

DAFTAR ISI

	Halaman
ALGORITMA DETEKSI FREKUENSI DTMF MENGGUNAKAN KORELASI SILANG UNTUK TELEKOMANDO WAHANA TERBANG (DTMF FREQUENCY DETECTION ALGORITHM USING CROSS-CORRELATION FOR VEHICLE TELECOMMAND) Sri Kliwati	1 - 8
PENGATURAN SUDUT AZIMUTH ROKET RUM UNTUK OPERASI PELUNCURAN PADA KECEPATAN ANGIN DI ATAS 10 KNOT (AZIMUTH ANGLE'S SETTING OF ROCKET RUM FOR LAUNCH OPERATION AT WIND SPEED MORE THAN 10 KNOT) Heri Budi Wibowo, Ahmad Riyadl, dan Yudha Agung Nugroho	9 - 16
DEKOMPOSISI TERMAL PROPELAN KOMPOSIT BERBASIS AMONIUM PERKlorat/ HYDROXY TERMINATED POLYBUTADIENE (AP/HTPB) (THE THERMAL DECOMPOSITION ANALYSIS OF AMMONIUM PERCHLORATE/ HYDROXYTERMINATED POLYBUTADIENE (AP/HTPB) COMPOSITE SOLID PROPELLANT) Wiwiek Utami Dewi, dan Yulia Azatil Ismah	17 - 24
APLIKASI CFD DALAM PENENTUAN PERFORMA MESIN TURBOFAN MODEL CFM56-5B YANG MENGALAMI CACAT PADA KIPAS UNTUK KEPUTUSAN MAINTENANCE (CFD APPLICATION IN THE DETERMINATION OF TURBOFAN ENGINE MODEL CFM56-5B PERFORMANCE WHICH HAS FAN DEFECT FOR MAINTENANCE DECISION) Vicky Wuwung, Puspa Wandani, Carolus Bintoro	25 - 36
PENINGKATAN KUALITAS FOKUS CITRA IMAGER MULTISPEKTRAL SATELIT LAPAN-A3 (IMAGE-FOCUSING QUALITY IMPROVEMENT ON LAPAN-A3 SATELLITE MULTISPECTRAL IMAGER) Andi Mukhtar Tahir, Patria Rachman Hakim, A. Hadi Syafruddin	37 – 50
RETIKULASI HIDROXYL TERMINATED POLUBUTADIENE (HTPB) MANDIRI DENGAN TOLUENE DIISOCIANATE (TDI) MEMBENTUK POLIURETAN SEBAGAI FUEL BINDER PROPELAN (RETICULATION OF HYDROXYL-TERMINATED POLYBUTADIENE (HTPB) WITH TOLUENE DIISOCYANATE (TDI) TO FORM POLYURETHANE AS A PROPELLANT FUEL-BINDER) Geni Rosita	51 - 60
KAJIAN EKSPERIMENTAL TENSILE PROPERTIES KOMPOSIT POLIESTER BERPENGUAT SERAT KARBON SEARAH HASIL MANUFAKTUR VACUUM INFUSION SEBAGAI MATERIAL STRUKTUR LSU (AN EXPERIMENTAL STUDY OF POLYESTER COMPOSITE TENSILE PROPERTIES REINFORCED UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER MANUFACTURED BY VACUUM INFUSION FOR LSU MATERIAL) Kosim Abdurohman, dan Aryandi Marta	61 - 72
ANALISIS KANDUNGAN ALUMINIUM POWDER PROPELAN BERDASAR ENERGI PEMBAKARAN DARI BOMB KALORIMETER (ANALYSIS OF PROPELLANT'S ALUMINUM POWDER CONTENT BASED ON BURNING ENERGY FROM BOMB CALORIMETER) Kendra Hartaya	73 - 80

Jurnal **TEKNOLOGI DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Technology**

Vol. 14 No. 1 Juni 2016

ISSN 1412- 8063

Nomor : 670/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

SUSUNAN DEWAN PENYUNTING JURNAL TEKNOLOGI DIRGANTARA

Penyunting

• Ketua

Dr. Heri Budi Wibowo, MT (Propelan, Piroteknik dan Material Penahan Panas)

• Anggota

Ir. Atik Bintoro, MT (Desain Kendaraan Ruang Angkasa, Misil dan Satelit)

Ir. Robertus Heru Triharjanto, M.Sc (Desain Roket dan Satelit)

Ir. Suhermanto, MT (Pemrosesan Image)

Dr. Ir. Bagus Hayatul Jihad, MT (Sistem Propulsi)

Mitra Bestari

Prof. Dr. Ing. Soewarto Hardhienata (Teknologi Satelit)/Universitas Pakuan

Prof. Dr. Ir. Tresna Priyana Soemardi,, M.Si., S.E. (Product Development, Material Komposit,
Desain Mekanikal)/UI

Dr. Ing. Agus Nuryanto (Teknologi Roket)

Dr. Ridanto Eko Putro (Fisika Terbang)

Dr. Waspada Kurniadi (Bahan Eksplosif)/DAHANA

SUSUNAN SEKRETARIAT REDAKSI JURNAL TEKNOLOGI DIRGANTARA

Pemimpin Umum

Ir. Christianus R. Dewanto, M.Eng

Pemimpin Redaksi Pelaksana

Ir. Jasyanto, MM

Redaksi Pelaksana

Mega Mardita, S.Sos., M.Si

Yudho Dewanto, ST

Dwi Haryanto, Skom

Tata Letak

M. Luthfi

Berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor : 818/E/2015 ditetapkan
Jurnal Teknologi Dirgantara sebagai Majalah Berkala Ilmiah Terakreditasi

Gambar cover: Aliran udara pada turbofan (Hall, Nancy, 2015) (*atas*); Hasil meshing (bawah kiri); Dent pada Leading Edge bilah kipas akibat Bird Strike (B763, 2013) (*bawah kanan*)

Alamat Penerbit :

LAPAN, Jl. Pemuda Persil No. 1, Rawamangun, Jakarta 13120

Telepon : (021) – 4892802 ext. 142 dan 146 (Hunting)

Fax : (021) – 47882726

Email : publikasi@lapan.go.id

Situs : <http://www.lapan.go.id>

<http://www.jurnal.lapan.go.id>

DARI REDAKSI

Sidang Pembaca yang kami hormati,

Puji syukur, kita panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 14, No. 1, Juni 2016 hadir ke hadapan sidang pembaca dengan menengahkan 8 (delapan) artikel sebagai berikut, "Algoritma Deteksi Frekuensi DTMF Menggunakan Korelasi Silang untuk Telekomando Wahana Terbang (DTMF Frequency Detection Algorithm using Cross-Correlation for Vehicle Telecommand)" ditulis oleh Sri Kliwati. Tujuan penelitian ini adalah membangun sistem telekomando untuk wahana terbang. Tulisan ini membahas metode deteksi frekuensi *Dual Tone Multi Frequency* (DTMF) dengan menggunakan algoritma korelasi silang dan data-base DTMF; "Pengaturan Sudut Azimuth Roket RUM untuk Operasi Peluncuran pada Kecepatan Angin di atas 10 knot (Azimuth Angle's Setting of Rocket RUM for Launch Operation at Wind Speed More Than 10 knot)" ditulis oleh Heri Budi Wibowo, Ahmad Riyadl, dan Yudha Agung Nugroho. Penelitian ini bertujuan mengatur sudut azimuth roket untuk mengatur jatuhnya motor roket sehingga tetap aman dalam radius area peluncuran. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengujian roket RUM pada kondisi ekstrim (kecepatan angin 10-20 knot) dengan variasi penahan beban dan sudut azimuth; Wiwiek Utami Dewi, Yulia Azatil Ismah, menulis Dekomposisi Termal Propelan Komposit Berbasis Amonium Perklorat/Hydroxy Terminated Polybutadiene (AP/HTPB) (The Thermal Decomposition Analysis of Ammonium Perchlorate/Hydroxyterminated Polybutadiene (AP/HTPB) Composite Solid Propellant)". Pada makalah ini akan dibahas analisis proses dekomposisi termal tiga jenis propelan komposit yang diproduksi oleh LAPAN diantaranya propelan RUM, RX450, dan RX1220. Ketiga propelan tersebut memiliki ciri khas yang membedakan satu sama lain; Artikel dengan judul "Aplikasi CFD Dalam Penentuan Performa Mesin Turbofan Model CFM56-5B yang Mengalami Cacat pada Kipas untuk Keputusan Maintenance (CFD Application in the Determination of Turbofan Engine Model CFM56-5b Performance which has Fan Defect for Maintenance Decision)" ditulis oleh Vicky Wuwung, Puspa Wandani, Carolus Bintoro. Penelitian ini membahas mengenai kajian kerusakan yang terjadi pada bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B. Kerusakan tersebut memerlukan adanya sebuah keputusan *maintenance*, apakah bilah kipas tersebut masih layak digunakan ataukah perlu di *repair* atau diganti; "Peningkatan Kualitas Fokus Citra Imager Multispektral Satelit LAPAN-A3 (Image-Focusing Quality Improvement on LAPAN-A3 Satellite Multispectral Imager)" ditulis oleh Andi Mukhtar Tahir, Patria Rachman Hakim, A. Hadi Syafruddin. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra komposit *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 dengan cara memastikan agar setiap kanal warna akan menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang seragam; Kemudian Geni Rosita menulis "Retikulasi Hidroksil Terminated Polubutadiene (HTPB) Mandiri Dengan Toluene Diisocyanate (TDI) Membentuk Poliuretan Sebagai Fuel Binder Propelan (Reticulation of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene (HTPB) with Toluene Diisocyanate (TDI) to form Polyurethane as a Propellant Fuel-Binder)". penelitian ini dilakukan reaksi HTPB : TDI pada beberapa perbandingan, dan HTPB yang direaksikan berbeda pada viskositas dan berat molekul ratanya; "Kajian Eksperimental Tensile Properties Komposit Poliester Berpenguat Serat Karbon Searah Hasil Manufaktur Vacuum Infusion Sebagai Material Struktur LSU (An Experimental Study of Polyester Composite Tensile Properties Reinforced Unidirectional Carbon Fiber Manufactured by Vacuum Infusion for LSU Material)" ditulis oleh Kosim Abdurrohman dan Aryandi Marta; Artikel terakhir Kendra Hartaya menulis "Analisis Kandungan Aluminium Powder Propelan Berdasar Energi Pembakaran dari Bomb Kalorimeter (Analysis of Propellant's Aluminum Powder Content Based on Burning Energy from Bomb Calorimeter)". Pengukuran besarnya energi pembakaran dilakukan dengan *bomb calorimeter*. Sampel propelan dibuat dengan pencampuran semua komponen penyusun propelan (kecuali TDI) HTPB, Aluminium, AP selama pengadukan 15 menit.

Demikianlah 8 artikel yang kami sajikan dalam Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 14, No. 1, Juni 2016. Seperti diketahui jurnal ini memuat hasil penelitian di bidang teknologi dirgantara dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris dan terbuka bagi ilmuwan-ilmuwan dalam dan luar negeri. Semoga sidang pembaca dapat mengambil manfaatnya.

ALGORITMA DETEKSI FREKUENSI DTMF MENGGUNAKAN KORELASI SILANG UNTUK TELEKOMANDO WAHANA TERBANG (DTMF FREQUENCY DETECTION ALGORITHM USING CROSS- CORRELATION FOR VEHICLE TELECOMMAND)

Sri Kliwati

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekar Sari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

e-mail : sri.kliwati@lapan.go.id

Diterima 6 Oktober 2015; Direvisi 28 Mei 2016; Disetujui 24 Juni 2016

ABSTRACT

In general, the frequency DTMF detection algorithm using FFT (Fast Fourier Transform) and Goertzel Algorithm. However, in certain circumstances a more suitable signal detected by the other algorithms. For example in a non-periodic signal as the measurement sensors for flight vehicle. The purpose of this study is to develop a system telecommand for flight vehicle. And this paper discusses the frequency DTMF (Dual Tone Multi Frequency) detection method using cross correlation algorithm and data-base DTMF. The simulation results show the frequency detection successfully carried out in accordance with the accuracy of the data-base created (1 Hz) to change the frequency of zero to 1700 Hz (DTMF frequency limit).

Keywords: *Frequency, DTMF, Detection of cross-correlation*

ABSTRAK

Deteksi frekuensi DTMF secara umum menggunakan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) dan Goertzel Algorithm. Akan tetapi pada kondisi tertentu sebuah sinyal lebih cocok dideteksi dengan algoritma yang lain. Misalnya pada sinyal yang non-periodik seperti pada pengukuran sensor-sensor wahana terbang. Tujuan penelitian ini adalah membangun sistem telekomando untuk wahana terbang. Dan tulisan ini membahas metode deteksi frekuensi *Dual Tone Multi Frequency* (DTMF) dengan menggunakan algoritma korelasi silang dan data-base DTMF. Hasil simulasi menunjukkan deteksi frekuensi berhasil dilakukan sesuai dengan akurasi *database* yang dibuat (1 Hz) untuk perubahan frekuensi antara nol hingga 1700 Hz (batas frekuensi DTMF).

Kata kunci: *Frekuensi, DTMF, Deteksi korelasi silang*

1 PENDAHULUAN

Deteksi frekuensi sinyal merupakan pemrosesan baik secara analog maupun secara digital untuk berbagai aplikasi seperti pada telekomunikasi, telemetri, kode keamanan, dan remote kontrol. Metode *Fast Fourier Transform* (FFT) digunakan dalam berbagai instrumentasi seperti sistem *Doppler* untuk *tracking* roket dan kendaraan, sistem radar untuk *tracking* wahana dan *atmosphere*. Untuk instrumentasi seperti deteksi *Dual Tone Multi Frequency* (DTMF) tertentu memerlukan algoritma alternatif untuk mendeteksi bentuk signal dari suatu obyek yang akan dicari. Tujuan dari penelitian ini adalah membangun sistem telekomando untuk wahana terbang. Sistem telekomando yang dimaksud bisa digunakan untuk mengontrol wahana terbang sesuai dengan yang diinginkan. Kegunaan dari sistem ini antara lain banyak diaplikasikan pada sistem radar, *Flight Termination System* (FTS), maupun untuk komunikasi digital. Dewasa ini telah berkembang berbagai algoritma yang bisa digunakan untuk mengontrol wahana terbang. Salah satu algoritma deteksi sinyal adalah korelasi-silang atau *cross-correlation* [Kliwati, 2015; Belmont, 1997; Jun, 2015; Daniel, 2015; Raghavender, 2014]. Untuk itu, pada tulisan ini pembahasan dibatasi pada algoritma deteksi frekuensi DTMF menggunakan korelasi silang (*cross correlation*). Keakuratan perhitungan dengan menggunakan algoritma ini

berbanding lurus dengan waktu pemrosesannya. Semakin akurat hasil yang didapatkan, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk memproses. Namun algoritma ini perlu dicoba untuk mengetahui performanya. Adapun algoritma deteksi frekuensi DTMF menggunakan korelasi silang untuk telekomando belum pernah diujicobakan atau diimplementasikan pada roket LAPAN. Selama ini sensor yang dipasang pada roket adalah antara lain GPS dan *accelerometer*, untuk mengetahui ketinggian, kecepatan, dan percepatan roket. Dengan menggunakan algoritma deteksi frekuensi DTMF menggunakan korelasi silang ini, diharapkan dapat membangun sistem telekomando untuk roket.

Pembahasan pada tulisan ini terbatas pada penggunaan korelasi silang untuk mendeteksi frekuensi DTMF yang masuk ke *onboard* prosesor wahana terbang.

Sinyal DTMF ini banyak diaplikasikan pada komunikasi telepon, pengiriman data digital, pengiriman data rahasia dan lain-lain dengan kondisi penggunaan perangkat keras yang berbeda-beda. Algoritma korelasi-silang ini banyak diaplikasikan untuk berbagai bidang deteksi sinyal, seperti pada bidang pasif radar untuk deteksi jarak obyek [Jun, 2015], bidang sistem *Doppler* untuk deteksi kecepatan obyek [Daniel, 2015], dan untuk *image processing* untuk deteksi obyek [Hari, 2014]. Selain itu juga menggunakan

algoritma Goertzel untuk deteksi sinyal tersebut [Nagakishore, 2014]. Akan tetapi algoritma untuk deteksi frekuensi sinyal DTMF tanpa menggunakan algoritma FFT belum berkembang pesat, untuk aplikasi tertentu sangat diperlukan. Penelitian pemrosesan sinyal tersebut masih terus dilanjutkan sesuai dengan kondisi perangkat keras maupun perangkat lunak yang akan digunakan. Metode deteksi frekuensi berbasis korelasi-silang ini dapat dikembangkan untuk berbagai aplikasi karena algoritma FFT cukup memerlukan memori dan kecepatan prosesor PC. Selain itu dapat digunakan untuk deteksi sinyal-sinyal yang lain yang mirip kegunaannya, seperti algoritma *neural networks* yang juga mempunyai fungsi yang sama [Yu, 1993].

Tulisan ini menyajikan pembahasan metode korelasi silang untuk deteksi frekuensi sinyal gelombang *Dual Tone Multi Frequency* (DTMF) dengan menggunakan data-base sinyal dengan frekuensi kombinasi 2 buah sinyal sinus. Algoritma korelasi-silang ini orisinal untuk aplikasi deteksi sinyal DTMF. Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab, selain mudah diimplementasikan juga fungsi-fungsi pada *software* ini sangat membantu baik untuk tampilan grafik dan juga *input* data secara analog maupun secara digital. Akan tetapi pada percobaan kali ini semua dilakukan secara simulasi. Metode ini belum pernah dipublikasikan sebelumnya, sehingga mempunyai orisinalitas algoritma.

2 METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk membangun suatu sistem telekomando untuk wahana terbang. Dengan adanya telekomando, maka wahana terbang bisa melaksanakan perintah yang dikirim dari *ground station*. Pembahasan pada makalah ini, sinyal yang dikirim berupa sinyal DTMF. Sedangkan untuk mendeteksi sinyal DTMF pada tulisan ini

menggunakan metode korelasi silang. Metode ini juga banyak diaplikasikan pada radar dan komunikasi digital. Fungsi korelasi ini digunakan untuk menentukan kemiripan/kesamaan antara dua buah sinyal. Pada radar, fungsi korelasi ini digunakan untuk menentukan posisi obyek yang terdeteksi.

Dalam bidang sinyal prosesing algoritma korelasi silang digunakan untuk mengukur kesamaan antara dua bentuk gelombang seperti $f(t)$ dan $g(t)$ yang dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut.

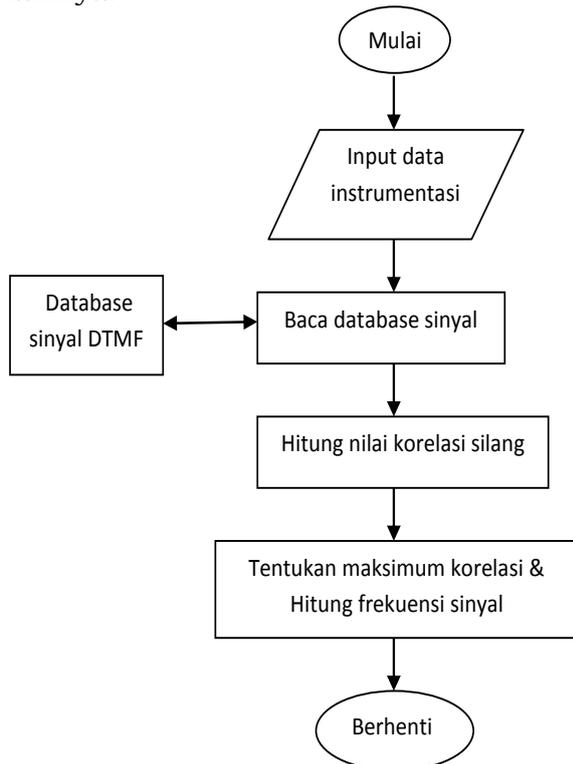
$$C(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)d\tau \tag{2-1}$$

Semakin mirip maka nilai pada persamaan (2-1) akan semakin besar, sebaliknya akan semakin kecil jika jauh dari kemiripan. Fungsi pada Matlab dapat menggunakan fungsi ***xcoor(f,g)***. Untuk membandingkan kemiripan dua buah sinyal dapat menggunakan *normalized cross correlation* NCC supaya nilainya tidak menjadi besar, tetapi antara -1 sampai dengan +1 dengan menggunakan persamaan berikut [Kliwati, 2015].

$$-1 \leq \bar{C}(t) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t + \tau)d\tau}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)^2 d\tau \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau)^2 d\tau}} \leq +1 \tag{2-2}$$

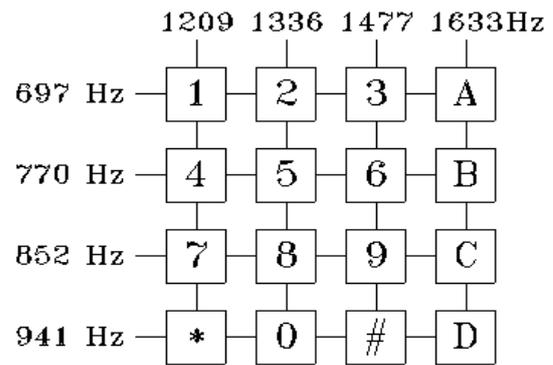
Secara praktek jika nilai NCC lebih dari 0,8 maka sudah dapat disebut kemiripannya cukup tinggi. Jika nilai mendekati nol, maka kedua sinyal tersebut semakin tidak mirip. Fungsi pada Matlab yang dapat digunakan adalah ***xcov(f,g,'coeff')***. Algoritma deteksi sinyal DTMF adalah seperti pada Gambar 2-1. Mula-mula PC akan menerima sinyal DTMF dari instrumen (misal sinyal radio dan telepon) secara analog. Kemudian, membaca *database* sinyal sinus dengan frekuensi pada batas frekuensi sinyal DTMF. Kemudian, sinyal yang diterima tersebut dihitung korelasi silang dengan semua data base tersebut. Jika nilai korelasi lebih dari

0,8, maka ditentukan sebagai frekuensi yang dideteksi. Proses tersebut diulang-ulang hingga sinyal yang diterima selesai. Algoritma yang telah dijelaskan di atas dapat digunakan untuk mendeteksi frekuensi sinyal DTMF secara umum. Metode tersebut juga dapat digunakan untuk mendeteksi bentuk-bentuk sinyal secara umum (selain gelombang sinus), sehingga secara luas dapat dimanfaatkan untuk sistem instrumen lainnya.



Gambar 2-1: Alur deteksi frekuensi sinyal DTMF berbasis algoritma korelasi silang

Data dua buah sinyal untuk kombinasi DTMF dapat dilihat pada Gambar 2-2. Misalnya, angka '1' merupakan kombinasi sinyal frekuensi 697 Hz dan 1209 Hz. Angka '2' adalah dengan frekuensi 697 Hz dengan 1336 Hz. Demikian selanjutnya, selain angka dari '0' hingga '9', juga huruf 'A', 'B', 'C' dan 'D'. Minimum frekuensi yang digunakan adalah 697 Hz dan maksimum frekuensi yang digunakan adalah 1633 Hz.



Gambar 2-2: Kombinasi frekuensi sinus untuk DTMF

Oleh karena itu data base sinyal sinus dimulai dari frekuensi 500 Hz hingga 1700 Hz dengan cacahan frekuensi 1 Hz. Batas frekuensi ini relatif rendah untuk dapat digunakan pada komunikasi secara umum seperti radio dan telepon. Simulasi deteksi sinyal DTMF ini menggunakan *software* Matlab dengan sebuah PC. *Database* dan sinyal DTMF dibuat pada Matlab dan digunakan untuk proses simulasi. Beberapa contoh sinyal sebagai bahan simulasi dengan angka dan huruf.

Untuk membuat *database* sinyal sinus, maka dengan menggunakan *software* Matlab dapat dengan mudah dilakukan seperti pada Gambar 2-3. Frekuensi antara 500-1700 Hz cukup untuk sinyal DTMF dengan cacahan frekuensi 1 Hz.

```

9      % data-base sinyal sinus 1 - 1700 Hz-
10     m=0;
11     for n=500:1:1700
12         m=m+1;
13         data(:,m) = sin(2*pi*(n)*t);
14     end
  
```

Gambar 2-3: *Database* sinyal sinus 500 Hz hingga 1700 Hz dengan *software* Matlab

Untuk deteksi sinyal DTMF, maka dengan algoritma korelasi silang dapat dengan mudah dilakukan seperti pada Gambar 2-4.

```

20 % deteksi signal DTMF-----
21 for nn=1:m
22 [C,LAGS] = xcov(data(:,nn),DTMF,'coeff');
23 Cm(nn)=max(C);
24 end
25 [m,nn]=max(Cm) ; % nilai puncak korelasi
26 frekd = nn/10 ; % find frekuensi signal
27 -----
    
```

Gambar 2-4: Deteksi frekuensi DTMF dengan software Matlab

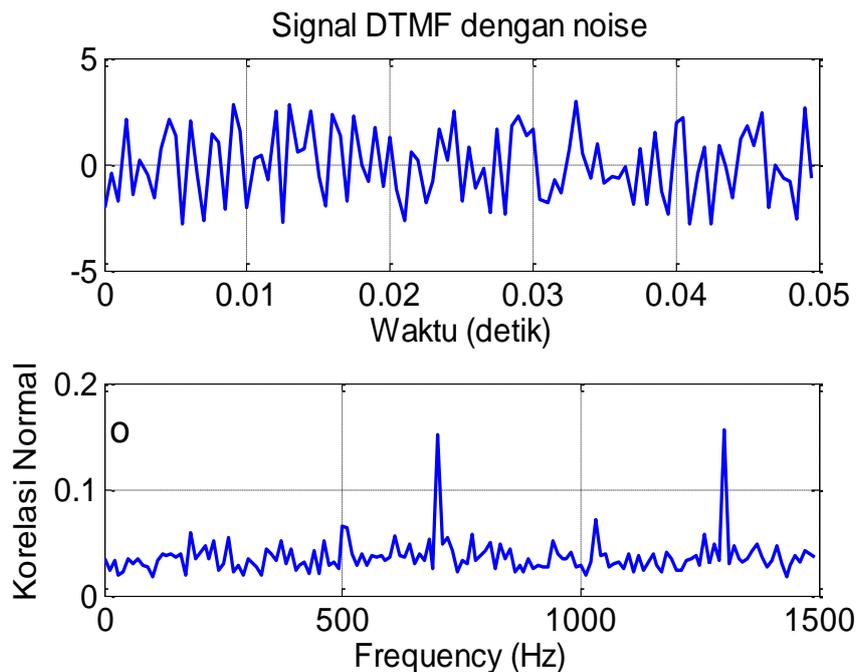
Dengan menggunakan algoritma yang telah dijelaskan secara rinci dan implementasi pada software Matlab di atas, maka simulasi sudah dapat dilakukan untuk deteksi sinyal DTMF berbasis korelasi silang.

3 HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

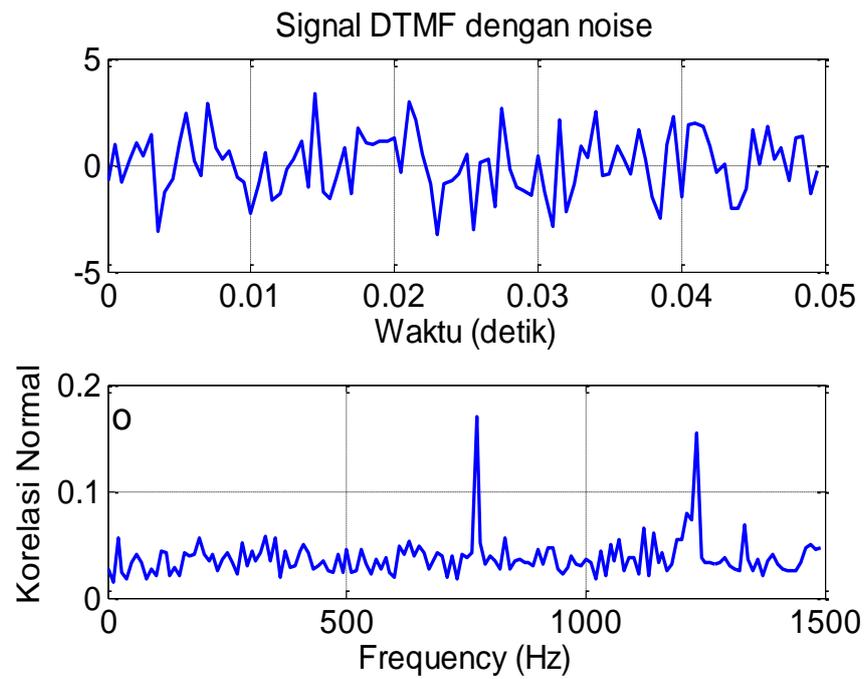
Algoritma yang telah dikembangkan di atas akan dilakukan verifikasi dengan menggunakan percobaan berbasis simulasi pada PC. Mula-mula yang dilakukan adalah dengan membuat database sinyal sinus dengan rentang frekuensi yang mencukupi sinyal DTMF yaitu antara 1 Hz hingga 1700 Hz. Simulasi ini menggunakan software Matlab dengan membuat sinyal DTMF yang dicampur dengan dengan sinyal derau. Besaran sinyal

derau cukup besar dengan perbandingan satu banding satu. Contoh sinyal dengan kode angka /1/ adalah seperti terlihat pada Gambar 3-1 bagian atas. Sedangkan hasil deteksi sinyal secara bersamaan adalah seperti pada Gambar 3-1 bagian bawah. Frekuensi yang terdeteksi adalah sekitar 697 Hz dan 1209 Hz sesuai dengan tabel kode DTMF pada Gambar 2-2.

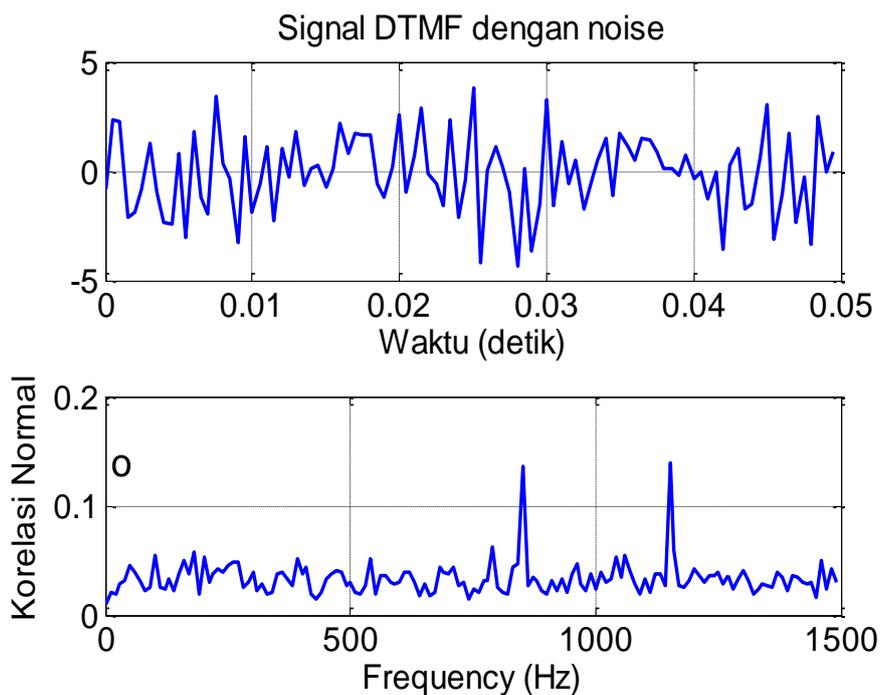
Contoh sinyal kode berikutnya adalah angka /4/ adalah seperti terlihat pada Gambar 3-2 bagian atas. Sedangkan hasil deteksi sinyal secara bersamaan adalah seperti pada gambar 3-2 bagian bawah. Frekuensi yang terdeteksi adalah sekitar 770 Hz dan 1209 Hz sesuai dengan tabel kode DTMF pada Gambar 2-2. Dari kedua contoh simulasi tersebut, algoritma yang digunakan berhasil untuk mendeteksi sinyal kode DTMF. Contoh lain dengan frekuensi yang lebih tinggi adalah dengan sinyal kode /7/ yaitu dengan frekuensi 852 Hz dan 1209 Hz seperti terlihat pada Gambar 3-3. Hasil deteksi frekuensi terlihat berhasil seperti pada Gambar 3-3 bagian bawah.



Gambar 3-1: Kombinasi frekuensi sinus untuk DTMF /1/



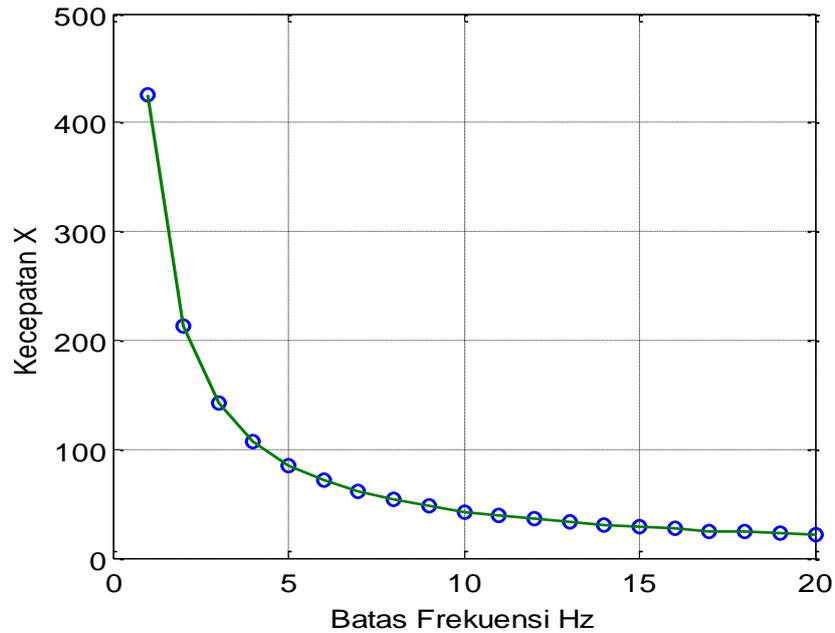
Gambar 3-2: Kombinasi frekuensi sinus untuk DTMF /4/



Gambar 3-3: Kombinasi frekuensi sinus untuk DTMF /7/

Analisis kemampuan untuk deteksi frekuensi dengan derau yang lebih variatif seperti pada literatur [Kliwati, 2015], dan terbukti tahan terhadap gangguan sinyal derau yang lebih tinggi. Untuk mempersingkat waktu hitung, khusus untuk deteksi sinyal DTMF ini tidak perlu menggunakan *database* yang lengkap, tetapi cukup menggunakan *database* sinyal dengan

batas frekuensi pada frekuensi yang digunakan oleh DTMF, yaitu 8 buah frekuensi dengan batas perubahan ± 5 Hz (untukantisipasi pergeseran frekuensi). Dengan penggunaan *database* yang sedikit, maka waktu untuk perhitungan menjadi lebih cepat (21,25x) dan sesuai untuk aplikasi *onboard*, seperti untuk wahana terbang (roket, UAV *Unmanned Aerial Vehicle*, dan robotika).



Gambar 3-4: Hubungan kecepatan perhitungan dengan batas frekuensi *database*.

Hubungan antara kecepatan perhitungan dengan batas frekuensi *database* untuk DTMF dapat dilihat pada Gambar 3-4. Semakin sempit batasnya akan semakin cepat perhitungannya, tetapi akurasi dapat terganggu jika ada pergeseran frekuensi akibat dari gangguan derau. Sebaliknya semakin lebar akan semakin lambat kecepataannya, tetapi tahan terhadap gangguan perubahan frekuensi. Oleh karena itu batas ini disesuaikan dengan kebutuhan.

4 KESIMPULAN

Telah dibuat metode deteksi frekuensi DTMF dengan menggunakan algoritma korelasi silang dengan *database* frekuensi 1 Hz untuk rentang frekuensi hingga 1700 Hz. Parameter akurasi frekuensi dan batas rentang frekuensi dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan aplikasi riil (1 Hz untuk percobaan kali ini). Metode ini selain untuk deteksi frekuensi juga dapat diaplikasikan untuk deteksi bentuk gelombang lainnya yang sangat dibutuhkan dalam berbagai bidang seperti medis, kontrol, dan lain-lain. Kecepatan hitung frekuensi dapat dipercepat (21,25x lebih cepat) dengan membatasi jumlah *database* sinyal sinus

sesuai dengan frekuensi DTMF (8 buah frekuensi dengan batas $\pm 5\text{Hz}$).

Algoritma deteksi frekuensi DTMF menggunakan korelasi silang berpotensi untuk membangun suatu sistem telekomando wahana terbang (roket) di LAPAN. Untuk selanjutnya dapat dikembangkan berbagai perintah untuk mengendalikan roket sesuai dengan misinya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terimakasih kepada Pustekroket yang telah memberikan fasilitas, dan bantuan diskusi ide dan teknis dari sesama peneliti, dosen, dan rekan-rekan yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

DAFTAR RUJUKAN

Chao-Ping Chu, Li-Te Shen, Shaw-Hwa Hwang 2014. *A New Algorithm for Tone Detection*, AASRI Conference on Sports Engineering and Computer Science Volume 8, 2014, 118-122.

Daniel R. Cadel, K. Todd Lowe, 2015. *Cross-correlation Doppler Global Velocimetry (CC-DGV)*, Optics and Lasers in Engineering, Volume 71, August, 51-61.

- Hari Mohan Rai, 2013. *ECG Signal Processing for Abnormalities Detection using Multi-Resolution Wavelet Transform and Artificial Neural Network Classifier*, Measurement Volume 46, Issue 9, November, 3238–3246.
- Hideyuki Kato, Miguel C. Soriano, Ernesto Pereda, Ingo Fischer, and Claudio R., Mirasso, 2013. *Limits to Detection of Generalized Synchronization in Delay-Coupled Chaotic Oscillators*, Phys. Rev. E 88, 062924 – Published 26 December.
- Jun Liu, Hongbin Li, Braham Himed, 2015. *On the Performance of the Cross-correlation Detector for Passive Radar Applications*, Signal Processing, Volume 113, August, 32-37.
- Jun Ye, 2003. *An Improved Cross-Correlation based Method of Blind Source Separation in Frequency Domain*, IEEE 2003 International Conference on Neural Networks & Signal Processing Publication Year: 2003 , Page(s): 867.
- M. R. Belmont and A. J. Hotchkiss, 1997. *Generalized Cross-Correlation Functions for Engineering Applications, Part I: Basic Theory*, J. Appl. Mech 64(2), 321-326 (Jun 01, 1997) (6 pages) doi: 10.1115/1.2787310
- M. R. Belmont, A. J. Hotchkiss, S. J. Maskell and E. L. Morris, 1997. *Generalized Cross-Correlation, Part II: Discretization of Generalized Cross-Correlation and Progress to Date in Its Implementation*, J. Appl. Mech 64(2), 327-335 (Jun 01, 1997) (9 pages) doi:10.1115/1.2787311
- Ming HUANG, 2011. *A Novel Cross-Correlation Algorithm Based on the Weighted Average for IEEE 802.11N Symbol Synchronization*, Journal of Information & Computational Science 8: 16 4255–4263.
- S Nagakishore Bhavanam, 2014. *Goertzel Algorithm Based DTMF Detection*, American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics AIJRSTEM 14-307;, AIJRSTEM 6-12.
- Sri Kliwati, 2015. *Deteksi Frekuensi Gelombang Sinus Menggunakan Algoritma Korelasi Silang*, ISAST 2015 Bali Indonesia.
- Y.Raghavender Rao, 2014. *Application of Normalized Cross Correlation to Image Registration*, International Journal of Research in Engineering and Technology Volume: 03 Special Issue: 05 May.
- Yu Hen Hu, 1993. *Applications of Artificial Neural Networks for ECG Signal Detection and Classification*, Journal of Electrocardiology (Impact Factor: 1.36); 26 Suppl:66-73.
- Zhijun WU, Yi CUI, Meng YUE, Lan MA, Lu WANG, 2014. *Cross-correlation Based Synchronization Mechanism of LDDoS Attacks*, Journal of Networks, Vol 9, No 3 (2014), 604-611, Mach doi: 10.4304/jnw.9.3.604-611.

PENGATURAN SUDUT AZIMUTH ROKET RUM UNTUK OPERASI PELUNCURAN PADA KECEPATAN ANGIN DI ATAS 10 KNOT (AZIMUTH ANGLE'S SETTING OF ROCKET RUM FOR LAUNCH OPERATION AT WIND SPEED MORE THAN 10 KNOT)

Heri Budi Wibowo¹, Ahmad Riyadi, dan Yudha Agung Nugroho
Pusat Teknologi Roket
Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekar Sari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia
¹e-mail: heribw@gmail.com

Diterima 14 Desember 2015; Direvisi 07 Juni 2016; Disetujui 29 Juni 2016

ABSTRACT

RUM rocket is a rocket used in the payload competition among university students. The rocket is designed to bring a maximum payload of 1 kg to altitude of 600-1000 m and falls safely on a 500 m radius of the left and right rear of the center point of the launching pad of the conditions of wind speeds below 10 knots. In extreme circumstances where the wind speed is above 10 knots, the effect of speed and direction of wind to the stability of the rocket flight direction large enough to cause it to fall beyond the defined safety radius. The research aims to adjust azimuth setting of the rocket so that the fall of the rocket motor remains secure within the radius of the launch area. The study was conducted by testing a rocket RUM in extreme conditions (wind speed of 10-20 knots) with variations in shear-pin and azimuth angle. The test variables are the position of the fallen rocket motor. The results show that the wind direction and speed significantly affecting direction of rockets flight. The results show that rocket azimuth angle of 60 degrees with the direction of 90 degrees from the wind direction can make thea rocket falls on a secure area (within 500 m).

Keywords: *Rocket RUM, stability, Azimuth angle of attack, the wind speed*

ABSTRAK

Roket RUM adalah roket untuk lomba muatan antar mahasiswa. Roket didisain membawa beban maksimum 1 kg dengan ketinggian 600-1000 m dan jatuh pada radius 500 m dari titik pusat peluncuran dengan kondisi kecepatan angin di bawah 10 knot. Dalam keadaan ekstrim dimana kecepatan angin di atas 10 knot, pengaruh kecepatan angin terhadap arah terbang roket menjadi besar sehingga dapat menyebabkan jatuhnya roket meleset di luar radius aman yang telah ditetapkan. Penelitian ini bertujuan mengatur sudut azimuth roket untuk mengatur jatuhnya motor roket sehingga tetap aman dalam radius area peluncuran. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengujian roket RUM pada kondisi ekstrim (kecepatan angin 10-20 knot) dengan variasi penahan beban dan sudut azimuth. Hasil optimasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan penahan beban dan pengaturan sudut azimuth roket 60 derajat dengan arah 90 derajat dari arah angin dapat membuat roket jatuh pada daerah aman peluncuran (500 m).

Kata kunci: *Roket RUM, Kestabilan, Azimuth sudut serang, Kecepatan angin*

1 PENDAHULUAN

Roket RUM dikembangkan untuk kompetisi muatan roket antar mahasiswa di Indonesia. Roket RUM didisain untuk mengangkut beban guna 1 kg dengan separasi muatan pada ketinggian 600-1000 m. Roket dirancang aman dan stabil, motor roket dan *payload* diberi parasut pengaman setelah separasi, dan apabila parasut gagal berfungsi maka roket akan tetap jatuh pada area aman. Area aman yang dimaksud adalah pada radius 500 m dari titik peluncuran (*launching pad*). Roket yang didisain memiliki kecepatan maksimum 60 m per detik tersebut stabil pada kondisi kecepatan maksimal 10 knot (5 m/det) (Riadhi, 2012; Wibowo dan Riyadl, 2015; Sunar, 2014).

Pada kecepatan angin di bawah 5 m/det, roket masih stabil, namun pada kecepatan angin di atas 5 m/det maka pengaruhnya cukup besar terhadap kestabilan dan arah roket. Arah angin yang cukup besar secara aerodinamis dapat mempengaruhi arah terbang roket, cenderung akan menuju sumber arah angin (Wibowo, 2012). Hal ini dapat membahayakan peserta karena dapat terjadi lintasan jatuhnya roket di luar daerah aman (dalam kondisi parasut tidak mengembang). Oleh karena itu, operasi peluncuran diusahakan roket diluncurkan pada kondisi aman, yaitu kecepatan angin kurang dari 5 m/det, diarahkan ke arah datangnya angin.

Dalam kenyataan, operasi peluncuran dibatasi oleh waktu peluncuran yang pendek (3 jam), harus dilakukan pada hari yang sudah ditetapkan, namun dimana kecepatan angin adalah di atas 5 m/det. Dalam kejadian ekstrim tersebut, terdapat pilihan ditundanya operasi peluncuran yang berakibat berhentinya lomba, atau diteruskan dengan modifikasi operasi peluncuran (Agung, 2014).

Berdasarkan teori aerodinamika penerbangan, terdapat hubungan kestabilan roket, kecepatan awal, dan gaya angin yang menerpanya. Dengan mengatur kecepatan awal roket maka kestabilan roket dapat dipertahankan. Untuk mengatur kecepatan awal roket yang sudah ditentukan, maka dapat dilakukan dengan memberikan beban penahan sehingga roket memiliki kecepatan awal yang dibutuhkan untuk meluncur. Berdasarkan kenyataan tersebut, maka kestabilan roket RUM pada kecepatan angin 5 m/s sampai 10 m/s dapat dikendalikan dengan mengatur beban penahan. Demikian pula arah terbang roket dipengaruhi oleh arah sudut serang dan gaya eksternal yaitu arah angin. Dengan memanfaatkan gaya-gaya yang bekerja pada roket, maka penentuan arah sudut serang roket dalam menghadapi arah angin yang ada dengan kecepatan yang tinggi dapat dikendalikan (Wibowo, 2015).

Penelitian ini bertujuan mengatur azimuth sudut terbang roket untuk

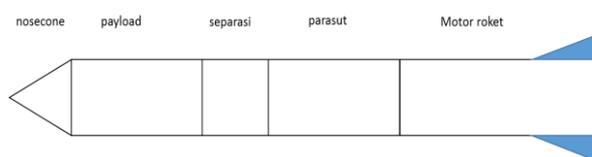
mengatur jatuhnya sisa motor roket sehingga tetap aman dalam radius area peluncuran. Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah diperoleh kondisi optimum dari penentuan azimuth yang diperlukan apabila peluncuran dilakukan pada kondisi kecepatan angin di atas 5 m/det atau 10 knot.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Spesifikasi Roket RUM

Roket RUM didisain memiliki diameter dalam 65 mm, diameter luar 70 mm, panjang roket 122 mm, dengan kompartemen ruang *payload* memiliki panjang minimal 20 cm dan berat maksimal 1,5 kg, seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1. Berat total maksimum roket adalah 5 kg. Prestasi terbang diinginkan mencapai ketinggian 1000 m atau jangkauan maksimum 2000 m. Untuk mendapatkan disain roket yang diinginkan, maka daya dorong minimum yang diperlukan adalah 28 kgf. Roket RUM juga dilengkapi dengan 2 buah parasut untuk *recovery*, satu parasut berdiameter 1,5 m digunakan untuk *recovery* muatan roket dan satu parasut lagi dengan diameter 1,0 m digunakan untuk *recovery* motor roket. Biasanya roket RUM diluncurkan dari peluncur aluminium sepanjang 2 m dengan sudut elevasi antara $70^\circ - 85^\circ$. RUM memiliki 4 sirip pada bagian pangkal roket. Percepatan roket saat meluncur adalah 7 G.

RUM secara umum terbagi dalam tiga bagian penting, yaitu motor roket, muatan/*payload*, dan sistem *recovery* seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1. RUM mampu menghasilkan daya dorong rata-rata sebesar 30 kgf selama 3,5 detik pada tekanan 50 atm.

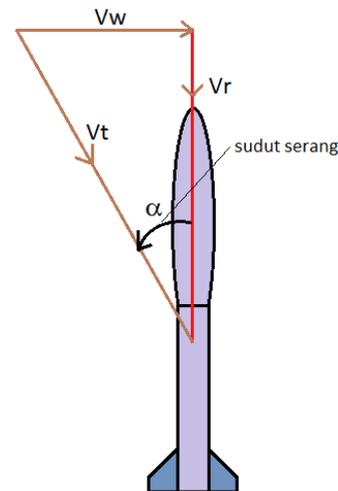


Gambar 2-1:Kompartemen Roket RUM (Wibowo dan Riyadl, 2015)

2.2 Kestabilan Roket dan Pengaruh Angin

Roket RUM adalah roket balistik yang didisain untuk terbang secara balistik tanpa panduan. Dengan kondisi atmosfer yang ideal, roket diharapkan terbang lurus tanpa adanya gangguan. Kondisi ideal seperti ini tentunya hal yang sulit dicapai.

Angin adalah faktor yang dapat mempengaruhi arah dan kestabilan roket (Zyluk, 2014). Arah dan kecepatan angin dapat berubah setiap saat, akibatnya meskipun roket diluncurkan dengan kondisi awal yang sama, roket dapat mengalami gangguan sehingga lintasan terbangnya juga akan berbeda.



Gambar 2-2:Vektor arah angin dan kecepatan roket

Sebuah roket memiliki margin kestabilan yang biasanya dinyatakan dalam diameter roket. Margin kestabilan ini adalah jarak antara pusat masa roket dengan pusat gaya pada roket pada kondisi sudut serang nol derajat. Pusat masa roket cenderung tidak berubah, sedangkan pusat gaya roket dapat berubah tergantung dari besarnya kecepatan dan besarnya sudut serang roket. Setiap roket memiliki batas maksimum besarnya sudut serang dimana jika melebihi batas maksimum tersebut maka roket akan terbang dengan tidak stabil. Dari Gambar 2-2, dapat dilihat bahwa besarnya sudut serang ditentukan dari besarnya sudut antara kecepatan resultan (V_t) dengan

sumbu simetri roket. Kecepatan resultan adalah penjumlahan vektor dari kecepatan roket (V_r) dan kecepatan angin (V_w), (Griner, 1967).

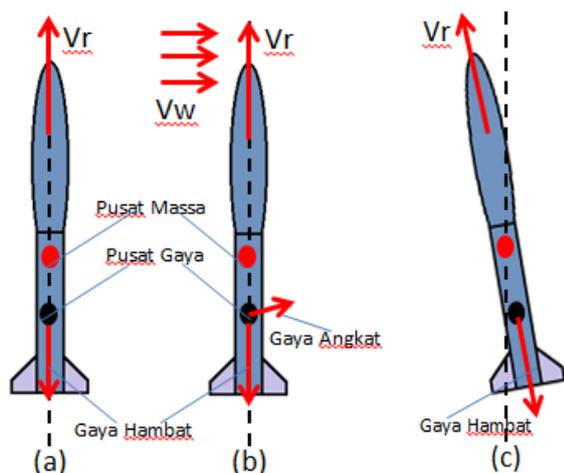
$$\vec{V}_t = \vec{V}_r + \vec{V}_w \quad (2-1)$$

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{V_r}{V_t}\right) \quad (2-2)$$

Dari persamaan (2-1) dan (2-2), maka untuk kecepatan roket yang tetap, bertambah besarnya kecepatan angin akan menyebabkan bertambah besarnya sudut serang roket yang akibatnya akan mengurangi nilai kestabilan roket.

2.3 Arah Terbang Roket dan Pengaruh Angin

Pada saat roket terbang, maka pada roket bekerja gaya dan momen aerodinamika. Gaya dan momen aerodinamika yang bekerja pada roket berbanding lurus dengan besarnya sudut serang yang terjadi pada roket (Sutton dan Blibarsz, 2011).



Gambar 2-3: Proses perubahan arah terbang roket akibat gangguan angin

Jika roket terbang dengan kondisi ideal dan lurus (sudut serang sama dengan nol) maka tidak terdapat momen aerodinamika dan gaya aerodinamika yang bekerja hanya gaya hambat. Ketika terdapat sudut serang (misalnya dalam kasus ini disebabkan adanya gangguan dari angin) maka selain gaya

hambat, akan terjadi juga gaya angkat dan momen *pitch* pada roket (Gambar 2-3). Pada Gambar 2-3 dapat dilihat proses perubahan arah terbang roket yang diakibatkan oleh gangguan angin.

Gambar 2-3a adalah kondisi dimana roket terbang lurus tanpa ada gangguan dari angin. Pada kondisi ini sudut serang roket α besarnya nol dan gaya yang bekerja pada roket hanya gaya hambat. Pada Gambar 2-3b adalah kondisi dimana roket mengalami gangguan angin. Dengan adanya gangguan angin tersebut maka akan terdapat sudut serang yang akibatnya terjadi gaya angkat pada roket. Gaya angkat pada roket bekerja pada jarak tertentu dari pusat massa roket. Adanya jarak dari pusat massa dan titik gaya angkat roket menyebabkan terjadinya momen aerodinamika. Jika dilihat pada gambar di atas, maka momen aerodinamika tersebut akan cenderung membuat arah terbang roket menuju ke arah datangnya angin (Gambar 2-3c), atau jika dilihat pada Gambar 2-2, roket akan bergerak ke arah vektor resultan kecepatan roket.

3 METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan melakukan pengujian roket RUM pada kondisi kecepatan angin 10-20 knot dengan variasi penahan beban dan azimuth sudut serang. Variabel pengujian adalah jatuhnya motor roket dan stabilitas roket.

Roket yang digunakan adalah roket RUM. Pengujian terbang roket dilakukan di Lapangan Uji Roket Pameungpeuk, Garut, Jawa Barat.

Untuk menguji pengaruh angin terhadap kestabilan dan arah terbang roket, maka dilakukan serangkaian uji terbang roket RUM dengan beberapa kuat penahan beban (0-20 kg) dan arah azimuth peluncuran (-90 sampai +90 derajat) dari arah angin. Pada peluncuran roket kemudian diamati arah terbang

roket, kestabilan dan jatuhnya roket setelah separasi. Kestabilan roket diamati secara visual.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

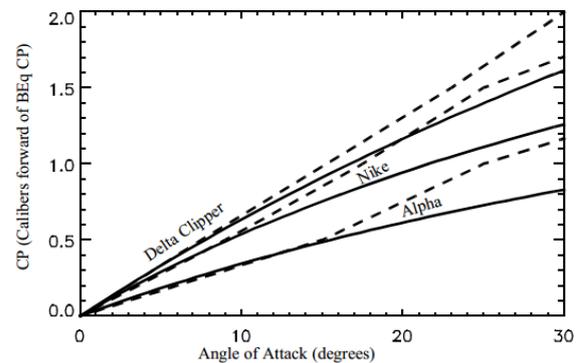
4.1 Pengaruh Beban Penahan Terhadap Kestabilan Roket pada Berbagai Kecepatan Angin

Untuk mempelajari pengaruh beban penahan terhadap kestabilan roket, maka dilakukan pengujian terbang roket dengan variasi beban penahan dan kecepatan angin terhadap kestabilan roket. Kestabilan roket terbang diamati dengan visual dan dapat dihitung dengan perhitungan aerodinamik. Hasilnya ditampilkan pada Tabel 4-1, pada kondisi tanpa beban penahan dengan kecepatan angin 0 m/det, maka roket meluncur dengan stabil. Hal ini menunjukkan pengaruh eksternal tidak ada, dan memang roket didesain sangat stabil. Pada kecepatan angin 5 m/det, roket masih cukup stabil, artinya stabilitas roket belum terganggu dengan adanya faktor eksternal atau stabilitas masih cukup menahan pengaruh gaya yang ditimbulkan oleh angin (Agung, 2010). Pada kecepatan angin 10 m/det, ternyata roket tidak stabil, dimana roket meluncur dengan sedikit “tumbling”. Hal ini disebabkan oleh gaya yang ditimbulkan oleh angin menerpa roket sehingga faktor eksternal yang cukup besar tersebut mengakibatkan pengaruh terhadap arah terbang roket (Wibowo dan Riyadl, 2015). Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin yang tinggi memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap stabilitas roket.

Kecepatan awal roket adalah nol dengan percepatan awal 4G atau 40 m/det. Dengan kecepatan angin 10 m/det maka pengaruh gaya angin adalah $\frac{1}{4}$ gaya dorong roket. Dengan demikian maka pengaruh tersebut cukup besar. Upaya menurunkan pengaruh kecepatan angin dapat dilakukan dengan menaikkan kecepatan awal dari roket sehingga dengan percepatan awal 4G, maka gaya total

roket di awal adalah meningkat sehingga pengaruh angin bisa diturunkan. Tumbling terjadi dan sangat besar pada saat gaya eksternal sekitar $\frac{1}{4}$ dari gaya dorong roket. Hal ini berbeda dengan pada kecepatan angin 5 m/det sehingga pengaruh eksternal kecepatan angin adalah $\frac{1}{8}$ dari gaya dorong roket.

Nilai kestabilan roket dipengaruhi oleh besarnya sudut serang yang terjadi pada roket. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4-1 yang dirujuk oleh Robert Galejis (2012).



Gambar 4-1: Posisi pusat gaya terhadap perubahan sudut serang

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa pusat gaya roket bergerak ke depan (mendekati pusat massa) dengan bertambah besarnya sudut serang dimana besarnya sudut serang dipengaruhi besarnya kecepatan angin. Tergantung dari posisi pusat massa roket, maka terdapat nilai maksimum untuk sudut serang yang diperbolehkan.

Tabel 4-1 dapat menerangkan karakteristik tersebut. Untuk menaikkan kecepatan awal roket, maka roket diberi beban penahan sehingga roket akan bergerak setelah mengalami beban sesuai dengan yang ditentukan. Pada kondisi kecepatan angin 10 m/det, maka diberikan beban mulai dari 0,10, dan 20 kg. Beban tersebut setara dengan 0, 4G, dan 8G. Pada kondisi beban nol, maka terjadi tumbling cukup besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa besarnya kecepatan angin mampu memberikan simpangan gaya sebesar 10 derajat ke arah horisontal sehingga mengakibatkan tumbling yang

cukup signifikan. Kemudian pada penambahan beban penahan sebesar 10 kg, maka akan memberikan kestabilan yang lebih baik, namun masih kelihatan tumblingnya. Hal ini dimungkinkan karena dengan penambahan beban penahan 10 kg yang setara dengan 10 G, maka pengaruh angin menjadi sekitar 1/6 dari gaya total roket ke depan. Pada penambahan beban penahan sebesar 20 kg atau setara dengan 8G, maka pengaruh angin menjadi 1/8 dari gaya dorong roket. Hal ini menjadi sama dengan keadaan roket tanpa beban penahan pada kecepatan angin 5 m/det yang dianggap stabil. Berdasarkan kenyataan tersebut, maka dapat diambil kesimpulan bahwa dengan adanya beban penahan dapat menaikkan kestabilan penerbangan roket karena akan menaikkan kecepatan awal dan mereduksi pengaruh gaya yang ditimbulkan oleh angin. Mengacu pada kondisi dari batas stabilitas dengan kecepatan angin 5 m/det dimana faktor eksternal adalah 1/8 dari gaya total arah roket, maka penggunaan beban penahan dapat diekstrapolasi untuk kondisi dimana kecepatan angin cukup tinggi.

Tabel 4-1: PENGAMATAN STABILITAS ROKET PADA BERBAGAI BEBAN PENAHAN DAN KECEPATAN ANGIN

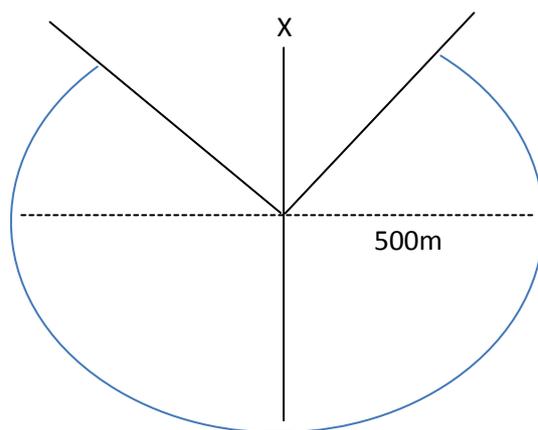
No.	Kec angin (m/det)	Beban penahan (kg)	stabilitas
1	0	0	Stabil
2	5	0	Stabil
3	10	0	Tumbling
4	10	10	Tumbling
5	10	20	Stabil

4.2 Pengaruh Arah dan Kecepatan Angin Terhadap Arah Terbang Roket

Radius aman dalam suatu operasi peluncuran ditunjukkan pada Gambar 4-2, dalam gambar tersebut dapat

digambarkan bahwa arah sudut peluncuran adalah ke arah depan (X), dengan sudut 90 derajat, kemudian daerah belakang dan samping, masing-masing adalah 500 m diasumsikan sebagai daerah aman. Artinya pada saat roket meluncur dan parasut tidak bekerja, maka roket jatuh di daerah yang aman sebagai tempat jatuhnya roket. Roket diluncurkan pada arah depan (X), dengan harapan jatuh ke arah X. Apabila karena angin dan sebagainya, maka roket diharuskan jatuh di dalam area peluncuran yang ditentukan, yaitu pada jarak 500 m kiri, kanan, dan belakang dari titik peluncuran.

Untuk menentukan daerah jatuhnya roket apabila tanpa parasut maka dilakukan pengujian roket RUM dengan variasi kecepatan angin. Untuk arah angin, maka koordinat arah peluncuran (X) diukur perbedaan dengan arah angin bertiup. Pada pengujian, maka posisi daerah aman dibuat tetap, penentuan arah peluncuran roket (azimuth) digunakan sebagai variabel. Pengujian dilakukan dengan mengubah arah azimuth atau sudut serang dengan posisi arah angin adalah dua, yaitu arah sesuai dengan arah peluncuran X, dan pada arah 45 derajat dari posisi X.



Gambar 4-2: Daerah aman peluncuran roket.

Pengaruh arah dan kecepatan angin terhadap arah terbang roket dipelajari dengan melakukan pengujian terbang roket pada berbagai keadaan. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4-2.

Tabel 4-2: PENGAMATAN ARAH TERBANG ROKET PADA BERBAGAI ARAH DAN KECEPATAN ANGIN

No.	Kec angin (m/det)	Arah angin (derajat)	Sudut zimuth (derajat)	Arah jatuh roket
1	0	0	0	0
2	5	0	0	0
3	5	0	+45	0
4	5	+45	0	0
5	5	+45	+90	+60
6	10	0	0	+180
7	10	0	+45	0
8	10	+45	0	+180
9	10	+45	+90	+45

Menurut teori aerodinamik, apabila pengaruh angin cukup besar, maka arah terbang roket biasanya akan menuju arah angin datang (Lapan, 2010). Hasil pengujian bahwa pada saat kecepatan angin di bawah 5 m/det, maka arah terbang roket selalu sesuai dengan arah sudut serang roket, walaupun dengan simpangan yang relatif kecil. Hal ini dikarenakan pengaruh gaya dari angin relatif lebih kecil dibandingkan dengan pengaruh gaya dorong roket. Pada keadaan angin di atas 5 m/det, dalam penelitian ini digunakan kecepatan angin 5 m/det, ternyata memiliki perilaku yang berbeda. Pengaruh gaya dari angin cukup besar sehingga mampu membelokkan arah roket secara signifikan, gaya angin cukup besar dan berpengaruh terhadap gaya dorong roket. Perilaku tersebut menguatkan hasil pengamatan bahwa manuver roket RUM selalu menuju ke arah datang angin (Lapan, 2010). Untuk kecepatan angin di bawah 5 m/det, gaya yang tumbuh sudah ada namun masih relatif kecil dibandingkan dengan gaya dorong yang ditimbulkan oleh roket. Manuver angin relatif kecil sehingga memberikan penyimpangan arah terbang yang relatif kecil. Karena pengamatan dilakukan secara visual, maka penyimpangan pada orde 10 derajat

tidak dapat dilakukan. Namun secara umum dapat dilihat tidak lebih dari 15 derajat.

Profil arah roket dari Tabel 4-2 juga menarik diperhatikan bahwa arah roket akan berbelok sekitar 45 derajat ke kiri dari arah sudut serang roket sehingga searah dengan arah angin. Hal ini terjadi karena ketika terjadi gangguan angin maka akan terjadi gaya dan momen aerodinamika pada roket yang cenderung akan membuat roket kearah dari mana angin datang. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2-3 dan penjelasan pada sub bab 2.3.

4.3 Optimasi Kondisi Peluncuran Ekstrim pada Kecepatan Angin di atas 10 m/det

Berdasarkan hasil pembahasan di awal, bahwa kecepatan angin memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas terbang roket. Adanya beban penahan memiliki korelasi kuat terhadap stabilitas terbang roket melalui perubahan kecepatan awal terbang roket. Dengan menggunakan asumsi bahwa kestabilan dapat dipertahankan pada sekitar kecepatan angin harus di bawah 1/8 gaya dorong roket, maka untuk kecepatan angin 5 m/det sampai 10 m/det dapat digunakan beban penahan 20 kg, untuk kecepatan angin di atas 10 m/det sulit dilakukan penerbangan roket karena beban penahan terlalu besar dibandingkan dengan gaya dorong roket yang tidak bertambah.

Kecepatan dan arah angin memiliki pengaruh terhadap arah terbang roket RUM secara signifikan. Pada kecepatan angin di atas 5 m/det, maka arah terbang roket cenderung menuju arah sumber angin berasal. Pada pengujian dengan sudut serang yang berbeda, maka arah terbang roket akan berbelok ke kiri dari arah sudut serang roket sebesar 45 derajat.

Dengan dasar kenyataan tersebut, maka keadaan optimal kondisi peluncuran untuk roket RUM dengan kecepatan angin di atas 5 m/det dapat dilakukan

penurunan sudut serang roket pada 60 derajat, azimuth +45 derajat dari arah angin, dan pemberian beban penahan sebesar 20 kg, untuk menjamin arah roket sesuai dengan daerah aman yang ditetapkan.

5 KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah angin dan kecepatan angin berpengaruh signifikan terhadap arah terbang roket. Adanya penahan beban dapat merubah kecepatan awal roket sehingga dapat meningkatkan kestabilan terbang roket. Hasil optimasi menunjukkan bahwa pengaturan sudut azimuth roket 60 derajat dengan arah 90 derajat dari arah angin dapat membuat roket stabil dan jatuh pada daerah aman peluncuran (500 m).

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih diucapkan kepada Kepala Pusat Teknologi Roket yang telah memberikan fasilitas dan biaya untuk tercapainya penelitian ini berlangsung. Terimakasih juga diucapkan kepada Saudara Agus Aribowo, Kepala Bidang Program dan Fasilitas, Pustekbang LAPAN atas ide dasarnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Galejs, Robert, 2012. *Wind Instability—What Barrowman Left Out*.
- Griner, Gary M., 1967. *Effect of Rocket Thrust-Time Curve on Wind Dispersion*.
- LAPAN, 2010. *Buku Pedoman Workshop Roket RUM*, LAPAN, Jakarta.
- LAPAN, 2015. *Buku Panduan Lomba Muatan Roket KOMURINDO Tahun 2015*, LAPAN, Jakarta.
- Riadhi, H.S., 2012. *Roket RUM Sebagai Sarana Pembelajaran Roket Pengorbit Satelit*, Prosiding Seminar Nasional JASAKIAI, Yogyakarta.
- Sutton, G.P. dan Biblarz, O., 2011. *Rocket Propulsion Elements*, 9th ed., John Wiley & Son, New York.
- Wibowo, H.B. dan Riyadl, A., 2015. *Analisis Kinerja Roket Rum untuk Peningkatan Keberhasilan Lomba Muatan Roket Antar Mahasiswa*, Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara, No. 1, Vol. 2, Jakarta.
- Wibowo, H.B., 2012. *Efektifitas Kinerja Roket RUM*, Prosiding Seminar Nasional JASAKIAI, Yogyakarta.
- Wibowo, H.B., 2015. *Laporan Penelitian Pengembangan Roket RUM*, Laporan Teknis Pusat Teknologi Roket, LAPAN.
- Zyluk, Andrej, 2014. *Numerical Simulation Of The Effect Of The Wind On The Missile Motion*, Journal Of Theoretical And Applied Mechanics.

**DEKOMPOSISI TERMAL PROPELAN KOMPOSIT BERBASIS
AMONIUM PERKlorAT/HYDROXY TERMINATED POLYBUTADIENE
(AP/HTPB)
(THE THERMAL DECOMPOSITION ANALYSIS OF AMMONIUM
PERCHLORATE/HYDROXYTERMINATED POLYBUTADIENE
(AP/HTPB) COMPOSITE SOLID PROPELLANT)**

Wiwiek Utami Dewi¹, dan Yulia Azatil Ismah

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekar Sari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

¹e-mail: wiwiek.utami@lapan.go.id/wiwiekdewi@gmail.com

Diterima 22 Maret 2016; Direvisi 11 Mei 2016; 2015; Disetujui 17 Juni 2016

ABSTRACT

Thermal decomposition process of AP/HTPB solid propellant type RUM, 450 and 1220 were investigated by DTG60 (Differential Thermogravimetric) with operational parameters: temperature 30 – 400°C, nitrogen flow rate 50 ml/min, and heating rate 2.5 C/min. Thermal decomposition analysis will be the first step of decomposition kinetics research in determining life time of the propellant. TGA curve of propellant RUM was found to be two staged meanwhile the thermal decomposition of propellant 450 and 1220 has become one staged. The DTA curve/thermogram of propellant RUM show the formation of intermediate product before full-length decomposition. Unlike propellant RUM, DTA curves of propellant 450 and 1220 do not show the formation of intermediate product. Decomposition process of propellant 450 and 1220 accelerate by Al presence. The difference between AP modal on propellant 450 and 1220 show insignificance effect to the amount of decomposition energy consumption.

Kata kunci: *Dekomposisi, Propelan, DTA, TGA, DTG*

ABSTRAK

Proses dekomposisi termal propelan padat AP/HTPB jenis RUM, 450 dan 1220 telah dianalisis menggunakan *Differential Thermogravimetric* 60 (DTG) dengan parameter operasi: suhu 30 - 400°C, atmosfer nitrogen berlaju alir 50 ml/menit, dan laju pemanasan 2,5°C/menit. Analisis dekomposisi termal adalah langkah awal penelitian kinetika dekomposisi propelan dalam menentukan *life time* propelan. Kurva TGA menunjukkan bahwa propelan RUM mengalami proses dekomposisi dua tahap sedangkan propelan 450 dan 1220 mengalami proses dekomposisi satu tahap. Kurva DTA/termogram proses dekomposisi propelan RUM menunjukkan adanya pembentukan produk *intermediate* sebelum akhirnya terdekomposisi sempurna. Berbeda dengan propelan RUM, termogram propelan 450 dan 1220 tidak menunjukkan terbentuknya produk *intermediate*. Proses dekomposisi propelan 450 dan 1220 terakselerasi oleh keberadaan Al. Perbedaan modal AP pada propelan 450 dan 1220 ternyata tidak begitu berpengaruh pada nilai konsumsi energi proses dekomposisi.

Keywords: *Decomposition, Propellants, DTA, TGA, DTG*

1 PENDAHULUAN

Dekomposisi adalah proses dimana senyawa kimia kompleks rusak atau hancur atau terpecah-pecah menjadi senyawa kimia yang jauh lebih sederhana. Proses dekomposisi yang disebabkan karena adanya paparan panas disebut dekomposisi termal. Suhu dekomposisi suatu material adalah suhu dimana material tersebut terdekomposisi secara kimia.

Pada makalah ini akan dibahas analisis proses dekomposisi termal tiga jenis propelan komposit yang diproduksi oleh LAPAN diantaranya propelan RUM, RX450, dan RX1220. Ketiga propelan tersebut memiliki ciri khas yang membedakan satu sama lain. Propelan RUM merupakan propelan AP/HTPB bimodal (AP dua ukuran partikel). Propelan RX450 merupakan propelan Al/AP/HTPB bimodal. Sementara itu, propelan RX1220 adalah propelan Al/AP/HTPB trimodal (AP tiga ukuran partikel).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memaparkan, menjelaskan dan menganalisis pola dekomposisi termal pada kondisi *slow cook-off* atau pemanasan perlahan dengan bantuan alat DTG. Penelitian ini akan memberikan penjelasan lebih rinci tentang perbedaan pola dekomposisi propelan AP/HTPB, propelan Al/AP/

HTPB bimodal serta propelan Al/AP/HTPB trimodal.

Pemahaman mengenai karakteristik dekomposisi termal propelan adalah langkah pertama dalam *grand design* tahapan penelitian kinetika dekomposisi propelan. Pola dekomposisi sangat menentukan modeling matematika dari proses kinetika dekomposisi propelan. Pada riset selanjutnya, ketiga nilai kinetika triplet (energi aktivasi, konstanta arhenius dan konstanta laju reaksi) serta model dekomposisi termal propelan akan ditentukan. Nilai triplet kinetika propelan akan memberikan informasi mengenai *life time* propelan dan lebih jauh lagi akan memberikan pedoman bagi sistem penyimpanan produk propelan dan roket.

Komponen penyusun utama propelan komposit adalah ammonium perklorat (AP) sebagai oksidator dan *hydroxyterminated polybutadiene* (HTPB) sebagai matriks pengikat (*binder*). Selain kedua material utama tersebut, propelan komposit biasanya ditambahkan zat aditif untuk meningkatkan sifat balistik propelan. Zat aditif yang biasa dipakai adalah logam dan oksida logam. Salah satu zat aditif yang paling populer dan digunakan LAPAN adalah aluminium (Al). Al sering disebut *solid fuel*. Al meningkatkan nilai kalor (energi) pembakaran propelan.

Selain penambahan aditif seperti yang sudah disebutkan sebelumnya, kinerja propelan juga dipengaruhi oleh ukuran partikel AP. Ukuran partikel AP yang lebih kecil akan meningkatkan luas permukaan propelan sehingga proses pembakaran propelan menjadi semakin cepat. Propelan RX1220 menggunakan konsep trimodal untuk meningkatkan kinerjanya.

Rodic dan Bajlovski (2006) melakukan penelitian tentang pengaruh penggunaan tiga ukuran AP (trimodal) pada kecepatan bakar propelan. Rodic dan Bajlovski menggunakan AP ukuran 400 μm , 200 μm dan 80 μm . Hasil penelitian Rodic dan Bajlovski menunjukkan bahwa semakin besar fraksi AP ukuran 80 μm maka kecepatan bakar semakin meningkat. Kecepatan bakar meningkat hingga 25% ketika perbandingan AP 200 μm dan 80 μm adalah 1 : 1. Sementara itu kecepatan bakar terendah diperoleh ketika fraksi AP ukuran 400 μm terbesar.

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, makalah ini tidak akan membahas pengaruh ukuran partikel AP atau penambahan Al pada kinerja keseluruhan propelan seperti kecepatan bakar atau spesifik impuls, namun lebih kepada menganalisis perbedaan proses dekomposisi yang terjadi pada ketiga jenis propelan.

Banyak studi yang sudah dilakukan untuk menyelidiki proses dekomposisi termal propelan. Salah satunya dilakukan oleh Liu Leili, dkk pada 2004. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa proses dekomposisi propelan sangat dipengaruhi oleh jenis dan ukuran partikel aditif balistik yang ditambahkan. Penambahan Al ukuran mikro memberikan efek katalitik terendah sementara penambahan Cu dan NiCuB ukuran nano memberikan efek katalitik terbaik. Cu dan CuNiB mempercepat terjadinya dekomposisi termal karena berhasil menurunkan suhu dekomposisi eksotermis propelan yang ditandai dengan bergesernya puncak

eksotermis kedua sebesar 34°C pada termogram.

Lalith V Kakumanu, dkk (2014) melakukan penelitian proses dekomposisi termal pada propelan komposit AP-HTPB yang ditambahkan katalis pembakaran dari jenis *metal phthalocyanines* (CuPc, CoPc dan FePc) pada rentang suhu 30°C – 500°C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa katalis tersebut mempersingkat proses dekomposisi termal propelan AP/HTPB. Proses dekomposisi yang awalnya terdiri dari 3 tahap menjadi hanya 2 tahap. Katalis pembakaran terbaik pada penelitian tersebut adalah FePc karena berhasil menurunkan suhu dekomposisi eksotermis propelan sebesar 94°C pada termogram.

Dekomposisi termal propelan dapat diamati menggunakan instrumen analisis termal. Analisis termal adalah pengukuran perubahan fisik suatu zat sebagai fungsi dari suhu. Salah satu instrumen analisis termal yang umum dipakai adalah *Differential Thermal Analysis - Thermogravimetry* (DTA-TG). DTA-TG adalah integrasi dari DTA dan DTG dalam satu instrumen. Pada DTA-TG, perubahan massa dan profil termal suatu material direkam secara terus-menerus selama sampel dipanaskan dalam tungku dengan kondisi tertentu.

2 METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Material

Bahan propelan berasal dari Dalian Clorate Co. LTD. HTPB dengan berat molekul 2300 – 2800 dan kandungan isomer Cis 12,63%, Trans 23,37%, dan Vinil 35,34%. *Curing agent* yang digunakan adalah TDI (Toluene-2,4-diisocyanate 80 % dan Toluene-2,6-diisocyanate 20 %). Ammonium perchlorate (AP) memiliki 4 macam ukuran partikel 400 $\mu\text{m} \pm 25 \mu\text{m}$, 200 $\mu\text{m} \pm 25 \mu\text{m}$, 100 $\mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$, dan 50 $\mu\text{m} \pm 15 \mu\text{m}$. Al *powder* 99% dengan ukuran partikel 30 μm .

2.2 Proses Manufaktur Propelan

Propelan padat diformulasikan dengan menggunakan bahan HTPB

sebagai matriks pengikat (*binder*) dan AP sebagai oksidator. Proses produksi motor roket LAPAN dilakukan dengan perpaduan antara metode *free standing* dan *case bonded*. Propelan dibuat terpisah menggunakan cetakan propelan (Dewi, 2014).

Bahan AP dikeringkan terlebih dahulu selama 4 jam pada suhu 60°C untuk menurunkan kadar air, untuk bahan AP 400 µm setelah dikeringkan dilakukan proses *grinding* untuk memperkecil ukuran partikel. Proses pembuatan propelan dimulai dengan proses pencampuran HTPB dan TDI dalam kondisi vakum 0,1 kPa pada suhu 50 – 60°C. Matriks *binder* kemudian ditambahkan Al. AP selanjutnya ditambahkan mulai dari ukuran partikel terbesar hingga terkecil agar bahan AP tercampur dengan homogen. Proses *casting slurry* propelan dilakukan dengan kondisi vakum 75 cmHg. Propelan dimatangkan dalam oven bersuhu 60°C selama 22 jam.

Pada penelitian ini propelan yang digunakan ada tiga jenis yaitu propelan RUM, 450, dan 1220. Komposisinya adalah sebagai berikut:

- Propelan RUM terdiri dari HTPB:TDI 15:1; AP 80% dengan perbandingan AP 200µm:50µm 1:1.
- Propelan 450 terdiri dari HTPB:TDI 15:1; AP 75% dengan perbandingan AP 400µm:200µm 1:1; Al 30µm 7,5%.
- Propelan 1220 terdiri dari HTPB:TDI 15:1; AP 77,5% dengan perbandingan AP 200µm:100µm: 50µm 1:1:1; Al 30µm 7,5%.

2.3 Analisis Termal DTA-TG

Analisis termal adalah cabang dari ilmu material yang mempelajari perubahan sifat material sebagai fungsi dari suhu. Pada DTA-TG sampel dan material referensi dipanaskan dalam sebuah tungku pemanas dengan laju panas konstan hingga mencapai suhu tertentu (dipanaskan dalam atmosfer inert N₂). Ketika sampel dan material referensi (Al₂O₃) dipanaskan bersama-sama akan terjadi perubahan fasa dan proses termal pada sampel sehingga

mengakibatkan terjadinya perbedaan suhu antara sampel dan referensi. Perubahan fasa yang terjadi juga mengakibatkan perubahan massa sampel (Dewi, 2015).

DTA akan mengukur dan merekam perbedaan suhu (ΔT) antara sampel dan senyawa referensi. ΔT akan memperlihatkan perubahan suhu yang positif atau negatif ketika sampel merespon kenaikan suhu yang terjadi selama proses pemanasan. Perubahan suhu akan dikonversi menjadi perubahan energi selama proses pemanasan. Sementara itu, TGA mengukur dan merekam perubahan massa sampel (Δm) selama proses pemanasan. Perubahan energi dan massa kemudian diplot terhadap suhu dan atau waktu.

Instrumen yang dipakai pada penelitian ini adalah DTG-60 Shimadzu. Data akuisisi alat DTG-60 menggunakan bantuan perangkat lunak TA-60WS. Perangkat lunak ini memberikan kurva profil perubahan massa dan energi dari material secara *real time*. Data tersebut kemudian diolah dengan perangkat lunak TA60 untuk menghasilkan data termal seperti berat hilang (*weight loss*), kalor/entalpi proses termal (ΔH), puncak eksotermis – endotermis, dll. Nilai konsumsi energi proses dekomposisi (ΔH) diperoleh dari integrasi luasan kurva DTA material. Pengujian termal dilakukan dengan parameter operasi alat DTG-TA pada suhu operasi 30 - 400°C, atmosfer nitrogen berlaju alir 50 ml/menit, dan laju pemanasan 2,5°C/menit.

Pemanasan propelan pada DTG akan memberikan gambaran mengenai proses dekomposisi secara *slow cook-off* (pemanasan perlahan). Pengamatan proses dekomposisi termal terbaik dilakukan dengan laju pemanasan rendah sehingga semua tahapan dekomposisi dapat terdeteksi dan direkam dengan lebih baik. Goncalves, dkk (2013) menggunakan laju pemanasan 0,33K/s pada pengujian dekomposisi termal propelan AP/HTPB. Goncalves juga mengungkapkan bahwa ketika laju pemanasan yang digunakan

terlalu tinggi, proses dekomposisi propelan akan menjadi tidak selesai secara sempurna.

Sampel propelan dipotong kemudian diserut hingga menjadi seperti bubuk yang berukuran seragam. Sampel kemudian diletakkan pada sampel pan aluminium. Material referensi yang digunakan adalah $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Berat sampel yang digunakan sekitar 11 mg.

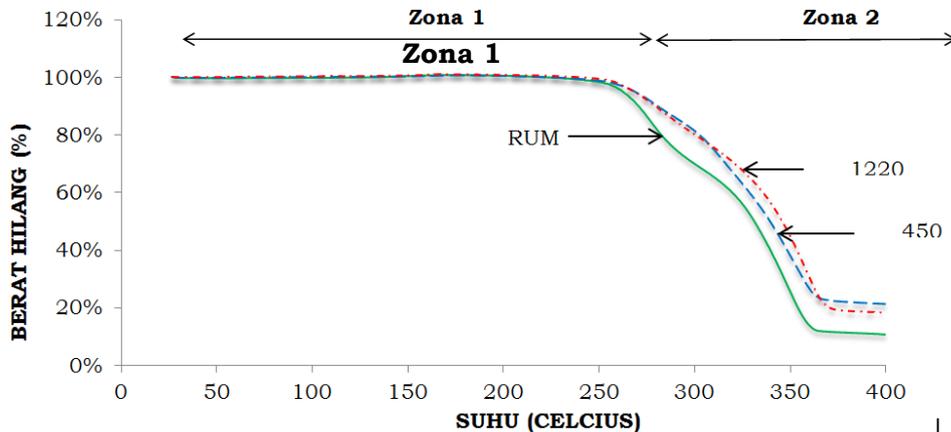
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik dekomposisi termal dari propelan RUM, 450 dan 1220 (seperti terlihat pada Gambar 2-1) telah diinvestigasi menggunakan *thermogravimetric analysis* (TGA). Prosentase berat hilang dan massa residu dari setiap sampel propelan pada suhu 30 – 400°C telah dievaluasi dan disajikan pada Tabel 2-1.

Sumbu x pada kurva TGA menyatakan suhu dan sumbu y menyatakan prosentase berat hilang yang terjadi selama proses pemanasan propelan. Seiring dengan kenaikan suhu, massa

propelan akan berkurang (terdekomposisi). Kurva TGA terbagi menjadi dua zona. Zona 1 berada pada rentang suhu 30-260°C dan zona 2 berada pada rentang suhu 260-400°C. Propelan mulai mengalami penurunan massa secara masif pada suhu sekitar 260°C. Alasan inilah yang dijadikan pertimbangan dalam penetapan suhu 260°C sebagai titik pembagi zona.

Berat residu propelan RUM (AP/HTPB) adalah yang paling rendah daripada ketiga propelan tersebut. Sementara berat residu propelan 450 dan 1220 (Al/AP/HTPB) lebih tinggi. Propelan dengan penambahan aluminium lebih tahan terhadap paparan panas. Aluminium merupakan aditif logam sehingga wajar bila prosentase residu propelan dengan kandungan Al lebih rendah. Al memiliki titik leleh jauh lebih tinggi dari semua komponen penyusun propelan. Titik leleh Al ±660°C sementara AP ±300°C dan HTPB ±450°C.



Gambar 2-1: Kurva TGA propelan

Tabel 2-1: PROFIL TGA PROPELAN

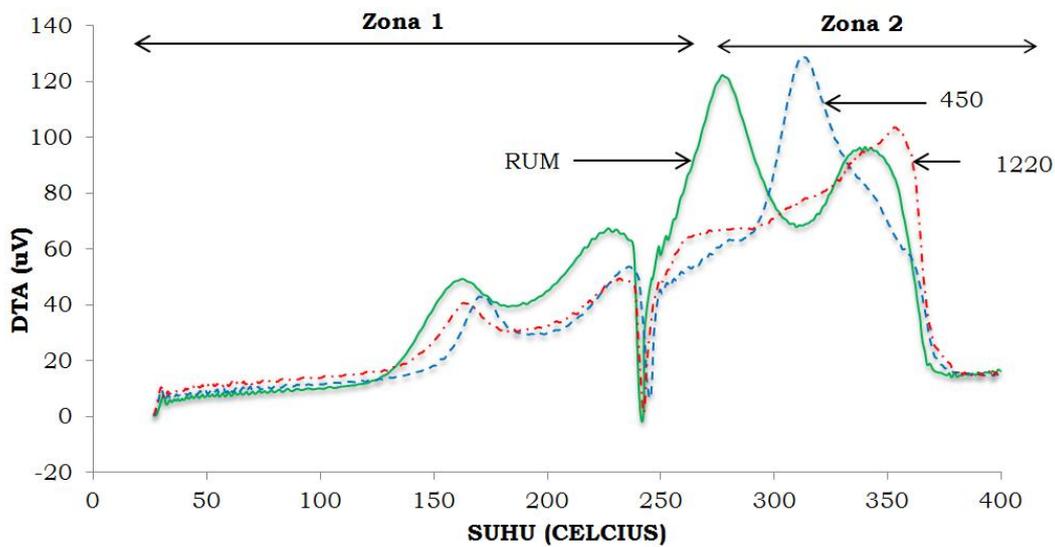
Sampel	Zona	Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Berat Hilang %	Berat Residu %
Propelan RUM	1	30	260	3.69	10.81
	2	260	400	85.48	
Propelan 450	1	30	260	2.40	21.44
	2	260	400	76.16	
Propelan 1220	1	30	260	2.23	18.70
	2	260	400	79.06	

Proses dekomposisi propelan RUM yang merupakan propelan virgin AP/HTPB terjadi dalam dua langkah penurunan massa. Penambahan Al pada komposisi propelan 450 dan 1220 mengubah proses dekomposisi propelan yang awalnya dua langkah menjadi satu langkah. Pada proses dekomposisi propelan 450 dan 1220 terjadi penurunan massa tiba-tiba tidak bertahap.

Gambar 2-2 merupakan kurva DTA (termogram) dekomposisi propelan RUM, 450 dan 1220. Sumbu x pada kurva DTA menyatakan suhu dan sumbu y menyatakan energi yang terjadi pada proses pemanasan propelan. Seiring dengan kenaikan suhu, terjadi perubahan entalpi (energi) pada sampel propelan. Perubahan energi tersebut terlihat dari puncak endotermis dan eksotermis yang terjadi. Kurva DTA suatu material adalah sidik jari termal material. Kurva ini menggambarkan

respon suatu material ketika terpapar panas. Sama seperti kurva TGA, termogram dibagi ke dalam dua zona. Zona 1 berada pada rentang suhu 30-260°C dan zona 2 berada pada rentang suhu 260-400°C. Perilaku termal propelan pada suhu 30 – 400°C telah dievaluasi dan disajikan pada Tabel 2-2.

Ketiga propelan memiliki puncak eksotermis pertama pada suhu sekitar 165-175°C. Puncak eksotermis pada rentang suhu tersebut merupakan peristiwa hilangnya air atau kelembaban pada suatu propelan. Pada termogravimetri, dekomposisi yang terjadi pada suhu 50-200°C berhubungan dengan evaporasi uap air yang terabsorpsi pada matriks polimer/komposit. Evaporasi yang terjadi pada suhu 50-200°C berlangsung pada daerah volume bebas (*free volume area*), di bagian kosong antar ikatan silang molekul polimer/komposit (Brun, 2007).



Gambar 2-2: Kurva DTA propelan

Tabel 2-2: PROFIL DTA PROPELAN

Sample	Berat mg	Zona 1		Zona 2	
		Puncak Ekso 1 T (°C)	Puncak Endo T (°C)	Puncak Ekso 2 T (°C)	Puncak Ekso 3 T (°C)
Propelan RUM	11.659	162.78	241.89	277.26	340.16
Propelan 450	11.502	172.60	245.11	-	313.31
Propelan 1220	11.401	166.15	242.18	-	352.37

Puncak endotermis propelan terjadi pada suhu sekitar 240-245°C. Puncak endotermis ini menunjukkan proses perubahan fasa kristal AP dari bentuk ortorombik ke kubik (Liu Leili, dkk, 2004) (Kakumanu, dkk, 2014) (Goncalves, dkk, 2013). Tidak ada perbedaan yang mencolok pada puncak endotermis antara propelan satu dengan yang lain. Hal ini menandakan bahwa ukuran partikel AP tidak berpengaruh pada suhu perubahan fasa kristal AP.

Secara umum tidak terlihat perbedaan bentuk termogram propelan pada zona 1. Perbedaan mencolok terjadi pada zona 2. Adanya puncak eksotermis setelah terjadi perubahan fasa AP pada zona 1 menunjukkan bahwa proses dekomposisi propelan baru dapat terjadi ketika partikel AP berubah fasa dan mulai terdekomposisi.

Proses dekomposisi termal propelan RUM pada zona 2 terbagi dalam dua tahapan. Hal ini ditunjukkan dengan adanya dua puncak eksotermis (277,26°C dan 340,16°C). Sementara pada zona 2 dekomposisi propelan 450 dan 1220 hanya terdapat satu puncak eksotermis yaitu masing-masing pada suhu 313,31°C dan 352,27°C.

Pada propelan RUM, puncak eksotermis yang terjadi pada suhu 277,26°C berkaitan dengan terjadinya dekomposisi parsial dari propelan dan pembentukan produk *intermediate*. Sementara itu, puncak eksotermis kedua yang terjadi pada suhu 340,16°C menunjukkan proses dekomposisi lengkap dari produk *intermediate* ke produk *volatile* (Liu Leili, dkk, 2004). Produk *intermediate* berupa gas hasil proses depolimerisasi HTPB seperti butadiena (Chen, dkk, 1991).

Mekanisme dekomposisi propelan AP/HTPB dapat diilustrasikan melalui langkah-langkah berikut ini:

- Langkah pertama. Proses disosiasi-sublimasi AP terjadi pada suhu rendah (<300°C) (Kakumanu, dkk, 2014).



- Langkah kedua. HTPB terpirolisis membentuk beberapa produk gas utama antara lain butadiena, siklopentena, 1,3-sikloheksadiena, dan 4-vinilsikloheksena (Cai, dkk, 2008).
- Langkah ketiga. Segera setelah terjadi perubahan fasa AP, AP terdekomposisi dan produk pirolisis HTPB terbentuk. Produk-produk gas tersebut kemudian bereaksi dengan HClO₄, menghasilkan senyawa hydrogen dan membentuk HCl dan H₂O. Kemudian residu karbon bereaksi dengan O₂ untuk membentuk CO dan CO₂ (Kakumanu, dkk, 2014).

Seperti sudah dipaparkan sebelumnya, berbeda dengan termogram propelan RUM yang memiliki dua puncak eksotermis, termogram propelan AP/Al/HTPB (propelan 450 dan propelan 1220) hanya memiliki satu puncak eksotermis. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan Al memberikan pengaruh yang signifikan pada proses dekomposisi termal dan pembakaran propelan.

Hilangnya puncak eksotermis kedua pada propelan dengan kandungan Al menunjukkan bahwa penambahan Al memberikan efek katalitik dalam proses dekomposisi propelan. Penambahan Al meningkatkan ekstraksi O₂ dari HClO₄ karena terjadi reaksi redoks yang mengakibatkan laju reaksi total meningkat (Kakumanu, 2014).

Walaupun penambahan Al menurunkan konsumsi energi total pada proses dekomposisi namun perbedaan jenis modal AP yang digunakan tidak begitu berpengaruh pada konsumsi energi total proses dekomposisi (Tabel 2-3). Energi dekomposisi adalah jumlah energi yang diperlukan untuk proses dekomposisi propelan, bukan kalor pembakaran. Tidak ada korelasi langsung antara besarnya energi dekomposisi dengan kinerja propelan.

Tabel 2-3: KONSUMSI ENERGI PROSES DEKOMPOSISI PROPELAN

Sample	Berat mg	Konsumsi Energi Proses Dekomposisi kJ/g
Propelan RUM	11.659	26,28
Propelan 450	11.502	20,76
Propelan 1220	11.401	22,98

Ukuran partikel serbuk Al yang lebih kecil dari propelan juga turut memberikan sumbangan pada percepatan reaksi propelan AP/Al/HTPB. Oleh karena ukuran partikel-nya yang kecil, luas permukaan serbuk Al lebih luas. Hal ini memungkinkan Al dapat menyerap molekul reaktif gas hasil dekomposisi AP dan HTPB lebih banyak pada permukaannya sehingga mempercepat reaksi. Berdasarkan termogram propelan pada Gambar 2-2, propelan 450 dan 1220 (AP/Al/HTPB) terdekomposisi tanpa pembentukan produk *intermediate* sehingga puncak eksotermis kedua tidak muncul. Penambahan Al pada propelan AP/HTPB mempercepat reaksi pembakaran dan meningkatkan energi propelan.

4 KESIMPULAN

Pola dekomposisi propelan AP/HTPB serta propelan Al/AP/HTPB bimodul dan trimodal memiliki perbedaan. Propelan RUM (AP/HTPB) terdekomposisi dalam dua tahap sementara propelan 450 (Al/AP/HTPB bimodul) dan 1220 (Al/AP/HTPB trimodul) terdekomposisi dalam satu tahap. Pada proses dekomposisi propelan RUM terbentuk produk antara (*intermediate*) sebelum akhirnya terdekomposisi sempurna. Sementara itu pada propelan 450 dan 1220 tidak terbentuk produk antara (*intermediate*) karena proses dekomposisi terakselerasi dengan keberadaan Al. Perbedaan moda AP pada propelan 450 dan 1220 ternyata tidak begitu berpengaruh pada nilai konsumsi energi proses dekomposisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan pada Drs. Sutrisno, M.Si dan Dr. Heru Supriyatno selaku pembimbing. Ucapan terima kasih juga ditujukan pada rekan-rekan peneliti, perekayasa dan teknisi di Laboratorium Insulasi Termal, dan Laboratorium Proses Propelan, Pustekroket, LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

Brun, E; Rain, P; Teissedre, G; Guillermin, C dan Rowe, S, 2007. *Hygrothermal Aging*

of Filled Epoxy Resins. International Conference on Solid Dielectrics UK.

- Cai, Weidong; Thakre, Piyush dan Yang, Vigor, 2008. *A Model of AP/HTPB Composite Propellants Combustion in Rocket Motor Environments*. Combustion Science and Technology, 180 : 2143 – 2169.
- Chen, J.K and Brill, T.B, 1991. *Chemistry and Kinetics of Hydroxyterminated Polybutadiene (HTPB) and Diisocyanate – HTPB Polymers During Slow Decomposition and Combustion-like Conditions*. Combustion and Flame, 87: 217 – 232.
- Dewi, Wiwiek Utami, 2014. *Optimasi Sistem Lining Motor Roket Padat RX1220 Melalui Perubahan Komposisi Material Liner dan Metode Lining*. Jurnal Teknologi Dirgantara, Vol 12, No. 1 : 27-36.
- Dewi, Wiwiek Utami, 2015. *Identifikasi Aging pada Komponen Polisulfida Cair Dalam Material Liner Menggunakan Metode Analisis Termal DTG*. Bunga Rampai Hasil Penelitian Teknologi Roket Sonda Indonesia 2015 : 88 - 100.
- Goncalves, R.F.B.; Rocco, J.A.F.F dan Iha, K., 2013. *Thermal Decomposition Kinetics of Aged Solid Propellant Based on Ammonium Perchlorate-AP/HTPB Binder*, 325 - 342. <http://dx.doi.org/10.5772/52109>, download 19 Mei 2015.
- Kakumanu, Lalith V; Yadav, Narendra; Karmakar, Srinibas, 2014. *Combustion Study of Composite Solid Propellants Containing Metal Phthalocyanines*. International Journal of Aerospace Science, 3 (2) : 21 – 36.
- Leili, Liu; Fengsheng, Li; Linghua, Tan; Min, Li dan Yi, Yang, 2004. *Effects of Metal and Composite Metal Nanopowders on The Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate (AP) and The Ammonium Perchlorate/Hydroxyterminated Polybutadiene (AP/HTPB) Composite Solid Propellant*. Chinese J. Chem. Eng., 12 (4) : 595 – 598.
- Rodic, Vesna dan Bajlovski, Miomir, 2006. *Influence of Trimodal Fraction Mixture of Ammonium Perchlorate on Characteristic of Composite Rocket Propellant*. Scientific Technical Review, Vol LVI, No.2 : 38 - 44.
- Sutton, G.P and Biblarz, Oscar, 2001. *Rocket Propulsion Elements*, 7th Edition, John Wiley & Sons, New York.

APLIKASI CFD DALAM PENENTUAN PERFORMA MESIN TURBOFAN MODEL CFM56-5B YANG MENGALAMI CACAT PADA KIPAS UNTUK KEPUTUSAN MAINTENANCE CFD APPLICATION IN THE DETERMINATION OF TURBOFAN ENGINE MODEL CFM56-5B PERFORMANCE WHICH HAS FAN DEFECT FOR MAINTENANCE DECISION

Vicky Wuwung¹, Puspa Wandani, Carolus Bintoro

**Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Bandung**

**Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Parongpong, Kabupaten Bandung Barat,
Jawa Barat 40012**

¹e-mail: vicky_pn98@yahoo.com

Diterima 19 April 2016; Direvisi 27 Mei 2016; Disetujui 31 Mei 2016

ABSTRACT

This paper deals with the study of damage assessment that occurred on the fan blade of turbofan engine CFM 56-5B. The damage requires a maintenance decision, whether a fan blade is still capable to be used or needs to be repaired/replaced. Although regulations stipulate that such damage is still acceptable, but it should be studied in terms of performance, whether the fan still can give a good performance or not. The study was conducted by simulating CF M56-5B on CFD-Numeca software with the fan blade in good and defects conditions. The defects on all the blade is a dent lies on 70% span blade with 0.069" depth on the leading edge to simulate the damage caused by a bird strike. In Numerical simulation, the flow is modeled steady and Spallart- Almaras turbulent model is used . Numerical simulation result show engine performance is reduced in take-off condition for 14% for thrust and 16% for efficiency, and 55% for thrust and 54% for efficiency for cruise condition. This engine performance reduction in take-off condition based on AC 25-13 regulation is definitely save and there is no need of repair or replacement action. Meanwhile, for cruise condition, this engine performance reduction means much higher fuel consumption although safe condition is reached. Thus, based on AC 25-13, engine performance reduction in this case leads to a maintenance decision of no need to repair or replacement action.

Keywords: CFM 56-5B Bilah kipas, Dent cacat, CFD Numeca, Efficiency Kipas, Performance

ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai kajian kerusakan yang terjadi pada bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B. Kerusakan tersebut memerlukan adanya sebuah keputusan *maintenance*, apakah bilah kipas tersebut masih layak digunakan ataukah perlu di *repair* atau diganti. Meskipun regulasi menetapkan bahwa kerusakan tersebut masih dapat diterima, namun perlu ditinjau dari segi performanya, apakah kipas masih dapat memberikan performa yang baik atau tidak. Kajian dilakukan dengan menyimulasikan model bilah kipas CFM56-5B pada kondisi baik dan cacat pada perangkat lunak CFD-Numeca di kondisi *take-off* dan *cruise*. Cacat pada bilah berupa *dent* dengan kedalaman 0.069" dan terletak seragam di semua bilah pada 70% *span* bilah di bagian *leading edge* sebagai simulasi kerusakan akibat adanya *bird strike*. Simulasi numerik dilakukan dengan kondisi pemodelan aliran *steady*, dan menggunakan model turbulen Spallart-Allmaras. Hasil simulasi numerik menunjukkan adanya penurunan performa mesin pada *Thrust* di kondisi *take-off* sebesar 14% dan penurunan efisiensi sebesar 16%, sedangkan pada kondisi *cruise*, penurunan *Thrust* dan efisiensi berturut-turut adalah sebesar 55%, dan 54%. Penurunan *Thrust* pada saat *take-off* berdasarkan regulasi AC 25-13 adalah aman dan tidak perlu dilakukan *repair* atau *replacement*. Namun, meskipun aman, mesin akan boros bahan bakar ketika berada dalam kondisi *cruise* sehingga perlu dilakukan *repair* atau *replacement*. Penentuan keputusan *maintenance* jika didasarkan pada regulasi AC 25-13 pada akhirnya adalah tidak diperlukannya *repair* atau *replacement* pada bilah kipas.

Kata kunci: *Bilah kipas CFM56-5B, Kerusakan dent, CFD Numeca, Efisiensi Kipas, Performa mesin*

1 PENDAHULUAN

Foreign Object Damage atau disingkat dengan FOD merupakan kerusakan yang disebabkan oleh suatu *object*/benda yang terbawa masuk oleh aliran udara ke dalam mesin. *Object* yang dimaksud dapat berupa batu, hewan, benda metal, atau serpihan lainnya. *Object* tersebut dapat mengakibatkan *impact* yang cukup besar, sehingga dapat menyebabkan berbagai kerusakan pada mesin, terutama bilah kipas pada turbofan.

Kerusakan pada bilah kipas, umumnya dapat berupa *cracking*, *dent*, dll. Kerusakan akibat FOD umumnya terdistribusi sepanjang *leading edge* mulai dari *platform* hingga *tip*, sehingga dapat menyebabkan penurunan performa pada kipas. Besar kecilnya penurunan performa kipas tergantung pada tingkat kerusakannya.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar penurunan performa pada kipas yang cacat akibat adanya FOD dengan cara membandingkan performa dua keadaan kipas yaitu tanpa cacat (*non-defect*) dan dengan cacat (*defect*) yang

sama pada setiap bilah kipas. Performa kedua keadaan kipas tersebut diperoleh dari simulasi numerik CFD. Dari hasil perbandingan performa kedua keadaan kipas tersebut maka kemudian dapat diperoleh sebuah keputusan *maintenance* apakah kipas tersebut perlu di *repair* atau tidak dengan mengacu pada regulasi yang berlaku (AC 25-13).

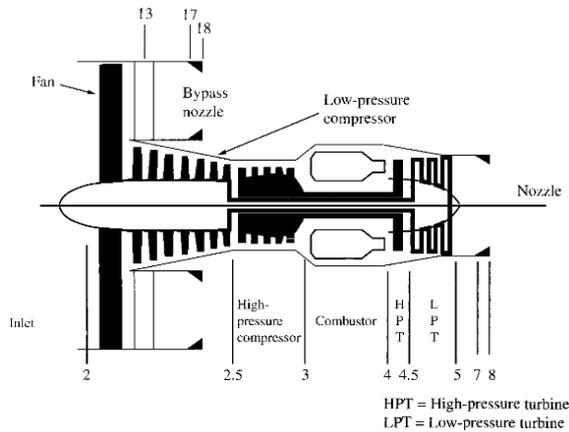
Selanjutnya, pada penelitian ini, kajian simulasi numerik performa kipas yang dilakukan adalah hanya pada bagian kipas mesin turbofan CFM56-5B dan mengacu pada saat kondisi terbang *cruise* dan *take-off*. Selain itu, kajian ini hanya terfokuskan pada penurunan performa dari sisi aerodinamika saja, sehingga pengaruh deformasi struktur kipas terhadap performa kipas dapat diabaikan atau kipas dianggap *rigid body* dan pada akhirnya pengambilan keputusan *maintenance* dilakukan berdasarkan performa aerodinamika saja.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Turbofan

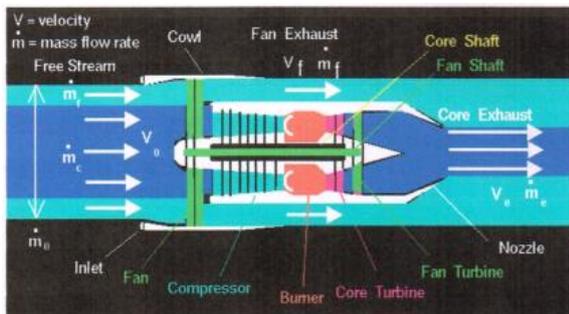
Mesin Turbofan merupakan variasi modern dari mesin turbin gas. Pada mesin turbofan, bagian *core*

dikelilingi oleh kipas pada bagian depan dan dilengkapi dengan turbin di bagian belakang mesin. Kipas dan turbin tersebut terdiri dari banyak bilah yang terhubung oleh sebuah *shaft* (Gambar 2-1).



Gambar 2-1: Diagram Skematik Mesin Turbopan (Mattingly, Ohain, 2006)

Pada mesin turbopan, aliran udara akan terbagi menjadi dua bagian setelah melewati kipas pada bagian depan, yaitu aliran panas (*hot flow*) dan aliran dingin (*cold flow*). *Hot flow* adalah aliran udara yang akan diteruskan menuju kompresor, kemudian ruang bakar, turbin serta *core exhaust* dengan temperatur tinggi. *Cold flow* adalah aliran yang langsung diarahkan untuk dilepaskan ke atmosfer melalui kipas *exhaust*. Kedua aliran tersebut akan meningkat kecepatannya setelah melewati *exhaust* yang mengakibatkan timbulnya gaya dorong atau *Thrust* (Gambar 2-2).



Gambar 2-2: Aliran udara pada turbopan (Hall, Nancy, 2015)

Gaya dorong pada mesin turbopan dapat dinyatakan dalam persamaan hukum kekekalan momentum sbb:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \sum \mathbf{F} \quad (2-1)$$

Dengan asumsi *steady*, dan absennya *body force*, maka persamaan 2-1 dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = \mathbf{T} \quad (2-2)$$

Atau dapat disederhanakan lagi menjadi :

$$T = \dot{m}_c(V_e - V_0) + \dot{m}_c(V_f - V_0) + A_e(P_e - P_0) \quad (2-3)$$

Untuk $P_e - P_0 = 0$, maka persamaan *thrust* mesin turbopan menjadi:

$$T = \dot{m}_c(V_e - V_0) + \dot{m}_c(V_f - V_0) \quad (2-4)$$

Dari persamaan 2-4, dapat dibuat suatu parameter yang disebut *bypass ratio* (λ) yang merupakan perbandingan antara laju aliran massa pada *cold flow* dengan *hot flow*. Semakin tinggi nilai *bypass ratio*, maka semakin tinggi efisiensi turbopan mesin tersebut (Wiranto, 2002).

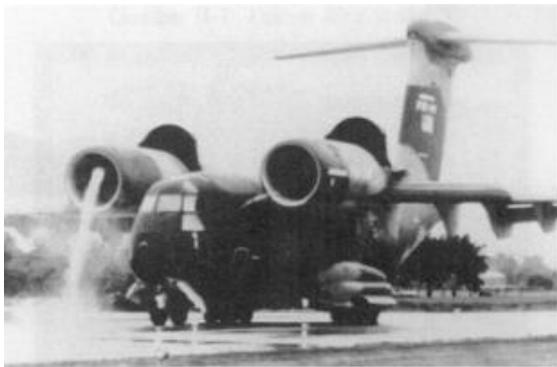
Selanjutnya, gaya dorong (*thrust*) pada turbopan yang dihasilkan oleh *hot flow* berkisar antara 15%-25%, sedangkan gaya dorong yang dihasilkan oleh *cold flow* berkisar antara 75%-85% [Cohen, H and Saravanamuttoo, HIH., 1996]. Oleh karena itu, kerusakan pada permukaan kipas yang mengarah pada *cold flow* berperan besar dalam penurunan performa dari mesin turbopan (penurunan *thrust* dan efisiensi).

2.2 Cacat pada Kipas Mesin Turbopan

Kerusakan pada bilah kipas dapat disebabkan oleh beberapa hal diantaranya adalah adanya FOD, fenomena *icing*, dan *fatigue*. Pada saat pesawat udara terbang di daerah dengan kerapatan udara rendah, maka pesawat akan memerlukan daya yang lebih besar dari kondisi normalnya untuk mendapatkan *thrust* yang

dibutuhkan. Akibatnya, mesin pesawat harus bekerja lebih keras dan hal inilah yang menjadi salah satu faktor utama terjadinya cacat pada bilah kipas (James and Jonathan, 2004).

Selanjutnya, Winfrey (2013) mengatakan bahwa sebuah fenomena berupa *damaging vortices* yang mengakibatkan munculnya getaran pada kipas dan kompresor mesin pada saat pesawat terbang melakukan *taxing* dapat menyebabkan struktur bilah dari kipas dan kompresor mengalami *fatigue*.



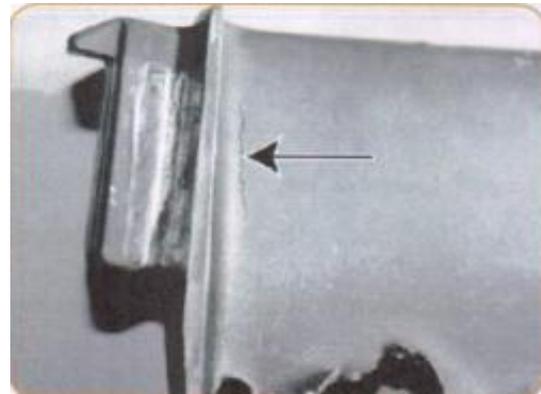
Gambar 2-3: Damaging Vortex [Winfrey, Ryan, 2013]

Selain itu, James A. Turso and Jonathan S. Lift, (2004), didalam investigasinya mendapatkan bahwa komponen yang sering rusak akibat adanya FOD adalah kipas dan kemungkinan terbesar kerusakan yang terjadi sebesar 44% diakibatkan oleh *bird strike* (Mabaso, 2011) (Gambar 2-4).



Gambar 2-4: Lokasi kerusakan pada pesawat udara akibat *bird strike* (Mabaso, 2011)

Bentuk-bentuk kerusakan yang timbul akibat adanya *bird strike* dapat berupa *crack* dan *dent* pada *leading edge* dari bilah kipas (Gambar 2-5 dan 2-6)



Gambar 2-5: *Crack* pada *root bilah kipas* akibat *Bird Strike* [Fischer Ulrich, 2010]



Gambar 2-6: *Dent* pada *Leading Edge* bilah kipas akibat *Bird Strike* (B763, 2013)

2.3 Computational Fluid Dynamics untuk Simulasi Aliran Pada Mesin Turbofan

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan sebuah sistem yang memodelkan dinamika fluida, perpindahan panas, dsb dalam sebuah persamaan matematik yang kemudian diselesaikan dengan metode komputasi numerik. Untuk dinamika fluida, persamaan pemodelan matematik yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes yang dimodifikasi menjadi persamaan *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) untuk memodelkan aliran turbulen. Persamaan RANS dapat dituliskan sbb:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_S \vec{F}_I \cdot \vec{dS} + \int_S \vec{F}_V \cdot \vec{dS} = \int_{\Omega} S_T d\Omega \quad (2-5)$$

Dengan Ω menyatakan volume, dan S menyatakan permukaan dari *control volume*, kemudian U adalah vektor variabel konservatif, dan \vec{F}_I , \vec{F}_V , berturut turut adalah vektor flux dari *inviscid* dan viskos, serta, S_T merupakan *source term* yang dapat berupa gaya gravitasi dsb. Pada kasus *turbomachinery*, sangatlah perlu untuk mendeskripsikan aliran fluida dalam sistem relatif sehingga persamaan RANS harus dibuat dalam bentuk sistem relatif untuk mendapatkan solusi dalam kerangka acuan relatif. Pada kerangka acuan relatif, komponen – komponen U , \vec{F}_I , \vec{F}_V , S_T , $\bar{\tau}_{ij}$, \bar{q}_i , \bar{p}^* dan \vec{E} dapat dinyatakan sbb:

$$U = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \\ \bar{\rho} \bar{w}_1 \\ \bar{\rho} \bar{w}_2 \\ \bar{\rho} \bar{w}_3 \\ \bar{\rho} \vec{E} \end{bmatrix} \quad \vec{F}_I = \begin{bmatrix} \bar{\rho} \bar{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{1i} + \bar{\rho} \bar{w}_1 \bar{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{2i} + \bar{\rho} \bar{w}_2 \bar{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{3i} + \bar{\rho} \bar{w}_3 \bar{w}_i \\ (\bar{\rho} \vec{E} + \bar{p}^*) \bar{w}_i \end{bmatrix} \quad -\vec{F}_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\tau}_{11} \\ \bar{\tau}_{12} \\ \bar{\tau}_{13} \\ \bar{q}_i + \bar{w}_i \bar{\tau}_{ij} \end{bmatrix} \quad (2-6a)$$

$$S_T = \begin{bmatrix} 0 \\ (-\bar{\rho}) [2\vec{\omega} \times \vec{w} + (\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}))] \\ \bar{\rho} \vec{w} \cdot \vec{\nabla} (0.5 \omega^2 r^2) \end{bmatrix} \quad (2-6b)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = (\bar{\mu} + \mu_t) \left[\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \right] \quad (2-6c)$$

$$\bar{q}_i = (\bar{\kappa} + \kappa_t) \frac{\partial \vec{T}}{\partial x_i}, \quad \bar{p}^* = \bar{p} + \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \quad (2-6d)$$

dan $\vec{E} = \tilde{e} + \frac{1}{2} \bar{w}_i \bar{w}_i + \tilde{k}$

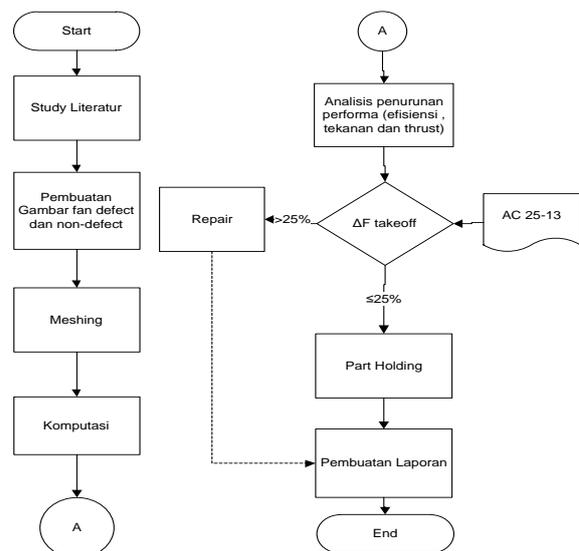
Persamaan-persamaan di atas selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan metode numerik dengan metode diskritisasi domain fisik volume hingga (*finite volume method*), dan penerapan kondisi batas tertentu untuk kasus *turbomachinery*. [Numeca User Manual, 2015].

Pada penelitian ini, digunakan NUMECA sebagai perangkat lunak *solver* persamaan RANS dengan model fluida udara *perfect gas* dan dalam kondisi

steady. Selanjutnya, modul turbulen yang digunakan adalah spallart-almaras, metode diskritisasi yang digunakan adalah skema *central difference*, dan diselesaikan dengan menggunakan teknik *multigrid*.

3 METODOLOGI

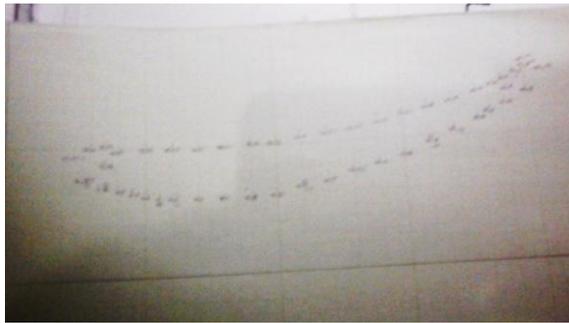
Metodologi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3-1. Dari diagram alir pada Gambar 3-1 dapat dilihat bahwa studi literatur merupakan langkah awal dalam proses simulasi kelayakan bilah kipas oleh adanya cacat (*dent*). Pada kajian ini, diperdalam pemahaman mengenai konsep dasar, cacat yang kemungkinan terjadi, teori dasar mesin turbofan, regulasi dan *maintenance*. Berdasarkan pada pemahaman mengenai mesin turbofan tersebut, maka dilakukan kajian mengenai perihail yang perlu diketahui untuk mendapatkan performa dari kipas. Pada tahapan ini juga dilakukan pengumpulan data mengenai bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B berupa data geometri, jumlah bilah, dan data operasional pada kondisi *cruise* dan *take-off*.



Gambar 3-1: Diagram alir

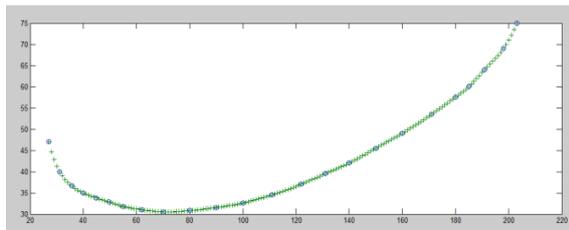
Data-data mengenai geometri bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B yang telah terkumpul meliputi geometri *airfoil* pada *root*, *midspan* dan *tip* bilah kemudian

menjadi acuan dalam penggambaran *geometry* model bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B sebagai *input* simulasi numerik. Penggambaran geometri bilah kipas ini dimulai dengan membuat titik-titik koordinat dari *airfoil* bilah (*root*, *mid* dan *tip*) pada *millimeterblock* seperti diperlihatkan pada Gambar 3-2. Kemudian titik-titik koordinat tersebut menjadi *input* pada perangkat lunak Microsoft Excel.



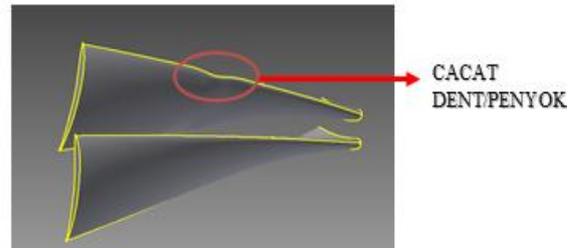
Gambar 3-2: Koordinat *airfoil* pada *millimeterblock*

Selanjutnya, untuk mendapatkan kurva *airfoil* dengan tingkat kehalusan yang baik, maka dilakukan *curve fitting* menggunakan fungsi *spline* pada perangkat lunak Matlab. Hasil dari *curve fitting* pada perangkat lunak Matlab diperlihatkan pada Gambar 3-3.



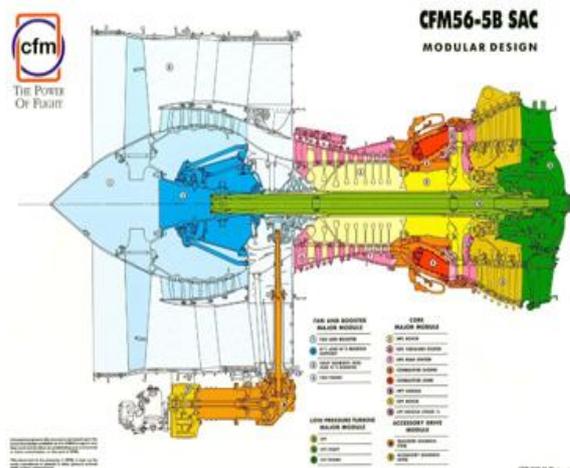
Gambar 3-3: Hasil *curviting*

Pada perangkat lunak inventor, titik-titik koordinat tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sebuah *airfoil* (*root*, *mid*, dan *tip*). Kemudian *airfoil* tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sebuah bilah kipas. Bilah dibuat dalam dua variasi, yaitu bilah dalam keadaan baik (*non-cacat*) dan bilah dalam keadaan rusak/*cacat* (*cacat*). Cacat pada bilah tersebut berbentuk *dent*/*penyok* sebesar 0.069" [CFM Maintenance Manual, 1999] seperti diperlihatkan pada Gambar 3-4.



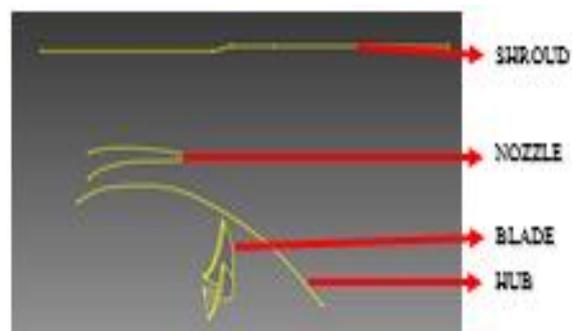
Gambar 3-4: Bilah *cacat* dan *non-cacat*

Pembuatan gambar lainnya seperti *hub*, *nozzle*, dan *shroud* didapatkan dengan mengacu pada Gambar 3-5 yang kemudian dibuat titik-titik koordinatnya pada *millimeterblock*.



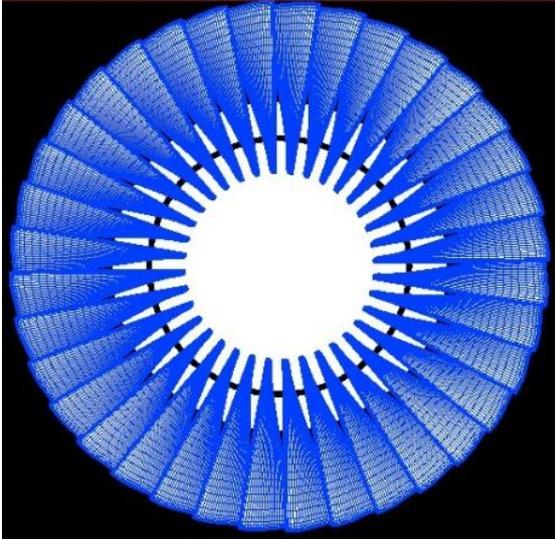
Gambar 3-5: Mesin CFM56-5B (CFM Mesin 56-5B Maintenance Manual, 1999)

Titik-titik koordinat tersebut selanjutnya diinputkan ke dalam perangkat lunak Microsoft Excel yang kemudian di *export* ke perangkat lunak inventor. Pada perangkat lunak inventor, titik-titik koordinat tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sketsa kurva dari *shroud*, *nozzle*, dan *hub* seperti diperlihatkan pada Gambar 3-6.



Gambar 3-6: *Sketch Shroud*, *nozzle* dan *hub*

Bilah yang telah dibuat di *input* ke dalam Numeca, kemudian dilakukan proses pembuatan domain *meshing*. Proses *meshing* ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Numeca IGG-Autogrid5 (64-bits). Hasil dari pembuatan domain *meshing* diperlihatkan pada Gambar 3-7.



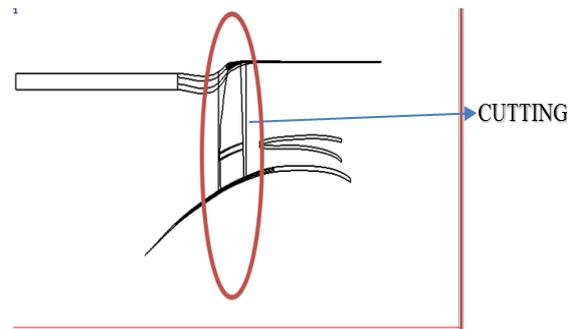
Gambar 3-7: Hasil *meshing*

Domain dari *geometry bilah kipas* yang telah berhasil di-*meshing* kemudian disimulasikan untuk mendapatkan karakteristik aerodinamika dari bilah kipas. Proses simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD NUMECA FineTurbo 90_3. Parameter simulasi yang digunakan disesuaikan dengan kondisi terbang pesawat airbus A-320 yang menggunakan mesin CFM56 saat terbang dalam keadaan *economical cruise* dengan tinggi terbang 37.000 feet atau sekitar 11.300 m di atas permukaan laut dan kecepatan terbang 233 m/s, serta pada saat *takeoff* dengan tinggi terbang 0 meter di atas permukaan laut dan kecepatan 79.17 m/s. Properti udara (tekanan, temperatur, dan kerapatan udara) ditentukan dengan cara memasukan *input* dari kondisi terbang ke dalam perhitungan ISA.

Proses simulasi dilakukan dengan memvariasikan nilai dari *mass flow*. Variasi dari *mass flow* ini mulai dari 120

..., 165 dan 500 kg/s. Adapun *output* yang didapatkan, diantaranya *temperature*, *pressure*, *thrust* dan *power*.

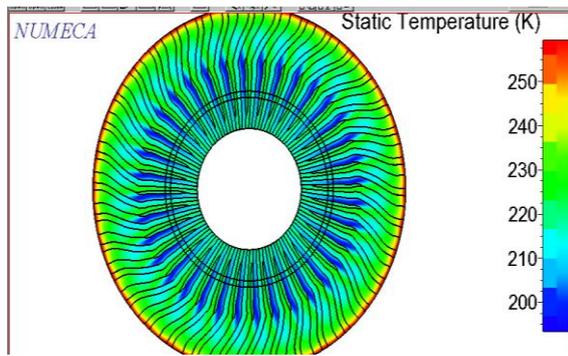
Untuk mendapatkan kurva performa dari pada kipas, maka setelah simulasi selesai, dilakukan pemotongan di sisi depan dan belakang kipas. Dari hasil pemotongan tersebut didapatkan nilai dari tekanan dan juga temperatur tepat sebelum dan sesudah kipas. Hasil dari pada CFView diperlihatkan pada Gambar 3-8.



Gambar 3-8: Hasil pemotongan

Setelah dilakukan pemotongan, nilai dari tekanan dan temperatur dapat diperlihatkan dengan menggunakan fungsi *contour* (ditunjukkan dengan gradasi warna) dan fungsi integral (untuk mendapatkan nilai rata-rata). Hasil dari penggunaan fungsi *contour* dan integral diperlihatkan pada Gambar 3-9.

Untuk mendapatkan sebuah keputusan *maintenance*, maka diperlukan sebuah analisis data. Analisis data dilakukan dengan membandingkan performa yang dihasilkan oleh kipas dalam keadaan cacat dan non-cacat. Dari hasil perbandingan performa kipas cacat dan non-cacat, didapat perubahan efisiensi, tekanan, *temperature*, *power*, dan juga *thrust* dari kipas. Perubahan nilai-nilai tersebut dibuat dalam bentuk persentase. Kemudian besar perubahan *thrust* dari kipas dibandingkan dengan regulasi AC 25-13 bagian 5.a.1 mengenai *reduce take-off thrust* yang menyatakan bahwa pesawat terbang dapat melakukan *take-off* apabila:



Gambar 3-9: Hasil fungsi contour

“Pengaturan reduce take-off thrust paling sedikit adalah 75 % dari maximum take-off thrust atau derated take-off thrust pada kondisi ambient.”[Federal Aviation Regulation CFR 14 , AC-25-13. 1988]

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

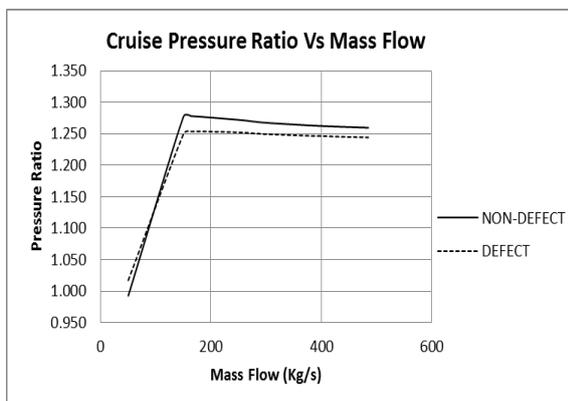
Dengan diketahuinya data-data kondisi terbang, maka *mass flow* dapat dihitung sehingga di dapat nilai *massflow* sebagai berikut:

$$\dot{m}_{cruise} = 165.82 \text{ kg/s}$$

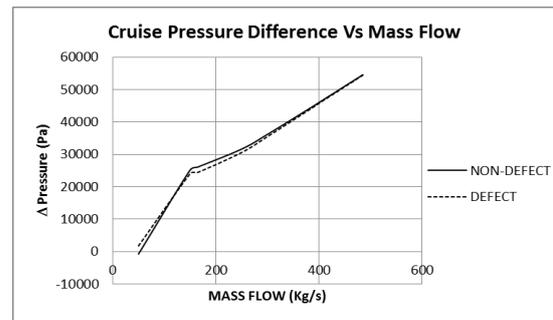
$$\dot{m}_{Takeoff} = 198 \text{ kg/s}$$

Dari komputasi yang dilakukan, didapat data-data hasil komputasi kipas cacat dan non-cacat pada kondisi *cruise* dan pada kondisi *take-off*.

Nilai dari ΔP dan *pressure ratio* dari kipas pada saat *cruise* menghasilkan grafik *pressure ratio* dan ΔP seperti diperlihatkan pada Gambar 4-1 dan Gambar 4-2.



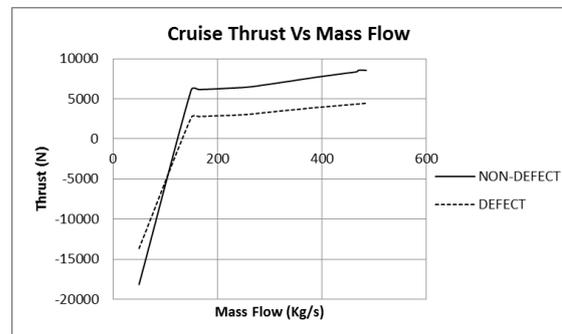
Gambar 4-1: Cruise pressure ratio vs mass flow



Gambar 4-2: Cruise pressure difference vs mass flow

Dari grafik *pressure ratio* dan ΔP dapat dilihat bahwa kurva kipas dengan kondisi cacat berada di bawah kurva kipas dengan kondisi non-cacat. Ini membuktikan bahwa cacat pada kipas tersebut menyebabkan terjadinya penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas.

Penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas berpengaruh pada *thrust* yang dihasilkan oleh kipas. Kurva dari *thrust* yang di plot bersama *mass flow* dapat dilihat pada Gambar 4-3.

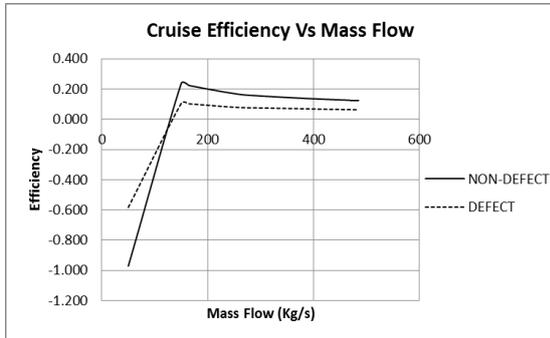


Gambar 4-3: Cruise thrust vs mass flow

Dari grafik *thrust*, dapat dilihat bahwa bilah kipas dalam kondisi cacat menghasilkan *thrust* yang lebih rendah dari pada bilah kipas dalam kondisi non-cacat. Besar penurunan dari *thrust* kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} \Delta F &= \left(\frac{F_{non-defect} - F_{defect}}{F_{non-defect}} \times 100\% \right) \Delta F \\ &= \left(\frac{6153.4 - 2799.8}{6153.4} \times 100\% \right) \\ \Delta F &= 55\% \end{aligned}$$

Nilai efisiensi kemudian di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan Grafik efisiensi seperti diperlihatkan pada Gambar 4-4.



Gambar 4-4: Cruise Efficiency Vs Mass Flow

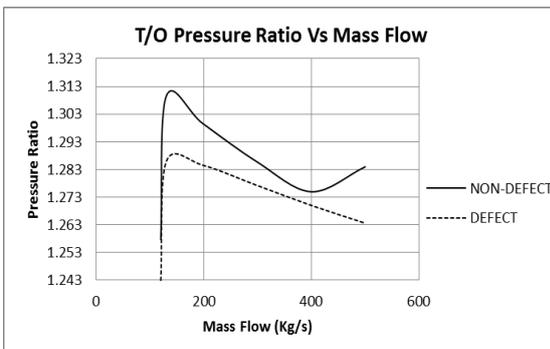
Dari grafik efisiensi, dapat dilihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi dari kipas. Besar penurunan dari efisiensi kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dapat dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\Delta\eta = \left(\frac{\eta_{non-defect} - \eta_{defect}}{\eta_{non-defect}} \times 100\% \right)$$

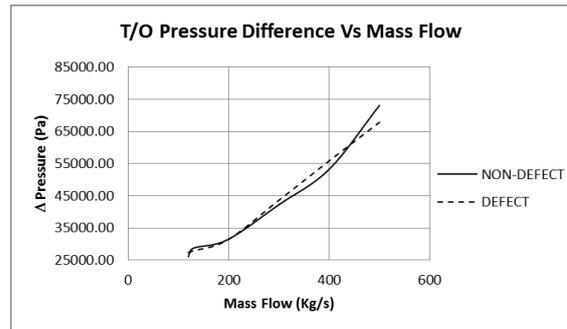
$$\Delta\eta = \left(\frac{0.223 - 0.102}{0.223} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = 54\%$$

Untuk kondisi *takeoff*, nilai dari ΔP dan *pressure ratio* dari kipas pada saat kondisi *take-off* di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan grafik *pressure ratio* dan ΔP seperti diperlihatkan pada Gambar 4-5 dan Gambar 4-6.

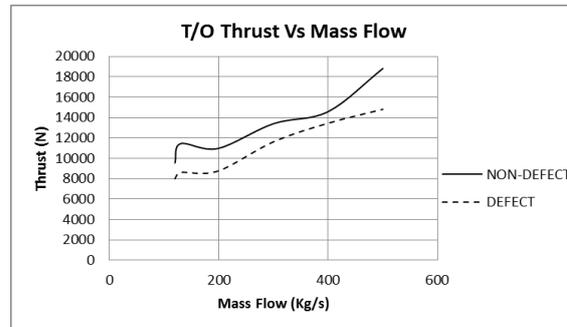


Gambar 4-5: Take-off pressure ratio vs mass flow



Gambar 4-6: Take-off pressure difference vs mass flow

Seperti pada kondisi *cruise*, penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas pada saat *takeoff* juga berpengaruh pada *thrust* yang dihasilkan oleh kipas. Kurva dari *thrust* pada saat *takeoff* yang di plot bersama *massflow* dapat dilihat pada Gambar 4-7.



Gambar 4-7: Take-off thrust vs mass flow

Dari grafik tersebut, kita dapat melihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan *thrust* dari kipas. Besar penurunan dari *thrust* kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dapat dihitung dengan perhitungan berikut:

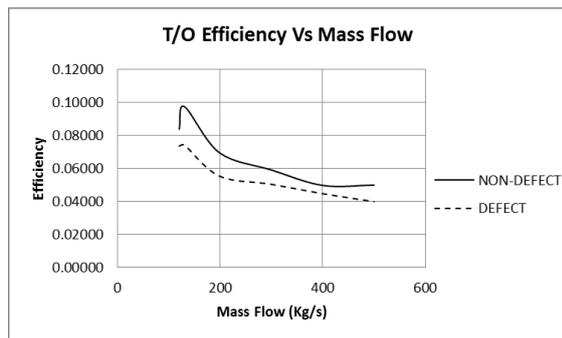
$$\Delta F = \left(\frac{F_{non-defect} - F_{defect}}{F_{non-defect}} \times 100\% \right)$$

$$\Delta F = \left(\frac{12369 - 10686}{12369} \times 100\% \right)$$

$$\Delta F = 14\%$$

Dari data *thrust*, *power* dan kecepatan, maka efisiensi dari kipas dapat dihitung. Nilai efisiensi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-5 yang terdapat pada sub bab 2-1. Nilai efisiensi dari kipas di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan Grafik

efisiensi seperti diperlihatkan pada Gambar 4-8.



Gambar 4-8: Efisiensi *take-off* vs *mass flow*

Dari grafik tersebut, kita dapat melihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi dari kipas. Besar penurunan dari efisiensi kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) pada saat *take-off* dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\Delta\eta = \left(\frac{\eta_{non-defect} - \eta_{defect}}{\eta_{non-defect}} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = \left(\frac{0.077 - 0.064}{0.077} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = 16\%$$

Dari komputasi yang dilakukan, didapat *thrust* dan efisiensi dari kipas cacat dan non-cacat baik dalam kondisi *cruise* maupun kondisi *take-off*. Data-data *thrust* dan efisiensi diperlihatkan pada Tabel 4-1.

Table 4-1: *THRUST* DAN EFISIENSI

No.	Kondisi Terbang	$\Delta\eta$	ΔF
1	Cruise	54%	55%
2	Take-Off	16%	14%

Dari Tabel 4-1, kita dapat melihat bahwa terjadi penurunan *thrust* pada kipas yang diakibatkan oleh adanya cacat berupa *dent* pada bilah kipas. Penurunan *thrust* pada kipas tersebut diakibatkan oleh penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas. Maka, sesuai dengan AC 25-13 yang telah dibahas pada sub bagian 2 bahwa apabila terjadi penurunan *thrust* pada sebuah mesin,

maka *thrust* yang dihasilkan tidak boleh kurang dari 75% *maximum take-off thrust*. Atau dengan kata lain, regulasi tersebut menyatakan bahwa penurunan *thrust* tidak boleh lebih dari 25% *maximum take-off thrust*.

Dengan adanya ketentuan AC 25-13 tersebut, maka dengan menghitung presentase penurunan *thrust* antara mesin dalam kondisi *non-cacat* dengan mesin dalam kondisi *cacat* pada saat *take-off*, dapat diketahui keputusan *maintenance* yang tepat bagi mesin tersebut.

Kerusakan atau cacat pada kipas terdapat pada daerah sekitar *tip* dari bilah kipas. Dengan demikian, diasumsikan bahwa kerusakan atau cacat tersebut hanya mempengaruhi performa pada bagian *cold flow* saja sehingga, penurunan performa yang dihasilkan oleh kipas atau disebut dengan performa kipas sama dengan penurunan performa mesin secara keseluruhan.

Dari hasil perhitungan tersebut, didapat bahwa presentase penurunan *thrust* yang dihasilkan oleh mesin pada saat *take-off* sebesar 14%. Oleh karena penurunan presentase *thrust* tidak melebihi 25%, maka keputusan *maintenance* yang tepat bagi bilah kipas mesin tersebut adalah *part holding*. Oleh karena itu, berdasarkan regulasi tersebut maka bilah kipas tidak diganti dan tidak dilakukan *repair*.

Apabila ditinjau dari kondisi pada saat pesawat melakukan *cruising*, penurunan *thrust* sebesar 55% dan efisiensi 54%. Angka penurunan tersebut merupakan angka yang cukup besar. Penurunan tersebut dapat mengakibatkan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak atau dapat dikatakan bahwa konsumsi bahan bakar akan lebih boros. Karena dengan RPM yang sama, bilah yang *cacat* hanya mampu menghasilkan

kurang lebih 55% dari *thrust* yang seharusnya. Konsumsi bahan bakar yang berlebih ini akan menyebabkan *cost* yang lebih tinggi, sehingga menimbulkan kerugian bagi perusahaan. Oleh karena itu, berdasarkan persentase penurunan *thrust* tersebut, maka bilah kipas tersebut lebih baik dilakukan *repair/replacement*. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari kerugian *financial* bagi perusahaan pemilik pesawat terbang.

Berdasarkan dua pertimbangan tersebut, untuk menjaga mesin tetap memenuhi *safety*, maka keputusan *maintenance* tetap mengacu pada regulasi, sehingga keputusan *maintenance* yang tepat untuk bilah tersebut adalah tidak dilakukan *repair (part holding)*.

5 KESIMPULAN

Dari hasil kajian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kerusakan *dent* sebesar 0.069 inchi yang terjadi pada bilah kipas menyebabkan turunnya performa pada mesin, diantaranya terjadi penurunan efisiensi dan *thrust* mesin. Saat kondisi *cruise*, kerusakan *dent*/penyok pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 54% dan penurunan *thrust* sebesar 55%. sedangkan untuk kondisi *take-off*, penurunan efisiensi sebesar 16% dan penurunan *thrust* sebesar 14%.

Berdasarkan AC 25-13 yang menyatakan bahwa apabila terjadi penurunan *thrust* pada sebuah mesin, maka penurunan *thrust* tidak boleh lebih dari 25% *maximum take-off thrust*. Dengan mengacu pada regulasi tersebut, dengan penurunan *take-off thrust* sebesar 14% (kurang dari 25%) maka bilah kipas mesin tersebut masih layak digunakan dan tidak perlu dilakukan *repair/replacement*.

Apabila ditinjau dari segi performa mesin pada saat terbang *cruise*, didapatkan bahwa penurunan *thrust* sebesar 55%. Penurunan sebesar 55%

tersebut dapat menyebabkan mesin tidak efisien sehingga menjadikan mesin lebih boros saat beroperasi. Dengan alasan tersebut, maka bilah kipas perlu di-*repair* ataupun *replacement*.

Dari hasil pertimbangan di atas, untuk menjaga mesin tetap memenuhi *safety*, maka keputusan *maintenance* tetap mengacu pada regulasi. Berdasarkan regulasi tersebut, dengan adanya penurunan *thrust* sebesar 14% pada saat *take-off*, maka keputusan *maintenance* yang dipilih yaitu bilah kipas tidak perlu di-*repair/replacement*.

DAFTAR RUJUKAN

- B763 , 2013. *Melbourne Australia*, 2006 (BS LOC), skybrary, www. skybrary.aero/index.php/b763, Melbourne_ Australia_ 2006_(BS_LOC).
- CFM Mesin 56-5B Maintenance Manual, 1999. *CFM International*.
- Cohen, H.R. and HIH. Saravanamuttoo, 1996. *Gas Turbine Mesin*, Longman Group Limited, England.
- Federal Aviation Regulation CFR 14 , AC-25-13, 1988, *FAA*.
- Fischer, U., 2010. *Mechanical and Metal Trades Handbook 2nd*, S.I: Verlag Eropa-Lehrmittel.
- Hall, Nancy., 2015. "Turbofan Engine". Glenn Research Center. NASA.
- James A.T. and S.L. Jonathan, 2004. *Foreign Object Damage Event Detector Data Fusion System for Turbofan Mesin*, *NASA Technical Report*, NASA/TM—2004-213192.
- Mabaso, A., 2011. *Mesin safety : bird be gone*, *Flight Global*, [http : //www.flightglobal.com/news/articles/mesin-safety-birds-be-gone-354209](http://www.flightglobal.com/news/articles/mesin-safety-birds-be-gone-354209).
- Mattingly, J. D.and Hans von Ohain, 2006. *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*, AIAA Education Series, Reston, Virginia, USA
- Numeca User Manual, 2015. *Fine Turbo User Manual*, Numeca International.
- Winfrey, R.W., 2013. *The Aplication of Computational Fluid Dynamics to Jet Mesin Inlet Flow Quality*, Undergraduate Thesis, Ohio State University.
- Wiranto, A., 2002. *Pengantar Turbin Gas dan Motor Propulsi*, Jakarta.

PENINGKATAN KUALITAS FOKUS CITRA IMAGER MULTISPEKTRAL SATELIT LAPAN-A3 (IMAGE-FOCUSING QUALITY IMPROVEMENT ON LAPAN-A3 SATELLITE MULTISPECTRAL IMAGER)

Andi Mukhtar Tahir¹, Patria Rachman Hakim, A. Hadi Syafruddin

Pusat Teknologi Satelit

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Cagak Satelit Km. 4, Bogor 16310 Indonesia

¹e-mail: andi.mukhtar@lapan.go.id

Diterima 2 Mei 2016; Direvisi 25 Mei 2015; Disetujui 27 Mei 2016

ABSTRACT

LAPAN-A3 satellite brings a multispectral imager as main payload which has four color channel, i.e.: red, green, blue and near-infrared. The imager optics system uses beam-splitter mechanism, which divides the incoming light passing lens system into each color channel detector. Since each channel detector has different position and orientation with respect to lens center, then images produced by each channel detector will have different image focus quality. Such factor could reduce the quality of image produced. This research aims to improve the composite image quality of LAPAN-A3 satellite multispectral imager by ensuring that every channel detector will have uniform focus setting. The method used in this research consists of taking series of observation of object with zebra-cross pattern, then processed them by using Iatest software. The determination of the quality of each image focus are based on Modulation Transfer Function (MTF) calculation in particular spatial frequency. After several observations and calculation, image focus level of each channel detector can be successfully uniformed by controlling the distance of each detector to the center of lens. Furthermore, the experiment also able to reduce distortion caused by channel co-registration in horizontal axes. As a result, image quality of LAPAN-A3 satellite multispectral imager can be improved significantly. These results can be used as reference on the actual LAPAN-A3 satellite ground station operation, and to support the development of experimental multispectral imager that is prepared for the next LAPAN-A4 satellite.

Keywords: Multispectral imager, Image focusing, Modulation transfer function

ABSTRAK

Satelit LAPAN-A3 membawa *imager* multispektral sebagai muatan utama, yang memiliki empat kanal warna yaitu merah, hijau, biru, dan *near-infrared*. Sistem optik *imager* dirancang dengan menggunakan *beam-splitter* yang akan membagi cahaya yang melewati sistem lensa menuju detektor masing-masing kanal warna. Karena setiap detektor memiliki posisi dan juga orientasi yang berbeda terhadap pusat lensa, maka akan terjadi ketidakseragaman derajat kefokusan untuk setiap citra yang dihasilkan oleh masing-masing kanal warna, yang dapat mengurangi kualitas citra komposit yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas citra komposit *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 dengan cara memastikan agar setiap kanal warna akan menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang seragam. Metode yang digunakan yaitu dengan mengambil sejumlah data pengamatan terhadap obyek dengan pola geometri *zebra-cross*, dan kemudian diolah dengan menggunakan perangkat lunak Imatest. Penentuan kualitas fokus citra dilakukan dengan mengukur *Modulation Transfer Function* (MTF) pada frekuensi spasial tertentu. Berdasarkan sejumlah pengamatan dan perhitungan yang dilakukan, derajat kefokusan citra yang dihasilkan masing-masing detektor dapat diseragamkan dengan mengatur jarak detektor tersebut terhadap pusat lensa. Selain itu, percobaan yang dilakukan juga dapat mengurangi distorsi ko-registrasi kanal yang terjadi pada sumbu horisontal. Kedua hasil tersebut secara signifikan dapat meningkatkan kualitas citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, terutama dalam aspek geometri. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai panduan dalam proses operasional satelit LAPAN-A3 selanjutnya dan juga dapat mendukung pengembangan *imager* multispektral eksperimen yang sedang dikembangkan untuk satelit LAPAN-A4.

Kata kunci: *Imager multispektral, Fokus citra, Modulation transfer function*

1 PENDAHULUAN

Satelit LAPAN-A3 merupakan satelit mikro eksperimental Indonesia dengan misi pemantauan bumi dan penginderaan jauh. Satelit LAPAN-A3 memiliki muatan optis berupa sebuah *imager* multispektral bertipe *pushbroom* dan sebuah kamera digital matriks. *Imager* multispektral yang dibawa memiliki empat buah kanal warna yaitu merah, hijau, biru dan inframerah dekat (*near-infrared*). Sistem optik yang dimiliki *imager* multispektral tersebut menggunakan mekanisme *beam-splitter*, dimana cahaya yang melewati lensa kemudian dipecah melalui sebuah prisma menjadi tiga bagian yang kemudian akan ditangkap oleh keempat detektor untuk setiap kanal warna tersebut, dimana detektor kanal biru dan hijau adalah satu kesatuan yang memiliki posisi geometri yang sama. Sebagai konsekuensi penggunaan *beam-splitter* tersebut, citra yang dihasilkan masing-masing detektor ini dapat memiliki kualitas geometri

yang berbeda, khususnya dalam hal derajat kefokusan citra dan distorsi ko-registrasi antar kanal.

Secara umum, derajat kefokusan citra yang dihasilkan sebuah sistem optik dapat ditentukan oleh dua hal, yaitu karakteristik pergerakan relatif obyek-kamera pada saat pengamatan dan kualitas sistem optik itu sendiri. Analisis kefokusan citra yang akan dihasilkan *imager* multispektral pada satelit LAPAN-A3 terkait pergerakan relatif kamera telah dilakukan (Hakim, dkk, 2013), berdasarkan teori koreksi dekonvolusi (Kaur, 2012). Sebagai kelanjutan pengembangan sistem pengolah data sistematis citra satelit LAPAN-A3 (Hakim, dkk, 2012), pada penelitian ini akan dianalisis kefokusan citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 terkait kualitas sistem optik *imager* yang dimiliki, khususnya mengenai karakteristik geometri internal keempat detektor untuk kanal merah, hijau, biru dan NIR. Perbedaan fokus antar citra yang

dihasilkan masing-masing detektor akibat penggunaan *beam-splitter* akan dapat menurunkan kualitas citra komposit yang dihasilkan *imager* secara signifikan, sehingga derajat kefokusan untuk seluruh kanal warna harus diseragamkan.

Salah satu cara yang cukup umum digunakan untuk mengukur kualitas derajat kefokusan sebuah citra adalah dengan cara menentukan *modulation transfer function* (MTF) citra tersebut. Secara umum, MTF merepresentasikan derajat ketajaman citra yang dihasilkan suatu sistem optik terhadap fungsi frekuensi spasial dari obyek yang diamati (Fliegel, 2004; McCluney, 1994). Terdapat beberapa metode untuk menentukan kurva MTF dari sebuah sistem optik, dimana secara umum seluruh metode tersebut menggunakan target obyek berpola geometri hitam-putih dengan resolusi spasial yang beragam. Citra pengamatan obyek yang dihasilkan kemudian diolah menggunakan berbagai algoritma pengolahan citra untuk dapat menghasilkan kurva MTF. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan mengimplementasikan transformasi *Fourier* pada *Edge Spread Function* (ESF) dan *Line Spread Function* (LSF) sebuah citra untuk menghasilkan kurva MTF (Crespi, et al, 2009; Choi, 2002; Khom, 2004). Metode komputasi lainnya seperti algoritma *neural network* juga dapat digunakan untuk menentukan kurva MTF (Delvit, 2004), walaupun metode ini cukup kompleks untuk keperluan pengolahan citra.

Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk memastikan keempat kanal detektor pada *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 akan memiliki derajat kefokusan citra yang seragam. Diharapkan dengan hanya mengatur pengendali *stepper* pada sistem lensa yang berlaku untuk seluruh detektor, maka seluruh detektor dapat menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang sama. Metode yang digunakan adalah dengan mengatur jarak masing-

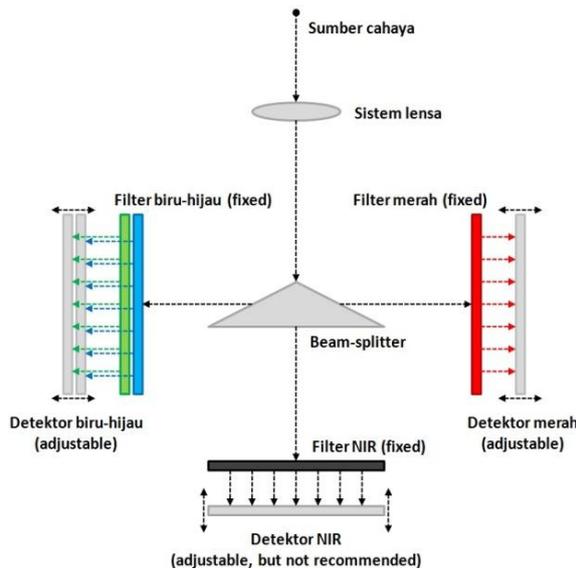
masing detektor terhadap pusat lensa, dan kualitas kefokusan citra yang dihasilkan ditentukan dengan menggunakan perangkat lunak Imatest. Selain permasalahan derajat kefokusan citra tersebut, penelitian ini juga bertujuan untuk meminimalisasi distorsi ko-registrasi pada sumbu horisontal detektor.

2 METODE PENELITIAN

Secara umum, penelitian dilakukan dalam beberapa tahap meliputi studi literatur, *setup* peralatan pengujian, pengambilan citra observasi, perhitungan kurva MTF, koreksi pengaturan jarak detektor terhadap pusat lensa dan analisis terhadap kualitas citra yang dihasilkan. Proses koreksi dan perhitungan kurva MTF dilakukan secara iteratif hingga diperoleh citra dengan kualitas yang cukup baik. Selanjutnya, berikut ini akan dijelaskan secara singkat mengenai karakteristik *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, teori MTF dan prosedur pengujian yang digunakan.

2.1 Karakteristik *Imager* LAPAN-A3

Imager multispektral satelit LAPAN-A3 memiliki empat buah detektor tipe *Charged-Coupled Device* (CCD) yang menghasilkan empat kanal warna yaitu merah-hijau-biru (RGB) dan inframerah dekat (NIR). Secara geometri, cahaya yang masuk melalui sistem lensa akan dibagi oleh *beam-splitter* menjadi tiga bagian, satu menuju detektor biru-hijau, satu menuju detektor merah dan satu menuju detektor NIR. Setiap *chip* detektor memiliki 8002 buah unit detektor dengan lebar 9 μm . Sementara itu, filter warna untuk masing-masing kanal ditempatkan tepat sebelum detektor. Gambar 2-1 menunjukkan ilustrasi geometri cahaya pada sistem optik *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, dimulai dari cahaya memasuki sistem lensa hingga cahaya yang telah dibagi oleh *beam-splitter* diterima oleh masing-masing detektor.

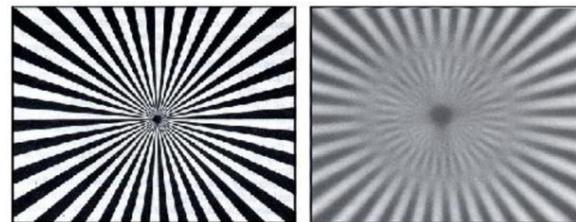


Gambar 2-1: Karakteristik geometri sistem optik pada imager multispektral satelit LAPAN-A3

Dengan menggunakan *beam-splitter*, sebuah obyek yang diamati akan memiliki karakteristik geometri yang berbeda untuk masing-masing kanal warna. Hal tersebut disebabkan karena posisi dan orientasi relatif detektor tiap kanal terhadap pusat lensa dapat berbeda, sehingga berdasarkan teori cahaya maka karakteristik geometri obyek pada citra yang dihasilkan menjadi berbeda. Beberapa akibat yang dapat ditimbulkan oleh adanya ketidakseragaman jarak antara detektor tiap kanal terhadap pusat lensa adalah perbedaan derajat kefokusan dan perbedaan posisi obyek pada masing-masing kanal citra. Hal ini tidak terjadi pada kamera matriks satelit LAPAN-A3 atau kamera jenis matriks pada umumnya karena ketiga kanal warna pada kamera tersebut ditangkap oleh detektor yang berada pada bidang yang sama, dengan menggunakan *filter Bayer*. Untuk mengatasi permasalahan ketidakseragaman kefokusan dan posisi citra tersebut, *imager* multispektral LAPAN-A3 telah dirancang agar posisi dan orientasi detektor untuk setiap kanal warna dapat dimodifikasi, dengan cara menggeser detektor dalam tiga arah sumbu, yaitu sumbu optik serta sumbu vertikal dan horisontal.

2.2 Modulation Transfer Function (MTF)

Berdasarkan pengertian MTF yang telah dipaparkan, semakin tinggi kualitas MTF suatu sistem optik, maka sistem optik tersebut akan dapat mengidentifikasi obyek dengan frekuensi spasial yang lebih tinggi. Sebaliknya, sebuah citra yang dihasilkan oleh sistem optik yang memiliki kualitas MTF rendah biasanya akan mengalami distorsi *blurring* ketika mengamati obyek dengan frekuensi spasial yang tinggi. Gambar 2-2 berikut menunjukkan ilustrasi perbedaan kualitas citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF tinggi dan kualitas rendah (Optikos Corporation, 1999). Pada citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF rendah, pola garis hitam-putih dengan frekuensi tinggi pada bagian tengah citra tidak dapat ditampilkan dengan baik.



Gambar 2-2: Perbandingan kualitas citra yang dihasilkan sistem optik dengan kualitas MTF berbeda; kualitas tinggi (kiri) dan kualitas rendah (kanan)

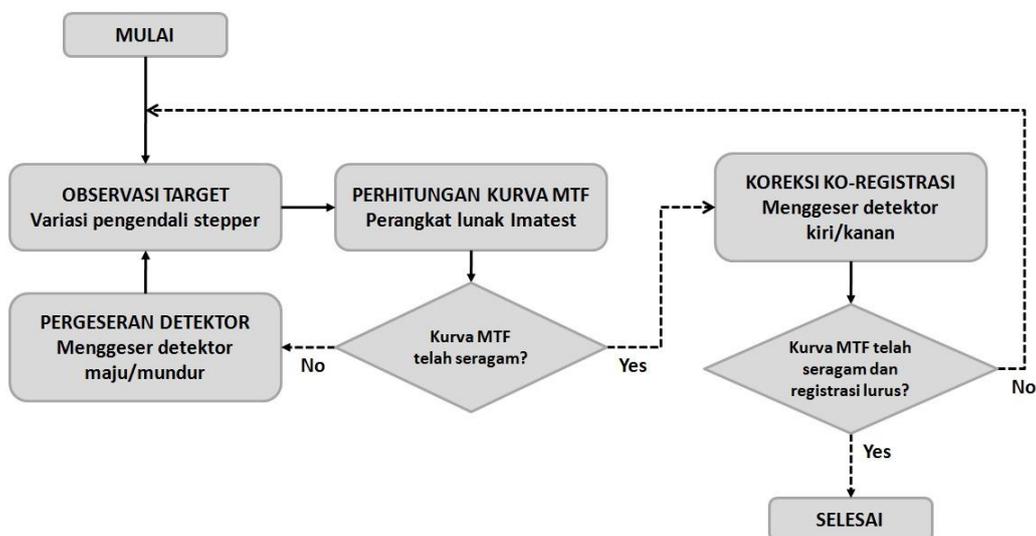
Penentuan kualitas MTF suatu sistem optik umumnya dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap target obyek dengan pola geometri standar. Target obyek yang umum digunakan dapat berpola seperti pada Gambar 2-2, atau dengan pola geometri hitam-putih lainnya. Pada prinsipnya, target obyek yang digunakan harus memiliki perbatasan yang jelas antara warna hitam dan putih, baik dapat berbentuk garis lurus, garis melingkar, bentuk dasar geometri seperti segitiga, atau bentuk lainnya sesuai dengan keperluan aplikasi. Dengan menggunakan beberapa citra hasil pengamatan target obyek tersebut, maka

kurva MTF dapat ditentukan menggunakan kombinasi beberapa algoritma pengolahan citra dan perhitungan statistik. Pada metode *Edge Spread Function* dan *Line Spread Function* (Crespi et al, 2009; Choi, 2002), algoritma akan mendeteksi dan menghitung fitur tepi pada citra, dan kurva ESF ditentukan dengan menggunakan regresi *least-square* untuk fitur tepi untuk seluruh baris citra. Selanjutnya, kurva LSF ditentukan dengan cara mendiferensialkan kurva ESF, dan kurva MTF diperoleh dengan menerapkan transformasi Fourier pada kurva LSF yang dihasilkan.

Pada penelitian ini, penentuan kurva MTF untuk sebuah citra hasil pengamatan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Iatest, yang secara efektif dan efisien dapat menghasilkan kurva MTF sebuah citra dan juga informasi data statistik turunannya. Perangkat lunak Iatest tersebut menerima data masukan berupa sebuah gambar yang memiliki fitur tepi yang tegas, baik dapat berupa tepi garis, lengkungan, atau bahkan tepi tanpa pola yang cukup jelas. Walaupun demikian, hasil perhitungan yang dihasilkan akan semakin baik jika menggunakan citra dengan fitur tepi berupa garis, seperti yang akan digunakan dalam penelitian ini.

2.3 Prosedur Pengujian

Proses observasi dan pengujian yang dilakukan dimulai dengan mengamati target obyek berpola dalam beberapa posisi fokus lensa yang berbeda, yang dapat diatur dengan menggunakan pengendali *stepper*. Kemudian satu set citra tersebut diolah menggunakan perangkat lunak Iatest untuk menghasilkan kurva MTF seluruh kanal citra. Selanjutnya jika terdapat perbedaan kurva MTF antar kanal yang signifikan, maka dilakukan proses pergeseran detektor tertentu untuk menggeser kurva MTF detektor tersebut. Proses tersebut kemudian terus diulang hingga keempat kurva MTF untuk seluruh detektor memiliki karakteristik titik optimum yang sama. Pada penelitian ini, detektor NIR dijadikan sebagai detektor referensi karena sulit dimodifikasi, dan detektor biru dan hijau dijadikan detektor yang menyesuaikan dengan detektor lainnya. Proses dilanjutkan dengan meminimalisasi distorsi ko-registrasi dalam sumbu horisontal, sedangkan koreksi dalam sumbu vertikal tidak dapat dilakukan karena karakteristik target yang digunakan. Gambar 2-3 menunjukkan diagram alir untuk prosedur observasi dan pengujian yang dilakukan.



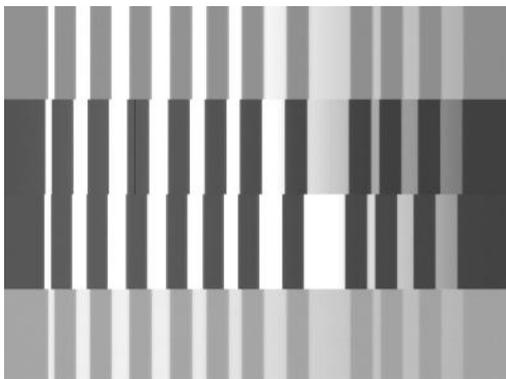
Gambar 2-3: Diagram alir prosedur observasi dan pengujian yang dilakukan

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil pengamatan imager terhadap target berpola dan analisis pengolahan data yang dilakukan perangkat lunak Iatest. Proses pengukuran dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu tahap awal sebelum dilakukannya perubahan jarak detektor, beberapa tahapan setelah dilakukan pergeseran detektor sesuai kebutuhan, dan tahap akhir dimana kurva MTF untuk seluruh kanal telah relatif seragam. Beberapa tahapan tersebut kembali dilakukan setelah proses koreksi ko-registrasi dilakukan sehingga citra yang dihasilkan setiap kanal akan memiliki derajat kefokusan yang seragam dan juga posisi registrasi yang bersesuaian.

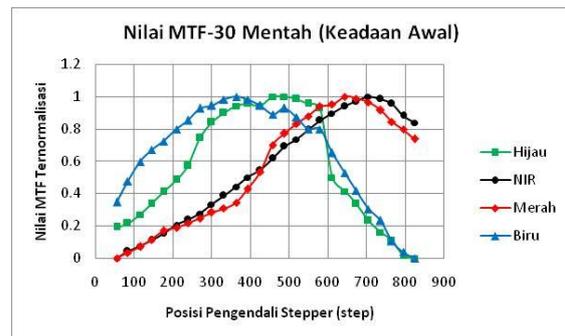
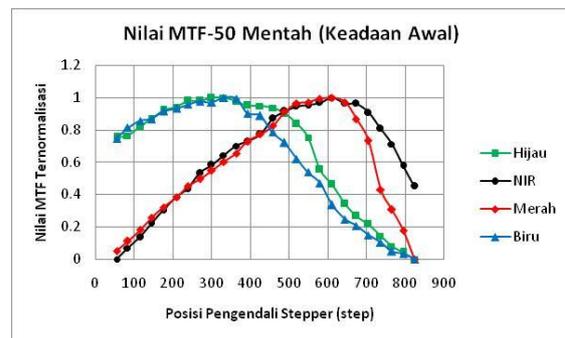
3.1 Data Pengukuran Awal

Pengukuran pertama dilakukan untuk mengetahui keadaan awal sebelum dilakukan perubahan posisi masing-masing detektor terhadap pusat lensa. Gambar 3-1 berikut ini menunjukkan citra hasil pengamatan untuk target berpola tersebut, dimana baris pertama merupakan hasil pengamatan detektor kanal hijau, baris kedua milik detektor kanal NIR, baris ketiga milik detektor kanal merah dan baris keempat milik detektor kanal biru. Citra pengamatan tersebut diambil pada saat kanal NIR menghasilkan citra terbaik.

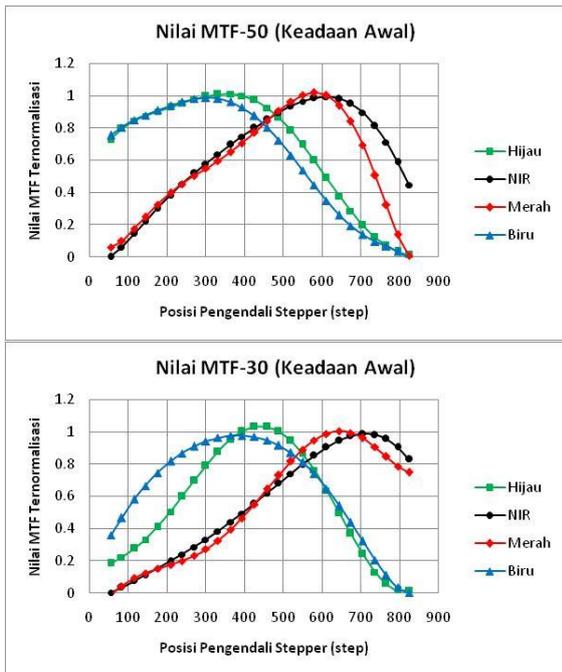


Gambar 3-1: Citra hasil pengamatan pada saat keadaan awal sebelum dilakukan perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa

Pada gambar tersebut, secara visual tampak bahwa citra kanal NIR sangat fokus, sementara ketiga kanal lainnya tidak terlalu fokus, terutama kanal hijau dan biru. Gambar 3-2 menunjukkan kurva MTF-50 dan MTF-30 yang telah dinormalisasi untuk setiap kanal, yang dihasilkan menggunakan perangkat lunak Iatest. Kurva normalisasi MTF-X merupakan fungsi frekuensi spasial pada saat MTF bernilai $X/100$ terhadap posisi pengendali *stepper*. Pengamatan dilakukan mulai dari posisi *stepper* terendah hingga posisi tertinggi. Gambar 3-3 merupakan hasil regresi polinomial orde-6 untuk kurva MTF pada Gambar 3-2. Warna kurva MTF pada kedua gambar tersebut disesuaikan dengan setiap kanal warna citra, kecuali warna hitam yang merepresentasikan kanal NIR.



Gambar 3-2: Kurva MTF ternormalisasi untuk keadaan awal sebelum dilakukan perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa



Gambar 3-3: Hasil regresi polinomial orde-6 untuk kurva MTF ternormalisasi sebelumnya

Dari Gambar 3-2 dan Gambar 3-3, tampak bahwa kanal biru dan hijau memiliki karakteristik kurva yang hampir sama. Hal ini disebabkan karena detektor kanal biru dan hijau merupakan satu kesatuan unit sehingga memiliki jarak yang relatif sama terhadap pusat lensa. Selain itu, tampak bahwa kurva biru dan hijau tersebut masih cukup jauh jika dibandingkan dengan kurva kanal merah dan NIR. Tujuan utama proses perbaikan dalam penelitian ini adalah membuat keempat kurva masing-masing kanal tersebut berhimpit atau paling tidak menjadi saling berdekatan.

Regresi polinomial orde-6 dilakukan agar memudahkan penentuan titik optimum untuk masing-masing kurva MTF, dan untuk meminimalisasi pengaruh adanya *noise* baik yang berasal dari citra pengamatan maupun kesalahan perhitungan oleh perangkat lunak. Tabel 3-1 menunjukkan posisi *stepper* untuk masing-masing kanal warna pada saat kurva MTF bernilai optimum. Adanya perbedaan titik optimum yang signifikan antara MTF-50 dan MTF-30 tidak menjadi masalah, karena pada perhitungan ini hanya

dibutuhkan titik optimum relatif antara keempat kanal warna tersebut. Jika setelah proses perubahan jarak detektor terhadap pusat lensa, seluruh kurva MTF-50 telah berdekatan, maka idealnya seluruh kurva MTF-30 juga akan berdekatan, walaupun memiliki posisi step yang berbeda.

Tabel 3-1: POSISI PENGENDALI STEPPER PADA SAAT KURVA MTF MASING-MASING KANAL WARNA BERNILAI OPTIMUM

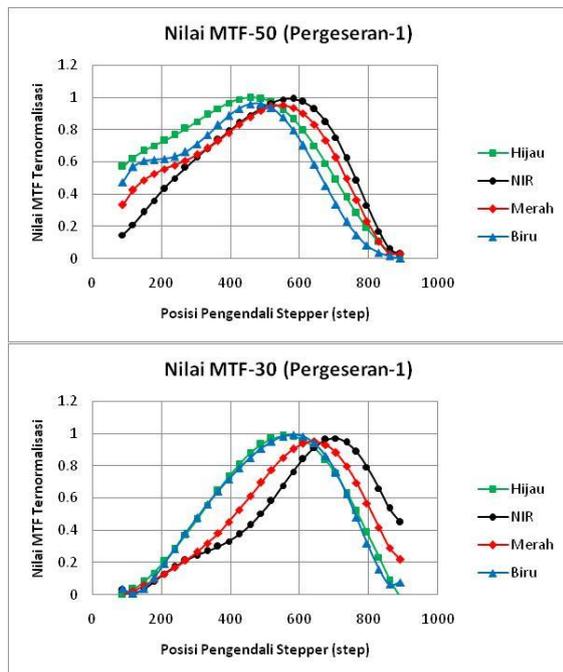
Pengamatan	Posisi Optimum Stepper			
	R	G	B	NIR
Kurva MTF-50	580	350	300	610
Kurva MTF-30	650	440	380	710

3.2 Perubahan Posisi Detektor

Berdasarkan kurva MTF setiap kanal pada Gambar 3-3, tampak bahwa kurva biru dan hijau, yang merupakan satu kesatuan, harus digeser ke kanan untuk menyesuaikan dengan posisi kurva merah dan NIR. Pilihan lainnya adalah mengeser kurva merah dan NIR ke kiri untuk menyesuaikan posisi kurva biru dan hijau. Karena detektor biru dan hijau merupakan satu kesatuan, dan fakta bahwa detektor NIR paling sulit untuk dimodifikasi, maka selanjutnya akan diubah posisi detektor biru dan hijau, agar dapat menggeser kurva MTF ke kanan untuk menyesuaikan dengan kurva MTF merah dan NIR.

Berdasarkan beberapa pengamatan yang telah dilakukan, menggeser kurva MTF ke kanan dilakukan dengan cara menjauhkan posisi detektor terhadap pusat lensa. Untuk pengamatan kedua berikut ini, posisi detektor kanal biru dan hijau dijauhkan dengan cara memutar sekrup pada detektor sebesar 180 derajat berlawanan dengan arah jarum jam (*counter-clockwise*). Gambar 3-4 menunjukkan kurva MTF setiap kanal warna setelah adanya perubahan posisi detektor biru dan hijau. Sama seperti gambar sebelumnya, kurva MTF berikut telah dinormalisasi, tetapi hanya

menampilkan kurva MTF setelah hasil regresi polinomial orde-6.

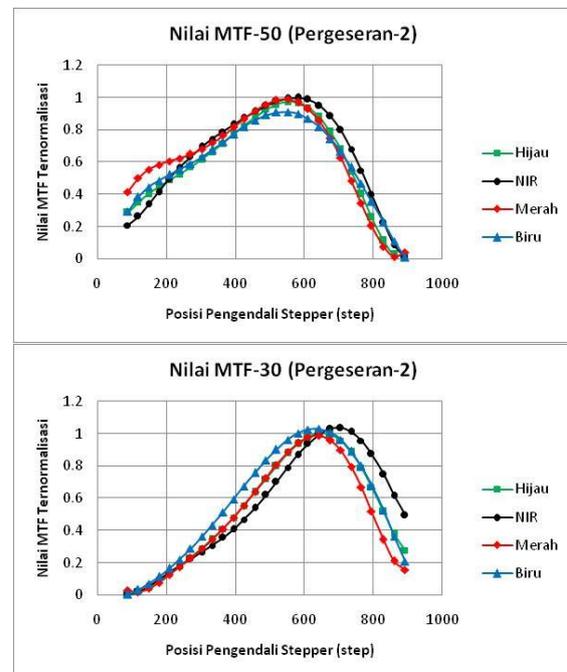


Gambar 3-4: Kurva MTF ternormalisasi setelah perputaran sekrup detektor biru dan hijau sebesar 180 derajat berlawanan dengan arah jarum jam

Tampak bahwa setelah posisi detektor biru dan hijau dimundurkan, kurva MTF-50 dan kurva MTF-30 untuk seluruh kanal lebih menyatu dan berhimpit dibandingkan dengan kurva pada keadaan awal. Nilai *step* optimum pada kurva MTF-50 untuk kanal BGR-NIR yaitu 470, 460, 550 dan 570, sedangkan pada kurva MTF-30 yaitu 580, 560, 640 dan 700. Jika sebelumnya terjadi selisih titik optimum kanal biru dan NIR sebesar 310 *step*, maka setelah pergeseran detektor biru dan hijau, selisih tersebut berkurang menjadi 100 *step*. Jadi tampak jelas bahwa baik secara visual maupun matematis, kurva MTF untuk setiap kanal menjadi lebih berdekatan.

Pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang tersebut ternyata dapat menggeser kurva biru dan hijau ke kanan dan mendekat menuju kurva merah dan NIR. Walaupun demikian, tampak bahwa keempat kurva tersebut belum berhimpit sempurna, sehingga

masih diperlukan proses pergeseran detektor kanal biru dan hijau dengan arah sama seperti sebelumnya yaitu ke arah belakang. Karena puntiran sekrup detektor sebesar 180 derajat dapat menggeser kurva sekitar 200 *step* ke kanan, maka diperkirakan masih dibutuhkan puntiran sekrup detektor sebesar 90 derajat berlawanan dengan arah jarum jam untuk dapat menyatukan kurva biru/hijau dan kurva merah/NIR tersebut. Gambar 3-5 menunjukkan kurva MTF untuk setiap kanal warna setelah pergeseran kedua ini, yang secara total akibat perputaran sekrup detektor sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam.



Gambar 3-5: Kurva MTF ternormalisasi setelah perputaran sekrup detektor biru dan hijau sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam

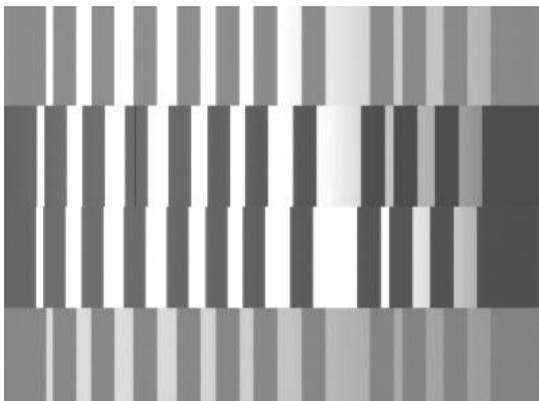
Berdasarkan kurva pada Gambar 3-5, terutama pada kurva MTF-50, tampak bahwa keempat kurva kanal RGB-NIR telah cukup berdekatan. Selisih posisi *step* optimum antar kanal untuk MTF-50 tidak melebihi 40 *step*, sedangkan untuk kurva MTF-30 sebesar 70 *step*. Dengan mempertimbangkan pengaruh *noise* pengukuran, maka selisih sebesar 40 *step* tersebut dapat diterima, sehingga

dapat dikatakan bahwa keempat detektor tersebut telah berada pada posisi relatif terhadap pusat lensa yang cukup ideal.

Satu catatan yang perlu diperhatikan yaitu adanya perbedaan kurva MTF optimum untuk kanal merah dan NIR, walau keduanya sama sekali tidak mengalami pergeseran. Karena perbedaan ini tidak terlalu signifikan, baik nilai nominal maupun pola kurvanya, maka perbedaan tersebut dapat disebabkan karena adanya *noise* pada data pengamatan yang digunakan.

3.3 Perbandingan Kualitas Citra

Setelah pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang tersebut, yang dilakukan dalam dua kali pergeseran, tampak bahwa kurva MTF seluruh kanal warna telah cukup berhimpit. Hal tersebut menyebabkan seluruh detektor untuk setiap kanal warna akan menghasilkan citra dengan derajat kefokusan yang lebih seragam. Gambar 3-6 berikut ini menunjukkan citra hasil pengamatan setelah sekrup detektor biru dan hijau diputar sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam. Sama seperti pada Gambar 3-1, seluruh citra pengamatan tiap kanal berikut diambil pada posisi step optimum kanal NIR yaitu 600, dan citra tersebut telah dikontraskan agar dapat ditampilkan dengan jelas dan baik.



Gambar 3-6: Citra hasil pengamatan setelah pergeseran detektor biru dan hijau ke belakang akibat putaran sekrup detektor 270 derajat CCW

Walaupun secara visual tidak terlihat dengan jelas, tetapi tampak

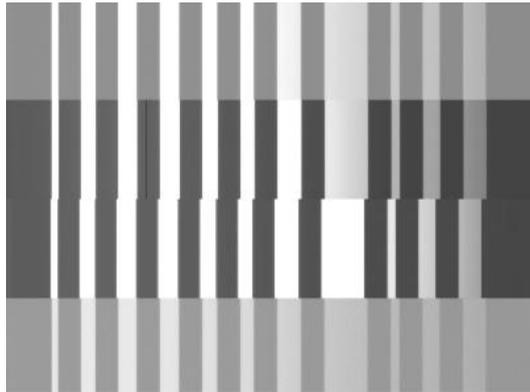
bahwa untuk keadaan awal pada Gambar 3-1, kualitas citra untuk kanal biru dan hijau relatif rendah jika dibandingkan dengan citra merah dan NIR. Hal tersebut sesuai dengan adanya perbedaan posisi *step* optimum yang signifikan antara kanal biru dan hijau terhadap kanal NIR. Sementara itu, setelah proses pergeseran detektor biru dan hijau pada Gambar 3-6, kualitas citra untuk keempat kanal tersebut sulit untuk dibedakan, setidaknya tidak dapat dibedakan secara jelas. Hal tersebut dapat ditunjukkan dengan perbedaan posisi *step* optimum yang tidak terlalu berbeda di antara seluruh kanal tersebut. Satu hal yang perlu dicatat adalah derajat kefokusan citra berbeda dengan derajat kecerahan citra, jadi bisa saja secara visual citra yang lebih cerah akan terlihat lebih fokus, walaupun sebenarnya tidak karena secara matematis citra tersebut memiliki nilai MTF yang lebih rendah pada frekuensi spasial tertentu tersebut.

3.4 Perbaikan Posisi Ko-Registrasi

Berdasarkan citra pengamatan pada Gambar 3-1 dan Gambar 3-6, tampak bahwa baik sebelum dan sesudah proses pergeseran detektor, terjadi distorsi ko-registrasi antar kanal di antara keempat detektor tersebut, dimana sebagian besar batas warna hitam-putih untuk setiap kanal tidak segaris. Hal tersebut menunjukkan bahwa terjadi distorsi registrasi pada sumbu horisontal, terutama antara kanal biru-hijau terhadap kanal merah dan NIR. Distorsi ko-registrasi pada sumbu vertikal juga terjadi, tetapi sayangnya tidak dapat ditunjukkan pada citra pengamatan dengan menggunakan target obyek dengan pola vertikal seperti yang digunakan dalam penelitian ini.

Terdapat beberapa faktor yang dapat menyebabkan terjadinya distorsi ko-registrasi ini. Pada penelitian ini, distorsi tersebut akan diminimalisasi dengan menggeser detektor biru-hijau

pada sumbu horisontal detektor. Gambar 3-7 berikut menunjukkan citra yang dihasilkan setelah melakukan pergeseran ini. Tampak bahwa batas tepi hitam-putih untuk seluruh kanal menjadi lebih segaris. Distorsi ko-registrasi dalam sumbu horisontal masih terjadi, tetapi telah berkurang secara sangat signifikan jika dibandingkan dengan keadaan awal sebelum dilakukannya perbaikan.

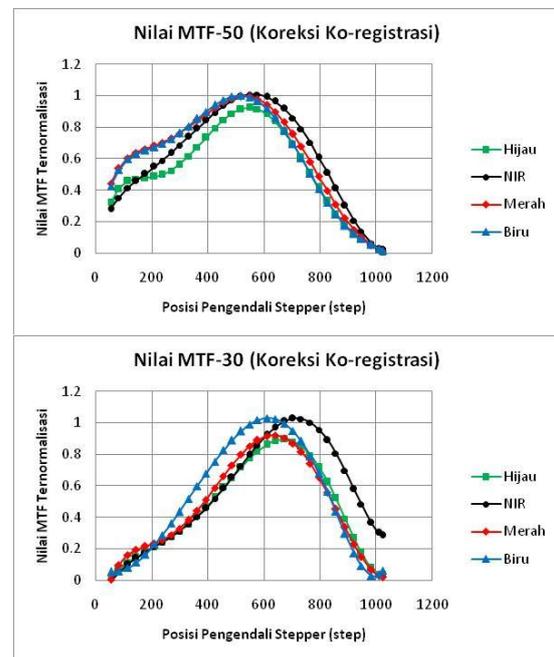


Gambar 3-7: Citra hasil pengamatan setelah proses perbaikan ko-registrasi kanal biru dan hijau

Setelah melakukan perbaikan distorsi registrasi, selanjutnya kembali dilakukan uji MTF, karena dengan melakukan perubahan posisi dan orientasi detektor biru dan hijau, dikhawatirkan kurva MTF yang dihasilkan menjadi berbeda. Gambar 3-8 berikut ini menunjukkan kurva MTF setelah dilakukan perbaikan tersebut, dimana tampak bahwa perbaikan ko-registrasi yang dilakukan tidak mengubah kurva MTF secara signifikan, jika dibandingkan terhadap kurva MTF pada Gambar 3-5 sebelum dilakukannya perbaikan ko-registrasi detektor biru dan hijau.

Distorsi registrasi lainnya yang masih tampak adalah terkait detektor merah yang memperlihatkan karakteristik distorsi yang bersifat non-linear terhadap kanal NIR. Hal tersebut tampak dimana pada bagian kiri citra, perbedaan batas tepi hitam-putih tidak signifikan, sementara pada sisi kanan citra, perbedaan batas tersebut cukup signifikan. Beberapa alternatif telah

dilakukan untuk meminimalisasi distorsi tersebut, tetapi tidak menghasilkan perubahan yang signifikan. Berdasarkan analisis dan pertimbangan yang dilakukan, diputuskan untuk mengembalikan keadaan detektor merah pada keadaan awal. Dengan demikian, distorsi ko-registrasi untuk kanal merah masih terjadi dan akan dijadikan pertimbangan dalam melakukan koreksi citra yang dihasilkan imager multispektral pada saat satelit LAPAN-A3 telah mengorbit.

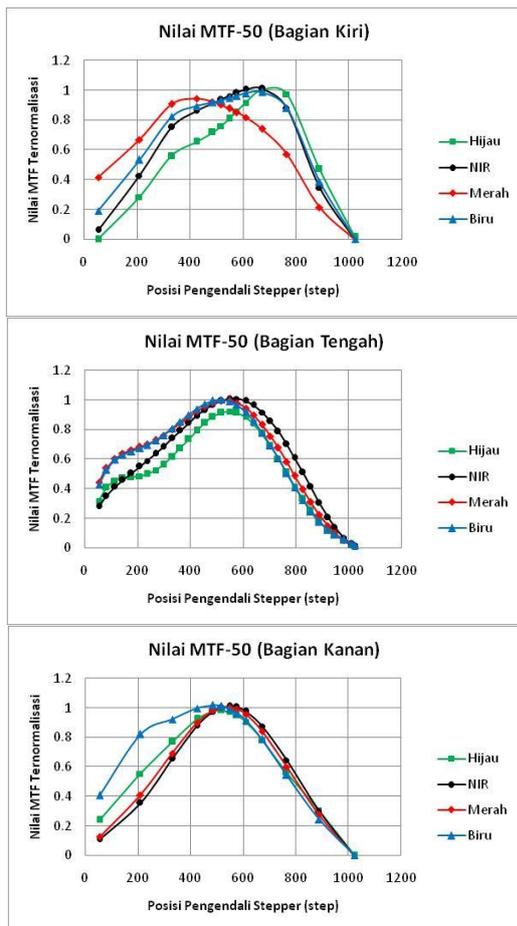


Gambar 3-8: Kurva MTF ternormalisasi setelah perbaikan ko-registrasi kanal biru dan hijau

3.5 Pengaruh Posisi Pixel terhadap MTF

Aspek lain yang diinvestigasi dalam penelitian ini adalah pengaruh posisi piksel pada detektor terhadap kualitas MTF yang dihasilkan. Berdasarkan teori, semakin dekat terhadap pusat lensa, maka bagian citra tersebut akan semakin fokus dibandingkan bagian citra pada daerah pinggir. Gambar 3-9 menunjukkan kurva MTF yang dihasilkan pada beberapa bagian citra setelah seluruh proses perbaikan dilakukan, yaitu bagian kiri, tengah dan kanan relatif terhadap pusat lensa atau titik tengah detektor.

Analisis terhadap kurva pada Gambar 3-9 cukup rumit, tetapi secara umum terlihat bahwa konvergensi titik optimum untuk setiap kanal warna akan berbeda untuk setiap bagian citra tersebut. Pada bagian tengah mungkin telah tercapai konvergensi keempat titik optimum MTF, tetapi pada daerah lain tidak demikian. Walaupun demikian, wilayah bagian tengah citra umumnya lebih penting jika dibandingkan dengan kedua bagian tepi karena pada akhirnya setelah proses koreksi geometri sistematis, bagian citra pada daerah tepi umumnya dipotong secara signifikan. Untuk penelitian selanjutnya, analisis yang lebih mendalam mengenai perbedaan derajat kefokusan citra sebagai fungsi jarak piksel terhadap pusat citra harus dilakukan.



Gambar 3-9: Perbandingan kurva MTF-50 antara beberapa bagian citra, i.e.: kiri, tengah dan kanan

3.6 Pembahasan Komprehensif

Setelah melakukan beberapa tahapan pengamatan, pengujian dan

analisis di atas, terdapat beberapa benang merah yang dapat diambil. Pertama adalah perubahan posisi detektor dalam sumbu optikal, yaitu sumbu maju-mundur pada sumbu pusat lensa, akan secara signifikan mengubah kefokusan citra yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan pada percobaan dengan menggeser detektor biru-hijau mundur ke belakang setara dengan 270 derajat puntiran detektor berlawanan arah jarum jam, yang menyebabkan kurva MTF akan bergeser ke arah kanan. Tabel 3-2 berikut menjelaskan secara ringkas hubungan antara beberapa pergeseran detektor yang telah dilakukan terhadap pergeseran posisi *stepper* optimum pada kurva MTF-50 untuk masing-masing kanal warna citra, mulai dari keadaan awal hingga setelah dilakukannya koreksi ko-registrasi.

Tabel 3-2: RINGKASAN HUBUNGAN ANTARA PERGESERAN DETEKTOR TERHADAP POSISI OPTIMUM KURVA MTF

Pengamatan	Posisi Optimum MTF-50			
	R	G	B	NIR
Keadaan awal	580	350	300	610
Pergeseran 180°	550	460	470	570
Pergeseran 270°	540	560	540	580
Ko-Registrasi	530	550	510	560

Tampak bahwa pergeseran detektor dapat menyeragamkan posisi optimum kurva MTF. Fenomena tersebut secara langsung menyiratkan bahwa derajat kefokusan citra masing-masing kanal warna ditentukan oleh dua faktor yang saling berkaitan. Faktor pertama adalah variabel fokus lensa yang dapat diatur dengan pengendali *stepper*, dimana variabel ini berlaku untuk seluruh detektor. Sementara itu faktor kedua adalah jarak masing-masing detektor terhadap pusat lensa, yang dapat diatur secara terpisah antar setiap kanal warna. Dapat dikatakan, derajat kefokusan citra

ditentukan oleh jarak efektif detektor terhadap lensa, yang dalam hal ini merupakan fungsi non-linear antara kedua variabel tersebut, yaitu variabel fokus lensa (pengendali *stepper*) dan variabel jarak setiap detektor terhadap pusat lensa.

Berdasarkan Tabel 3-2, setelah proses perbaikan ko-registrasi, posisi *stepper* pada nilai 550 dapat menghasilkan kualitas citra komposit yang cukup baik. Tabel 3-3 menunjukkan nilai frekuensi spasial pada saat MTF bernilai 0.5, sebelum normalisasi untuk masing-masing kanal citra pada posisi *stepper* di sekitar nilai 550 tersebut.

Tabel 3-3: NILAI FREKUENSI SPASIAL UNTUK MTF-50 PADA POSISI PENGENDALI STEPPER DI SEKITAR NILAI 550

Posisi <i>Stepper</i>	Frekuensi Spasial (Nyquist)			
	R	G	B	NIR
425	0.087	0.081	0.086	0.072
456	0.089	0.082	0.088	0.075
486	0.092	0.083	0.089	0.076
518	0.093	0.084	0.091	0.075
549	0.097	0.084	0.091	0.075
577	0.101	0.085	0.091	0.075
610	0.101	0.085	0.089	0.076
640	0.090	0.085	0.089	0.072
673	0.086	0.083	0.085	0.066

Tampak bahwa posisi *stepper* pada nilai 577 memberikan kombinasi terbaik untuk keempat kanal tersebut. Posisi 577 ini sedikit berbeda dengan nilai 550 yang telah diperoleh sebelumnya karena data tersebut belum mengalami proses regresi. Walaupun demikian, perbedaan posisi tersebut tidak signifikan sehingga masih dalam batas yang dapat ditoleransi. Terdapat dua hal penting yang dapat diangkat berdasarkan data pada Tabel 3-3 tersebut. Pertama adalah posisi pengendali *stepper* berapapun tidak dapat mengakomodasi kurva MTF optimum untuk seluruh kanal. Pada posisi pengendali *stepper* 577, kanal merah, hijau dan biru memiliki frekuensi spasial optimum, tetapi kanal NIR masih sedikit berada di bawah nilai optimum.

Walaupun demikian, posisi *stepper* pada nilai 577 ini memberikan komposisi terbaik untuk keempat kanal tersebut. Hal kedua yaitu mengenai perbedaan nilai frekuensi spasial yang cukup signifikan antar keempat kanal tersebut. Contohnya, walaupun pada posisi *stepper* pada nilai 577, kanal NIR telah memiliki frekuensi spasial yang relatif cukup optimum yaitu 0,075, tetapi nyatanya nilai tersebut masih jauh di bawah frekuensi spasial kanal merah sebesar 0,101. Hal ini dapat disebabkan karena perbedaan detail obyek yang diamati atau perbedaan kualitas antar detektor itu sendiri. Penggunaan target obyek dengan kualitas tinggi dapat mengatasi permasalahan tersebut.

Selain keseragaman fokus antar kanal citra, hal penting lainnya adalah mengenai distorsi ko-registrasi yang terjadi pada sumbu horisontal tidak dapat diminimalisasi dengan sempurna. Untuk kanal warna biru dan hijau, distorsi tersebut mungkin dapat diselesaikan secara sederhana dengan menggeser detektor dalam sumbu tersebut. Walaupun demikian, metode tersebut tidak dapat digunakan pada distorsi kanal merah, dimana karakteristik distorsi yang terjadi tampak bersifat tidak linear seperti yang telah dijelaskan. Karena metode di atas tidak dapat meminimalisasi distorsi yang terjadi, maka distorsi tersebut mungkin disebabkan karena detektor merah mengalami *bending* akibat struktur mekanik yang tidak bersifat ideal. Ketidakefektifan struktur mekanik tersebut, walaupun hanya dalam orde mili-derajat, secara teori dapat menyebabkan distorsi registrasi yang bersifat non-linear tersebut. Karena permasalahan itu, maka dalam penelitian ini tidak dilakukan perbaikan lebih lanjut pada detektor merah.

4 KESIMPULAN

Salah satu distorsi geometri yang terjadi pada citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3 adalah distorsi fokus internal dan distorsi ko-registrasi antar

kanal yang diakibatkan karena penggunaan *beam-splitter* pada sistem optik. Proses pengamatan, pengujian dan perbaikan yang dilakukan dapat memperbaiki kualitas citra yang dihasilkan *imager*, terutama dalam aspek geometri, yaitu dalam hal keseragaman derajat kefokusan antar kanal citra, dan juga dalam hal keseragaman ko-registrasi dalam sumbu horisontal.

Pada *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, derajat kefokusan antar kanal citra telah dapat diseragamkan dengan cara menggeser detektor biru-hijau ke belakang, dengan memutar sekrup detektor sebesar 270 derajat berlawanan dengan arah jarum jam. Sementara itu distorsi ko-registrasi detektor biru-hijau pada sumbu horisontal juga dapat diminimalisasi dengan menggeser detektor pada arah sumbu detektor tersebut. Kedua metode perbaikan tersebut secara signifikan telah dapat meningkatkan kualitas geometri citra yang dihasilkan, yang dapat ditunjukkan baik secara visual berupa citra pengamatan *imager* dan secara matematis berupa kurva MTF antar kanal.

Beberapa pengembangan masih perlu dilakukan untuk meningkatkan kualitas citra *imager* multispektral satelit LAPAN-A3, terutama mengenai distorsi ko-registrasi pada detektor kanal merah yang bersifat non-linear dan juga mengenai ketidakseragaman derajat kefokusan citra pada beberapa bagian citra yang berbeda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami sampaikan kepada Wahyudi Hasbi, M.Sc, atas semua bimbingan dan arahannya sehingga karya tulis ilmiah ini dapat terselesaikan dengan baik. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Bapak Drs. Abdul Rahman, MT dan Ir. Suhermanto, MT, atas bimbingan dan arahannya dalam membangun modul pengoreksi citra satelit LAPAN-A2 dan LAPAN-A3.

DAFTAR RUJUKAN

- Bu, F; Qiu, Y; and X. Yan, 2013. *Improvement of MTF Measurement and Analysis Using Knife-Edge Method*, Journal of Computational Information Systems 9:3, 987-994.
- Choi, T., 2002. *IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method*, Master Thesis, South Dakota State University, Brookings, SD.
- Crespi, M., and L.D. Vendictis, 2009. *A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment*, Sensors Journal Vol. 9, 3289-3313.
- Delvit, J.M; Leger; Roques, S; and C. Valorge, 2004. *Modulation Transfer Function Estimation from Nonspecific Images*, Optical Engineering, Vol. 43, 1355-1365.
- Fliegel, K., 2004. *Modelling and Measurement of Image Sensor Characteristics*, Radio Engineering Vol. 13, No. 4, 27-34.
- Hakim, P.R; Rachim, E; dan A. Rahman, 2013. *Model Koreksi Distorsi Blurring pada Citra Imager Pushbroom Menggunakan Algoritma Dekonvolusi Filter Wiener*, Pengembangan Teknologi Satelit di Indonesia: Sistem, Subsystem dan Misi Operasi, IPB Press, Bogor, 79-91.
- Hakim, P.R; Rahman, A; Suhermanto, dan E. Rachim, 2012. *Model Koreksi Geometri Sistemik Data Imager Pushbroom Menggunakan Metode Proyeksi Kolinear*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 10 No. 2, 121-132, LAPAN, Jakarta.
- Kaur, A. and V. Chopra, 2012. *A Comparative Study and Analysis of Image Restoration Techniques Using Different Images Formats*, International Journal for Science and Emerging Technologies with Latest Trends, Vol. 2, 7-14.
- Kohm, K., 2004. *Modulation Transfer Function Measurement Method and Results for the OrbView-3 High Resolution Imaging Satellite*, IAPRS, Vol. 35, 7-12.
- McCluney, R., 1994. *Introduction to Radiometry and Photometry*, Artech House, Inc., Norwood, MA.
- Optikos Corporation, 1999. *How to Measure MTF and Other Properties of Lenses*, User Manual Rev. 2.0, Wakefield, MA.

**RETIKULASI HIDROXYL TERMINATED POLUBUTADIENE (HTPB)
MANDIRI DENGAN TOLUENE DIISOCIANATE (TDI) MEMBENTUK
POLIURETAN SEBAGAI FUEL BINDER PROPELAN
(RETICULATION OF HYDROXYL-TERMINATED POLYBUTADIENE
(HTPB) WITH TOLUENE DIISOCYANATE (TDI) TO FORM
POLYURETHANE AS A PROPELLANT FUEL-BINDER)**

Geni Rosita

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

e-mail: genirosita@yahoo.co.id; geni.rosita@lapan.go.id

Diterima 6 Mei 2016; Direvisi 10 Juni 2016; Disetujui 23 Juni 2016

ABSTRACT

LAPAN has successfully made HTPB independently. The next stage is to manufacture fuel-binder by reacting the HTPB with TDI. Stages of this test to get the gel time and the hardness that can qualify as a propellant binder. In this research HTPB:TDI reacted in some ratio, and HTPB are treated differently on the viscosity and average molecular weight. From some of the compositions of the reaction, which can be used as a propellant fuel binder are that meet several criteria, among others, there are no air bubbles, elastic, non-sticky for easy process, not hard and not brittle so that the propellant is not easy to crack. Observations during the gel time, which can be used as fuel binder composition propellants are HTPB:TDI are 6:1, 7:1, 8:1 and 9:1. Thus, the self-developed HTPB can already be used as a fuel binder in the manufacture of composite propellant.

Keywords: *HTPB, TDI, gell time, propellant, fuel-binder*

ABSTRAK

LAPAN telah berhasil membuat HTPB secara mandiri. Tahapan berikutnya adalah melakukan pembuatan *fuel binder* dengan mereaksikan HTPB mandiri tersebut dengan TDI. Tahapan uji ini untuk mendapatkan *gel time* dan kekerasan yang dapat memenuhi syarat sebagai *binder* propelan. Pada penelitian ini dilakukan reaksi HTPB : TDI pada beberapa perbandingan, dan HTPB yang direaksikan berbeda pada viskositas dan berat molekul reratanya. Dari beberapa komposisi hasil reaksi, yang dapat digunakan sebagai *fuel binder* propelan adalah yang memenuhi beberapa kriteria, antara lain tidak ada gelembung udara, elastis, tidak lengket untuk memudahkan pencetakan, tidak keras dan tidak getas supaya propelan tidak mudah retak. Hasil pengamatan selama *gel time*, yang dapat digunakan sebagai *fuel binder* propelan adalah komposisi HTPB:TDI, 6:1, 7:1, 8:1 dan 9:1. Dengan demikian maka HTPB mandiri yang dikembangkan sudah dapat digunakan sebagai *fuel binder* pada pembuatan propelan komposit.

Kata kunci: HTPB, TDI, *gel time*, propelan, *fuel-binder*

1 PENDAHULUAN

Penelitian tentang reaksi antara HTPB dan TDI menjadi poliuretan sangatlah penting, karena poliuretan ini berfungsi sebagai *fuel binder* untuk mengikat oksidator pada proses pembuatan propelan. Poliuretan adalah hasil reaksi antara poliol yang berasal dari HTPB dan isosianat dari TDI, berupa reaksi perubahan HTPB dari cairan viskus menjadi padat. Proses ini membutuhkan waktu yang bergantung pada beberapa parameter. Bahan bakar roket padat merupakan bahan komposit, yang diperoleh dengan cara mereaksikan oksidator, *metal-fuel*, *fuel binder* (pengikat) dengan bahan *curing agent* (retikulasi) serta beberapa aditif tambahan. *Fuel binder* yang digunakan yaitu poliuretan berbasis HTPB. Bahan HTPB tidak dijual bebas, sehingga pengadaannya sulit, apalagi bila dikaitkan dengan industri militer. Oleh karena itu perlu diupayakan untuk membuat HTPB secara mandiri.

Penelitian dan pengembangan bahan baku *fuel binder* propelan, khususnya HTPB, telah dilakukan secara intensif sejak 2007. Saat ini LAPAN telah berhasil membuat HTPB melalui tahapan skala laboratorium. jika memungkinkan akan dilanjutkan ke skala lebih besar, karena selama ini HTPB yang digunakan adalah HTPB impor, yang selain sulit diperoleh juga mengalami persoalan variasi properti. Bahan HTPB spesifikasi *fuel binder* propelan memiliki persyaratan dengan

berat molekul rata-rata 2000-5000, viskositas 500 cp, mikrostruktur utama 1,4-cis minimal 40 %.

Binder memegang komposisi bersama-sama dan bertindak sebagai bahan bakar tambahan (*fuel-binder*). Setelah *curing*, *binder* membuat propelan menjadi fleksibel, yang menurunkan kemungkinan propelan akan retak/patah di bawah tegangan dan tekanan. *Binder* setidaknya terdiri atas dua komponen, yang pertama adalah prapolimer cair atau semi-cair dan yang kedua adalah *curing-agen*. Prapolimer fungsional hidroksil, seperti HTPB, di-*cure* menggunakan isosianat (Brzic, et al., 2014).

Fuel binder yang banyak dipakai untuk propelan pada saat ini adalah poliuretan berbasis HTPB karena memiliki sifat mekanik yang baik. HTPB yang dipakai adalah berupa cairan yang bila direaksikan dengan isosianat menjadi padat. Hal ini terjadi karena adanya ikatan silang antara gugus hidroksil dari HTPB dengan gugus isosianat dari TDI. TDI yang direaksikan dengan HTPB berfungsi sebagai bahan retikulasi dan memperpanjang rantai menjadi polimer jaringan sebagai matrik komposit berupa poliuretan yang elastis (Dubois, et al., 1995; Wibowo, 2013; Wibowo, 2015).

Pada proses pembuatan propelan perlu diperoleh formulasi *fuel binder* yang tepat, agar tidak menimbulkan masalah. Mendapatkan formula yang

memiliki sifat karakteristik dan sifat mekanik yang baik sebagai *fuel binder* sangatlah diharuskan. Diantara sifat yang diinginkan yaitu tidak ada gelembung udara atau tidak keropos serta elastis sehingga tidak terjadi keretakan pada propelan selama penyimpanan, karena sifat *fuel binder* otomatis akan berpengaruh kepada propelan yang dihasilkan. Hal ini yang akan diamati sampai tercapainya *gel time*.

Selain mengikat oksidator, campuran HTPB:TDI juga berfungsi sebagai pengikat serbuk logam (*metal powder/fuel-metal*), harus mampu menampung atau mengikat bahan oksidator semaksimal mungkin. Sehingga propelan yang dihasilkan selama penyimpanan memiliki ketahanan kimia dan didapatkan propelan yang kuat.

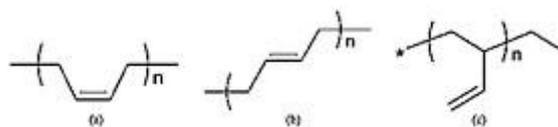
Dengan telah berhasilnya LAPAN membuat HTPB secara skala laboratorium, maka dilanjutkan dengan penelitian pembuatan poliuretan ini, yaitu mencari komposisi yang tepat untuk mencapai *gel time* dengan kekerasan yang sesuai. Untuk dapat digunakan sebagai *fuel binder* dilakukan reaksi retikulasi (pemadatan) dengan penambahan TDI yang akan menghasilkan poliuretan. Pada penelitian ini yang diamati yaitu lama reaksi (*gel time*) dan kekerasan dari poliuretan yang terbentuk pada setiap komposisi. Penelitian ini juga dapat memberikan informasi tambahan, apakah HTPB mandiri ini layak digunakan sebagai bahan *fuel-binder* pada proses pembuatan propelan padat.

2 TEORI

HTPB bila direaksikan dengan isosianat akan menjadi poliuretan merupakan polimer yang sangat bagus sifat mekaniknya dengan sifat energetik yang sangat tinggi untuk *fuel binder* propelan (Dubois et al., 1995). Pada penelitian ini isosianat yang digunakan adalah TDI (Rosita, 2013; Wibowo 2015). Sistem *binder* ini menunjukkan kelayakan dan superioritas di atas sistem *binder* lainnya, mampu menjadi padatan yang sangat tinggi (86% - 90 wt %), tanpa mengorbankan kemudahan dalam

processability dan dengan sifat mekanik yang dapat ditingkatkan dan disempurnakan sesuai karakteristik internal balistik yang diharapkan (Gupta, 2014).

Poliuretan berbasis HTPB adalah hasil reaksi HTPB dengan TDI dimana HTPB cairan viskus menjadi padatan yang elastis, tidak ada gelembung udara. Untuk terjadinya pemadatan memerlukan waktu atau lama reaksi (*gel time*) (Gupta, 2014). Pada pembuatan propelan yang baik adalah dengan reaksi yang tidak terlalu cepat karena secara teori bila reaksi terlalu cepat hasil akan keras. Sedangkan sifat mekanik propelan dapat dipengaruhi oleh kraktristik HTPB, antara lain mikro struktur yang dimilikinya. Tiga tipe strukturmikro tersebut, yaitu 1,4-cis, 1,4-trans dan 1,2-vinil, sebagai diperlihatkan pada Gambar 2-1.



Gambar 2-1: Struktur mikro HTPB a) cis, b) trans, dan c) vinil

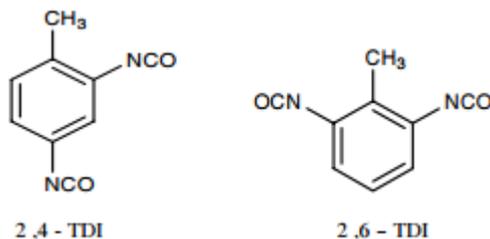
Pada reaksi pembentukan poliuretan berbasis HTPB dengan TDI akan terjadi reaksi gugus hidroksil (poliol) dengan gugus isosianat berupa reaksi ikatan silang yang berpengaruh kepada kekerasan membentuk uretan. Poliuretan merupakan polimer yang sifatnya dapat diatur sesuai dengan kebutuhan (Sekkar et al., 2000; Delebecq et al., 2013).

Reaksi pembentukan poliuretan adalah reaksi kopolimerisasi antara prepolimer poliol (-OH) dalam hal ini adalah HTPB dengan isosianat (NCO). Pada penelitian ini digunakan TDI yang berfungsi sebagai bahan untuk memperpanjang rantai yang membentuk ikatan silang dengan HTPB berbentuk polimer dengan berat molekul yang tinggi.

Untuk meningkatkan properti HTPB, komposisi strukturmikro akan memainkan peran penting. Karakteristik aliran dari HTPB dan sifat mekanik poliuretan yang sesuai tergantung pada

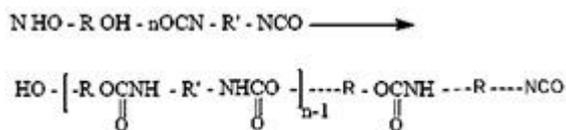
rasio konsentrasi strukturmikro yang ada dalam sampel. Meskipun terlihat seperti molekul sederhana namun strukturnya benar-benar kompleks. Jumlah strukturmikro dalam sampel relatif tergantung pada kondisi polimerisasi yang disintesis (Dey, et al., 2015).

TDI merupakan senyawa aromatis toluen yang tersubsitusi oleh gugus isosianat (NCO), dapat dibuat dengan bahan dasar toluene melalui tiga tahap. Tahap I adalah nitration toluene menjadi dinitro toluene. Tahap II, reduksi dinitro toluen menjadi diamino toluen. Tahap III adalah posgenasi diamino toluen menghasilkan dua isomer diisocyanat yaitu 2,4- dan 2,6-TDI (Gambar 2-2).



Gambar 2-2: Mikrostruktur TDI

Reaksi antara TDI dan HTPB akan menghasilkan poliuretan yang merupakan salah satu golongan polimer kondensasi dengan reaksi sebagai berikut:



Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat fisik poliuretan, antara lain: kualitas isosianat yang digunakan, reaktivitas isosianat, reaktivitas atom hydrogen aktif dan energi ikatan antara gugus isosianat dan hydrogen reaktif. Sifat mekanik polyuretan juga tergantung dari panjang rantai dan struktur dari polymer cair yang akan dipadatkan (Daniel, 2006; Mahanta 2012).

3 METODE PENELITIAN

3.1 Bahan

HTPB yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas 4 macam, yaitu M₃, M₄, M₆ dan M₇. Yang membedakan

diantara keempat macam HTPB yang digunakan adalah viskositas dan berat molekulnya. Besaran viskositas secara berturutan adalah 13, 12, 16, 18 cp. Sedangkan berat molekul rerata yang diukur menggunakan peralatan GPC adalah 5700, 5087, 6015 dan 6484.

HTPB yang dipakai disini adalah HTPB hasil polimerisasi sendiri dari gas butadiena menjadi polibutadiena. Penelitian dilakukan di laboratorium polimer LAPAN, produk yang dihasilkan dinamakan HTPB mandiri. Sedangkan TDI adalah bahan komersial yang diperoleh secara bebas dari pasar industri.

3.2 Proses

Pembuatan poliuretan dilakukan dengan mencampurkan HTPB dengan TDI pada beberapa perbandingan berat yang telah ditentukan. HTPB terlebih dahulu dituang ke dalam *beaker-glass*, kemudian ditambahkan TDI secara perlahan sambil diaduk. Pengadukan menggunakan *stirer* magnetik dengan kecepatan 300 rpm.

Campuran diaduk sampai homogen dan dilakukan pada dua keadaan, a) pada suhu kamar dan b) pada suhu 45°C. Pengadukan sampai diperoleh homogenitas campuran selama kurang lebih 45 sampai 60 menit. Semua variabel proses seperti durasi mixing, urutan penambahan material pada *mixer*, interval waktu yang diaplikasikan, dipertahankan tetap pada semua komposisi.

Adonan yang terbentuk lalu dituang dalam cetakan, proses *curing* berlangsung pada kondisi udara bebas. Pengamatan dilakukan kapan terbentuknya *gel time*, jika ada gelembung udara diamati kapan terbentuk. Untuk memudahkan pemilihan komposisi *fuel binder* yang tepat pada pembuatan propelan, setelah terjadi pepadatan, dilakukan uji elastisitas secara visual dan uji kekerasan poliuretan yang terbentuk. Untuk hasil kekerasan diukur dengan alat Teclock. Untuk *gel time* hanya diukur secara manual yaitu dengan mengamati lama reaksi sampai mencapai pepadatan.

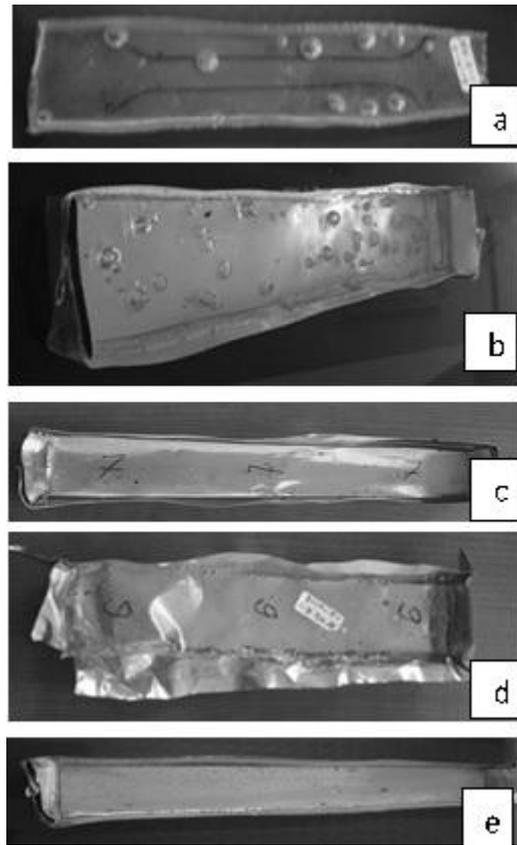
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil reaksi HTPB dan TDI dengan komposisi yang divariasikan, diperoleh sampel poliuretan yang berbeda. Contoh bentuk sampel poliuretan sebagai *fuel binder* yang diperoleh diberikan pada gambar 4-1, yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

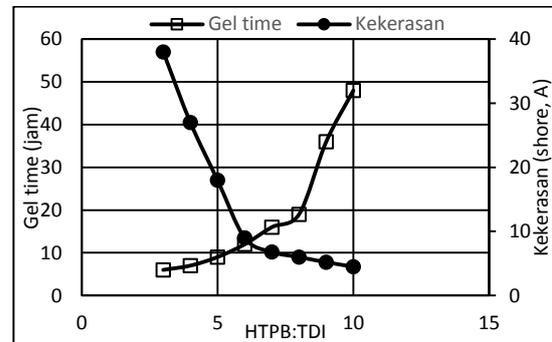
- Gambar 4-1a, merupakan hasil reaksi dengan perbandingan HTPB:TDI = 4:1, ada gelembung udara dan keras, tidak elastis.
- Gambar 4-1b, merupakan hasil reaksi pada komposisi 6:1 dan 7:1 (sampel M₆), elastis tapi ada gelembung udara.
- Gambar 4-1c, merupakan hasil reaksi dengan komposisi 7:1, 8:1 dan 9:1 (sampel M₄) yang tidak lengket, elastis serta reaksi lebih stabil.
- Gambar 4-1d, merupakan hasil reaksi dengan komposisi 12:1 (sampel M₃), terjadi reaksi 2 lapisan, yang bagian atas ada gelembung udara kecil-kecil seperti busa dan keras, bagian bawah tidak ada gelembung udara.
- Gambar 4-1e, merupakan hasil reaksi dengan komposisi 11:1. Hasilnya adalah elastis, tidak ada gelembung udara, lebih lembek dan lengket, membutuhkan waktu yang lama untuk reaksi, sedikit lengket waktu baru dikeluarkan dari cetakan.

Reaksi poliuretan yang terbentuk antara HTPB dan TDI diberikan pada Gambar 4-2, 4-3, 4-4, dan 4-5. Dari gambar terlihat bahwa *gel time* dan kekerasan yang diperoleh akan berbeda, walaupun pada perbandingan berat yang sama.

Untuk sampel HTPB M₄, hasilnya diberikan pada Gambar 4-2. Dari grafik tersebut diberikan hasil kekerasan dan *gel time* dari beberapa komposisi, dimana semakin banyak kandungan HTPB, maka kekerasan akan menurun sedangkan *gel time* semakin lama atau meningkat. Diawali dengan perbandingan HTPB:TDI 3:1 diperoleh kekerasan 38 Shore A dengan *gel time* selama 6 jam. Pada perbandingan 10:1 kekerasan menurun menjadi 4.5 Shore A, dengan peningkatan *gel time*, yaitu 48 jam.



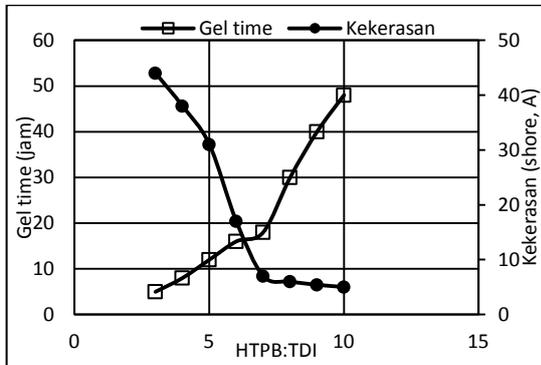
Gambar 4-1: Contoh hasil reaksi retikulasi HTPB dengan TDI



Gambar 4-2: Hasil reaksi HTPB M₄ dengan TDI

Gambar 4-3, merupakan hasil *gel time* dan kekerasan yang bervariasi dari HTPB:TDI untuk sampel M₇. Pada komposisi 3:1 dengan *gel time* tercatat selama 5 jam, menghasilkan kekerasan 40 Shore A. Disini terlihat pada komposisi yang sama pada sampel M₄ pada Gambar 4-2, *gel time* yang dibutuhkan lebih cepat dari pada *gel time* sampel M₇, untuk kekerasan sampel M₇ lebih keras dari pada sampel M₄. Hal tersebut disebabkan karena viskositas dan berat molekul sampel M₇ lebih tinggi dari pada berat molekul M₄. Berat molekul akan diikuti oleh viskositas, semakin tinggi

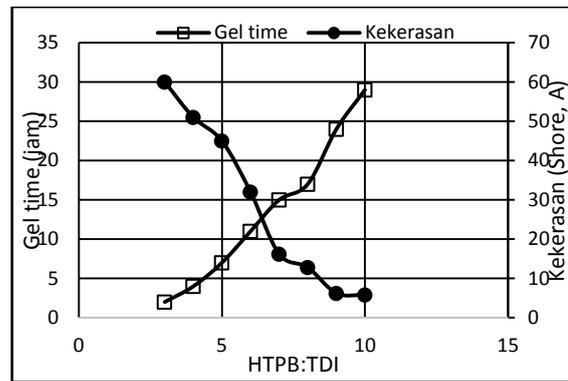
atau kental viskositas maka berat molekul akan semakin tinggi. Selain itu, mikrostruktur 1,4-cis pada sampel M₇ lebih banyak dari pada sampel M₄. Semakin banyak mikrostruktur 1,4-cis hasil reaksi akan semakin elastis dan kekerasan akan berkurang dengan *gel time* semakin lambat.



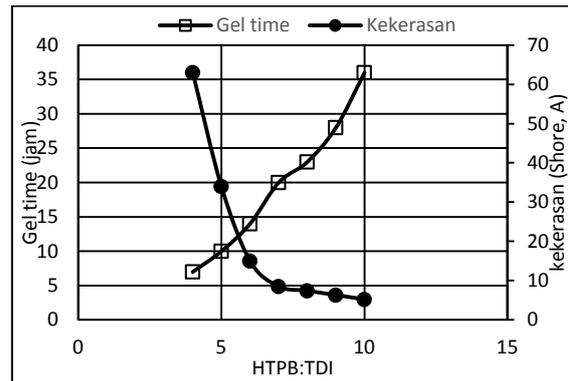
Gambar 4-3: Hasil reaksi HTPB M₇ dengan TDI

Pada sampel M₃ (Gambar 4-4), dengan viskositas yang lebih kecil dari sampel yang lain, diperoleh *gel time* yang lebih cepat daripada sampel M₄ dan M₇ pada perbandingan yang sama. Sedangkan untuk kekerasannya diperoleh hasil yang lebih tinggi, hal ini terjadi karena mikrostruktur 1,4-cis pada HTPB sampel M₃ terlalu kecil. Komposisi 6:1, 7:1, 8:1 merupakan komposisi dengan *gel time* lebih lama. Hal ini disebabkan karena mikrostruktur 1,2-vinil lebih dominan. Mikrostruktur vinil letak gugus OH-nya tidak teratur mengakibatkan rantai silang yang terbentuk memberikan untaian polimer membentuk geometri yang kurang teratur dan rapat, karena terlalu banyak ruang kosong sehingga cenderung membentuk polimer yang keras dan getas.

Pada Gambar 4-5, yaitu sampel M₆ dapat dilihat walaupun viskositas lebih kecil dari pada sampel M₇ pada komposisi yang sama, *gel time* tidak jauh berbeda tetapi kekerasan lebih meningkat. Hal ini disebabkan karena mikrostruktur 1,4-trans M₆ terlalu tinggi, mengakibatkan rantai silang yang terbentuk memberikan untaian polimer yang secara efek ruang (geometri) tidak teratur sehingga polimer yang terbentuk padat dan keras tetapi tidak getas.



Gambar 4-4: Hasil reaksi HTPB M₃ dengan TDI



Gambar 4-5: Hasil reaksi HTPB M₆ dengan TDI

Gambar 4-1, adalah contoh hasil retikulasi yang bisa digunakan dan yang tidak memenuhi syarat dari keseluruhan hasil reaksi antara HTPB dan TDI yang telah dilakukan. Sedangkan hasil yang telah ditampilkan pada Gambar 4-1 dapat dijelaskan sebagai berikut.

Pada Gambar 4-1a, dimana hasil seperti ini tidak bisa digunakan sebagai *fuel binder*, karena kaku dan banyak gelembung udara. Hal ini disebabkan karena rasio TDI yang berlebih, mengakibatkan banyak terbentuk rantai cabang yang akan mematikan perpanjangan rantai. Gambar 4-1b, hasil seperti ini tidak bisa dipakai pada pembuatan propelan. Pada gambar nampak terbentuknya gelembung udara kecil-kecil. Hal ini bisa diatasi dengan mencari perbandingan lain. Terjadinya gelembung disebabkan karena mikrostruktur yang tidak seimbang. Gambar 4-1c, merupakan contoh yang tidak ada gelembung udara dan hasilnya elastis. Ini menandakan bahwa perbandingan bilangan isosianat dan bilangan hidroksil dan mikrostruktur seimbang, maka terjadi reaksi yang sempurna. Model yang seperti ini dapat

dipakai pada proses pembuatan propelan. Sedangkan Gambar 4-1d, tidak bisa dijadikan sebagai *fuel binder* karena terjadinya gelembung udara kecil-kecil, ini disebabkan karena HTPB hasil sintesa yang kurang bersih dalam pencucian hasil akhir dan diperkirakan masih ada zat lain yang tersisa dalam pencucian, menjadikan campuran tidak merata. Gambar 4-1e, hasilnya bagus, tapi disini butuh *gel time* lebih lama untuk terjadi *curing* karena HTPB lebih encer jadi butuh waktu untuk memperpanjang rantai, dan tidak tepat digunakan dalam proses propelan, karena nantinya akan menyebabkan propelan yang terbentuk menjadi kurang rigid dan mudah terdefleksi.

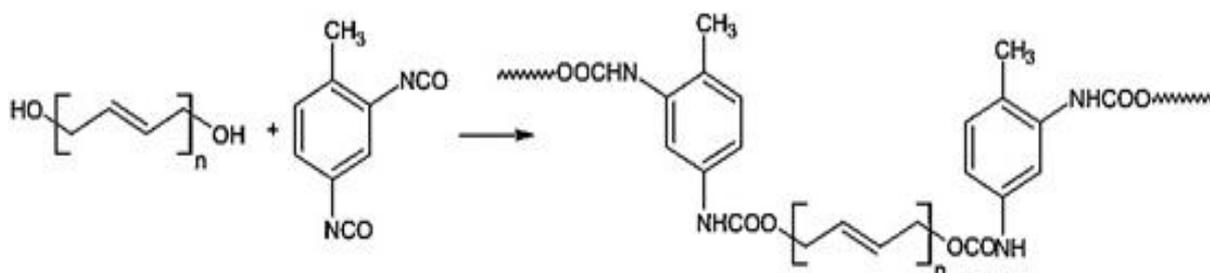
Hasil reaksi yang dipilih adalah yang tidak mempunyai gelembung udara, elastis dan dapat diukur kekerasannya, dalam hal ini juga didapat hasil yang berbeda. Penelitian ini dilakukan pada suhu kamar dan suhu 45°C, hasil pada suhu 45°C tidak ditampilkan disini, karena dilihat dari hasil reaksi dan sifat fisik secara signifikan tidak jauh berbeda, hanya saja waktu reaksi pada suhu 45°C lebih cepat dari pada suhu kamar.

HTPB dengan TDI yang harus dipertimbangkan bukan elastis dan gelembung udara saja, tapi *gel time* dan kestabilan hasil reaksi juga jadi bahan pertimbangan untuk proses pembuatan propelan. Sifat mekanik poliuretan dipengaruhi oleh jumlah ikatan silang yang terjadi, mikrostruktur dan berat molekul rata-rata (Dey et al., 2015). Poliuretan dengan ikatan silang yang banyak menghasilkan jaringan yang

rapat dan kuat sehingga kuat tarik dan kekerasan elastomer poliuretan akan besar, sedangkan kemulurannya rendah (Jain et al., 1994; Brzic et.al, 2014).

Dilihat dari hasil reaksi pada komposisi 3:1 dan 4:1, hasil *gel time* yang dicapai lebih cepat dan kekerasan lebih tinggi, ini sesuai dengan teori, dimana bila HTPB lebih sedikit dan TDI lebih banyak, maka ikatan silang yang terbentuk lebih banyak, tidak teratur dan padat. Yang paling stabil berdasarkan dari hasil kekerasan dan *gel time* yang ada pada perbandingan 6:1, 7:1 dan 8:1. Karena setelah 3 sampai 4 minggu poliuretan yang terbentuk kekerasannya tidak mengalami perubahan, yang berarti sudah stabil. Sedangkan pada perbandingan 9:1 setelah 10 hari ada perubahan kekerasan menjadi lebih keras. Disini dapat kita buktikan secara teori bahwa semakin banyak HTPB, TDI yang digunakan lebih sedikit maka reaksi antara TDI dan HTPB semakin akan membentuk ikatan linier dan teratur, mengakibatkan *gel time* akan lama atau lebih tinggi kemuluran dan elastisitas semakin kecil (Gupta, 2005).

Pada Gambar 4-2 dan 4-3 yaitu sampel M₄ dan sampel M₇, pada komposisi yang sama tetapi hasil reaksi, *gel time*, kekerasan dan elastisitasnya berbeda, karena disebabkan masing-masing karakteristik HTPB berbeda. Disini dapat dibuktikan bahwa polimer yang terbentuk dari ikatan silang karakteristiknya akan berbeda sesuai dengan sifat kimia bahan dasar, seperti kekerasan dan elastisitas poliuretan.



Gambar 4-6: Reaksi poliuretan HTPB:TDI

Penyebab yang mungkin adalah karena mikrostruktur HTPB yang berbeda. Bila mikrostruktur HTPB 1,4-trans lebih dominan akan mengakibatkan poliuretanan yang terbentuk kurang elastis atau keras. Yang dibutuhkan adalah mikrostruktur 1,2-vinil dan 1,4-cis yang dominan supaya poliuretanan yang terjadi bersifat elastis.

Sampel HTPB yang dipakai pada M₇ adalah HTPB dengan viskositas yang lebih tinggi, hasil reaksinya dapat dilihat pada Gambar 4-2. Dimana *gel time* pada komposisi yang sama dengan sampel yang lain. Sampel M₇, *gel time*-nya lebih lama dan kekerasannya lebih tinggi dari M₃. Sampel M₃ lebih cepat waktu reaksinya (lebih cepat mengeras pada perbandingan rendah). Ini disebabkan M₇ memiliki viskositas yang lebih tinggi, mikrostruktur HTPB yang kurang sempurna antara 1,4-cis, 1,4-trans dan 1,2-vinil. Bilangan OH dan bilangan isosianat juga tidak seimbang, karena bila bilangan isosianat dari TDI kurang, maka ikatan silang kurang rapat. Sedangkan *gel time fuel binder* diperlukan TDI yang lebih banyak, tetapi bila TDI ditambahkan dengan jumlah yang banyak akan menghasilkan poliuretanan yang keras atau kurang elastis atau rantai ikatan masih pendek. Untuk mendapatkan hasil yang memenuhi syarat perlu dicari komposisi yang tepat, dan bila hasil reaksi walaupun elastis akan mengalami kesulitan dalam pencetakan propelan. Disinilah pentingnya analisis kualitas bahan baku sebelum digunakan untuk mendapatkan hasil yang maksimal.

Dilihat dari hasil semua reaksi pada Gambar 4-1, dapat diamati bahwa ada beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat-sifat polimer, *crosslink* (ikatan silang) dan *branching* (percabangan) yang terjadi dan gugus-gugus yang terikat. Panjang rantai berpengaruh kepada kekentalan atau kepadatan polimer yang terjadi. Semakin panjang rantai polimer, semakin kental atau padat. Panjang rantai biasanya diukur dengan berat molekul rata-rata, semakin tinggi berat molekul rata-rata semakin panjang rantai polimer, semakin panjang rantai semakin elastis polimer

yang terbentuk [Krol, 1998 dan Sekkar et al., 2000]

Percabangan terjadi dengan adanya triol atau triisosianat yang membentuk titik percabangan, semakin banyak titik percabangan semakin keras polimer yang terjadi dan keropos karena struktur polimer yang terjadi biasanya ini banyak rongga atau ada ruang kosong akibat kelebihan gugus isosianat (Mahanta, 2012). Seperti pada perbandingan 3:1 dan 4:1 terjadi yang memiliki banyak gelembung udara akibat kelebihan bilangan isosianat, dan mengakibatkan berat jenis propelan yang terbentuk akan turun karena berat jenis udara lebih kecil. Semakin banyak bilangan isosianat maka jumlah ikatan dominan yang terjadi adalah ikatan linier, karena gugus NCO yang tersedia digunakan untuk ikatan linier. Nilai tetapan kecepatan reaksi pembentukan ikatan linier lebih besar dari pada ikatan silang.

Masih sulit untuk merinci penyebab perubahan dan perbedaan dari sifat-sifat mekanik poliuretanan, karena jurnal penelitian mengenai sifat mekanik elastomer poliuretanan sampai saat ini masih terfokus pada penelitian pengaruh panjang rantai dan perbandingan NCO/OH terhadap sifat mekaniknya secara kualitatif, karena sulit dalam mencari korelasi antara struktur jaringan polimer yang terjadi dengan ikatan silang, berat molekul dan struktur dari masing bahan dasar.

Sifat mekanik seperti kekuatan tarik, elongasi poliuretanan mengalami peningkatan yang signifikan dengan meningkatnya cis, trans dan mengurangi vinyl. Sebuah HTPB ideal harus memiliki trans, cis, vinyl dalam rasio 55:25:20 (Dey et al., 2015).

Waktu *curing* terutama dipengaruhi oleh viskositas pada akhir pencampuran. Pertumbuhan viskositas itu sendiri pada dasarnya dipengaruhi oleh partikel dan binder. Binder melibatkan reaksi kimia, yang pada dasarnya merupakan reaksi kondensasi antara grup isosianat dari kurator dan grup hidroksil dari binder. Reaksi utama antara HTPB dan TDI

diberikan oleh Gambar 4-5 (Mahanta et al., 2010(b)).

Apabila polimer mengandung gugus vinil berlebih, lebih rentan terhadap penuaan (pengerasan) selama penyimpanan, karena ikatan silang yang mungkin dapat terjadi antara kelompok vinil dan ikatan rangkap di dekatnya. Viskositas prapolimer HTPB meningkat dengan peningkatan vinil.

Selama sintesis propelan berbasis HTPB dengan *isocyanurate* sebagai agen bonding, udara yang terjebak dapat menjadi masalah, menciptakan rongga atau gelembung. Demikian juga, rongga dan gelembung dapat terjadi sebagai hasil dari gas selama proses *curing* sebagai akibat dari penyerapan air. Hal ini menyebabkan pembentukan retak/celah, yang terbentuk bisa sangat dalam dan sangat berbahaya (Dostanic, 2007).

HTPB untuk propelan yang diharapkan adalah dengan kandungan 1,4-cis yang tinggi, supaya lebih elastis, bila 1,4-tran yang tinggi polimer yang terbentuk akan kaku dan keras, bila 1,2-vinil yang banyak, maka polimer yang terbentuk tidak keras tapi getas dan tidak elastis.

5 KESIMPULAN

Pada sampel M₄ komposisi yang optimal terhadap *gel time* dan kekerasan ada pada komposisi 6:7, 7:1, 8:1, karena tidak ada gelembung udara, elastis, dengan *gel time* antara 12-19 jam. Sedangkan untuk sampel M₃, semakin banyak kandungan HTPB maka *gel time* semakin lama dan kekerasan semakin menurun dan sebaliknya.

Semakin tinggi viskositas, maka berat molekul rata-rata akan naik dan *gel time* semakin lama. Semakin sedikit HTPB maka kandungan dalam campuran akan bertambah, bila jumlahnya lebih sedikit maka *gel time* semakin lama dan kekerasan semakin menurun. Bila TDI semakin banyak, maka *gel time* semakin cepat dan kekerasan meningkat. Semakin tinggi viskositas maka *gel time* semakin lama dapat dilihat pada Gambar 4-2, ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Dey et al. (2015).

Bila mikro struktur 1,4-cis yang dominan maka polimer yang terbentuk akan lentur dan elastis. Bila mikro struktur 1,2-vinil yang dominan maka polimer yang terbentuk akan cenderung keras dan getas atau rapuh.

Terjadinya gelembung udara pada pemakaian jumlah TDI yang banyak disebabkan karena kelebihan gugus isosianat yang membentuk ikatan linier lebih besar daripada ikatan silang, dan struktur polimer yang terbentuk cenderung lurus.

Secara umum pada bahan baku ini yang paling bagus adalah perbandingan 7:1, 8:1, dan 9:1, elastis dan tidak lengket, dimana hal ini dapat juga dilihat pada kekerasan, bila kekerasan >9 kurang elastis dan bila <5 akan lembek dan lengket atau tidak curing.

Dari hasil penelitian ini, dapat dinyatakan bahwa HTPB mandiri ini sudah layak untuk dapat digunakan sebagai *fuel binder* pada proses pembuatan propelan padat. Untuk mendapatkan hasil yang lebih sempurna, maka perlu dilakukan kajian lebih lanjut. Penelitian perlu dilakukan dengan mengukur kadar mikrostruktur dan bilangan OH dalam HTPB mandiri yang akan digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Pustekroket yang telah memfasilitasi penelitian ini dan kepada tim di Lab. HTPB yang telah membantu pembuatan sampel yaitu, Widhy Cahyo, Safrudin, Ahmad Yani dan kepada Dr. Heri Budi Wibowo dan Dr. Kendra Hartaya, MSi., yang telah membimbing penulisan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Brzić, S.J; Jelisavac, L.N; Galović, J.R; Simić, D.M; Petković, and L. Jelena, 2014. *Viscoelastic Properties of Hydroxyl-terminated Poly (butadiene)-based Composite Rocket Propellants*, Hem. ind. 68 (4) 435-443 (2014), doi: 10.2298/HEMIND 1304260 67B.
- Daniel, M.A, 2006. *Polyurethane Binder Systems for Polymer Bonded Explosives*, Weapons Systems Division, DSTO-GD-0492, Australia.

- Delebecq, E; Pascault, J.P; Boutevin, B; and F. Ganachaud, 2013. *On the Versatility of Urethane/Urea Bonds: Reversibility, Blocked Isocyanate, and Non-Isocyanate Urethane*, Chemical Reviews 113: 80–118. Doi:10.1021/cr300195n.
- Dey, A.; Khan, Md; Shafeeuulla, A; Javaid, S; Arun, K; and C. Santanu, 2015. *Effect of Microstructure on HTPB Based Polyurethane (HTPB-PU)*, Journal of Materials Science and Engineering B 5 (3-4) (2015), pp. 145-151, doi: 10.17265/2161-6221/2015.3-4.005.
- Dostanic, J; Uscumlic, G; Husovic, V; Heinemann, R; and M. Dusan, 2007. *The use of Image Analysis for the Study of Interfacial Bonding in Solid Composite Propellant*, J. Serb. Chem. Soc. 72 (10) 1023-1030 (2007).
- Dubois, C., Desilets, S., Ait-kadi, A. and Tanguy, P., 1995. *Bulk Polymerization of HTPB with TDI: A Kinetics Study using spectroscopy*, J. Appl. Polym. Sci., 58(4): 827-834.
- Gupta, B.L; Kumar, V; and N. Shivhare, 2014. *Rheological Studies on Virgin, Plasticized and Solid Filled HTPB Binder System*, Global J. Of Adv. Eng. Tech. And Sci., 1(2): May, 2014.
- Gupta, D.C; Deo, S.S; Wast; D.V; Raomre, S.S; and D.H. Gholap, 2005. *HTPB-Based Polyurethanes for Inhibition of Composite Propellants*, J. Appl. Polym. Sci., 1151-1155.
- Jain, D.R; Sekkar,V; and V.N. Krishnamurti, 1994. *Mechanical and Swelling Properties of HTPB based Copolyurthane Networks*, J. Appl. Polym. Sci. 48.
- Javni, I; Hong, D.P; and Z.S. Petrovic, 2013. *Polyurethanes from Soybean Oil, Aromatic and Cycloaliphatic Diamines by Non Isosianate Route*, J. Appl. Polym. Sci 2013, 566 -571.
- Krol, P., 1998. *Kinetic Model for the Process Giving Linier Polyurethanes with Consideration of Substitution Effects and Different Chemical Reactivities of Functional Groups in Toluene 2,4-diisocyanate*, J. Appl. Polym. Sc., 69, pp 1169-1181.
- Mahanta, A.K; Goyal M; and P. Devendra D., 2010. *Empirical Modeling of Chemo-viscosity of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Composite Propellant Slurry*, Malaysian Polymer Journal, Vol. 5, No. 1, p 1-16, 2010.
- Mahanta, A.K; Goyal, M; and P. Devendra D., 2010. *Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry*, E-Journal Of Chemistry 2010, 7(1), 171-179 ISSN: 0973-4945.
- Mahanta, AK; Monica, G; and D.D. Pathak, 2012. *Rheokinetic Analysis of Hydroxyl Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry*, E- Journal of Chemistry, 7(1), 171 – 179.
- Rosita, G., 2013. *Karakteristik Visikolastisitas HTPB-TDI Propelan Mandiri*, Seminar Nasional Proseding Kimia dalam Pembangunan Yogyakarta, ISSN: 0854-4778.
- Saša J.B; Ljiljana, N; Jelisavac, J.R; Danica, M.S; and J.L. Petković, 2014. *Viscoelastic Properties of Hydroxyl-terminated Poly (butadiene)-based Composite Rocket Propellants*, Hem. ind. 68 (4) 435–443, doi: 10.2298/HEMIND130426067B.
- Sekkar, V; Bhagawan S, S; Prabhakaran, N; Rama, M; and K.N. Ninan, 2000. *Polyurethane Based on Hydroxy Terminated Polybutadiene: Modelling of Network Parameters and Correlation with mechanical Properties*, J. of Polymer, 41.67.
- Whitmore, S.A; Peterson, Z.W; and E. Shannon, 2011. *Analytical and Experimental Comparisons of HTPB and ABS as Hybrid Rocket Fuels*. AIAA 2011-5909, 1-48.
- Wibowo, HB., 2012. *Struktur Polimer Polibutadien dan Teknik Pengendalian Produksi*, Chemistry Progress, 1 Mei 2012, ISSN: 1979-5920.
- Wibowo, HB., 2013. *Formulasi Propelan Padat Menggunakan HTPB Lokal untuk Mendapatkan Komposisi Propelan yang Memenuhi Persyaratan Proses Produksi*, Proseding Seminar Nasional XXII Kimia Dalam Industri dan Lingkungan, Hotel Phonix Yogyakarta , 21 November 2013, ISSN: 0854-5778.
- Wibowo, HB., 2015. *Reduksi Struktur untuk Meningkatkan Kualitas HTPB dengan Pergeseran Kesetimbangan Penata Ulangan Isomer*, Teknologi Pesawat Terbang Sebagai Mitra Pengembang Teknologi Roket dan Satelit Nasional, ISSN 978-602-703533-1.

**KAJIAN EKSPERIMENTAL TENSILE PROPERTIES KOMPOSIT
POLIESTER BERPENGUAT SERAT KARBON SEARAH HASIL
MANUFAKTUR VACUUM INFUSION SEBAGAI
MATERIAL STRUKTUR LSU
(AN EXPERIMENTAL STUDY OF POLYESTER COMPOSITE TENSILE
PROPERTIES REINFORCED UNIDIRECTIONAL CARBON FIBER
MANUFACTURED BY VACUUM INFUSION FOR LSU MATERIAL)**

Kosim Abdurohman¹ dan Aryandi Marta

Pusat Teknologi Penerbangan

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN, Sukamulya, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

¹e-mail: kosim.abdurohman@lapan.go.id

Diterima 31 Mei 2016; Direvisi 20 Juni 2016; Disetujui 21 Juni 2016

ABSTRACT

Vacuum infusion is a manufacturing method to improve mechanical properties of composite. Before apply this in LSU structure, it should be experimented using tensile test to know mechanical properties of the composite. Tensile test is an experimental to know tensile strength, modulus of elasticity, and failure modes of composite. Experimental process of CFRP composite using unidirectional carbon fiber and polyester matrix was done using vacuum infusion technology, start from specimens preparation until testing steps. Manufacturing results gave the values of composite density and thickness; mass and volume fraction of fiber and matrix materials. Specimens and testing process are refer to ASTM D3039 tensile test standard for composite matrix polymers. The testing results showed 1011.67 MPa ultimate tensile strength, 59074.96 MPa modulus of elasticity, and SGV (long splitting, gage, various) failure mode .

Keywords: VARTM, Tensile strength, Modulus elastisitas, Failure mode

ABSTRAK

Vacuum infusion merupakan salah satu metode manufaktur yang digunakan untuk meningkatkan sifat mekanik komposit. Untuk mengaplikasikan metode ini dalam pembuatan struktur LAPAN *Surveillance UAV* (LSU), perlu diketahui terlebih dahulu sifat mekanik dari komposit hasil metode ini secara eksperimen. Salah satu eksperimen yang dilakukan yaitu pengujian tarik untuk mendapatkan *tensile strength*, modulus elastisitas, dan *failure mode* yang terjadi pada komposit. Eksperimen dilakukan terhadap komposit CFRP menggunakan material serat karbon searah (UD) 0° dan matriks poliester dibuat dengan metode *vacuum infusion* mulai dari tahap preparasi sampai tahap pengujian. Dari hasil manufaktur didapat nilai densitas dan ketebalan komposit serta fraksi massa dan fraksi volume material penyusun komposit. Spesimen dan proses pengujian mengikuti standar ASTM D3039 yang merupakan standar pengujian tarik untuk komposit dengan matriks polimer. Hasil pengujian menunjukkan nilai *ultimate tensile strength* 1011,67 MPa, modulus elastisitas 59074,96 MPa, dan *failure mode* SGV (Long Splitting, Gage, Various).

Kata kunci: *VARTM, Tensile strength, Modulus elastisitas, Failure mode*

1 PENDAHULUAN

Komposit merupakan kombinasi makroskopik dari dua atau lebih material, yang memiliki sifat yang berbeda dari material penyusunnya (Bakir B. Dan Hashem H., 2013). Komposit yang banyak digunakan sebagai struktur pesawat, kapal laut, otomotif dan lainnya merupakan komposit dengan resin termoseting berpenguat sert kontinyu (Yeung dan Rao, 2014). Resin yang termasuk kedalam termoseting diantaranya epoxy dan poliester. Material komposit telah banyak digunakan dalam industri penerbangan karena memiliki sifat mekanik yang unggul dan struktur yang ringan, salah satunya adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymers* (CFRP). CFRP banyak diteliti untuk dikembangkan, khususnya pada industri pesawat terbang, karena memiliki sifat-sifat khusus yang unggul dan struktur yang ringan yang dapat memberikan keuntungan secara ekonomi (Blas and Fernandez, 2001). Kebanyakan komposit yang diproduksi untuk keperluan komersial menggunakan matriks polimer dengan penguat serat tekstil seperti glass, aramid, dan karbon (Goren dan Atas, 2008). Komposit

Ada beberapa metode yang digunakan dalam pembuatan komposit

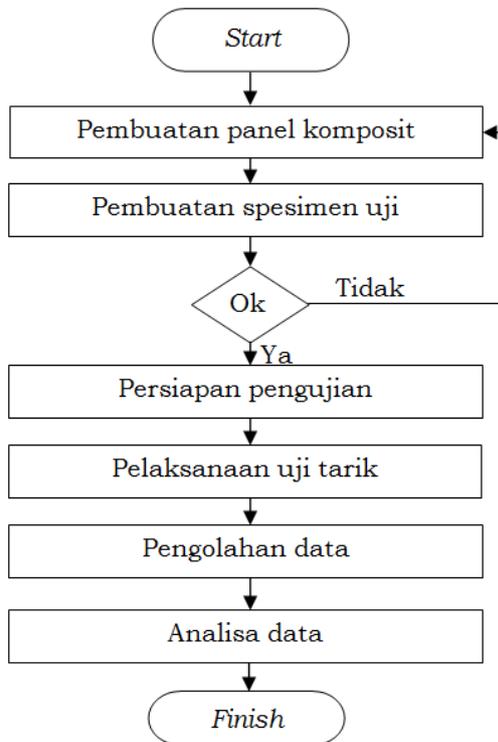
seperti manual *hand lay up*, *vacuum bagging*, *vacuum infusion*, *resin transfer moulding*, *prepreg autoclave* dan sebagainya. Beberapa dekade terakhir, proses *resin infusion* telah menjadi populer untuk manufaktur struktur komposit dengan matriks polimer. Proses *resin infusion* merupakan alternatif teknik dengan biaya lebih rendah dibanding teknik manufaktur *autoclave*. Sebagai contoh, dengan proses *resin infusion* memungkinkan untuk memproduksi *part* yang kompleks dan tebal dengan sifat mekanik yang sangat bagus dan *waste* lebih sedikit dibanding metode tradisional (Wang et al., 2011). Salah satu contoh aplikasi metode ini yaitu suksunya percobaan pembuatan *vertical stabilizer* pesawat Mitsubishi Regional Jet oleh Mitsubishi Heavy Industries (MHI, Ltd.) Jepang (Yamashita et al., 2008).

Pusat Teknologi Penerbangan-LAPAN telah menerapkan aplikasi material CFRP pada beberapa bagian struktur LAPAN *Surveillance UAV* (LSU) menggunakan metode *hand lay up* manual laminasi basah. Metode ini memiliki kekurangan diantaranya peresapan resin terhadap serat yang kurang sempurna, dan pemberian resin yang tidak dapat dikontrol sehingga memungkinkan terjadinya *overweight* akibat kelebihan

resin maupun ketebalan yang tidak seragam dari satu produk karena proses laminasi masih manual. Hasil manufaktur dengan metode ini sangat dipengaruhi oleh *skill* teknisi sehingga hasilnya sering tidak konsisten antara produk pertama dan berikutnya maupun antara produk satu teknisi dengan teknisi lainnya. Oleh karena itu, maka dipandang perlu untuk meningkatkan metode manufaktur komposit menggunakan *vacuum infusion*. Akan tetapi, sebelum mengaplikasikan metode ini terhadap struktur LSU, perlu dilakukan karakterisasi sifat-sifat mekanik, khususnya sifat tarik dengan melakukan uji tarik. Pengujian tarik (*tensile test*). Pengujian tarik biasa dilakukan dalam dunia penerbangan bertujuan untuk mendapatkan nilai *tensile strength*, modulus elastisitas, dan *failure mode* yang terjadi pada komposit (Paiva et al., 2006).

2 EKSPERIMENTAL

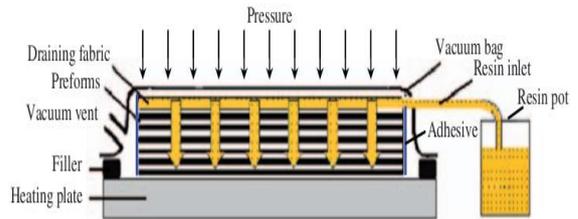
Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada *flow chart* (Gambar 2-1)



Gambar 2-1: Prosedur penelitian

2.1 Pembuatan Panel Komposit dan Spesimen Uji

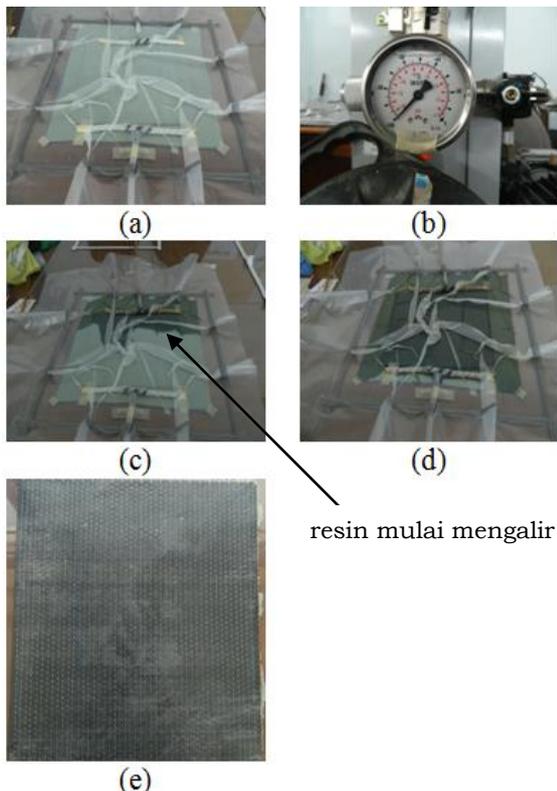
Panel komposit dibuat dengan metode *vacuum resin infusion*. Proses *vacuum infusion* merupakan teknik manufaktur menggunakan tekanan *vacuum* untuk mengalirkan resin kedalam *laminat* (lapisan-lapisan serat). Material serat diletakkan kedalam cetakan dan dilakukan pemakuan sebelum resin dialirkan. Ketika kondisi *vacuum* telah tercapai, resin dihisap kedalam *laminat* lewat pipa yang terpasang pada area *vacuum*. Skema manufaktur komposit dengan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2-2.



Gambar 2-2: Proses *vacuum infusion* (Wang et al., 2011)

Pada penelitian ini komposit dibuat menggunakan material empat lapis serat karbon *unidirectional* (searah) 0° yang memiliki massa per satuan luas 300 g/m², densitas 1,42 g/cm³ sebagai *reinforcement* dengan massa total 96 gram dan resin poliester dengan densitas 1.07 g/cm³, viskositas 155,92 cPs sebagai matriks. Komposit dibuat pada kondisi *vacuum* dengan tekanan -100 kPa. Proses manufaktur panel komposit dapat dilihat pada Gambar 2-3.

Berbeda dengan *hand layup* manual, pada proses *vacuum infusion* semua *ply* serat ditumpuk terlebih dahulu pada cetakan dengan diberi perekat *spray aerosil* pada tiap lapis serat agar serat tidak bergeser saat di-*vacuum*. Di atas lapisan serat ditutup dengan *peel ply* yang telah diolesi *release agent* kemudian di atasnya ditaruh *flow mesh* sebagai media alir resin kemudian ditutup dengan *bagging film*.



Gambar 2-3: Proses manufaktur komposit menggunakan metode *vacuum infusion*

Gambar 2-3 (a) menunjukkan *setting* area laminasi panel komposit dalam kondisi *vacuum* dengan tekanan -100 kPa (-1 bar) seperti ditunjukkan Gambar 2-3(b). Gambar 2-3(c) menunjukkan resin mulai mengalir membasahi area laminasi dan Gambar 2-3(d) menunjukkan area laminasi serat sudah terbasahi semua oleh resin. Hasil manufaktur panel komposit ini dapat dilihat pada Gambar 2-3(e) dengan berat 127,58 g.

Ada beberapa parameter yang perlu ditentukan untuk mengetahui sifat fisik komposit hasil manufaktur *vacuum infusion* ini. Parameter tersebut meliputi massa jenis komposit, ketebalan komposit, fraksi massa serat dan resin, serta fraksi volume serat dan resin.

2.1.1 Densitas dan Ketebalan Komposit

Massa jenis ditentukan secara eksperimental menggunakan densitometer presisi. Alat ini digunakan untuk menentukan densitas benda padat

maupun cair secara otomatis dengan menggunakan prinsip hukum Archimedes sebagai berikut.

$$\rho_c = \frac{w_c}{w_c - w_i} \rho_w \quad (2-1)$$

Keterangan:

ρ_c = densitas komposit (g/cm³),

w_c = massa komposit (g),

w_i = massa komposit saat tenggelam di air (g), dan

ρ_w = densitas cairan yang digunakan (g/cm³).



Gambar 2-4: Pengukuran densitas

Gambar 2-4(a) menunjukkan penimbangan komposit di udara dan Gambar 2-4(b) menunjukkan penimbangan komposit di dalam air. Dari hasil eksperimental diperoleh nilai densitas komposit serat karbon UD 0⁰/poliester hasil *vacuum infusion* 1,25 g/cm³.

Untuk menentukan ketebalan *laminat* komposit dapat dihitung secara teoritis maupun diukur secara langsung. Untuk perhitungan ketebalan secara teoritis dapat menggunakan persamaan 2-2 dan 2-3 (Quinn, 2002).

$$t = \frac{m_f}{\rho_f \times V_f} \quad (2-2)$$

Keterangan:

t = ketebalan *laminat* komposit (mm),

m_f = massa serat (kg/m²),

ρ_f = densitas serat (g/cm³),

V_f = fraksi volume serat (%).

Fraksi volume serat dapat dihitung berdasarkan tekanan yang diberikan pada saat manufaktur.

$$V_f = K_1 + K_2 \sqrt{P} \quad (2-3)$$

Keterangan:

$K_{1,2}$ = konstanta dan

P = tekanan (bar).

Berikut daftar persamaan fraksi volume untuk beberapa material serat.

Tabel 2-1: PERSAMAAN FRAKSI VOLUME UNTUK BEBERAPA SERAT (Quinn, 2002)

Material	Persamaan
<i>E-glass continous strand mat</i>	(a) $V_f = 8.56 + 15.49\sqrt{P}$
<i>E-glass chopped strand mat</i>	(b) $V_f = 20 + 14.69\sqrt{P}$
<i>E-glass roving</i>	(c) $V_f = 32 + 23.96\sqrt{P}$
<i>E-glass woven fabric</i>	(d) $V_f = 40 + 14.37\sqrt{P}$ (2-4)
<i>Kevlar fabric</i>	(e) $V_f = 47 + 16.29\sqrt{P}$
<i>Unidirectional carbon cloth</i>	(f) $V_f = 34 + 25.55\sqrt{P}$
<i>+/-45 Carbon fibre fabric</i>	(g) $V_f = 35 + 16.29\sqrt{P}$

Untuk serat karbon yang digunakan dalam penelitian ini maka perhitungan ketebalan teoritis tiap lapis serat dapat menggunakan persamaan (2-4) (f) sehingga persamaan 2-2 menjadi:

$$t = \frac{m_f}{\rho_f x (34 + 25.55\sqrt{1bar})\%}$$

$$t = \frac{0,3 \left(\frac{kg}{m^2}\right)}{1,42 \left(\frac{g}{cm^3}\right) x (0,596)}$$

$$t = 0,35 \text{ mm}$$

Karena dalam penelitian ini menggunakan 4 lapis serat maka total ketebalan *laminat* dikalikan empat menjadi 1,4 mm. Sedangkan untuk hasil pengukuran ketebalan komposit secara langsung didapat ketebalan komposit sebesar 1,146 mm. Perbedaan nilai ketebalan teoritis dan aktual ini bisa dikarenakan perbedaan jenis serat karbon yang digunakan saat penelitian dengan database serat karbon pada Tabel 2-1. Perbedaan ini juga dapat dikarenakan perhitungan secara teoritis hanya memperhitungkan ketebalan tiap lapis serat, padahal pada kenyataannya

ketebalan komposit serat tiap lapis berbeda-beda untuk *laminat* serat yang berbeda dengan nilai rata-rata ketebalan tiap lapisnya 0,29 mm (Abdurohman, 2015).

2.1.2 Fraksi Massa dan Fraksi Volume

Fraksi massa serat (W_f) dan matriks (W_m) didefinisikan sebagai berikut (Jweeg et al., 2012).

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (2-5)$$

$$W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (2-6)$$

Keterangan:

w_f = massa serat (g),

w_m = massa matriks (g), dan

$w_c = w_m + w_f$ = massa komposit (g).

Sedangkan fraksi volume serat (V_f), dan fraksi volume matriks (V_m), didefinisikan sebagai berikut (Jweeg et al., 2012).

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (2-7)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (2-8)$$

Keterangan:

v_f = volume serat (cm^3),

v_m = volume matriks (cm^3), dan

v_c = volume komposit (cm^3).

Volume fiber dan serat dapat dihitung berdasarkan perbandingan massa dan densitas.

$$v_f = \frac{w_f}{\rho_f} \quad (2-9)$$

$$v_m = \frac{w_m}{\rho_m} = \frac{w_c - w_f}{\rho_m} \quad (2-10)$$

Keterangan

ρ_f = densitas serat (g/cm^3), dan

ρ_m = densitas matriks (g/cm^3).

Volume komposit dapat dihitung secara aktual menggunakan densitas eksperimental ρ_{ce} dan teoritis menggunakan densitas teoritis ρ_{ct} .

$$v_c = \frac{w_c}{\rho_{ce}} \quad (2-11)$$

$$v_c = \frac{w_c}{\rho_{ce}} \quad (2-11)$$

$$v_f + v_m = \frac{w_c}{\rho_{ct}} \quad (2-12)$$

Untuk komposit yang mengandung void, fraksi volume void (V_v) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (2-13)$$

Dari hasil manufaktur *vacuum infusion* diketahui fraksi massa dan fraksi volume material penyusun komposit sebagai berikut.

Tabel 2-2: FRAKSI MASSA DAN FRAKSI VOLUME

Parameter	Konstituen	Nilai
Fraksi massa	Serat	75%
	Matriks	25%
Fraksi volume	Serat	66%
	Matriks	29%
	Void	5%

2.1.3 Spesimen Uji Tarik

Spesimen uji tarik dibuat berdasarkan *Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials* (ASTM) D3039 (Murugan et al., 2014). Spesimen uji tarik dipotong dari laminate komposit pada arah fiber (longitudinal) (Torabizadeh, 2014).



Gambar 2-5: Spesimen uji tarik

Spesimen dibuat lima buah dengan tiga spesimen menggunakan tab dan 2 spesimen tanpa tab. Material tab yang digunakan komposit serat

karbon/poliester dan ditempel menggunakan adesif.

2.1.4 Persiapan dan Pelaksanaan Pengujian

Dalam pengujian ini properti yang diambil adalah *tensile stress*, *ultimate tensile strength*, dan modulus elastisitas. Dari hasil pengujian juga dapat diketahui *failure mode* yang terjadi setelah mengalami kegagalan.

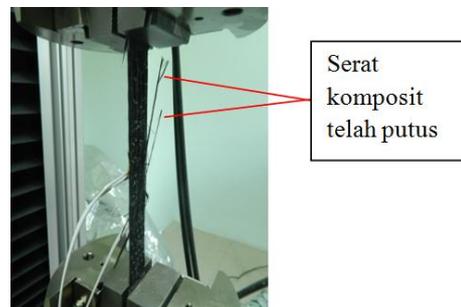
Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) tensilon RTF 2410 kapasitas 100 kN menggunakan grip hidrolik dengan kecepatan *crosshead* konstan 2 mm/menit. Pengujian dilakukan pada temperatur ruang (Pegoretti et al., 2006) 24° C dan RH 54%.



Gambar 2-8: Pemasangan spesimen pada UTM

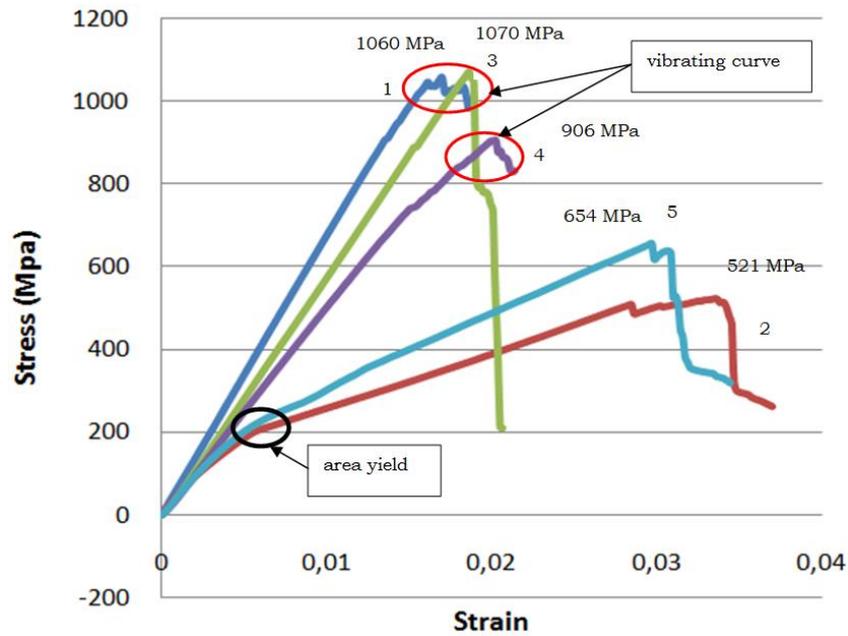
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Spesimen diuji sampai mengalami *failure* untuk mendapatkan nilai *ultimate strength*. Gambar 3-1 menunjukkan spesimen telah mengalami *failure* saat dilakukan uji tarik.



Gambar 3-1: Spesimen uji tarik telah mengalami *failure*

Gambar 3-2 menunjukkan kurva *stress-strain* hasil uji tarik komposit karbon UD 0°/poliester hasil *vacuum infusion* untuk kelima spesimen.

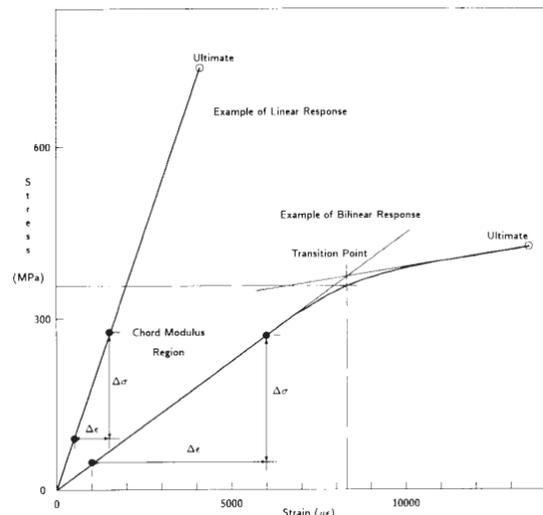


Gambar 3-2: Kurva *stress-strain* komposit karbon UD 0°/poliester hasil vacuum infusion

Dari kurva ini dapat diketahui nilai *stress* pada tiap *point strain*. Spesimen 1, 3, dan 4 merupakan spesimen yang menggunakan tab sedangkan spesimen 2 dan 5 tanpa menggunakan tab. Hasil pengujian menunjukkan perbedaan yang signifikan antara spesimen yang diuji menggunakan tab dengan tanpa tab. Spesimen tanpa tab menunjukkan ada *area yield* pada area $\pm 0,005$ *strain* dan nilai *yield strength* ± 200 MPa. Nilai *ultimate strength* spesimen tanpa tab juga berbeda jauh dengan spesimen yang menggunakan tab. Spesimen tanpa tab memiliki nilai *ultimate strength* 500 dan 650 MPa sedangkan nilai *ultimate strength* spesimen dengan tab mencapai 1000 MPa lebih. Dari kedua grafik juga diketahui bahwa spesimen tanpa tab memiliki dua nilai modulus elastisitas yaitu modulus *yield* (*slope* antara titik nol dan titik *yield*) dan *post-yield* modulus (*slope* antara titik *yield* dan titik *failure*).

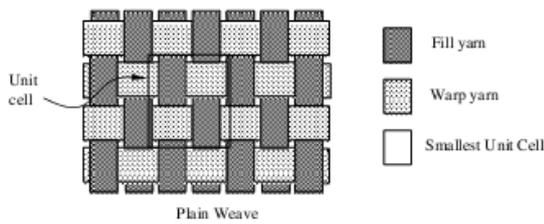
Hal ini berbeda dengan referensi ASTM D3039 dimana tipikal kurva *stress-strain* komposit berpenguat serat sintetis (*glass* atau karbon) seharusnya berbentuk linier tanpa *yield* kecuali ada

titik transisi (*transition point*) seperti dapat dilihat pada Gambar 3-3.



Gambar 3-3: Tipikal kurva *stress-strain* komposit untuk komposit (ASTM D3039)

Dari beberapa literatur yang dipelajari seharusnya komposit yang memiliki nilai *yield* adalah komposit polimer yang berpenguat serat *plain-weave-woven fabric* atau serat anyaman. Hal ini bisa terjadi karena kemungkinan terjadi kegagalan di *area yield* pada serat anyaman arah 90°, baru kemudian terjadi kegagalan katastrofik pada titik *ultimate*.



Gambar 3-4: Plain-weave-woven fabric (Faizal, et al. (2011))

Grafik 3-2 dan 3-5 juga menunjukkan nilai *strain* yang lebih tinggi daripada grafik lainnya, hal ini terjadi karena pergeseran *grip* pada spesimen tanpa tab saat dilakukan pengujian karena *grip* langsung menjepit bagian spesimen uji.

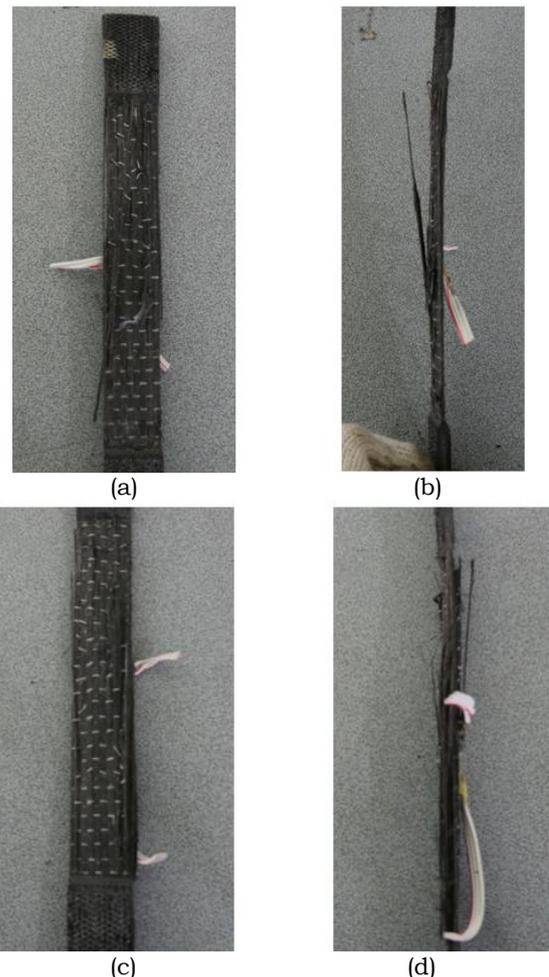
Spesimen hasil uji tanpa tab juga menunjukkan spesimen tidak mengalami kegagalan katastropik secara visual berbeda dengan spesimen yang menggunakan tab seperti dapat dilihat pada Gambar 3-5 dan 3-6. Hal ini terjadi karena saat spesimen menerima beban yang semakin besar sampai terjadi kegagalan pada resin di bagian *grip* yang mengakibatkan *grip* bergeser. Pada saat terjadi pergeseran ini terjadi penurunan beban yang cukup signifikan yang dibaca oleh UTM sehingga spesimen dianggap telah gagal meskipun belum terjadi kerusakan katastropik. Dari beberapa alasan ini maka dapat dikatakan hasil uji spesimen tanpa tab tidak dapat dijadikan sebagai nilai kekuatan material komposit karbon UD 0⁰/poliester karena belum merepresentasikan kekuatan maksimum komposit sehingga hasil yang dapat diterima adalah spesimen yang menggunakan tab.

Gambar 3-5 merupakan spesimen tanpa tab setelah dilakukan pengujian. Gambar ini secara visual menunjukkan belum terjadi kerusakan secara katastropik sehingga belum merepresentasikan kekuatan materialnya.

Gambar 3-6(a) dan (c) menunjukkan tampak depan sedangkan Gambar 3-6(b) dan (d) menunjukkan tampak samping spesimen menggunakan tab.



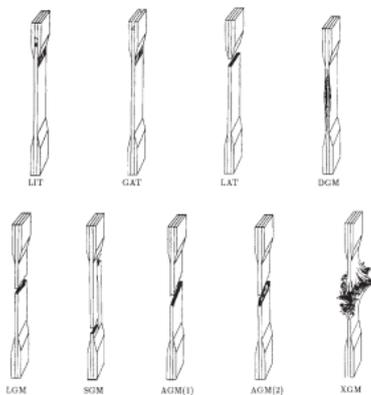
Gambar 3-5: Spesimen tanpa tab setelah diuji tarik tidak mengalami kerusakan katastropik



Gambar 3-6: Spesimen ber-tab setelah diuji tarik mengalami kerusakan katastropik

Dari Gambar 3-6 (a,b,c,d) dapat dilihat terjadi kerusakan katastropik secara visual untuk spesimen menggunakan tab.

Ketiga kurva *stress-strain* spesimen dengan tab menunjukkan adanya *vibrating curve* sebelum terjadi kerusakan katastropik (Chen, 2011). Hal ini menunjukkan kerusakan yang terjadi secara bertahap untuk masing-masing *bundle* serat searah sampai akhirnya spesimen benar-benar tidak dapat menahan lagi beban yang diberikan dan terjadi kerusakan katastropik yang ditandai dengan turunnya nilai *stress* setelah mencapai titik maksimum. Dari ketiga spesimen didapat nilai *tensile properties* rata-rata untuk *ultimate tensile strength* 1011,67 MPa dan modulus elastisitas 59074,96 MPa. Pada masing-masing spesimen memiliki nilai *ultimate tensile strength* berbeda-beda sebesar 1060 MPa pada spesimen 1, 1070 MPa pada spesimen 2, dan 906 MPa pada spesimen 4. Hal ini dapat terjadi karena adanya *residual stress* yang berbeda pada masing-masing spesimen akibat proses preparasi sampel. Proses preparasi sampel uji dilakukan secara manual menggunakan gergaji tangan tanpa *conditioning* sehingga sangat memungkinkan terjadinya *residual stress*. Sedangkan untuk total kelima spesimen memiliki nilai rata-rata untuk *maximum tensile strength* 842,17±245,56 MPa dan modulus elastisitas 51836,61±11480,69 MPa. Untuk menentukan jenis kerusakan yang terjadi secara visual dapat menggunakan acuan dari ASTM D3039 (tabel 3-1 sampai 3-3).



Gambar 3-7: Beberapa tipe *failure modes* pada uji tarik komposit (ASTM D3039, 2002)

Tabel 3-1: KODE UNTUK KARAKTERISTIK PERTAMA DARI *FAILURE MODE*

Failure Type	Code
<i>Angled</i>	A
<i>Edge Delamination</i>	D
<i>Grip/tab</i>	G
<i>Lateral</i>	L
<i>Multi-mode</i>	M (xyz)
<i>Long Splitting</i>	S
<i>Explosive</i>	X
<i>Other</i>	O

Tabel 3-2: KODE UNTUK KARAKTERISTIK KEDUA DARI *FAILURE MODE*

Failure Type	Code
<i>Inside grip/tab</i>	I
<i>At grip/tab</i>	A
<i><IW from grip/tab</i>	W
<i>Gage</i>	G
<i>Multiple Areas</i>	M
<i>Various</i>	V
<i>Unknown</i>	U

Tabel 3-3: KODE UNTUK KARAKTERISTIK KETIGA DARI *FAILURE MODE*

Failure Type	Code
<i>Bottom</i>	B
<i>Top</i>	T
<i>Left</i>	L
<i>Right</i>	R
<i>Middle</i>	M
<i>Various</i>	V
<i>Unknown</i>	U

Dari penampakan visual kegagalan spesimen setelah diuji tarik diketahui kode jenis kegagalannya SGV (*Long Splitting, Gage, Various*) dimana kerusakan pada serat (*fiber breakage*) berupa *splitting* terjadi sepanjang *area gage* antara *grip* atas dan bawah. Hal ini menjadi tipe kegagalan pada komposit serat searah 0° dimana kegagalan tidak terjadi tepat ditengah dimana spesimen putus menjadi dua bagian atas dan bawah akan tetapi kegagalan berupa *splitting*. Hal ini bisa terjadi karena terjadi kegagalan pada matriks antara *bundle* serat di awal yang

kemudian diikuti dengan kegagalan pada serat sehingga ada bagian serat yang benar-benar putus. Rangkuman hasil pengujian ini dapat dilihat pada tabel 3-4.

Tabel 3-4: Rangkuman hasil pengujian

Tensile properties	Nilai	Variasi
<i>Average maximum tensile strength</i>	842,17 MPa	±245,56 MPa
Modulus elastisitas	51836,61 MPa	±11480,69 MPa
<i>Failure mode</i>	SGV	

4 KESIMPULAN

Hasil uji tarik komposit CFRP arah serat searah 0° menunjukkan tipikal kurva *stress-strain* yang linier sampai mengalami *vibrating curve* sebelum terjadi kerusakan katastropik. Spesimen yang dapat dijadikan data komposit ini merupakan spesimen yang menggunakan tab. Dari kurva ini didapat *tensile properties* komposit yaitu *ultimate tensile strength* 1011,67 MPa dan modulus elastisitas 59074,96 MPa. *Failure mode* yang terjadi pada spesimen adalah SGV sehingga *properties* ini dapat dijadikan *input data* saat melakukan analisa struktur yang menggunakan material yang sama dengan material pengujian ini.

Untuk keperluan analisa struktur diperlukan juga *compressive* dan *shear properties* material, sehingga kedepannya perlu dilakukan uji tekan dan uji geser terhadap material yang sama untuk mendapatkan *properties*-nya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih atas bimbingan dan dukungan Bapak Agus Aribowo dan Bapak Gunawan Prabowo dalam kegiatan ini. Terimakasih juga kami ucapkan kepada

Bapak Atik Bintoro yang telah memberi masukan dalam penulisan makalah ini serta seluruh tim laboratorium aerostruktur Pustekbang-LAPAN.

DAFTAR RUJUKAN

- Abduruohman, K, 2105. *Uji Ketebalan Komposit dengan Metode Vacuum Infusion*, TN-11, LAPAN.
- Bakir, B. dan H. Hasim, 2013. *Effect of Fiber Orientation for Fiber Glass Reinforced Composite Material on Mechanical Properties*, International Journal of Mining, Metallurgy & Mechanical Engineering (IJMMME) Volume 1, Issue 5 (2013) ISSN 2320-4052.
- Blas, F. and I. Fernandez, 2001. *Mechanical Characterisation of Carbon/Epoxy Composite Materials Manufactured by Resin Film Infusion Method with Stitching Reinforcement*, STO Meeting Proceedings, RTO-MP-069(II).
- Chen, J.C; Wu, C.M; Pu, F.C; and C.H. Chiu, 2011. *Fabrication and Mechanical Properties of Self-reinforced Poly(ethylene Terephthalate) Composites*, eXPRESS Polymer Letters (Journal: ISSN 1788-618X) Vol.5, No.3 (2011) 228-237.
- Faizal, M.A; Beng, Y.K; and K.N. Dalimin, 2011. *Tensile Property of Hand Lay-Up Plain-Weave Woven E-Glass/Polyester Composite: Curing Pressure and Ply Arrangement Effect*, Borneo Science, The Journal of Science & Technology, ISSN: 2231-9085.
- Goren, A. dan Atas, C., 2011. *Manufacturing of Polymer Matrix Composites Using Vacuum Assisted Resin Infusion Molding*, International Scientific Journal, World Academy of Materials and Manufacturing Engineering, Volume 34 Issue 2, December 2008, Pages 117-120.
- Jweeg, M.J; Hammood, A.S; and M. AlWaily, 2012. *Experimental and Theoretical Studies of Mechanical Properties for*

- Reinforcement Fiber Types of Composite Materials*, International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS Vol:12.
- Murugan, R; Ramesh, R; Padmanabhan, K, 2014. *Investigation on Static and Dynamic Mechanical Properties of Epoxy Based Woven Fabric Glass/Carbon Hybrid Composite Laminate*, Procedia Engineering 97 (2014) 459 – 468, Elsevier Ltd.
- Paiva, J.M.F; Meyer, S; and M.C. Rezende, 2006. *Comparison of Tensile Strength of Different Carbon Fabric Reinforced Epoxy Composites*, Materials Research, Ibero-American Journal of Material Vol. 9, No. 1, 83-89.
- Pegoretti, A; Zanolli A; and C. Migliaresi, 2006. *Preparation and Tensile Mechanical Properties of Unidirectional Liquid Crystalline Single-Polymer Composite*, Composites Science and Technology 66 (2006) 1970-1979, Elsevier Ltd.
- Quinn, J.A., 2002. *Composite Design Manual Third Edition*, James Quinn Associates Ltd.
- Torabizadeh, M.A., 2013. *Tensile, Compressive and Shear Properties of Unidirectional Glass/Epoxy Composites Subjected to Mechanical Loading and Low Temperature Services*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, Vol. 20, 299-309.
- Wang, P; Drapier, S; Molimard, J; Vautrin, A; and J.C. Minni, 2011. *Numerical and Experimental Analyses of Resin Infusion Manufacturing Processes of Composite Materials*, Journal of Composite Materials 46(13) 1617-1631.
- Wang, P; Molimard, J; Drapier, S; Vautrin, A; and J.C. Minni, 2011. *Monitoring the Resin Infusion Manufacturing Processes Under Industrial Environment Using Distributed Sensors*, Journal of Composite Materials 46(6) 691-706.
- Yamashita, M; Takeda, F; Sakagawa, T; Kimata, F; and Y. Komori, 2008. *Development of Advanced Vacuum-assisted Resin Transfer Molding Technology for Use in an MRJ Empennage Box Structure*, Technical Review Vol. 45 No. 4, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.
- Yeung, K.K.H. and K.P. Rao, 2014. *Mechanical Properties of Boron and Kevlar-49 Reinforced Thermosetting Composites and Economic Implications*, Journal of Engineering Science, Vol. 10, 19-29.

ANALISIS KANDUNGAN ALUMINIUM POWDER PROPELAN BERDASAR ENERGI PEMBAKARAN DARI BOMB KALORIMETER (ANALYSIS OF PROPELLANT'S ALUMINUM POWDER CONTENT BASED ON BURNING ENERGY FROM BOMB CALORIMETER)

Kendra Hartaya

Pusat Teknologi Roket

Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Jl. Raya LAPAN No. 2, Mekarsari, Rumpin, Bogor 16350 Indonesia

e-mail: kendra19838@yahoo.co.id

Diterima 31 Mei 2016; Direvisi 21 Juni 2016; Disetujui 24 Juni 2016

ABSTRACT

It has been analyzed the result of propellant research with variable aluminum content to the combustion energy output . Measurement of the amount of combustion energy carried by the bomb calorimeter. Propellant sample was made by mixing HTPB and aluminium for 15 minutes, adding fine AP for mixing 20 minutes, adding coarse AP for mixing 50 minutes. After stirring ends, the TDI was added and stirred for 15 minutes . Aluminum content in the propellant varies from 8 % to 18 %w . The resulted combustion energy is 2885 cal/g to 3750 cal/g . In 18 % of Al content, burning energy begin to reduce . This reduction was largely caused by burning sample together with the eroding sample

Keywodrs: Analysis, Propellant, Aluminum, Bomb calorimeter

ABSTRAK

Telah dilakukan analisis hasil penelitian propelan dengan variabel kandungan aluminium terhadap hasil energi pembakaran. Pengukuran besarnya energi pembakaran propelan dilakukan dengan *bomb calorimeter*. Sampel propelan dibuat dengan mencampur HTPB dan aluminium selama 15 emnit dilanjutkan pencampuran dengan AP halus selama 20 menit, lalu dengan AP kasar selama 50 mrnit. Setelah pengadukan berakhir maka ditambahkan TDI dan diaduk selama 15 menit. Kandungan Al di variasi dari 8% hingga 18%. Energi pembakaran yang dihasilkan adalah 2885 kal/gr hingga 3750 kal/gr. Pada 18% Al energi pembakaran mulai menurun. Penurunan ini diakibatkan oleh sebagian besar sampel yang terbakar sama dengan sampel yang mengalami erosiv.

Kata kunci: Analisis, Propelan, Aluminium, Kalorimeter bom

1 PENDAHULUAN

Akhavan (2011) dan Klapotke (2012) mengatakan bahwa bahan energetik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian, yaitu propelan, bahan peledak dan piroteknik. Propelan dan piroteknik membebaskan energi melalui pembakaran lambat (*deflagration*). Sementara bahan peledak dapat membebaskan energinya selama proses peledakan dalam waktu mikrodetik [Zohari et al, 2013]. Propelan komposit merupakan bahan bakar roket yang sedang dikembangkan oleh LAPAN. Sebagian besar propelan padat komposit dibuat dengan resin *Hydroxyl terminated polybutadiene* (HTPB) sebagai *fuel binder* dan Amonium Perklorat sebagai oksidator. Aluminium bubuk ditambahkan untuk meningkatkan suhu nyala dan meningkatkan impuls spesifik (Isp).

Propelan dibuat dengan mencampur semua bahan tersebut ke dalam *mixer* untuk meng-hasilkan adonan *viscous*. *Curing agent* (bahan pematang) ditambahkan di awal pencampuran. Kemudian adonan propelan dicetak ke dalam cetakan motor roket yang di tengahnya dipasang mandrel [Rafi et al, 2010]. Oksida logam bisa ditambahkan sebagai katalis dalam dekomposisi termal Amonium Perklorat [Styborski et al, 2010]. Menurut Dreizin (2009), dalam bahan energetik (propelan, piroteknik, bahan peledak), Al (aluminium) bubuk digunakan secara luas karena entalpi pembakaran tinggi, mudah penyediaannya,

toksik rendah, stabilitas baik [De Luca et al, 2014].

Salah satu sifat yang penting dalam propelan adalah impuls spesifik yang didefinisikan sebagai besarnya energi yang dibebaskan setiap satu gram propelan. Pengembangan propelan LAPAN mengarah ke peningkatan nilai impuls spesifik. Berbagai upaya untuk meningkatkan impuls spesifik bisa saja dilakukan agar tujuan tersebut dapat terwujud, misalnya menaikkan kandungan padatan, menerapkan oksidator trimodal, mengaplikasikan aluminium dalam bentuk bulat, dan lain-lain.

Dalam satu *batch* (proses) pembuatan propelan, menghasilkan silinder propelan yang siap uji statik. Nilai-nilai impuls spesifik dari tiga silinder ini tidak selalu sama dan berbeda lebih dari 5 detik. Hal ini mengakibatkan sulitnya menganalisis nilai Isp dari variabel penelitian yang dilakukan. Untuk itu agar bisa diharapkan mencapai adonan yang *homogen*, maka dilakukan pengadukan yang lebih lama (biasanya 20 menit) sebelum pemasukan TDI sebagai komponen terakhir yang ditambahkan.

Makalah ini menyajikan analisis nilai energi pembakaran propelan dengan variasi kandungan aluminium *powder*. Energi pembakaran propelan diukur dengan *bomb calorimeter* yang dilakukan di laboratorium penelitian dan pengujian terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada. Pembakaran dilakukan tanpa tambahan oksigen dari luar.

Analisis mengarah pada sejauh mana *trend energy* yang dihasilkan, dan diharapkan mempunyai hubungan dengan kandungan Al. Dengan *trend* ini, bisa digunakan untuk memprediksi nilai energi pembakaran pada kandungan Al tertentu. Hasil penelitian ini diharapkan bisa bermanfaat untuk pengembangan propelan berikutnya.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Smith dan Hashemi (2005) mengatakan bahwa propelan komposit adalah gabungan dua atau lebih bahan dengan sifat kimia dan fisika berbeda yang secara umum tidak saling melarutkan yang ketika bergabung menghasilkan bahan baru dengan sifat berbeda dari bahan asalnya [Kitinirunkul et al, 2013]. Propelan komposit tersusun atas oksidator amonium perklorat (AP), aluminium (Al) yang tersebar kedalam binder *Hydroxyl Terminated Polybutadiene* (HTPB) yang bisa digunakan mendorong rudal dan kendaraan ruang angkasa [Nair et. al, 2010]. Propelan komposit dibuat dengan cara mencampur dalam *mixer* vertikal *vacum* pada suhu 48 - 50°C 2% katalis dengan HTPB 14%, AP 72%, Al 12% Propelan yang dihasilkan memiliki densitas 1,72-1,74 gr/cc dengan kekerasan 72-76 shoreA [Campos et. al, 2010].

Impuls spesifik adalah para-meter yang penting dalam propelan yang selalu diupayakan meningkat dalam

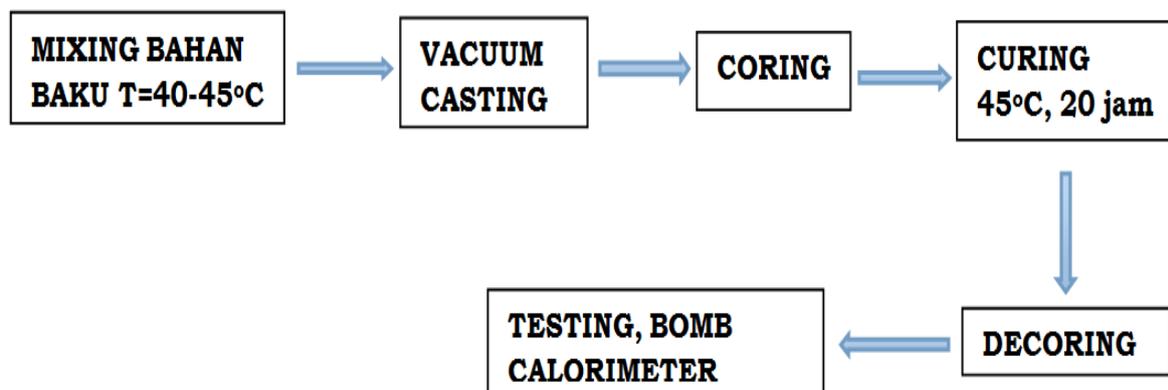
pengembangan propelan. Impuls spesifik tergantung pada volume gas yang dihasilkan dan panas pembakaran per gram propelan yang juga tergantung pada densitas [Sarner, 1967]. Sitzmann et. al (2006) mengatakan bahwa impuls spesifik propelan diperoleh dengan menambahkan padatan amonium perklorat dan aluminium ke dalam *binder* dan bahan energetik (*plasticizer*) [Abdullah et. al, 2013]. Impuls spesifik (Isp) adalah total impuls per satuan berat propelan. Ini merupakan sisi penitng dari kinerja sautu sistem propulsi roket. Dalam roket padat sangat sulit mengukur laju aliran propelan secara tepat. Oleh karena itu Impuls spesifik sering dihitung dari total impuls dan berat propelan menggunakan perbedaan antara berat motor awal dan akhir $I_s = F/(mg_o) = F/w = I_t/(m_p g_o) = I_t/w$.

Dengan $m_p g_o$ adalah berat efektif total propelan, w adalah laju alir massa propelan. Impuls total I_t diperoleh dari persamaan integral gaya dorong terhadap waktu [Sutton and Biblarz, 2001].

$$I_t = \int F dt \quad (2-1)$$

3 METODOLOGI

Gambar 3-1 menyajikan skema kerja langkah-langkah dalam pembuatan sampel propelan komposit.



Gambar 3-1: Proses pembuatan propelan hingga pengujian

Proses pembuatan propelan ukuran kecil (*K-Round*) dapat dilihat pada Gambar 3-1. Bahan baku berupa *Hydroxyl Terminated Polybutadiene* (HTPB), *Toluen diisocyanate* (TDI), *Ammonium Perchlorate bimodal* (AP), dan bubuk Aluminium. Setelah bahan baku sudah disiapkan maka dicampur satu per satu dan diaduk (*Proses Mixing*).

Proses *mixing* berlangsung pada suhu 40-45°C pengadukan dengan *blade horizontal*. Diawali dengan mencampur HTPB dan Al selama 15 menit, dilanjutkan dengan penambahan AP ukuran kecil (AP halus) diaduk selama 20 menit, dilanjutkan penambahan AP kasar diaduk dengan lama waktu 50 menit. Kemudian ditambah TDI dan diaduk selama 15 menit.

Setelah proses *mixing* selesai, adonan yang sudah dianggap homogen dicetak pada tekanan vakum (*Vacuum casting*) sesuai bentuk yang diinginkan. Kemudian dilanjutkan memasukkan mandril agar diperoleh sampel berbentuk silinder dengan *hollowgrain* (*Coring*). Selanjutnya dilakukan pematangan kedalam oven pada suhu 45°C selama 20 jam (*Curing*). Setelah waktu *curing* selesai, sampel dikeluarkan dari cetakan termasuk pencopotan mandril (*Decorating*). Diperoleh sampel propelan yang siap uji dengan *bomb calorimeter*.

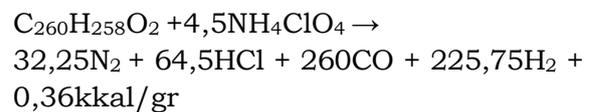
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 4-1 menyajikan energi pembakaran propelan dengan berbagai variasi kandungan Aluminium *powder*. Besarnya energi pembakaran dilakukan

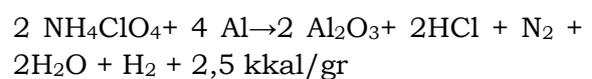
pengukuran dengan *bomb calorimeter*. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4-1.

Pada dasarnya propelan komposit tersusun atas oksidator (sumber oksigen), *fuel* (bahan yang dibakar) misalnya yang paling umum digunakan dalam propelan adalah bubuk logam aluminium, dan bahan organik yang berfungsi diantaranya sebagai *binder*, pematang, *plasticizer*, dll. Baik *fuel* dan bahan organik bisa dibakar oleh oksidator, namun menurut martien dkk (2003) berdasar reaksi di bawah ini, bahan organik akan menghasilkan energy jauh lebih sedikit daripada pembakaran *fuel* [Hartaya dkk, 2014].

Reaksi pembakaran binder



Reaksi pembakaran Aluminium



Propelan pada dasarnya tersusun dengan bahan baku HTPB, TDI (BM 174 gr/mol), AP (BM 117,5 gr/mol), dan Aluminium (BA 26 gr/mol). Dengan asumsi bahwa berat molekul HTPB adalah 3600 gr/mol dan propelan tersusun atas komponen dasar dengan HTPB 14%, Aluminium *powder* 20%, TDI 1%, dan AP 65%, Hartaya dkk (2013) telah menghitung bahwa kebutuhan oksigen untuk pembakaran yang diambil dari oksidator amonium perklorat berdasar kedua reaksi tersebut di atas disajikan pada Tabel 4-2.

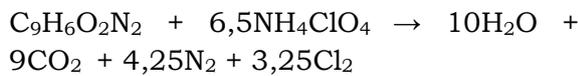
Tabel 4-1: ENERGI PEMBAKARAN PROPELAN DENGAN VARIASI %ALUMINIUM

Kandungan Al	Energi pembakaran	Kandungan Al	Energi pembakaran
8%	2885 kal/gr	14%	3237 kal/gr
10%	3001 kal/gr	16%	3750 kal/gr
12%	3151 kal/gr	18%	3496 kal/gr

Tabel 4-2: KOMPOSISI PROPELAN

Komponen propelan	Quantitas	Kebutuhan oksidator	
HTPB	14%	2,1%	Total 47,18%
TDI	1%	4,4%	
Auminium	18%	40,68%	
AP	67%		

Kebutuhan oksidator untuk pembakaran TDI (rumus molekul C₉H₆O₂N₂) secara sempurna dihitung dari reaksi pembakaran TDI oleh AP yang dibuat dengan asumsi bahwa semua senyawa hidrokarbon jika terbakar akan menghasilkan senyawa sederhana, H₂O, CO₂, N₂, Cl₂. Sehingga reaksinya adalah



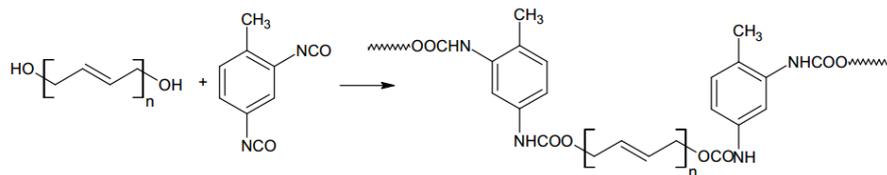
Dari perhitungan berdasar reaksi pembakaran Aluminium, pembakaran HTPB, pembakaran TDI maka diperoleh kebutuhan oksidator AP untuk tiap 1 gram masing-masing komponen tersebut, yaitu 2,16 gr AP untuk HTPB, 4,389 gr AP untuk TDI, 2,25 gr AP untuk Aluminium. Maka secara prosentase disajikan dalam Tabel 4-2. Reaksi pematangan antara TDI dan HTPB membentuk poliuretan adalah reaksi yang tidak melepaskan molekul apapun (reaksi tata ulang). TDI dan HTPB

membentuk poliuretan (NHCOO) dengan reaksi disajikan pada Gambar 4-1.

Oleh karena reaksi polimerisasi uretan hanya tata ulang maka pembakaran propelan bisa ditinjau pembakaran terhadap masing-masing komponen, yaitu pembakaran terhadap Aluminium, terhadap HTPB, terhadap TDI. Dengan demikian kebutuhan oksigen dari AP bisa dihitung masing-masing dan hasilnya disajikan dalam Tabel 4-2.

Dari Tabel 4-2, nampak bahwa banyaknya oksidator 67% bila digunakan untuk membakar sempurna Aluminium 18%, TDI 1% HTPB 14% masih tersisa sekitar 20%. Sehingga komponen propelan semua habis terbakar oleh kandungan oksigen yang ada dalam propelan.

Energi pembakaran Al adalah 2,5 kkal/mol, artinya pada sampel propelan dengan Al 8% jika terbakar sempurna maka berat sampel propelan yang dibakar adalah 14,425 gr. Berdasar ini, maka bisa dihitung energi pembakaran untuk propelan dengan variasi kandungan Aluminium, yang tersaji pada Tabel 4-3.



Gambar 4-1: Reaksi antara HTPB (diol) dengan Diisosianat (TDI) [Mahanta et. al 2010]

Tabel 4-3: ENERGI PEMBAKARAN PROPELAN DENGAN VARIASI %Al

Al	Energi pembakaran, kal/gr			Al	Energy pembakaran, kal/gr		
	Hasil uji	Seharusnya	selisih		Hasil uji	seharusnya	selisih
8%	2885	2885	0	14%	3237	5048	1811
10%	3001	3606	605	16%	3750	5770	2020
12%	3151	4327	1176	18%	3496	6491	2995

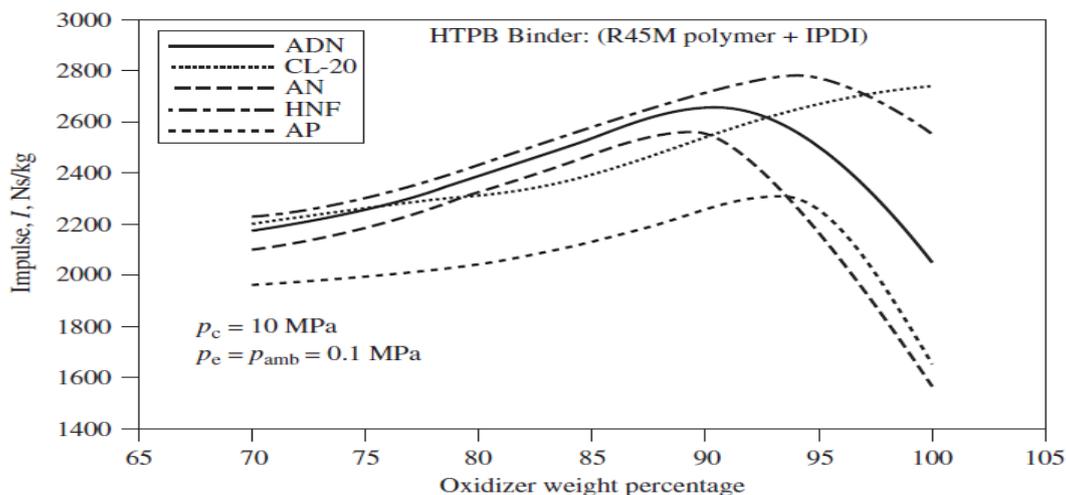
Dari Tabel 4-3, terdapat selisih energi antara yang seharusnya aluminium terbakar habis ternyata hanya terbakar sebagian. Dengan kata lain makin banyak kandungan Aluminium makin banyak pula aluminium yang tidak terbakar. Tidak terbakarnya beberapa aluminium ini tidak disebabkan oleh kurangnya oksigen yang tersedia. Karena memang dalam perhitungan di atas, oksigen dalam oksidator melimpah 20% melebihi kebutuhan oksidator. Kemungkinan beberapa propelan pada *cuil*/patah (erosi) sebelum terbakar akibat semburan/tekanan nyala propelan. Tekanan ini lebih besar sehingga mematahkan lebih cepat daripada kecepatan untuk terbakar. Untuk itu perlunya upaya menaikkan kekerasan propelan agar tingkat erosi ini bisa dikurangi sehingga meningkatkan banyaknya propelan terbakar.

Makin banyakpun oksidator juga tidak menjamin pembakaran sempurna, begitu pula makin besar pun kandungan aluminium tidak menjamin energi pembakaran makin tinggi. Menurut Kuo (1984) dalam penelitiannya kandungan oksidator AP maksimum 92%. Lebih dari ini kinerja propelan (Isp) menurun (Hartaya et. al, 2013). Pematang yang digunakan dalam propelan Kuo adalah IPDI yang memiliki suhu transisi *glas* lebih besar daripada TDI sehingga

pemasukkan padatan (AP atau Al) bisa lebih banyak. Sementara propelan LAPAN menggunakan pematang TDI, yang belum terbukti bisa menampung padatan (AP) bisa mencapai 92%. Yang kita petik dari penelitian Kuo ini bahwa kandungan AP ada batasnya, lihat Gambar 4-3.

Dalam pengujian dengan *bomb calorimeter* juga menunjukkan penurunan energi pembakaran pada kandungan Aluminium 18%. Kandungan Aluminium di atas 18% kemungkinan bisa lebih kecil nilai energinya. Hal ini mungkin yang menjadi alasan kebanyakan para peneliti menggunakan Aluminium kurang dari 20%. Kandungan Aluminium dalam propelan digunakan sebanyak 15-20% [Kishore dan Sridhara, 1999], 19% [Ramesh et. al, 2012].

Dari data energi pembakaran propelan, nampak bahwa makin besar kandungan aluminium makin besar pula energi yang dibebaskan. Dengan kata lain ada hubungan linier antara kandungan aluminium dengan energi pembakaran. Dengan demikian penggunaan *bomb calorimeter* bisa digunakan untuk penelitian dan pengembangan komposisi propelan. Misalnya untuk meneliti hubungan di antara sifat-sifat propelan seperti hubungan antara kekerasan dan energi pembakaran, hubungan antara komposisi dengan energi pembakaran, dan lain-lain.



Gambar 4-3: Impuls spesifik sebagai Fungsi %AP [Kuo, 1984]

Dugaan bahwa propelan mengalami erosi sebelum terbakar mendorong perlunya agar menaikkan kinerja propelan tidak dengan menaikkan solid content tetapi mengefektifkan ikatan binder terhadap komponen padat. Hal ini bisa dilakukan dengan menaikkan densitas, dan kekerasan. selain itu tidak banyak literatur dengan kandungan padatan melebihi 85%, dan Al melebihi 20%.

5 KESIMPULAN

Dari penelitian yang sudah dilakukan, dan dengan analisis dan pembahasan yang sudah diuraikan secara panjang lebar, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Dengan naiknya kandungan aluminium powder dalam propelan dari 8% hingga 16%, maka energi pembakaran juga mengalami kenaikan dari 2885 kal/gr hingga 3750 kal/gr dan menurun pada kandungan aluminium 18%,
- Penurunan energi pembakaran ini diduga karena sampel yang terbakar hampir sama dengan sampel yang mengalami erosi,
- Jika dihitung berdasar energi pembakaran Aluminium 2,5 kal/gr, maka makin besar kandungan aluminium dalam propelan makin banyak aluminium yang tidak terbakar. Ini diduga propelan mengalami erosi sebelum terbakar karena banyaknya AP secara perhitungan mampu membakar sempurna komponen propelan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada Kepala Pusat Teknologi Roket, rekan-rekan peneliti yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan para teknisi litkayasa dalam melakukan tugas dalam kegiatan peneliti. Harapan penulis semoga jerih payah mereka bisa bermanfaat bagi litbang berikutnya, dan mendapat balasan dari yang maha kuasa. Harapan penulis juga semoga makalah ini bisa

menjadi sumbangsih kepada pusat teknologi roket dalam pengembangan peroketan nasional, terutama dalam Bidang Teknologi Propelan.

DAFTAR RUJUKAN

- Campos, E.A; Rita C.L.D; Luis C; Milton F.D; Wilma, M.N; and K. Iha, 2010. *Performace Evaluation of Commercial Copper Chromites as Burning Rate Catalyst for Solid propellant*, J. Aerosp.Technol. Manag., Vol 2 No 3, 323-330.
- De Luca, L.T; Luciano G; Filippo Ma; Giovanni C; Christian; Alice R; Staefano D; Marco F; and A. Sossi, 2014. *Characterization and Combustion of Aluminum Nanopowders in Energetic Systems*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.
- Hartaya, K; Luthfia H.A; dan Retno A, 2013. *Aplication of Density Property as Alternative Propellant Performance for Accelerating the Development of Propellant Composition*, Prosiding International Seminar of Aeronautics and Space Science and Technology, Serpong.
- Hartaya, K; Luthfia H.A; dan Retno A, 2014. *Penentuan Kandungan Oksidator Berdasar Reaksi Stoikiometri dan Struktur Kristal Dalam rangkan Adopsi Formulasi Propelan HLP*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 12 No. 2 Desember, 102-115.
- Kishore, K., and K. Sridhara, 1999. *Solid Propellant Chemistry*, Ministry of Difense, New Delhi.
- Kitinirunkul, Thirapat., Nattawat W., and K.Prapunkan, 2013. *Affecting Factor of The Mechanical Properties Phenolic/Fiber Composite*, International journal of Chemical Materials Science and Engineering vol. 7, no. 10.
- Mohamed, A.; Mugamed F.; Gholamian; and A. R. Zarei, 2013. *Performance Analysis of Composite Propellant Based on HTPB-DNCB*, Journal of Propulsion and Power vo.l 30, no. 2.
- Nair, U.R.; S.N. Asthana; A. Subhananda; and B.R. Gandhe, 2010. *Advances in High Energy Materials*, Defense Science Journal v 60 no 2, 137-151.

- Rafi, A; T. Jayachandran T; and R. Hari, 2010. *Numerical Simulation of Solid Propellant Casting using Unstructured Finite Volume Method*, Proceeding of the 37th National & 4th international conference on Fluid Mechanics and Power – India.
- Ramesh, K; N. Shekhar; S.S. Jawalkar; and M. Bikash Bhattacharya, 2012. *Development of a Composite Propellant Formulation with a High Performance Index Using a Pressure Casting Technique*, Central European Journal of Energetic Materials, 9(1), 4958.
- Sarner, S.F., 1967. *Propellant Chemistry*, Reinhold, New York, 112.
- Styborski, J.A; J. Matthew; M.N.S. Scorza; and M.A. Oehlschlaeger, 2010. *Iron Nanoparticle Additives as Burning Rate Enhancers in AP/HTPB Composite Propellants*, Propellants Explos, Pyrotech. 2010, 35, Wiley-VCH, 1-8.
- Sutton, G.P., and O. Biblarz, 2001. *Rocket Propulsion Elements*, edisi 7, John Wiley & sons.
- Zohari, N; H.K. Mohammad; S.A. Seyedsadjadi, 2013. *The Advantages and Shortcomings of using Nano-sized Energetic Materials*, Central European Journal of Energetic Materials 10(1), 135-147.

Pedoman Penulisan Jurnal Teknologi Dirgantara)
JUDUL MAKALAH DITULIS DENGAN HURUF KAPITAL TEBAL
SECARA SINGKAT DAN JELAS, (Studi Kasus : apabila ada)
(16 pt, Britannic Bold)

Judul dibuat dalam 2 bahasa (Indonesia dan Inggris),
apabila tulisan dalam bahasa Indonesia, maka judul dalam
bahasa Inggris ditulis dalam tanda kurung
(16 pt, Britannic Bold)

Penulis Pertama¹, Penulis Kedua², dstⁿ ← Nama Penulis Tanpa gelar)
(10,5 pt, Franklin Gothic Medium, bold)

¹Instansi Penulis Pertama

²Instansi Penulis Kedua

dstⁿ....

(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)

e-mail: e-mail penulis pertama ← berwarna hitam)
(10,5 pt, Franklin Gothic Medium)

Diterima : (tanggal bulan tahun); Disetujui : (tanggal bulan tahun); Diterbitkan : (tanggal bulan tahun)
(9 pt, Franklin Gothic Medium)

ABSTRACT

(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)

Abstract is a summary of the most important elements of the paper, written in one paragraph in the one column of a maximum of 200 words. Abstract made in two languages written with the Bookman Old Style 9 pt. If the paper written in Indonesian, the Indonesian abstract written first then followed by English abstract and vice versa. The title "ABSTRAK" or "ABSTRACT" made with uppercase letters, and bold.

Keywords: *guidence, author, journal* ← (minimal 3 keywords)
(9pt, Bookman Old Style, italic)

ABSTRAK

(10,5 pt, Bookman Old Style, bold)

Abstrak merupakan ringkasan elemen-elemen terpenting dari naskah, ditulis dalam satu paragraf dalam 1 kolom maksimal 200 kata. Abstrak dibuat dalam 2 bahasa ditulis dengan huruf 9 pt, Bookman Old Style. Apabila naskah dalam Bahasa Indonesia, maka abstrak dengan Bahasa Indonesia ditulis terlebih dahulu dilanjutkan abstrak Bahasa Inggris dan sebaliknya. Judul "ABSTRAK" atau "ABSTRACT" dibuat dengan huruf besar, *bold*.

Kata kunci: *panduan, penulis, jurnal* ← (minimal 3 kata kunci)
(9pt, Bookman Old Style, italic)

1 PENDAHULUAN

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Naskah dapat ditulis dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris. Naskah diketik dalam Microsoft Word dengan 1 kolom untuk

abstrak dan 2 kolom untuk isi. Ukuran kertas A4 dengan ukuran panjang (*height*) 29,7 cm, lebar (*width*) 21 cm dengan dimensi

Top 3 cm, *Bottom* 2,5 cm, *Inside* 2,5 cm, *Outside* 2 cm, *Gutter* 1 cm, *Header* 1 cm dan *Footer* 1 cm. Jenis

Huruf Bookman Old Style 10,5 pt, dan spasi (*line spacing*) 1. Panjang naskah tidak melebihi 10 halaman termasuk tabel dan gambar.

Kerangka Tulisan disusun dengan urutan : Judul, Identitas Penulis, Abstrak, Kata Kunci, Pendahuluan, Metode, Hasil Pembahasan, Kesimpulan, Ucapan Terimakasih, dan Daftar Pustaka.

2 METODOLOGI

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Menguraikan tentang metode yang digunakan dalam penelitian termasuk data, peralatan, teori, diagram alir, beserta lokasi penelitian.

2.1 Lokasi dan Data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

2.2 Standarisasi data

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

2.3 Metode Penelitian

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Persamaan matematis atau formula diberi nomor secara berurutan yang diletakkan di ujung kanan dalam tanda kurung. Apabila penulisan persamaan lebih dari satu baris maka penulisan nomor diletakkan pada baris terakhir. Penggunaan huruf sebagai simbol matematis dalam naskah ditulis dengan huruf miring (*Italic*) seperti x . Penjelasan persamaan diulas dalam naskah. Penurunan persamaan matematis atau formula tidak perlu dituliskan secara detil, cukup diberikan bagian yang terpenting, metode yang digunakan dan hasilnya.

$$D(t) = \Delta H(t) - Sq(t, m) \quad (1-1)$$

dengan $D(t)$ tingkat gangguan geomagnet, $\Delta H(t)$ variasi medan magnet komponen horizontal, $Sq(t, m)$ variasi hari tenang pada waktu t dan bulan m .

3 HASIL PEMBAHASAN

(10,5pt, Bookman Old Style, bold)

Tabel dibuat ringkas dan diberi judul yang singkat tetapi jelas hanya menyajikan data yang esensial dan mudah dipahami. Tabel diberi catatan secukupnya, termasuk sumbernya, sehingga tabel mampu menjelaskan informasi yang disajikan secara mandiri. Setiap tabel diberi nomor secara berurutan dan diulas di dalam naskah. Judul tabel diketik dengan jenis huruf Bookman Old Style 10,5 pt dan pada tulisan "Tabel 1:" "Tabel 2:" dan seterusnya diketik tebal.

Tabel yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Tabel tidak boleh dalam bentuk "*picture*", harus dalam bentuk tabel. Judul tabel dituliskan pada bagian atas tabel, rata tengah dan diberi tanda titik (.) pada akhir judul tabel.

Gambar, Grafik dan Foto harus tajam dan jelas agar cetakan berkualitas baik. Semua simbol di dalamnya harus dijelaskan. Seperti halnya tabel, keterangan pada gambar, grafik atau foto harus mencukupi agar tersaji secara mandiri. Gambar, grafik dan foto harus diulas di dalam naskah. Seperti halnya tabel, gambar, grafik dan foto yang ukurannya melebihi satu kolom, maka dapat menempati area dua kolom. Gambar, grafik dan foto memiliki kedalaman minimal 300 dpi.



Gambar 2-6: *Dent* pada *Leading Edge* bilah kipas akibat *Bird Strike* (B763, 2013)

(9 pt, Bookman Old Style, bold)

**Table 4-1: THRUST DAN EFISIENSI
(9 pt, Bookman Old Style, bold)**

No.	Kondisi Terbang	$\Delta\eta$	ΔF
1	Cruise	54%	55%
2	Take-Off	16%	14%

4 KESIMPULAN

Hal-hal penting dalam naskah yang merupakan kesimpulan dari hasil penelitian atau kajian.

UCAPAN TERIMAKASIH

Wajib dituliskan penulis, ditujukan kepada pihak-pihak yang membantu penulis baik penyediaan data, pengerjaan data, serta Tim Redaksi Jurnal Geomatika dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

Referensi hendaknya dari sumber yang jelas dan terpercaya. Setiap referensi yang tercantum dalam daftar pustaka harus dikutip (disitir) pada naskah dan sebaliknya setiap kutipan harus tercantum dalam daftar pustaka. Penulisan acuan dalam pembahasan sebaiknya menggunakan “sistem penulis-tahun” yang mengacu pada karya pada daftar pustaka. Kutipan buku dalam bentuk saduran untuk satu sampai dua penulis ditulis nama akhir penulis dan tahun. Contoh: Muhammad Nasir dituliskan (Nasir, 2009).

Referensi primer lebih dari 80 % dan diterbitkan dalam 5-10 tahun terakhir. Referensi yang dicantumkan dalam naskah mengikuti pola baku dengan disusun menurut abjad berdasarkan nama (keluarga) penulis pertama dan tahun publikasi, dengan sistim sitasi *American Physiological Association 6th Edition*. Contoh

penulisan di dalam Daftar Pustaka adalah sebagai berikut :

Artikel dalam Jurnal (Jurnal Primer)

Burton R. K., R. I. McPherron, C. T. Russell, 1975. *An Empirical Relationship Between Interplanetary Conditions and Dst*, J. Geophys. Res., 80(31), 4204-4214.

Buku

Ross, S. M., 2004. *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, Burlington, Elsevier.

Artikel bagian dari Buku

Maris, G.; M.D. Popescu dan M. Mierla, 2004. *Soft X-Ray Solar Flarecycles*, dalam A.V. Stepanov; E.E. Benevolenskaya dan A.G.Kosovichev (editor), *Proceedings IAU Symposium*, no. 223, 73.

Skripsi/Tesis/Disertasi

Ameldam, P., 2012. *Pengujian Data NCEP-FNL Dan CCMP Untuk Potensi Energi Angin (Studi Kasus Di Jawa Barat)*, Skripsi ITB.

Naskah Prosiding

Avia, L. Q., A. Haryanto, N. Cholianawati dan B. Siswanto, 2010. *Identifikasi Awal Musim Kemarau dan Musim Hujan Berdasarkan Data Satelit TRMM*, Prosiding Seminar Penerbangan dan Antariksa 2010: Sub Seminar Sains Atmosfer dan Iklim. Serpong, 15 Nopember 2010.

Naskah Konferensi

Pontes, M-T, Sempreviva, AM, Barthelmie, R., Giebel, G., Costa, P., 2007. *Integrating Offshore Wind And Wave Resource Assessment*, Proc. 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal.

Naskah Laporan Hasil Penelitian

P3TKEBTKE-Kementerian ESDM, 2008. *Laporan Penelitian Kajian PLT Angin di Indonesia Bagian Timur*.

Naskah Online

Habby, J., 2011. *Applying Tropospheric Moisture to Forecasting*, Meteorology Education, diakses <http://weatherprediction.com>, 23 Desember 2014.

PEDOMAN BAGI PENULIS
JURNAL TEKNOLOGI DIRGANTARA
(*Journal of Aerospace Technology*)

Jurnal Teknologi Dirgantara (*Journal of Aerospace Technology*) adalah jurnal ilmiah untuk publikasi penelitian dan pengembangan di bidang :

- a) Teknologi wahana roket, satelit dan pesawat terbang, dirgantara terapan seperti struktur mekanika, sistem catu daya dan kontrol termal wahana roket dan satelit, struktur kendali, konversi energi;
- b) Teknologi propulsi dan energik, seperti teknologi propelan, propulsi, uji statik propulsi, termodinamika;
- c) Teknologi peluncuran dan operasi antariksa serta teknologi peluncuran dan operasi antariksa serta teknologi transmisi komunikasi dan muatan dirgantara, seperti teknologi stasiun bumi penerima dan pemancar, teknologi transmisi gelombang elektromagnetik dan teknologi transmisi komunikasi serat optik, teknologi muatan, sistem telemetri penjejak.

Pengiriman Naskah

Naskah yang ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris dikirim melalui e-mail (publikasi@lapan.go.id) atau file digital, ditujukan ke Sekretaris Dewan Penyunting Jurnal dengan alamat, Bagian Publikasi dan Promosi LAPAN, Jalan Pemuda Persil No. 1, Jakarta Timur 13220. Naskah diketik dua kolom dengan MS Word font 10,5 Bookman Old Styles (batas tengah 1 cm pada kertas A4 dengan spasi satu, batas kanan 2 cm, batas kiri 2,5 cm, batas atas 3 cm, dan batas bawah 2,5 cm). Judul huruf besar font 16.

Sistematika penulisan

Naskah terdiri dari halaman judul dan isi makalah. Halaman judul berisi judul yang ringkas tanpa singkatan nama (para) penulis tanpa gelar, instansi/peguruan tinggi, dan e-mail penulis utama. Halaman isi makalah terdiri dari (a) judul, (b) abstrak dalam bahasa Indonesia dan Inggris tidak lebih dari 200 kata, (c) batang tubuh naskah yang terbagi menjadi bab dan subbab dengan penomoran bertingkat (1. Pendahuluan; 2 Judul Bab; 2.1 Subbab tingkat pertama; 2.1.1 Subbab tingkat dua dan seterusnya), (d) Ucapan terima kasih yang lazim dan (e) daftar rujukan.

Gambar dan Tabel

Gambar atau foto harus dapat direproduksi dengan tajam dan jelas. Gambar atau foto warna hanya diterima dengan pertimbangan khusus. Gambar dan tabel dapat dimasukkan dalam batang tubuh atau dalam lampiran tersendiri. Untuk kejelasan penempatan dalam jurnal, gambar dan tabel harus diberi nomor sesuai nomor bab dan nomor urut pada bab tersebut, misalnya Gambar 2-2 atau Tabel 2-1. Gambar disertai keterangan singkat (bukan sekedar judul gambar) dan tabel disertai judul tabel.

Persamaan Satuan dan Data Numerik

Persamaan diketik atau ditulis tangan (untuk simbol khusus) dan diberi nomor di sebelah kanannya sesuai nomor bab dan nomor urutnya, misalnya persamaan (1-2). Satuan yang digunakan adalah satuan internasional (EGS atau MKS) atau yang lazim pada cabang ilmunya. Karena terbit dengan dua bahasa, angka desimal pada data numerik harus mangacu pada sistem internasional dengan menggunakan titik.

Rujukan

- PP No. 74, 2001. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 18 Tahun 1999 Tentang: *Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun*. Kementerian Lingkungan Hidup. Jakarta.
- Haryani, N. S., Hidayat, Sulma, S., dan Pasaribu, J. M., 2014. *Deteksi Limbah Acid Sludge Menggunakan Metode Red Edge Berbasis Data Penginderaan Jauh*, Jurnal Penginderaan Jauh dan Pengolahan data Citra Digital, Vol 11 No.2 Desember 2014.
- Center for International Forestry Research [CIFOR], 2012. *Forests and Climate Change Mitigation : What Policymakers Should Know*, Fact Sheet. No. 5, November 2012, MITIGATION, Key of Research Findings. CGIAR Research Programme.
- The National Geophysical Data Center (NOAA)-NASA. Sumber data VNF, 2014. Sumber: http://ngdc.noaa.gov/eog/viirs/download_2014_indonesia.html atau (Sumber LAPAN: <http://modis-catalog.lapan.go.id/monitoring/katalognpp#>).
- http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_prod/prog_sect11_3.html