

# **ANALISIS KINERJA ENJIN ROKET CAIR ECX1000H2-3 (PERFORMANCE ANALYSIS OF LIQUID ROCKET ENGINE ECX1000H2-3)**

**Arif Nur Hakim<sup>1</sup>, Hudoro Tahdi, Taufiqur Rochman**

**Pusat Teknologi Roket**

**Lembaga Penerbangan Dan Antariksa Nasional (LAPAN)**

**Jl. Raya Lapan No.2 Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350, Jawa Barat**

**<sup>1</sup>e-mail: arif.nurhakim@lapan.go.id**

**Diterima: 21 Mei 2018; Direvisi: 20 Juli 2018; Disetujui: 26 Juli 2018**

## **ABSTRACT**

Liquid rocket engine ECX1000H2-3 has been developed by adopting a new configuration injector to increase the thrust achieved by previous engine. The injector has 54 fuel holes and 156 oxidizer holes, with each diameter of 1 mm. The injector element shape has been modified to increase propellant mass flow rate. Hot firing test has been performed to evaluate overall performance of the engine system. The result recorded that average thrust and pressure produced were 730 kgf and 22.6 bar, respectively, 19.7 % higher than previous engine test result, but still 84% lower than thrust predicted from injector test result, due to poor performance of feeding system. In addition, there was a small explosion during ignition process caused by accumulation of unburned propellant due to limited contact area of ignition flame with propellant.

*Keywords: liquid rocket engine, nitric acid, firing test, ignition process*

## **ABSTRAK**

Enjin roket cair ECX1000H2-3 telah dikembangkan dengan mengadopsi injektor konfigurasi baru untuk meningkatkan gaya dorong yang telah dicapai enjin sebelumnya. Injektor baru mempunyai jumlah lubang fuel dan oksidator masing-masing sebanyak 54 dan 156 dengan diameter sebesar 1 mm. Bentuk elemen injektor telah dimodifikasi untuk meningkatkan debit propelan. Uji statik telah dilakukan untuk menguji kinerja sistem enjin secara keseluruhan. Hasil pengujian mencatat gaya dorong dan tekanan rata-rata sebesar 730 kgf dan 22,6 bar atau meningkat 19,7% dari hasil enjin sebelumnya, namun masih 84 % lebih rendah dari prediksi berdasarkan hasil uji injector dikarenakan kinerja sistem pengumpan yang tidak optimal. Selain itu, terjadi ledakan kecil saat penyalaan karena akumulasi propelan yang tidak terbakar akibat terbatasnya area kontak api penyalaan dengan propelan.

*Kata kunci: enjin roket cair, asam nitrat, kerosen, uji statik, proses penyalaan.*

## 1 PENDAHULUAN

Enjin roket cair dengan propelan pasangan asam nitrat dan kerosene telah mulai dikembangkan sejak tahun 2008 dengan dimulainya perancangan enjin ECX300H1 bergaya dorong 300 kgf. Pengembangan tersebut dimaksudkan sebagai langkah awal membangun sistem enjin berbasis propelan cair secara keseluruhan sebelum masuk pada tahapan rancang bangun enjin bergaya dorong 1 ton. Uji statik enjin ECX300H1 pertama kali berhasil dilakukan pada tahun 2010 walaupun gaya dorong yang dihasilkan belum memenuhi target (Hakim, 2011), namun sistem enjin tahap awal telah berhasil dilakukan sebagai landasan untuk langkah selanjutnya.

Pada tahapan selanjutnya, enjin ECX1000H yang didesain untuk menghasilkan gaya dorong 1 tonf telah diuji dalam uji statik (Hakim, 2015) dan menghasilkan gaya dorong rata-rata sebesar 610 kgf dan gaya dorong maksimum sebesar 670 kgf, lebih rendah dari rancangannya. Penyebabnya adalah karena tidak optimalnya kinerja sistem pengumpan dan injektor. Simulasi numerik kemudian dilakukan untuk menganalisa lebih lanjut kinerja elemen injektornya dan membandingkannya dengan desain elemen injektor baru (Hakim, 2017). Hasil simulasi membawa pada kesimpulan bahwa terjadi penurunan luas penampang efektif pada lubang injektor karena bentuknya sehingga besar Cd hanya 0,753 dan desain baru dapat meningkatkan Cd sebesar 12 persen.

Permasalahan kinerja injektor merupakan hal yang krusial pada sistem propulsi roket berbasis propelan cair, sehingga sampai saat ini pun masih dilakukan riset-riset baik secara eksperimental maupun numerik (Hakim, 2015) untuk memperoleh injektor yang

efisien yang mampu mengkabutkan propelan dengan baik.

Selain masalah mekanisme untuk menghasilkan gaya dorong yang diinginkan melalui pengembangan injektor yang efisien, permasalahan krusial lainnya adalah proses penyalaan awal enjin seiring dengan bertambah besarnya gaya dorong. Idealnya propelan harus secepat mungkin terbakar dan delay waktu pembakaran harus sekecil mungkin untuk mengurangi kemungkinan ledakan akibat akumulasi propelan yang tidak terbakar (Sutton, 2016). Studi terkait proses penyalaan seperti yang dilakukan oleh Park dkk (2017) telah banyak dilakukan sesuai dengan karakteristik masing-masing enjin yang digunakan.

Pada riset ini telah dilakukan pengembangan enjin ECX1000H2-3 yang menggunakan injektor konfigurasi baru untuk meningkatkan gaya dorong dari yang pernah dicapai oleh enjin ECX1000H2-2 sekaligus untuk mempelajari dan menganalisis mekanisme penyalaan enjin.

## 2 ENJIN ECX1000H2-3

Enjin ECX1000H2-3 adalah enjin seri ECX1000H generasi kedua rancangan ketiga yang didesain menghasilkan gaya dorong sebesar 1 ton pada tekanan ruang bakar sebesar 30 bar dengan menggunakan asam nitrat dan kerosene sebagai oksidator dan fuelnya. Gas inert bertekanan digunakan untuk mendistribusikan propelan dari tangki menuju ruang bakar. Asam nitrat dialirkan melalui inlet oksidator di bagian cap enjin dan kerosene melalui inlet fuel di dinding samping ruang bakar sebelum inlet nosel. Kerosen berfungsi sekaligus untuk mendinginkan dinding ruang bakar sebelum masuk ke injektor. Konstruksi enjin ECX1000H2-3 secara

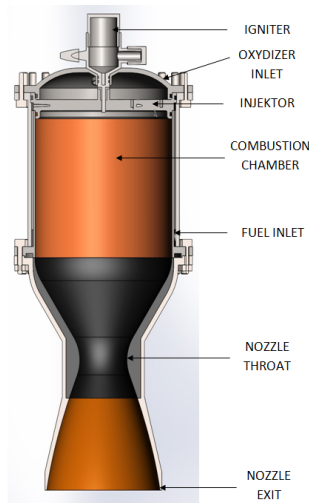
garis besar hampir sama dengan enjin ECX1000H2-2 yang ditunjukkan pada Gambar 2-1. Spesifikasi dan karakteristik dasar enjin hasil desain tersebut ditunjukkan pada Tabel 2-1.

Secara umum spesifikasi propulsi enjin tidak berubah dari enjin sebelumnya (Hakim, 2015), yang meliputi diameter dalam ruang bakar, diameter throat dan diameter exit nosel. Masing-masing sebesar 147 mm, 52 mm dan 124 mm. Selain itu, ada beberapa perubahan pada konstruksi sistem penyalaan dan konstruksi luar enjin, seperti ketebalan dinding, bentuk cap, nosel dsb.

Tekanan ruang bakar enjin didesain 30 bar untuk menghasilkan gaya dorong 1 tonf, dan memerlukan debit fuel dan oksidator sebesar 1,13 liter/detik dan 2,39 liter/detik.

Tabel 2-1: KARAKTERISTIK DASAR DESAIN ENJIN ECX1000H2-3

Property	Simbol	Value	Satuan
Gaya dorong maksimum	F	1000	kgf
Tekanan ruang bakar maksimum	$p_0$	30	Bar
Temperatur ruang bakar maksimum	$T_0$	2994	Kelvin
Impuls spesifik	$I_{sp}$	237	detik
Debit oksidator	$Q_O$	2,39	l/sec
Debit fuel	$Q_F$	1,13	l/sec
Diameter ruang bakar	$D_{rb}$	147	mm
Panjang ruang bakar	$L_{rb}$	231	mm
Diameter throat nosel	$D_{th}$	52	mm
Diameter exit nosel	$D_e$	124	mm



Gambar 2-1: Enjin ECX1000H2-2 (Hakim, 2015)



Gambar 2-2: Injektor IJ-KH-1T-2-3

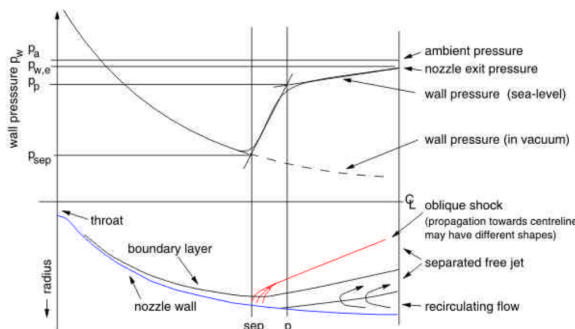
Injektor yang digunakan adalah injektor IJ-KH-1T-2-3 yang mempunyai konstruksi yang mirip dengan injektor enjin sebelumnya (Hakim, 2015) namun telah dimodifikasi pada bentuk lubang injektornya dan ada penambahan jumlah lubangnya. Bentuk lubangnya mengacu pada hasil simulasi CFD (Hakim, 2017). Gambar 2-2 menunjukkan permukaan injektor di sisi ruang bakar. Seperti yang ditunjukkan pada gambar tersebut, injektor IJ-KH-1T-2-3 mempunyai 54 lubang fuel dan 156 lubang oksidator yang masing masing mempunyai diameter 1 mm.

Gambar 2-3 menunjukkan igniter piroteknik yang digunakan untuk penyalaan awal. Isian primer igniter berupa propelan padat komposit HTPB dengan konfigurasi propelan end burning. Squib yang dipasang pada dua lubang squib digunakan sebagai pemacu penyalaan awal. Proses penyalaan ini dipercepat dan diperkuat dengan

penambahan black powder dan pellet AlNO, sehingga akan lebih mudah membakar isian primer.



Gambar 2-3: Igniter piroteknik



Gambar 2-4: Separasi aliran over-expanded pada nosel (Frey, 2001)

Proses penyalaan enjin dilakukan dengan terlebih dahulu menyalakan igniter sebelum propelan cair masuk ruang bakar untuk menghindari terjadinya ledakan. Reaksi pembakaran antara fuel dan oksidator kemudian menghasilkan gas hasil pembakaran dengan tekanan dan temperature tinggi dan kemudian dialirkan dan dipercepat dengan nosel divergen-konvergen sehingga menghasilkan gaya dorong. Jika tekanan ruang bakar dan panas spesifik diketahui, maka gaya dorong pada suatu motor roket dengan luas throat dan exit nosel tertentu dapat dihitung dengan persamaan (2-3), dengan rasio tekanan ruang bakar dan

exit nosel diperoleh dari persamaan (2-1) dan (2-2) (Matsuo, 1994).

Gaya dorong optimum diperoleh pada saat tekanan gas di exit nosel sama dengan tekanan udara di luar nosel. Jika tekanan gas di exit lebih rendah (*over expanded*), gaya dorong akan berkurang. Dan jika lebih rendah dari batas tekanan tertentu, aliran di nosel akan mengalami separasi dan pada saat itu, gaya dorong tidak dapat dihitung menggunakan persamaan (2-3). Ilustrasi separasi aliran ditunjukkan pada Gambar 2-4.

Untuk menghitung batas tekanan terjadinya separasi (tekanan separasi), dapat menggunakan metoda yang relative simpel seperti pada persamaan (2-4) (Kalt dan Badal, 1965), atau persamaan (2-5) (Schilling, 1962) untuk nosel bel pendek. Untuk keperluan analisis hasil uji statik, prediksi gaya dorong menggunakan tekanan ruang bakar dilakukan pada saat tekanan di atas tekanan separasi yang dihitung menggunakan persamaan (2-5).

$$\frac{A_e}{A_t} = \frac{1}{M} \left[ \frac{(\gamma - 1)M^2 + 2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (2-1)$$

$$\frac{p_0}{p_e} = \left( 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2-2)$$

$$F = p_0 A_t \sqrt{\gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \left[ \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right\} \right]} + \frac{\left( \frac{p_e}{p_0} - \frac{p_a}{p_0} \right)}{\left( \frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{p_e}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right\}}} \quad (2-3)$$

$$\frac{p_{sep}}{p_a} = \frac{2}{3} \left( \frac{p_c}{p_a} \right)^{-\frac{1}{5}} \quad (2-4)$$

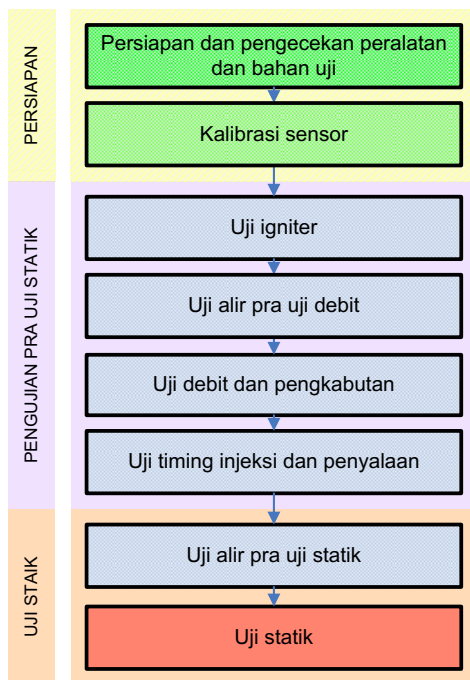


$$\frac{p_{sep}}{p_a} = 0,583 \left( \frac{p_c}{p_a} \right)^{-0,195} \quad (2-5)$$

### 3 METODOLOGI

Prosedur rangkaian pengujian enjin ditunjukkan pada Gambar 3-1. Secara garis besar, tahapan pengujian terbagi menjadi 3, yaitu tahapan persiapan, tahapan pengujian pra uji statik, dan tahapan utama, yaitu uji statik.

Sebelum dilakukan uji statik, persiapan dan pengujian dilakukan untuk memastikan fungsi dan kinerja komponen uji, seperti igniter, sistem valve, piping, serta seluruh alat dan prasarana, seperti *test bed*, *data recorder*, sensor, kamera, *firing system*, *controller*, dsb.



Gambar 3-1: Prosedur pengujian enjin roket cair ECX1000H2-3

#### 3.1 Uji sistem igniter

Uji sistem igniter dilakukan untuk memastikan igniter berfungsi dengan baik, dapat mensuplai energi yang cukup dengan panjang waktu dan *timing* yang tepat. Ada dua pengujian yang dilakukan, yaitu uji *squib* dan uji igniter. Uji *squib* dilakukan untuk memastikan

fungsi *firing system*, proses penyalaan *squib* dan konsistensi penyalaannya. Uji igniter dilakukan untuk melihat secara visual kontinuitas penyalaan, intensitas, lama waktu pembakaran, delay time penyalaannya. Selain itu juga akan dilihat kondisi struktur igniter selama penyalaan.

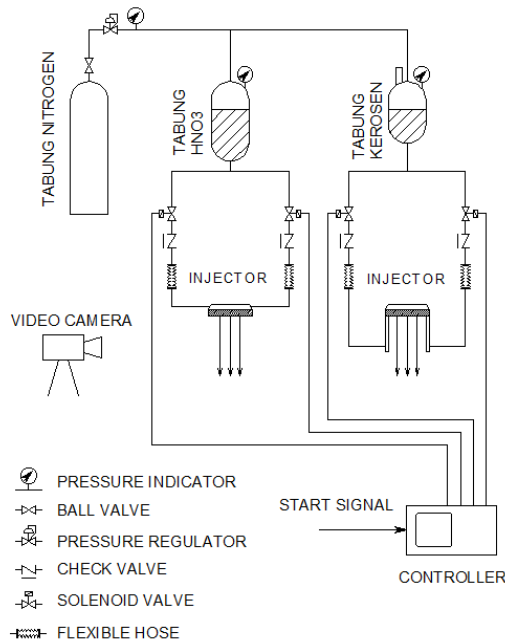
#### 3.2 Uji Debit dan Pengkabutan

Uji debit dan uji pengkabutan dilakukan secara bersamaan untuk mengukur debit riil propelan yang mampu dialirkan pada tekanan tertentu dan tingkat pengkabutannya.

Uji debit propelan dilakukan secara sederhana dengan mengukur berapa waktu yang dibutuhkan untuk volume tertentu propelan pada tekanan tertentu gas pendorong. Pengukuran waktu dilakukan dengan menggunakan high speed camera yang merekam aliran propelan. Dengan pertimbangan biaya dan tingkat resikonya, dalam pengujian ini, air digunakan sebagai pengganti oksidator, sedangkan kerosen tetap digunakan sebagai fuel. Debit asam nitrat dihitung menggunakan data debit air hasil pengukuran dengan menyesuaikan densitasnya.

Skema uji kabut dan uji debit ditunjukkan pada Gambar 3-2. Rangkaian uji debit dibuat sedekat mungkin dengan kondisi saat uji statik agar hasil yang didapat tidak berbeda. Seperti ditunjukkan pada gambar, rangkaian uji debit terdiri dari tabung gas nitrogen yang berisi gas bertekanan tinggi, tangki propelan, injektor serta *controller*. Gas nitrogen disuplai dari dua tabung untuk memenuhi debit gas yang dibutuhkan. Antara tabung gas dan tangki propelan dihubungkan dengan pemipaan yang dilengkapi dengan *valve* dan *pressure regulator* untuk mengatur tekanan suplai gas yang diinginkan. Dari tangki propelan masing-masing dihubungkan dengan pemipaan yang

dilengkapi dengan solenoid *valve* sebagai *valve* utama untuk mengalirkan propelan, dan katup anti balik. Dua injektor digunakan masing-masing untuk pengukuran debit kerosen dan air. Posisi riil pemasangan injektor pada pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 3-3.



Gambar 3-2 : Skema uji pengkabutan dan uji debit injektor.



Gambar 3-3: Setting injektor di test bed untuk uji debit propelan.

Prosedur pengujian dilakukan dengan mengisi tangki propelan dengan kerosen dan air masing-masing sebesar 6 liter dan 8 liter. Kemudian, dalam kondisi tangki propelan dan solenoid

valve tertutup, tabung nitrogen dibuka, gas dialirkan ke tangki dan diatur tekanannya dengan pressure regulator. Tekanan diatur bervariasi setiap pengujian dari tekanan 10 bar sampai 50 bar dengan kenaikan 10 bar. High speed camera Exilim RZ200 dengan kecepatan 240 fps digunakan untuk merekam aliran propelan yang keluar dari injektor. Data visual ini kemudian akan digunakan untuk menentukan waktu alir propelan sampai habis.

Uji pengkabutan dilakukan hanya dengan pengamatan langsung dan perekaman data visual dengan *high speed camera* untuk melihat kondisi pengkabutannya.

### 3.3 Uji Timing

Uji *timing* dilakukan untuk menentukan *timing* penyalaan dan injeksi masing-masing propelan. Penentuan *timing* ini akan sangat menentukan keberhasilan dari proses penyalaan. *Timing* yang salah dapat menyebabkan ledakan saat uji statik.

### 3.4 Uji statik

Uji statik adalah fase terakhir pengujian darat mesin untuk mengetahui kinerja sistem mesin secara keseluruhan, meliputi *feed system*, sistem igniter, sistem kontrol mesin dan mesin itu sendiri. Parameter utama yang diukur dalam pengujian ini adalah gaya dorong dan tekanan.

#### 3.4.1 Skema dan Peralatan Uji statik

Uji statik dilakukan dengan skema pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3-4. Skema ini hampir sama dengan skema uji debit. Perbedaannya adalah setelah solenoid valve, dua injektor diganti dengan mesin lengkap dengan igniternya. Katup anti balik dipasang untuk mencegah terjadinya tekanan balik jika terjadi tekanan di

ruang bakar yang melebihi tekanan tangki. Pipa oksidator tersambung di bagian cap enjin, sedangkan pipa kerosen tersambung di bagian belakang dinding ruang bakar enjin di bagian inlet nosel. Enjin dipasang secara horisontal pada test bed yang ada di laboratorium pengujian roket cair di Pusat Teknologi Roket LAPAN. Gambar 3-5 menunjukkan kondisi enjin pada test bed sebelum uji statik.

Untuk mengukur gaya dorong, digunakan loadcell yang dipasang pada dinding test bed yang langsung bersentuhan dengan bagian tengah adapter yang menempel di cap enjin, segaris dengan enjin. Untuk mengukur tekanan ruang bakar, pressure transducer dipasang di bagian inlet nosel. Data dari load cell dan pressure transducer yang terpasang di enjin direkam dengan menggunakan data recorder Yokogawa DL750 scopecorder. Selain itu, gauge pressure indicator dipasang pada tangki untuk pemantauan tekanan di lapangan.

Data visual diperoleh dengan memasang beberapa video camera, baik high speed maupun low speed. Kamera Casio exilim EX-ZR200 dengan kecepatan 240 fps yang dipasang di bagian-bagian tertentu yang menjadi titik fokus analisis seperti di bagian exit nosel dan bagian igniter.

**3.4.2 Kondisi Uji statik**

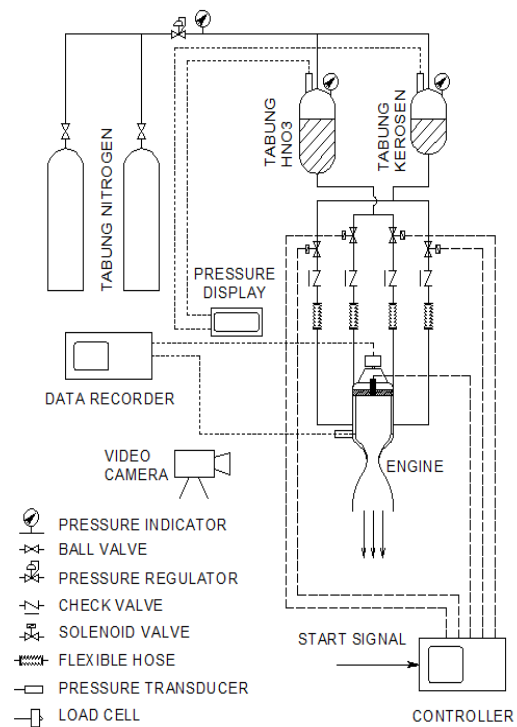
Kondisi pengujian ditunjukkan pada Tabel 3-2. Volume asam nitrat dan kerosene masing masing 8 liter dan 6 liter. Gas nitrogen dialirkan ke tangki yang berisi propelan dengan tekanan sebesar 60 bar.

Proses penyalaan dimulai dengan mengirimkan arus listrik untuk menyalakan squib dan kemudian akan menyalakan black powder, pellet propelan dan isian primer igniter. Penyalaan squib diatur 0,5 detik lebih

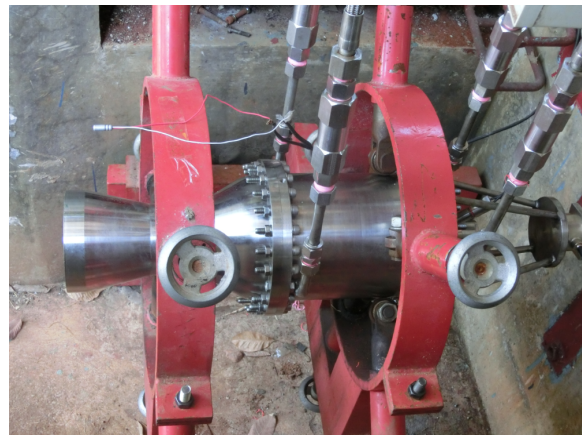
cepat daripada waktu pembukaan solenoid valve, agar ketika propelan masuk ke ruang bakar langsung bisa terbakar.

Tabel 3-2: KONDISI PENGUJIAN ENJIN

Item	Material	Volume/Tekanan
Fuel	Kerosene	6 liter
Oxidizer	Nitric Acid	8 liter
Feeder gas	Nitrogen	60 bar



Gambar 3-4: Skema uji statik roket cair



Gambar 3-5: Setting enjin di test bed sebelum uji statik

## 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Kinerja Sistem Pengumpan dan Injektor IJ-KH-1T-2-3

Pada Gambar 4-1 ditunjukkan kondisi pengkabutan air saat uji debit. Dari pengamatan dan data visual dapat dilihat secara kualitatif hasil pengkabutan dari injektor ini cukup baik. Aliran air relatif lurus dan merata dengan pola pengkabutan yang cukup baik. Aliran air di bagian dekat lubang injektor juga secara visual terlihat relatif bagus. Sudut aliran sesuai dengan desainnya, namun ada beberapa arah aliran yang sudutnya tidak sesuai dengan sudut lubang yang dirancang. Ini disebabkan karena kualitas manufaktur injektor yang masih kurang bagus.

Aliran kerosene seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4-2 juga sudah cukup bagus, tapi masih terlihat ketidaksimetrisan aliran, terutama saat injeksi hampir selesai. Penyebabnya kemungkinan karena O-ring di bagian dinding ruang bakar tidak rapat sehingga kerosene juga mengalir melalui celah tersebut dan mempengaruhi kelurusan aliran.

Secara umum kualitas manufaktur injektor perlu ditingkatkan lagi agar lebih presisi, khususnya pada pembuatan lubang injektor oksidator yang mempunyai tingkat kesulitan tinggi dalam pengeboran karena diameter lubang hanya 1 mm dan mempunyai sudut.

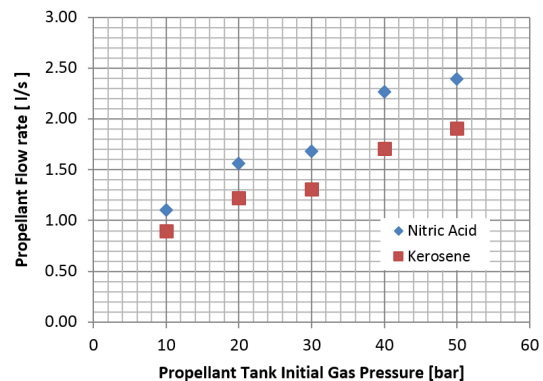
Hasil penghitungan debit ditunjukkan pada Gambar 4-3. Pada grafik tersebut, dapat dilihat perbandingan antara fuel dan oksidator tidak sesuai dengan data desainnya. Kondisi yang ditunjukkan pada grafik tersebut menunjukkan kondisi fuel rich. Berdasarkan data desain, seharusnya perbandingan debit antara oksidator dan fuel adalah 2,1 : 1.



Gambar 4-1: Kondisi pengkabutan dari injektor oksidator saat uji debit pada tekanan gas 30 bar



Gambar 4-2: Aliran kerosene saat uji debit pada tekanan gas 30 bar



Gambar 4-3: Hasil uji debit injektor

### 4.2 Uji Igniter dan Uji Timing Penyalaan

Gambar 4-4 menunjukkan proses uji penyalaan igniter. Dari pengukuran melalui high speed camera, dapat diketahui waktu penyalaan igniter adalah 2,3 detik dengan delay antara penyalaan squib dan keluarnya api dari exit igniter adalah 0,3 detik. Waktu penyalaan ini lebih pendek dari yang ditargetkan, yaitu selama 3 detik, namun masih dapat menyalakan propelan di



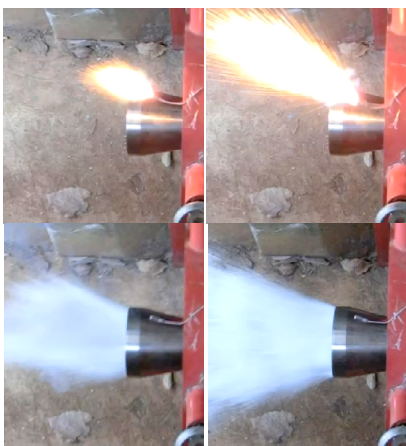
ruang bakar karena waktu kontak api igniter dengan propelan cair lebih dari satu detik.

Dari sisi material, waktu penyalaan igniter selama 2,3 detik ini menyebabkan material igniter di bagian exit membara. Namun diperkirakan secara langsung tidak ada pengaruhnya terhadap struktur enjin atau pembakarannya.



Gambar 4-4: Pengujian penyalaan igniter

Pengujian pra uji statik lain yang sangat penting adalah uji *timing* penyalaan dan injeksi. Keterlambatan *timing* penyalaan dapat menyebabkan ledakan karena api masuk pada saat propelan sudah terakumulasi di ruang bakar. Dari hasil pengujian, ditentukan bahwa *timing* penyalaan igniter adalah 0,5 detik lebih awal dari waktu injeksi dan waktu bukaan keempat valve, yakni valve fuel 1, valve fuel 2, valve oksidator 1 dan valve oksidator 2. Gambar 4-5 menunjukkan uji *timing* yang dilakukan bersamaan dengan uji alir pra uji statik.



Gambar 4-5: Uji *timing* injeksi propelan dan penyalaan squib pada tekanan 50 bar (tampak atas)

### 4.3 Hasil dan Analisis Uji statik Enjin ECX1000H-2-2

Gambar 4-6 menunjukkan data visual proses pembakaran dari awal sampai akhir. Beberapa hal yang dapat dilihat pada gambar tersebut adalah pada awalnya terdapat api tekanan rendah yang keluar dari exit nosel, kemudian terjadi pembakaran dengan tekanan kuat sehingga semburan api mengembang sangat cepat, kemudian muncul semburan gas warna hitam yang keluar dari nosel yang diiringi dengan semburan api di belakangnya. Setelah itu, semburan api melemah dan kemudian padam.



Gambar 4-6: Proses pembakaran

Api tekanan lemah di awal pembakaran adalah sisa kerosene dari uji pengkabutan yang menempel pada dinding ruang bakar yang terbakar oleh penyalaan igniter. Api ini kemudian hilang tersapu oleh derasnya aliran propelan dari injektor. Disusul dengan timbulnya ledakan dan kemudian aliran gas hasil pembakaran yang diselimuti gas warna hitam.

Gambar 4-7 menunjukkan data visual pembakaran dari sisi lain. Setelah ledakan semburan gas berubah warna menjadi hitam akibat rontokan grafit. Salah satu rontokan grafit yang cukup besar mengalir keluar dan beberapa saat

agak menyumbat aliran gas panas dari ruang bakar.

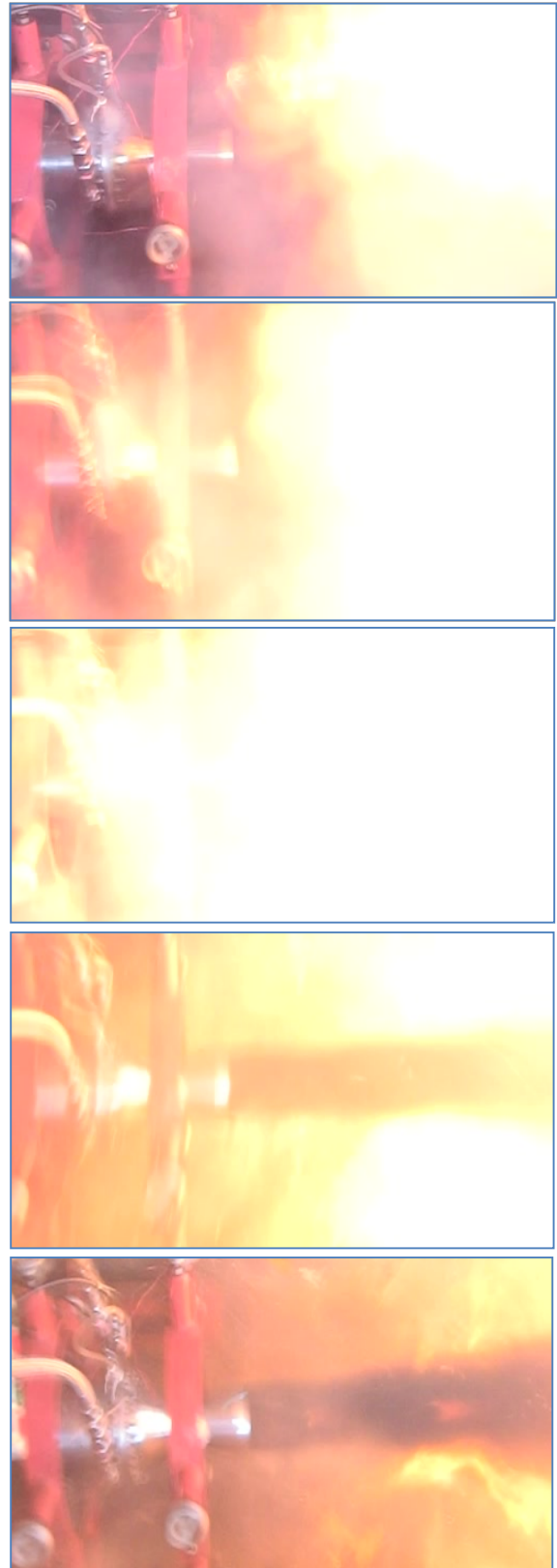
*Time history* proses pembakaran dirangkum pada Tabel 4-1. Data tabel ini disusun berdasarkan data visual dari video high speed dengan kecepatan 240 fps. Untuk memudahkan analisis, pengambilan acuan waktu disesuaikan dengan data gaya dorong, dengan detik ke-0 diset pada saat terjadinya ledakan. Dari data di tabel tersebut, dapat diketahui bahwa pembakaran penuh terjadi 1,33 detik setelah api dari squib pertama kali terlihat keluar dari exit nosel.

Pada saat pembakaran awal ini pula terjadi ledakan yang menyebabkan mesin terdorong ke depan oleh impact akibat ledakan. Namun setelah terjadinya ledakan, gas hasil pembakaran tetap secara normal mengalir lurus keluar nosel walaupun disertai warna hitam. Pembakaran mulai berakhir pada detik ke-3 ketika gaya dorong mulai menurun.

Gambar 4-8 menunjukkan grafik gaya dorong yang diukur dengan loadcell. Dari data tersebut dapat diketahui gaya dorong maksimal yang dicapai adalah 900 kgf pada saat terjadinya ledakan. Kemudian gaya dorong tersebut langsung turun menjadi sekitar 800 kgf dan turun secara gradual hingga menjadi 700 kgf dan agak flat. Setelah itu turun sedikit lagi sampai kemudian pembakaran berakhir pada detik ke-3.

Gambar 4-9 menunjukkan tekanan ruang bakar mesin pada saat uji statik. Dapat dilihat di awal pembakaran, bentuk grafik tekanan ruang bakar tidak identik dengan bentuk grafik gaya dorong. Artinya bahwa naiknya gaya dorong pada saat penyalaan bukan disebabkan dari gas hasil pembakaran di ruang bakar yang mendorong ke depan, namun karena ada

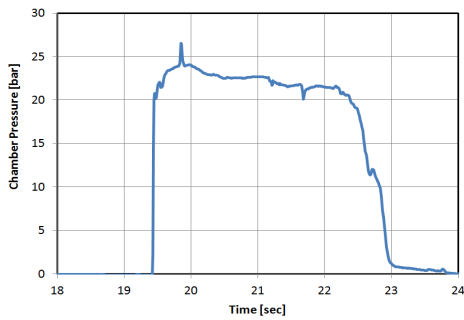
penambahan gaya dorong akibat ledakan di belakang nosel yang mendorong mesin ke arah depan.



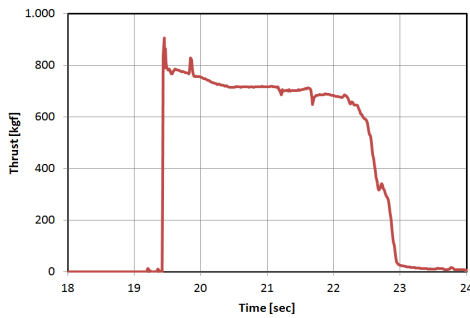
Gambar 4-7: Proses awal pembakaran

Tabel 4-1: TIME HISTORY PEMBAKARAN

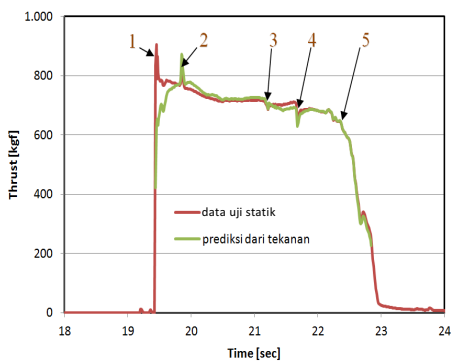
Waktu (detik)	Data kamera
-1,33	Squib keluar dari igniter
-0,28	Selang inlet fuel mulai bergerak
-0,18	Semburan propelan yang tidak menyala
-0,15	Jet gas pembakaran mulai keluar
-0,14	Propelan di luar terbakar penuh
0,00	Penyalan awal (Ledakan)
0,40	Penyumbatan oleh grafit
1,73	Fluktuasi tekanan jet
2,22	Fluktuasi tekanan jet
2,95	Finalisasi pembakaran.
3,25	Fluktuasi saat finalisasi pembakaran



Gambar 4-8: Tekanan ruang bakar



Gambar 4-9: Gaya dorong hasil uji



Gambar 4-10: Gaya dorong hasil penghitungan dari tekanan ruang bakar

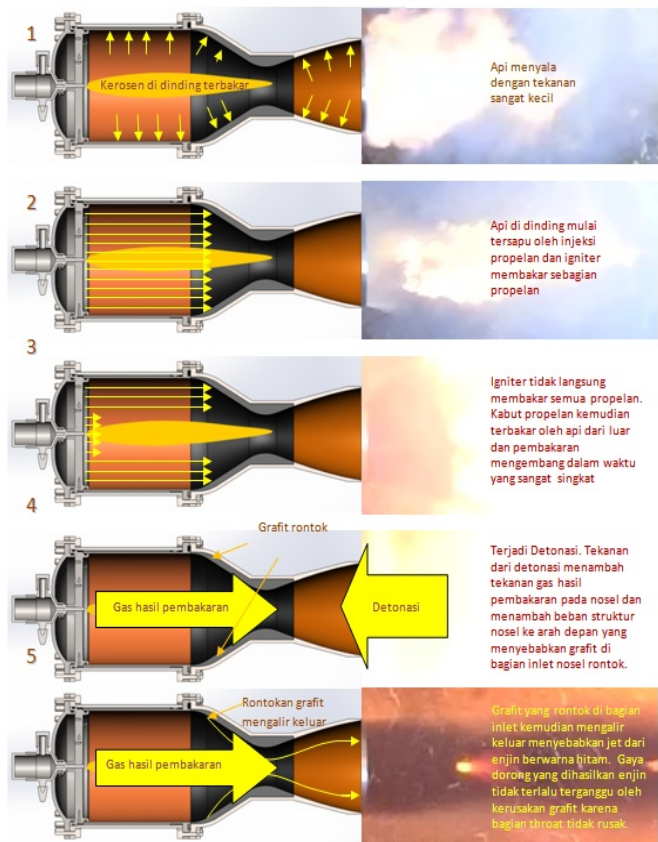
Gambar 4-10 menunjukkan perbandingan gaya dorong yang dihasilkan oleh gas hasil pembakaran di ruang bakar yang dihitung dari data tekanan ruang bakar menggunakan persamaan (2-1) sampai (2-5), dan gaya dorong yang terukur di loadcell. Fenomena-fenomena yang terjadi seperti ledakan, penyumbatan oleh grafit, fluktuasi tekanan dan finalisasi pembakaran seperti yang dijelaskan pada Tabel 3, waktu kejadiannya ditunjukkan dengan angka dan tanda panah pada grafik tersebut. Angka 1 menunjukkan saat terjadinya ledakan di mana ada dorongan akibat pembakaran mendadak dari kabut propelan yang terpapar di udara di belakang nosel. Angka 2 menunjukkan terjadinya kenaikan tekanan dan gaya dorong yang disebabkan adanya sumbatan pada throat nosel beberapa saat. Sumbatan ini disebabkan oleh pecahan grafit inlet nosel akibat impact dari ledakan di belakang nosel, yang mengalir keluar. Angka 3 dan 4 menunjukkan fluktuasi aliran yang diprediksi disebabkan oleh perubahan debit asam nitrat karena kebocoran. Angka 5 menunjukkan saat-saat mulai berakhirnya pembakaran. Tekanan gas mulai turun drastis.



### 4.3.1 Terjadinya Ledakan

Proses terjadinya ledakan dijelaskan dengan ilustrasi Gambar 4-11. Sebelum dilakukan uji statik, uji alir dilakukan dengan menggunakan air dan kerosene yang menyisakan kerosene menempel di dinding ruang bakar dan nosel, sehingga pada saat uji penyalaan awal uji statik, sebelum propelan diinjeksikan ke ruang bakar, sisa kerosene yang menempel di dinding ruang bakar dan nosel, terbakar seperti api biasa. Tidak terjadi kenaikan tekanan yang berarti. Ketika injeksi propelan mulai masuk ke ruang bakar, api yang menyala tersapu keluar, namun masih tersisa api yang membakar uap kerosene di luar enjin. Sementara itu, konstruksi igniter yang menghasilkan semburan api lurus keluar nosel menyebabkan igniter tidak mampu membakar seluruh propelan di ruang bakar dalam waktu yang cepat. Igniter hanya membakar sebagian propelan yang langsung bersentuhan dengan nyala igniter, sehingga kerosene dan asam nitrat yang tidak terbakar keluar menambah kabut propelan di luar. Kondisi udara di luar enjin yang mengandung kabut propelan dan terdapatnya api di luar menyebabkan api di belakang nosel menyambar propelan yang belum terbakar dan pembakarannya mengembang secara cepat sehingga menimbulkan ledakan di belakang nosel. Tekanan ledakan terjadi dalam waktu yang sangat singkat, dan menjadi beban impact yang mendorong nosel ke arah depan dan menambah gaya dorong yang dihasilkan pembakaran di dalam ruang bakar. Beban impact ini kemudian menjadi penyebab rontoknya grafit yang berada di dalam nosel bagian inlet. Rontokan grafit kemudian mengalir, menyumbat throat beberapa saat, menambah tekanan dan gaya dorong, kemudian akhirnya keluar nosel

menyelimuti gas yang keluar dari ruang bakar, sehingga menyebabkan aliran gas hasil pembakaran menjadi berwarna hitam.



Gambar 4-11: Ilustrasi proses penyalaan dan timbulnya ledakan

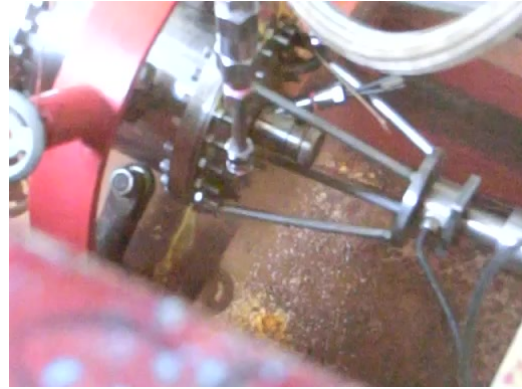
### 4.3.2 Analisis Kinerja Propulsi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa gaya dorong enjin ECX1000H2-3 yang diperoleh pada uji statik rata-rata 730 kgf atau 19,7% lebih tinggi dari gaya dorong rata-rata yang diperoleh enjin ECX1000H2-2 (Hakim, 2015). Gaya dorong maksimum mencapai 900 kgf. Tingginya gaya dorong maksimum ini lebih disebabkan oleh adanya penambahan gaya dorong sesaat oleh dorongan akibat ledakan. Tekanan ruang bakar rata-rata adalah 22,5 bar dengan tekanan pada saat penyalaan awal adalah 20 bar. Waktu pembakaran dihitung 3 detik. Pada tekanan ruang bakar 22,5 bar, berdasarkan data hasil

pengujian debit seperti pada Gambar 4-3, dapat dihitung debit asam nitrat dan kerosen masing masing adalah 2 liter per detik dan 1,6 liter per detik. Artinya asam nitrat 8 liter dan kerosen 6 liter akan habis dalam waktu masing masing 4 detik dan 3,75 detik. Debit tersebut cukup untuk menghasilkan tekanan ruang bakar sebesar 26 bar, atau 3,5 bar lebih tinggi dari hasil uji statik.

Dalam pengujian, pembakaran selesai dalam waktu sekitar 3,46 detik dan jika ditambahkan dengan waktu propelan pertama kali masuk ruang bakar (pada 0,28 detik sebelum ledakan), durasi aliran kerosen adalah sekitar 3,74 detik, sesuai dengan waktu yang dihitung dari debitnya, atau dengan kata lain debit kerosen saat uji statik juga sesuai dengan hasil uji debit, sehingga rendahnya tekanan gas hasil pembakaran di ruang bakar disimpulkan disebabkan oleh rendahnya debit asam nitrat yang masuk ke ruang bakar. Dari data visual diketahui aliran asam nitrat berakhir sekitar detik ke-4,31 dan jika dimasukkan massa aliran sebelum ledakan sebesar 0,28 detik maka waktu alir asam nitrat adalah sekitar 4,6 detik. Dengan hitungan kasar, debit asam nitrat adalah sekitar 1,74 liter/detik, yang dapat menghasilkan gas hasil pembakaran dengan tekanan 22,7 bar, mendekati nilai hasil uji statik. Dapat disimpulkan bahwa rendahnya tekanan ruang bakar sekitar 86 persen dari hasil perhitungan prediksi adalah karena debit asam nitrat lebih rendah dibandingkan dengan data hasil uji debit. Penyebabnya kemungkinan karena tidak optimalnya sistem valve. Ada juga kemungkinan disebabkan karena adanya kebocoran asam nitrat di bagian cap mesin, yang dapat menyebabkan debit asam nitrat yang masuk ke ruang bakar mesin lebih rendah dari yang seharusnya. Namun tidak ada data visual yang

memperlihatkan kebocoran terjadi pada saat pembakaran berlangsung. Kebocoran yang terdeteksi terjadi setelah pembakaran hampir selesai, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4-12. Kemungkinan penyebab kebocoran adalah kerusakan O-ring pada cap mesin.



Gambar 4-12: Kebocoran pada cap di akhir pembakaran

## 5 KESIMPULAN

Uji statik mesin ECX1000H2-3 sebagai tahap akhir rangkaian kegiatan peningkatan performa mesin ECX1000H2-2, telah dilakukan. Dari pengujian tersebut dapat diketahui gaya dorong dan tekanan rata-rata yang dihasilkan adalah 730 kgf dan 22,6 bar, atau 84% dari yang diprediksi berdasarkan hasil uji debit propelannya. Dari hasil analisis data visual, diketahui rendahnya gaya dorong ini disebabkan debit asam nitrat yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil uji debit injektor. Debit asam nitrat hanya sekitar 1,74 liter/detik, sehingga secara teoritik hanya mampu menghasilkan tekanan ruang bakar maksimal 22,7 bar dan gaya dorong maksimal 727 kgf mendekati hasil uji statik. Kecilnya debit asam nitrat dari yang seharusnya kemungkinan karena ada kebocoran dan gangguan atau kerusakan sehingga menyebabkan tidak optimalnya solenoid valve.

Saat penyalaan awal, terjadi ledakan yang disebabkan penyalaan oleh igniter hanya menjangkau propelan dalam area yang terbatas sehingga penyalaan dalam ruang bakar sedikit terlambat. Propelan yang tidak terbakar tersembur keluar dalam bentuk uap propelan, dan tersambar api yang ada di luar sehingga menimbulkan ledakan, mendorong nosel ke depan, dan menyebabkan ujung grafit inlet nosel pecah dan keluar dalam bentuk serbuk hitam.

Namun gaya dorong mesin ini naik 19,7% dibanding mesin sebelumnya, yakni mesin ECX1000H2-2.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kepala Pusat Teknologi Roket, LAPAN dan seluruh staf pengujian, atas dukungannya pada riset ini.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Hakim, A. N., (2011). *Analisis Propulsi Mesin Roket Cair RCX300H dengan Storable Propellant Asam Nitrat dan Kerosen*, Prosiding SIPTEKGAN XV-2011, ISBN 978-979-1458- 51-1.
- Hakim, A. N., (2015). *Rancang Bangun Mesin Roket Cair Dengan Gaya Dorong 1000 Kgf Menggunakan Propelan Asam Nitrat – Kerosen*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 13 No. 1, 71-85.
- Hakim, A. N., (2017). *Investigasi Numerik dan Peningkatan Kinerja Elemen Injektor Mesin Roket Cair ECX1000H2-2*, Prosiding SIPTEKGAN XXI-2017, ISBN: 978-602-71833-3-9.
- Son, M., Yu, K., Radhakrishnan, K., and Koo, J, (2016). *Design Procedure of a Movable Pintle Injector for Liquid Rocket Engines*, AIAA 2016-1453
- Jose, J. T., (2015). *Experimental Characterization of a Liquid Oxygen Isrosene Based Single Element Injector for a Liquid Rocket Engine*, International Journal of Engineering Studies and Technical Approach, Vol. 01, No.6
- Hakim, A. N., (2015). *Investigasi Aliran Fluida Pada Elemen Injektor Berbasis Pusaran Untuk Mesin Roket Cair*. 291-300 pp. In *Bunga Rampai Hasil Litbangyasa: Teknologi Pada Pesawat Terbang, Roket, dan Satelit*. Indonesian Book Project, Jakarta.
- Sutton, G. P., (2016). *Rocket Propulsion Elements, 9<sup>th</sup> Edition*, Wiley, ISBN: 978-1118753651
- Park, S. Y., Kim, Y. J., and Jeong, E. W., (2017). *Optimization of the Startup Sequence of a Liquid-propellant Rocket Engine*, Proceeding of 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS).
- Matsuo, K., (1994). *圧縮性流体力学－内部流れの理論と解析*, Rikogakusha.
- Kalt S., and Badal D., (1965). *Conical Rocket Nozzle Performanc under Flow - Separated Conditions*, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 2, No. 3, page 447 - 449.
- Schilling M., (1962). *Flow Separation in a Rocket Nozzle*, M. S. Thesis, Univ. Buffalo.
- Frey, M., (2001). *Behandlung von Strömungsproblemen in Raketendüsen bei Überexpansion*, Ph. D. Thesis, Universität Stuttgart.