

DEKOMPOSISSI 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, Mekarsari, 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 arhennius 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 popular 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.

Seperi 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 intergrasi 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 200 μm :50 μm 1:1.
- Propelan 450 terdiri dari HTPB:TDI 15:1; AP 75% dengan perbandingan AP 400 μm :200 μm 1:1; Al 30 μm 7,5%.
- Propelan 1220 terdiri dari HTPB:TDI 15:1; AP 77,5% dengan perbandingan AP 200 μm :100 μm : 50 μm 1:1:1; Al 30 μm 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 α -Al₂O₃. Berat sampel yang digunakan sekitar 11 mg.

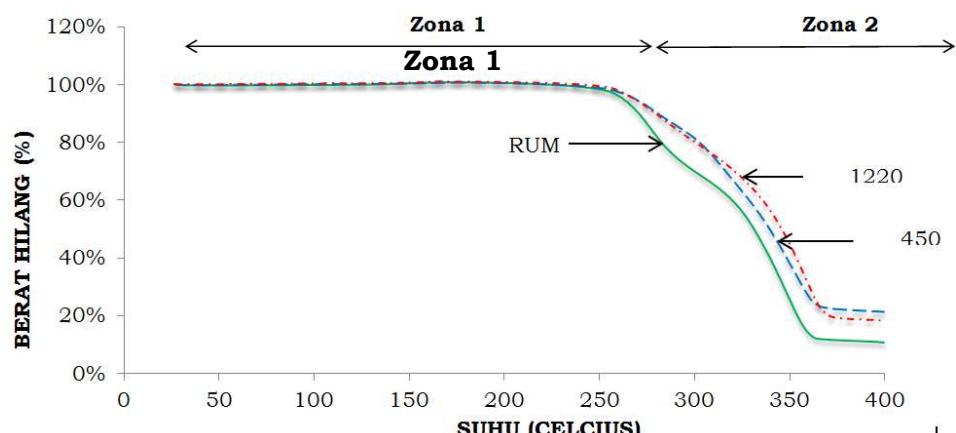
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

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 $\pm 660^\circ\text{C}$ sementara AP $\pm 300^\circ\text{C}$ dan HTPB $\pm 450^\circ\text{C}$.



Gambar 2-1: Kurva TGA propelan

Tabel 2-1: PROFIL TGA PROPELAN

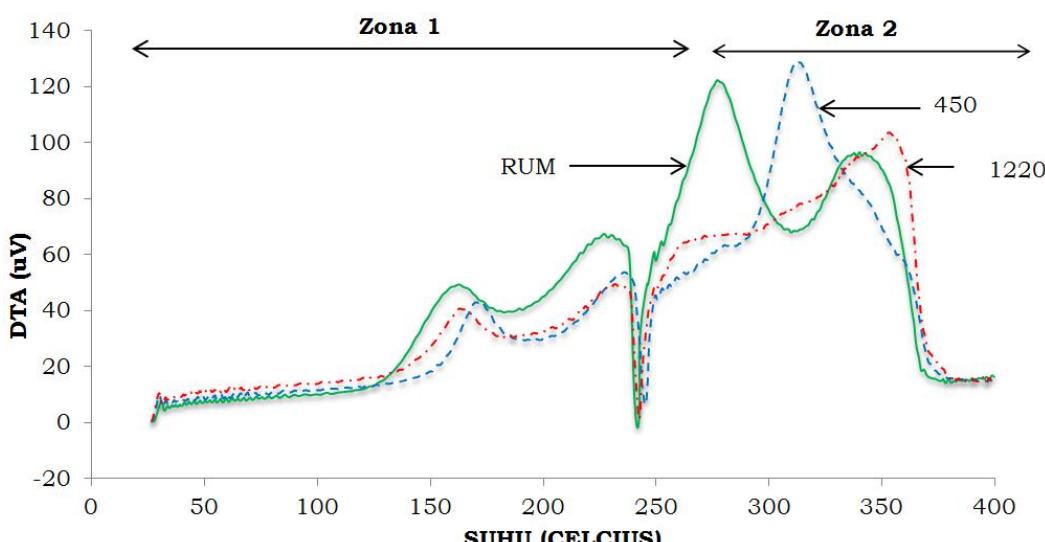
Sampel	Zona	Suhu Awal (°C)	Suhu Akhir (°C)	Berat Hilang %	Berat Residu %
Propelan RUM	1	30	260	3.69	10.81
	2	260	400	85.48	
Propelan 450	1	30	260	2.40	21.44
	2	260	400	76.16	
Propelan 1220	1	30	260	2.23	18.70
	2	260	400	79.06	

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	Zona 1		Zona 2	
		Puncak Ekso 1 mg	Puncak Endo T (°C)	Puncak Ekso 2 T (°C)	Puncak Ekso 3 T (°C)
Propelan RUM	11.659		162.78	241.89	277.26
Propelan 450	11.502		172.60	245.11	-
Propelan 1220	11.401		166.15	242.18	-
					340.16
					313.31
					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 disasosiasi-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 HClO_4 , menghasilkan senyawa hydrogen dan membentuk HCl dan H_2O . Kemudian residu karbon bereaksi dengan O_2 untuk membentuk CO dan CO_2 (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 O_2 dari HClO_4 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 DEKOMPOSISSI 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 partikelnya 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 Hydroxylterminated 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/Hydroxylterminated Polybutadiene (AP/HTPB) Composite Solid Propellant*. Chinese J. Chem. Eng., 12 (4) : 595 – 598.
- Rodic, Vesna dan Bajlovska, 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.