 liter per detik. Semakin besar sudut inlet, semakin besar sudut pancaran fluida yang diinjeksikan, namun semakin kecil debit yang dihasilkan. Mengecilnya sudut pancaran ketika sudut inlet mengecil disebabkan karena adanya komponen gaya dorong ke arah axial akibat semburan dari inlet. Kecilnya sudut ini sekaligus mengurangi kerugian tekanan sehingga debit propelannya akan meningkat. Debit yang terkecil diperoleh ketika sudut inlet injektor oksidator sebesar 90° .

Gambar 3-3 menunjukkan kondisi pengkabutan fuel dengan injektor yang mempunyai sudut inlet dan sudut outlet 90° . Sebelah kiri adalah injektor yang mempunyai 3 lubang inlet dengan diameter 1 mm, sedangkan gambar sebelah kanan injektor dengan 2 lubang inlet berdiameter 0,8 mm. Dibanding dengan injektor dengan 3 lubang inlet, injektor dengan 2 lubang inlet mempunyai performa yang buruk, sudut bukaan tidak beraturan dan pengkabutannya jelek. Buruknya performa ini dikarenakan fluida yang mengalir sangat kecil sehingga tidak rata menutupi seluruh dinding yang berakibat pada saat keluar dari outlet, fluida tidak merata dan tidak mempunyai kecepatan axial yang cukup.



Gambar 3-1 Pancaran oksidator dengan variabel sudut outlet 90° , 60° , 45° menghasilkan sudut bukaan pancaran masing-masing 76° , 78° , 83°



Gambar 3-2 Pancaran oksidator dengan variabel sudut inlet 90° , 60° , 45° menghasilkan sudut bukaan pancaran masing-masing 77° , 72° , 67°



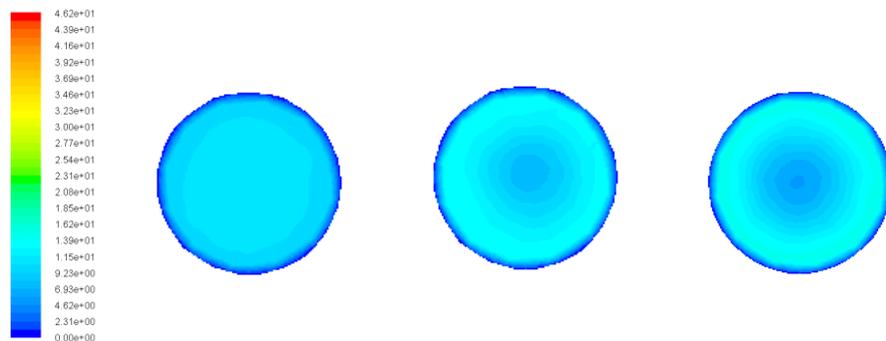
Gambar 3-3 Pengkabutan fuel

Dibanding dengan injeksi oksidator, sudut bukaan pancaran fuel lebih besar, yakni sebesar 110° (gambar kiri). Besarnya sudut bukaan ini disebabkan karena sudut inlet injektor dan pendeknya jarak antara inlet dan outlet injektor yang menyebabkan kecepatan ke arah radial tidak banyak berkurang. Untuk lebih memastikan hal ini, perlu dilakukan pengujian dengan variabel jarak outlet dan inlet. Yang jelas sudut pancaran fuel akan lebih bagus jika lebih besar dari sudut pancaran oksidator karena akan menyebabkan terjadinya percampuran yang lebih intens lagi. Hasil pengukuran sudut dan debit dari keenam injektor ini dirangkum pada tabel 3-1.

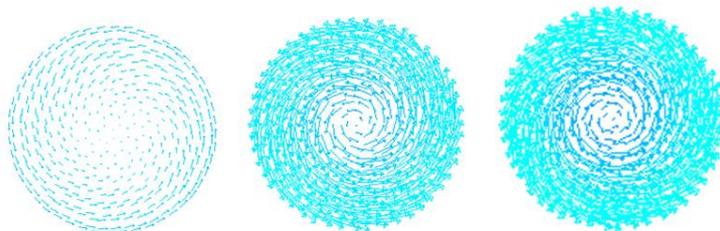
Tabel 3-1 Sudut pancaran dan debit hasil pengujian

Nama Injektor	Oksidator			Fuel	
	Sudut inlet	Sudut outlet	Sudut pancaran	DEBIT (liter/detik)	DEBIT (liter/detik)
Injektor A	90°	90°	77°	0,067	0,061
Injektor F	60°	90°	72°	0,083	0,061
Injektor B	45°	90°	67°	0,095	0,065
Injektor D	90°	90°	76°	0,072	0,065
Injektor C	90°	60°	78°	0,080	0,065
Injektor E	90°	45°	83°	0,074	0,050

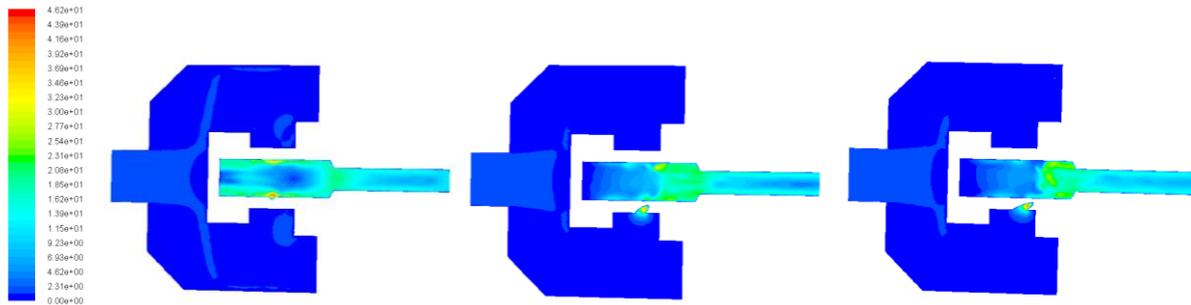
Gambar 3-4 menunjukkan kontur kecepatan pada outlet injektor untuk kasus sudut inlet 90° , 60° , 45° . Tampak bahwa semakin kecil sudut inlet, kecepatan pada daerah pinggiran semakin besar, sedangkan kecepatan pada daerah tengah outlet semakin kecil. Besarnya sudut menyebabkan perputaran aliran lebih kencang (gambar 3-5). Di satu sisi, kecepatan aliran ke arah axial tampak semakin membesar ketika sudut mengecil. Sedangkan untuk kasus 90° derajat, aliran di downstream juga cukup besar karena sudut tersebut juga menyebabkan fluida mengalir ke arah downstream seperti yang ditunjukkan pada gambar 3-6.



Gambar 3-4 Kontur kecepatan outlet elemen injektor pada kasus sudut inlet 90° , 60° , 45°

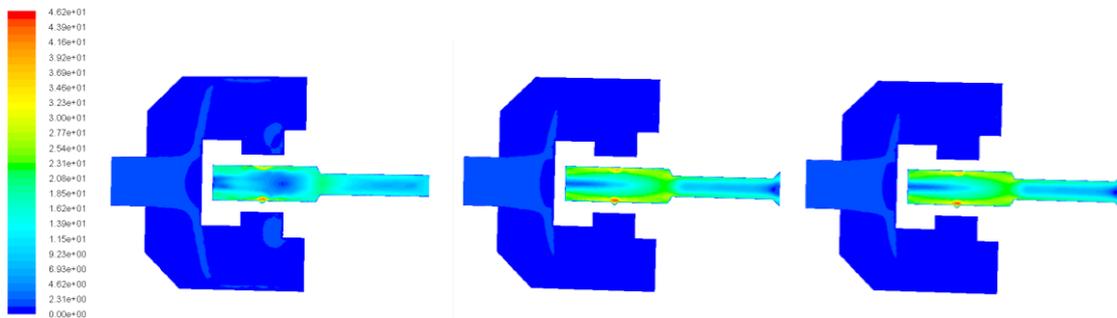


Gambar 3-5 Vektor kecepatan outlet elemen injektor pada kasus sudut inlet 90° , 60° , 45°



Gambar 3-6 Kontur kecepatan pada penampang tengah elemen injector pada kasus sudut inlet 90°, 60°, 45°

Seperti dijelaskan sebelumnya, hasil eksperimen menunjukkan kecenderungan peningkatan sudut pancaran fluida ketika sudut outletnya mengecil, namun debit alirannya tidak menunjukkan hal yang sama. Debit aliran terlihat acak dan perlu dilakukan penambahan sampel data untuk memastikan kecenderungannya. Namun pola aliran dalam elemen injektor tersebut dapat pula dilihat dari simulasi CFD seperti yang ditunjukkan pada gambar 3-7. Pada gambar tersebut ditunjukkan kontur kecepatan pada outlet elemen injektor pada kasus sudut outlet 90°, 60°, 45°. Dari hasil simulasi tersebut dapat diketahui bahwa terjadi separasi aliran pada sudut 60°, 45°. Pada exit injektor aliran fluida sudah terlepas dari permukaan dindingnya sehingga sulit dikatakan ada pengaruh sudut bukaan terhadap penyebaran dan pengkabutan propelan. Namun, terlihat aliran lebih mengembang ke arah radial pada sudut 45°. Ini dikarenakan pada sudut tersebut silinder lebih pendek dan gesekan permukaan lebih rendah sehingga kecepatan radial fluida lebih besar pada posisi sudut outlet mulai membuka, yang akhirnya menyebabkan sudut bukaan pancaran menjadi lebih besar. Lebih lanjut perlu diinvestigasi lagi pola aliran pada sudut yang lebih optimal, yaitu sudut outlet sebelum terjadinya separasi aliran.



Gambar 3-7 Kontur kecepatan pada penampang tengah elemen injector pada kasus sudut outlet 90°, 60°, 45°

4. KESIMPULAN

Uji pengkabutan telah dilakukan terhadap 6 injektor untuk melihat pola pengkabutan dan debit masing-masing. Pengujian dilakukan pada 6 injektor, yang terdiri dari 3 buah injektor dengan sudut inlet masing-masing 45°, 60° dan 90° dan 3 buah injektor yang mempunyai sudut outlet masing-masing 45°, 60° dan 90°. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin kecil sudut inlet akan menyebabkan semakin kecil sudut sebaran oksidator dan semakin besar debitnya. Sudut 90° memberikan debit yang terkecil karena mempunyai kehilangan tekanan yang paling besar. Sementara, sudut outlet tidak memberikan pengaruh pada debit namun sudut sebaran lebih besar pada sudut yang lebih kecil. Pada sudut outlet 45° dan 60° terjadi separasi aliran sehingga tidak bisa disimpulkan ada pengaruh langsung sudut outlet terhadap aliran. Meningkatnya sudut sebaran lebih dikarenakan kecepatan fluida lebih besar pada saat sudut outlet membuka. Pada aliran fuel, pola pengkabutan akan lebih bagus ketika jumlah lubang inlet injektor lebih banyak dan pendeknya jarak inlet ke outlet akan mempengaruhi tingkat

pengkabutan dan homogenitas spray. Perlu dilakukan investigasi lagi khususnya pada sudut outlet yang optimal sebelum terjadi separasi aliran.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Gill, G. S., Nurick, W. H., *Liquid Rocket Engine Injectors*, NASA Technical Report, NASA. 1976.
- 2) Shin-Jae Kang, Byung-Joon Rho, Je-Ha Oh, Ki-Chul Kwon, *Atomization Characteristics of a Double Impinging F-O-O-F Type Injector with Four Streams for Liquid Rockets*, KSME International Journal, Volume 14, Issue 4, 2000. pp 466-476
- 3) Huu Trinh, Charles Kopicz, Brad Bullard, Scott Michaels, *Evaluation of Impinging Stream Vortex Chamber Concepts for Liquid Rocket Engine Applications*, 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2003-446. 2003.
- 4) Arif Nur Hakim, *Analisis Propulsi Enjin Roket Cair ECX300H dengan Storable Propellant Asam Nitrat dan Kerosen*, Prosiding SIPTEKGAN XV. 2011
- 5) Huzel, D. K., *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines (Progress in Astronautics and Aeronautics)*, AIAA. 1992.
- 6) Chae Hoon Sohna, I-Sun Parka, Seong-Ku Kimb, Hong Jip Kimb, *Acoustic Tuning of Gas-Liquid Scheme Injectors for Acoustic Damping in a Combustion Chamber of a Liquid Rocket Engine*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 304, 1997. pp. 793-810
- 7) S. Soller, R. Wagner and H.-P. Kau, P. Martin and C. Maeding, *Characterisation of Main Chamber Injectors for GOX/Kerosene in a Single Element Rocket Combustor*, AIAA paper 2005-3750. 2005.
- 8) Christopher Greene, Roger Woodward, Sibtosha Pal, and Robert Santoro, *Design and Study of a LOX/GH2 Throttleable Swirl Injector for Rocket Applications*, 38th JANNAF Combustion Subcommittee Meeting; Volume 1; 479-492. 2002.
- 9) K. Ghorbanian, M. Ashjaee, M. R. Soltani, M. H. Mesbahi, M. R. Morad, *Experimental study of the spray of a liquid-liquid coaxial swirl injector for different injection pressures*, 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2003, Sorrento, Italy. 2003.
- 10) Sunghyuk Kim, Jungsoo Yoon, Youngbin Yoon, *Experimental Study on the Internal Flow Characteristics for Recess Length in a Swirl Coaxial Injector*, 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA 2010-6812. 2010.