

INVESTIGASI NUMERIK DAN PENINGKATAN KINERJA ELEMEN INJEKTOR ENJIN ROKET CAIR ECX1000H2-2

NUMERICAL INVESTIGATION AND IMPROVEMENT OF INJECTOR ELEMENT OF LIQUID ROCKET ENGINE ECX1000H2-2

Arif Nur Hakim

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
arif.nurhakim@lapan.go.id

Abstrak

Untuk memecahkan persoalan rendahnya kinerja mesin roket cair ECX1000H2-2 yang hanya menghasilkan 67% dari desainnya, investigasi secara numerik telah dilakukan terhadap elemen injektor oksidator dari injektor IJ-KH-1T-2-2 yang digunakan pada mesin tersebut. Elemen injektor mempunyai diameter lubang *outlet* 1 mm dengan sudut 40 derajat terhadap arah *thrust* mesin. Simulasi 3 dimensi *incompressible flow* menggunakan model turbulen k-epsilon dilakukan terhadap 2 konfigurasi elemen injektor, yaitu elemen 1 (elemen saat ini) dan elemen 2 (elemen perbaikan) dengan fluida menggunakan asam nitrat. Perbedaan tekanan antara *manifold* elemen dan *exit* lubang *outlet* adalah 30 atm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa konfigurasi elemen 1 menyebabkan terjadinya zona resirkulasi dan kecepatan rendah sehingga menyebabkan aliran massa asam nitrat pada elemen 1 75,3 % lebih rendah dari nilai teoritisnya, atau sekitar 0,0569 kg/detik. Dengan kata lain, *Coefficient of Discharge* (Cd) elemen ini adalah 0,753. Perbaikan bentuk elemen menyebabkan zona resirkulasi dapat diperkecil pada elemen 2, sehingga kecepatan aliran massanya meningkat 12 % menjadi 0,637 kg/detik, dengan Cd 0,843.

Kata kunci: CFD, Elemen Injektor, *Coefficient of Discharge*.

Abstract

To solve a problem related to low performance of liquid rocket engine which produced only 67% of its design, ECX1000H2-2, numerical investigation has been done to the oxidizer injector element of injector IJ-KH-1T-2-2 of the engine. The injector element has outlet holes diameter of 1 mm with angle of 40 degree to the direction of engine thrust. 3 dimensional incompressible flow simulation using turbulent model k-epsilon has been performed on 2 configuration of injector element, element 1 (existing element) and element 2 (improved element) using nitric acid as oxidizer fluid. The pressure difference between the element manifold and the exit of outlet hole is 30 atm. The simulation results show that the configuration of element 1 causes the occurrence of recirculation and low speed zone, which is causing the mass flow of nitric acid in element 1 75.3% lower than the theoretical value, about 0.0569 kg/sec. In other words, the *Coefficient of Discharge* (Cd) of this element is 0.753. Improvement of element configuration reduced the recirculation zone in element 2 and increased mass flow rate by 12% to 0.637 kg/sec, with Cd 0.843.

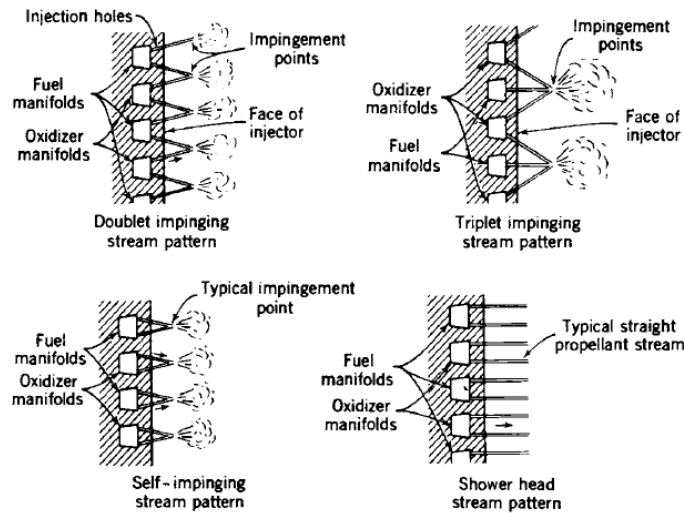
Keywords: CFD, Injector Element, *Coefficient of Discharge*.

1. PENDAHULUAN

Pengembangan mesin roket cair telah dilakukan di LAPAN sebagai langkah persiapan menuju program jangka panjang pengembangan Roket Pengorbit Satelit (RPS). Mesin roket cair mempunyai beberapa kelebihan dibanding roket padat, di antaranya adalah spesifik impuls (ISP) yang lebih tinggi, kemampuan kontrol gaya dorong (*throttling*) dan waktu pembakaran yang lebih panjang. Karakteristik ini akan menjadi sangat penting untuk sebuah roket pengorbit satelit.

Secara umum, mesin roket cair terdiri dari 3 bagian utama, yaitu ruang bakar, injektor dan nosel. Untuk mesin dengan propelan non hipergolik, mesin dilengkapi dengan *igniter*. Injektor merupakan bagian penting dalam mesin roket cair yang berfungsi untuk mendistribusikan, mengkabutkan dan kemudian mencampurkan pasangan oksidator dan *fuel* di dalam ruang bakar. Injektor yang efisien akan mendistribusikan dan mencampurkan pasangan propelan dalam ukuran *droplet* yang sekecil-kecilnya

dengan *pressure drop* yang rendah. Secara umum, ada dua jenis injektor untuk roket cair, yaitu injektor tipe *impinging* dan non *impinging* [1][2] yang diilustrasikan pada Gambar 1. Termasuk di dalamnya adalah injektor tipe pusran [3][4][5]. Tipe *impinging* adalah tipe yang paling banyak digunakan enjin roket cair saat ini. Riset terkait injektor tipe ini sudah banyak dilakukan sejak lama, baik yang terkait dengan karakteristik pengkabutan dan *mixingnya*[6][7][8], maupun mengenai karakteristik aliran fluidanya yang terkait dengan konfigurasi injektor dan *pressure drop*.



Gambar 1. Tipe injektor roket cair [1]

Cho melakukan investigasi secara numerik terhadap karakteristik hidrodinamika aliran kerosen pada elemen injektor dengan memvariasikan sudut injektor dari -40 deg sampai 40 deg terhadap arah *thrust* dan aliran utama fluida ke arah 90 deg[9]. Hasil riset tersebut menunjukkan bahwa *Coefficient of Discharge* (Cd) injektor dengan sudut 40 deg adalah $0,668$ atau lebih tinggi 7% dari injektor dengan sudut -40 deg.

Bentuk injektor yang mirip juga digunakan pada enjin ECX1000H2-2 yang telah dikembangkan di LAPAN [10]. Enjin ini menggunakan sistem pengumpan gas bertekanan dan injektor tipe *impinging* dengan sudut injektor 40 deg namun dengan arah aliran utama fluida searah dengan *thrust*. Enjin ini didesain dapat menghasilkan gaya dorong sebesar 1 ton. Tetapi dalam publikasi tersebut dikatakan bahwa gaya dorong yang dihasilkan enjin tersebut masih rendah, yakni hanya sekitar 67 persen dari desainnya, dengan total *pressure drop* sebesar 50 bar yang merupakan kontribusi dari pemipaan dan injektor. Untuk itu perlu dilakukan investigasi untuk mengetahui kontribusi masing-masing sehingga dapat dilakukan optimasi baik terhadap sistem pengumpan maupun injektornya sehingga *pressure drop* masing-masing dapat dikurangi. Untuk injektor, idealnya *pressure drop*-nya adalah sekitar 25 persen dari tekanan ruang bakarnya[1] atau sekitar $7,5$ bar untuk enjin ECX1000H2-2. Dari data debit *fuel* dan oksidator yang dipublikasikan, dapat disimpulkan bahwa debit oksidator masih kurang untuk memenuhi rasio massa oksidator dan *fuel* yang dibutuhkan.

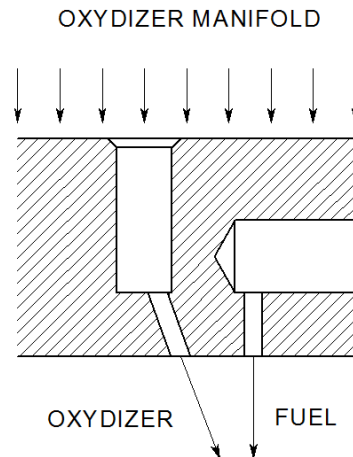
Riset ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik aliran pada elemen injektor oksidator dari injektor IJ-KH-1T-2-2 yang digunakan pada enjin ECX1000H2-2 sehingga dapat dilakukan peningkatan kinerjanya untuk meningkatkan debit oksidator.

2. GEOMETRI DAN PEMODELAN

Simulasi dilakukan hanya untuk elemen injektor oksidator karena debit yang paling besar dan tidak bisa dicapai pada eksperimental adalah debit oksidator, dalam hal ini debit asam nitrat. Dua tahap simulasi telah dilakukan, yang pertama adalah simulasi aliran propelan pada injektor elemen injektor IJ-KH-1T-2-2 (elemen 1) yang telah digunakan untuk uji statik untuk menganalisa alirannya sehingga dapat diketahui efisiensinya. Kemudian, hasil simulasi tersebut dijadikan dasar untuk melakukan improvement elemen injektor baru (elemen 2).

2.1. Geometri Elemen 1 (Injektor IJ-KH-1T-2-2)

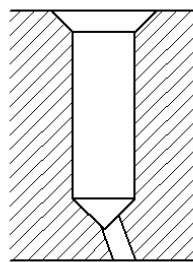
Injektor IJ-KH-1T-2-2 adalah injektor yang digunakan pada enjin roket cair ECX1000H2-2 yang menggunakan propelan pasangan asam nitrat dan kerosene. Injektor tersebut mempunyai jumlah lubang *fuel* dan oksidator masing-masing 35 dan 105 lubang dengan diameter lubang 1 mm. Setiap lubang *fuel* dikelilingi oleh tiga lubang oksidator. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi elemen injektor IJ-KH-1T-2-2 yang digunakan pada enjin ECX1000H2-2. Dari *manifold* oksidator, asam nitrat didorong melalui lubang *inlet* searah dengan gaya dorong, kemudian dibelokkan sebesar 40 derajat ke arah pancaran *fuel*. Diameter *inlet* injektor oksidator 3 mm dengan chamfer 0,5 mm di bagian *manifold*, sedangkan diameter *outlet*-nya adalah 1 mm. Lubang *inlet* terhubung dengan lubang *outlet* pada permukaan yang berbentuk *flat* (sudut 90 derajat). Ketebalan antara permukaan tersebut dengan permukaan bagian ruang bakar adalah 3,5 mm.



Gambar 2. Konfigurasi elemen injektor oksidator dan *fuel* pada injektor IJ-KH-1T-2-2 [10]

2.2. Geometri Elemen 2 (Injektor Perbaikan)

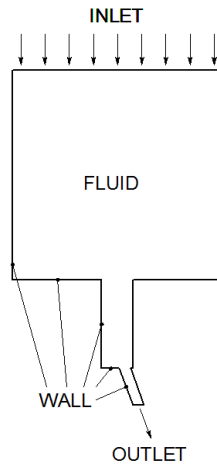
Pada elemen injektor perbaikan, terdapat beberapa perubahan bentuk, yang utama adalah perubahan bentuk permukaan dalam *inlet* yang ditembus lubang *outlet* dari bentuk *flat* menjadi bentuk kerucut dengan sudut 45 derajat. Selain itu, lubang *outlet* lebih pendek dari sebelumnya. Diameter *inlet* dan *outlet* tetap sama seperti sebelumnya, masing-masing adalah 3 mm dan 1 mm, dan ada penambahan tebal chamfer dari 0,5 mm menjadi 1 mm.



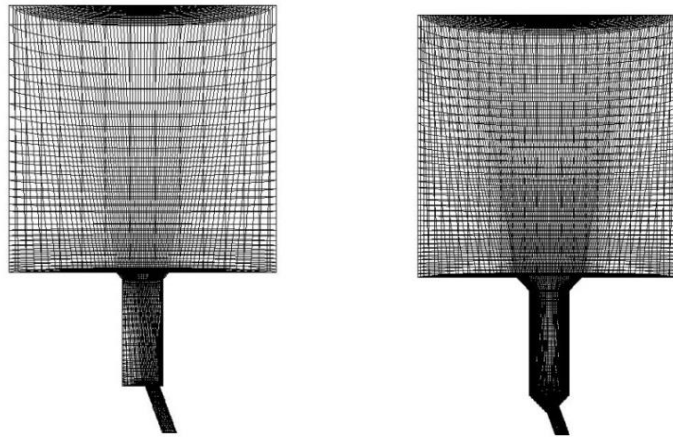
Gambar 3. Konfigurasi elemen injektor oksidator perbaikan

2.3. Pemodelan dan *Meshing*

Simulasi 3 dimensi dilakukan pada elemen injektor oksidator untuk dua kasus, elemen 1 dan elemen2 dengan pemodelan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Zonasi terdiri dari 3 bagian, yaitu dinding (*wall*), *Inlet* dan *outlet*. *Inlet* pada pemodelan menunjukkan area masuk fluida di bagian *manifold*. Diameter *inlet* 20 mm dengan tinggi 20 mm dari elemen injektor. Besaran ini diambil dengan mempertimbangkan efek keberadaan dinding di bagian samping *manifold* tidak berpengaruh pada aliran pada lubang injektor. *Meshing* dilakukan menggunakan *base hexahedral*. Gambar 5 menunjukkan hasil *Meshing* untuk dua kasus tersebut.



Gambar 4. Pemodelan



Gambar 5. Meshing Elemen 1 (kiri) dan Elemen 2 (kanan)

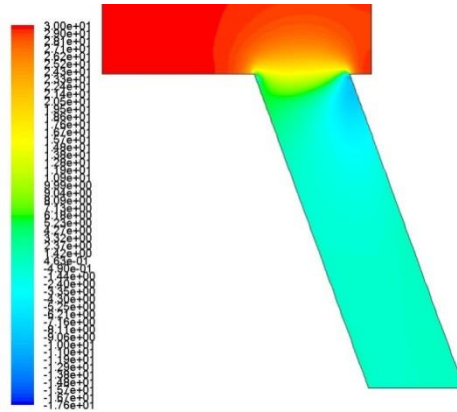
2.4. Kondisi Batas dan Solver

Simulasi dilakukan menggunakan model turbulen k-epsilon untuk aliran *steady state incompressible* dengan kondisi batas untuk elemen 1 dan elemen 2 dibuat sama sebagai berikut, tekanan *gauge* pada *inlet* 30 bar, tekanan *gauge outlet* 0 bar. Temperatur diset 300 K. Fluida yang digunakan sebagai propelan oksidator adalah asam nitrat dengan densitas 1512 kg/m³.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

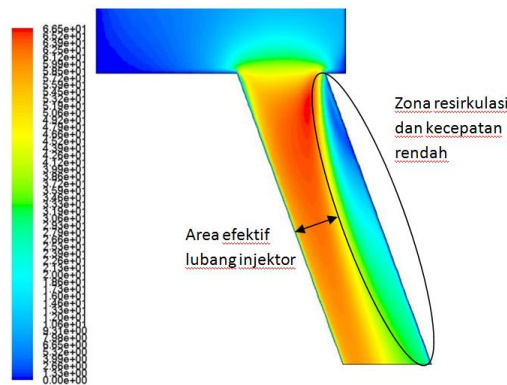
3.1. Aliran pada elemen 1 (Injektor IJ-KH-1T-2-2)

Untuk mengetahui kinerja dari injektor IJ-KH-1T-2-2 secara detail, simulasi aliran pada satu elemen oksidator dari injektor tersebut telah dilakukan dengan kondisi perbedaan tekanan 30 atm. Gambar 6 menunjukkan distribusi tekanan statis aliran asam nitrat hasil dari simulasi tersebut. Warna merah pada *inlet* menunjukkan tekanan 30 atm, sedangkan tekanan pada *exit* lubang *outlet* adalah sekitar 1 atm. Pada gambar tersebut dapat dilihat juga bahwa distribusi tekanan tidak merata persis setelah sudut tajam 40 derajat yang terbentuk antara dinding lubang *outlet* (diameter 1 mm) dan dinding lubang *inlet* (diameter 3 mm). Pada bagian tersebut tekanannya lebih rendah dibanding dengan di bagian agak ke tengah dari lubang *outlet* tersebut, yang ditunjukkan dari warna hijau di sebelah kiri, berubah menjadi warna biru di sebelah kanan. Warna biru menunjukkan tekanan negatif, yang menunjukkan adanya tegangan mekanik (*mechanical tension*) pada area tersebut yang disebabkan oleh tertariknya fluida bagian tersebut ke tengah oleh aliran deras fluida di bagian tengah lubang *inlet*.

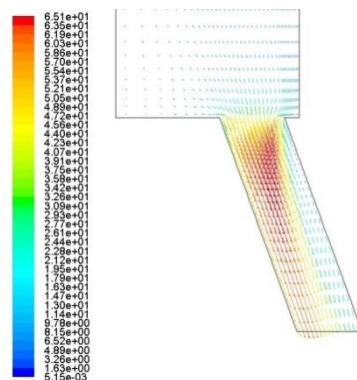


Gambar 6. Distribusi tekanan pada penampang tengah outlet injektor

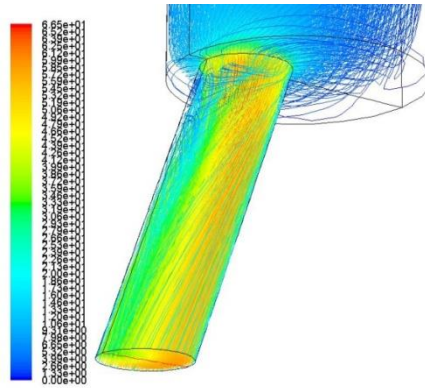
Gambar 7 menunjukkan distribusi kecepatan pada lubang *outlet* injektor tersebut. Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa pada lubang *outlet* injektor, kecepatan fluida tidak merata. Terjadi loncatan kecepatan aliran. Persis di sekitar dinding setelah melewati sudut tajam, kecepatan fluida sangat lambat sampai mendekati nol. Sedangkan lebih ke tengah lagi, kecepatan fluida sangat tinggi sampai dengan 65 meter / detik. Dari vektor kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 8, dapat diketahui bahwa arah aliran kecepatan tinggi mengarah menjauhi dinding setelah belokan tajam, sedangkan di sekitar dinding, kekosongan ini kemudian diisi oleh fluida dari sisi yang berlawanan yang masuk melalui celah di dekat dinding dan bergerak dengan kecepatan sangat rendah sampai mendekati nol. Perbedaan dua kecepatan ini menyebabkan arus fluida memutar dan menimbulkan aliran fluida di dekat dinding dengan arah yang berlawanan dengan arus utama. Arah masing-masing pergerakan fluida dapat dilihat pada Gambar 9. Pola kecepatan aliran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8 mempunyai karakteristik yang hampir sama dengan hasil simulasi yang dipublikasikan Cho yang melakukan simulasi dengan sudut aliran masuk utama sebesar 90 derajat terhadap arah gaya dorong [9].



Gambar 7. Distribusi kecepatan pada penampang tengah outlet injektor

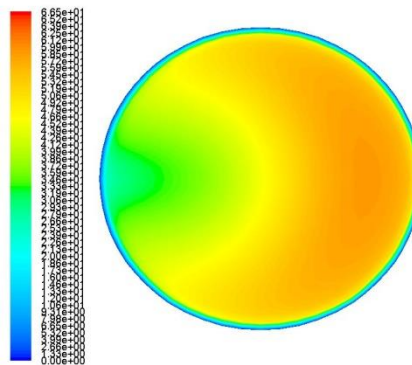


Gambar 8. Vektor kecepatan pada penampang tengah outlet injektor



Gambar 9. Garis lintasan fluida

Gambar 10 menunjukkan distribusi kecepatan fluida pada penampang *exit* lubang *outlet*. Kecepatan di *exit* menunjukkan adanya ketidakseragaman yang dipengaruhi oleh bentuk injektor seperti yang dijelaskan sebelumnya. Bentuk ini menimbulkan arah arus utama fluida menjauh dari dinding dan menyebabkan adanya zona fluida dengan kecepatan aliran mendekati nol. Pada *exit* lubang inlet, fluida dengan kecepatan sangat rendah itu kemudian bertambah cepat karena kontak dengan arah utama, menjadi sekitar 20 meter/detik di bagian dinding dan terus bertambah ke arah arus utama sampai kecepatannya menyamainya. Gambar 9 dan 10 dapat memberikan gambaran bahwa area efektif aliran fluida pada lubang *inlet* injektor berkurang dengan adanya fluida yang berkecepatan rendah baik di lapis batas di sekitar dinding maupun di area zona resirkulasi dan kecepatan rendah dengan besaran kira-kira seperempatnya sehingga menyebabkan turunnya debit fluida. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa debit asam nitrat pada elemen injektor ini adalah 0,0569 kg/detik atau 75,3 % dari perhitungan teoritis menggunakan teori Bernoulli. Sehingga C_d dari konfigurasi ini adalah 0,753. Angka ini lebih besar dari hasil simulasi Cho, di mana C_d nya adalah 0,620 untuk sudut -40 derajat dan 0,668 untuk sudut 40 derajat [9]. Hal ini dikarenakan perbedaan sudut arus masuk fluida utama.

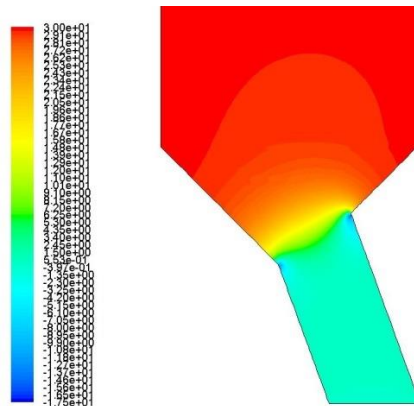


Gambar 10. Distribusi kecepatan fluida pada *exit* lubang *outlet*

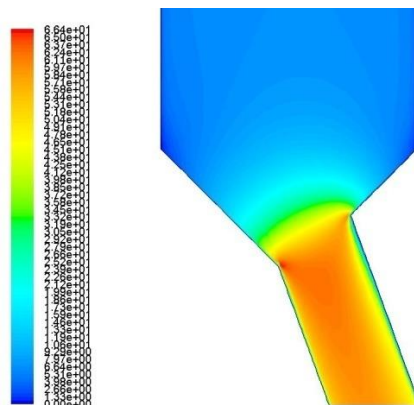
3.2. Aliran pada Elemen 2 (hasil perbaikan)

Dari hasil simulasi elemen 1, dapat diketahui penyebab pengurangan debit adalah karena bentuk injektor yang menyebabkan terjadinya zona resirkulasi dan kecepatan rendah. Untuk memperbaikinya, bentuk di area sambungan antara lubang *outlet* dan lubang *inlet* dimodifikasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 (elemen 2). Hasil simulasi menunjukkan adanya perbaikan kinerja aliran namun masih belum sempurna. Gambar 11 dan 12 masing-masing menunjukkan distribusi tekanan dan kecepatan fluida pada elemen 2. Area dengan tekanan rendah semakin mengecil. Bentuk kerucut pada dinding lubang *inlet* yang tersambung dengan lubang *outlet* dengan sudut lebih dari 90 derajat menyebabkan aliran tidak terlalu mengarah menjauhi dinding. Sehingga zona fluida dengan kecepatan rendah juga semakin berkurang. Namun masih ada sedikit aliran yang menjauh dari dinding, sehingga menyebabkan lapisan aliran berkecepatan rendah di dinding lubang *inlet* masih tebal, dan area efektif lubang injektor masih lebih kecil seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12. Secara keseluruhan, distribusi kecepatan

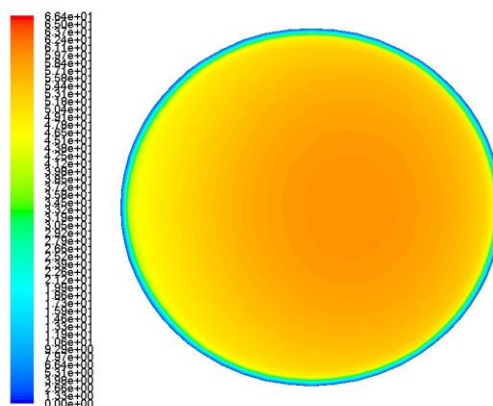
aliran pada *exit* lubang *inlet* lebih merata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13. Kecepatan aliran massa yang dihasilkan dari elemen 2 adalah 0,0637 kg/detik, atau sekitar 84,3 % dari nilai teoritisnya. Perbandingan kinerja antara 2 elemen ini dirangkum pada Tabel 1. Dari tabel dapat diketahui kinerja elemen 2 yang merupakan elemen perbaikan meningkat sebesar kurang lebih 12 %, dengan *Coefficient of Discharge* (Cd) meningkat dari 0,753 menjadi 0,843.



Gambar 11. Distribusi tekanan pada penampang tengah *outlet* injektor



Gambar 12. Distribusi kecepatan pada penampang tengah *outlet* injektor



Gambar 13. Distribusi kecepatan fluida pada *exit* lubang *outlet*

Tabel 1. Kinerja elemen

| | <i>mass flow rate</i> (kg/s) | <i>Coefficient of Discharge</i> (Cd) |
|----------|------------------------------|--------------------------------------|
| elemen 1 | 0,0569 | 0,753 |
| elemen 2 | 0,0637 | 0,843 |
| teoritis | 0,0756 | - |

4. KESIMPULAN

Untuk meningkatkan kinerja mesin roket cair ECX1000H2-2, analisis secara numerik dilakukan terhadap elemen oksidator dari injektor IJ-KH-1T-2-2 (elemen 1) yang digunakan pada mesin tersebut dan hasilnya dijadikan dasar untuk perbaikan (elemen 2). Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa bentuk elemen 1 menyebabkan terjadinya zona resirkulasi dan kecepatan rendah sehingga menjadikan luas efektif penampang injektor berkurang. Kecepatan aliran massa asam nitrat pada elemen 1 adalah 0,0569 kg/detik atau sekitar 75,3 % dari nilai teoritisnya. Dengan kata lain, *Coefficient of Discharge* (Cd) elemen ini adalah 0,753. Perbaikan bentuk elemen menyebabkan zona resirkulasi dapat diperkecil pada elemen 2, sehingga kecepatan aliran massa atau debitnya meningkat 12 % dengan Cd 0,843. Gaya dorong mesin juga akan naik sebanding dengan peningkatan debitnya jika konfigurasi elemen injektor oksidator lama diganti dengan yang baru.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi Roket LAPAN atas dukungan dan penyediaan fasilitas dalam melakukan kegiatan penelitian ini.

PERNYATAAN PENULIS

Seluruh materi dan isi yang ada di tulisan ini seluruhnya menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. P. Sutton. *Rocket Propulsion Elements 6th edition*, John Wiley & Sons, 1992.
- [2] G. S. Gill, W. H. Nurick. "Liquid Rocket Engine Injectors." *NASA Technical Report*, 1976.
- [3] 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." *Proceedings of 9th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*, 2003.
- [4] S. Kim, J. Yoon, Y. Yoon. "Experimental Study on the Internal Flow Characteristics for Recess Length in a Swirl Coaxial Injector." *AIAA Paper*, 2010-6812
- [5] A. N. Hakim. "Investigasi Aliran Fluida Pada Elemen Injektor Berbasis Pusaran Untuk Mesin Roket Cair." *Prosiding SIPTEKGAN XIX*, 2015.
- [6] J. H. Rupe. "The Liquid Phase *Mixing* of a Pair of *Impinging* Streams." *Progress Report No. 20-195*, Jet Propulsion Laboratory, 1953.
- [7] S. J. Kang, B. J. Rho, J. H. Oh, K. C. Kwon. "Atomization Characteristics of a Double *Impinging* F-O-O-F Type Injector with Four Streams for Liquid Rockets." *KSME International Journal*, Vol. 14, Issue 4, pp 466-476, 2000.
- [8] S. S. Lee, W. H. Kim, W. S. Yoon. "Spray formation by like-doublet *impinging* jets in low speed cross-flows." *Journal of Mechanical Science and Technology*, No. 23, pp. 1680-1692, 2009.
- [9] W. K. Cho, Y. M. Kim. "Numerical Analysis on the Discharge Characteristics of a Liquid Rocket Engine Injector Orifice." *KSAS International Journal*, Vol. 3, No. 1, 2002.
- [10] A. N. Hakim. "Rancang Bangun Mesin Roket Cair Dengan Gaya Dorong 1000 Kgf Menggunakan Propelan Asam Nitrat – Kerosen." *Jurnal Teknologi Dirgantara*, Vol. 13 No. 1, 2015.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS

DATA UMUM

Nama Lengkap : Arif Nur Hakim
Tempat & Tanggal Lahir : Tegal, 10 Mei 1975
Jenis Kelamin : Laki-laki
Instansi Pekerjaan : LAPAN
NIP. / NIM. : 19750510 199403 1 001



DATA PENDIDIKAN

| | | |
|----------------|-------------------------------|-------------|
| SLTA | : SMA Muhammadiyah 2 Surabaya | Tahun: 1993 |
| STRATA 1 (S.1) | : Kyushu University - Jepang | Tahun: 1999 |
| STRATA 2 (S.2) | : Kyushu University - Jepang | Tahun: 2001 |
| STRATA 3 (S.3) | : Kyushu University - Jepang | Tahun: 2008 |

ALAMAT

Alamat Kantor / Instansi : Jln. Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350
Email : anhanet@gmail.com, arif.nurhakim@lapan.go.id