

# Analisis Kecepatan Pembakaran Propelan HTPB/IPDI Dengan Variasi Penambahan Persentase Aluminium

Atwirman Sjarkawi, Henny Setyaningsih<sup>\*)</sup>

## ABSTRACT

An analysis on the burning rate of propellant of HTPB/IPDI 5 : 1 with percentage of variation was reviewed. Besides the influence of decomposition rate of both oxidizer and fuel as mentioned, the addition of 7% of the aluminum powder at 60 atm pressure increases the burning rate significantly, i.e. 0,42 cm/sec.

## ABSTRAK

Suatu analisis terhadap kecepatan pembakaran propelan HTPB/IPDI perbandingan 5 : 1 dengan variasi persentase serbuk Aluminium, Al, telah dilakukan. Disamping pengaruh laju dekomposisi baik oksidiser maupun fuel, penambahan serbuk Aluminium sebanyak 7 % pada tekanan 60 atm telah dapat meningkatkan kecepatan pembakaran secara signifikan yaitu sebesar 0,42 cm/det.

## 1. PENDAHULUAN

Propelan dengan fuel basis HTPB (*Hydroxyl Terminated Polybutadiene*) yang sedang diteliti dan dikembangkan LAPAN saat ini menggunakan TDI (*Toluen Diisocyanate*) sebagai *fuel* pematang atau *fuel kuratifnya*. Sebagai alternatif lainnya fuel kuratif TDI ini dapat diganti dengan Isophoron Diisocyanate (IPDI).

Pada tahap awal terhadap kombinasi HTPB-IPDI ini telah dilakukan penelitian kandungan isian padat dalam rangka penentuan tingkat stoikiometri berdasarkan kesetaraan oksigen serta daya serapnya terhadap *Ammonium Perchlorate* (AP) sebagai oksidiser yang dapat mencapai 85%.

Sebagaimana lazimnya dalam rangka meningkatkan kinerja propelan senantiasa ditambahkan serbuk Aluminium (*aluminum powder*) sebagai fuel metalik. Pada penelitian terdahulu dimana bahan yang digunakan sebagai *fuel kuratif* adalah *Toluen Diisocyanate* (TDI), penambahan *fuel metalik* adalah sebanyak 15%. Berkaitan dengan penggantian yang dilakukan terhadap fuel kuratif TDI dengan *Isophoron Diisocyanate* (IPDI), maka jumlah *fuel metalik* yang dapat ditambahkan diteliti serta dianalisis.

Dalam makalah ini dianalisis pengaruh penambahan Aluminium, Al terhadap kecepatan pembakaran propelan HTPB/IPDI pada perbandingan 5 : 1 dengan HTPB/TDI pada perbandingan 19 : 1 (Setyaningsih, H. dkk, 1996). Hal ini dilakukan sebagai langkah awal dalam rangka usaha-usaha peningkatan kinerja propelan berdasarkan alternatif pemakaian fuel kuratif (IPDI atau TDI).

## 2. TINJAUAN TEORI

Kecepatan pembakaran merupakan kinetika reaksi kimia yang menggambarkan laju suatu reaksi dikaitkan dengan temperatur dengan rumus dasar yang

dikenal dengan persamaan Arrhenius sebagai berikut :

$$k = A e^{-E/RT} \dots\dots\dots (2-1)$$

atau

$$\ln k = \ln A - E/RT \dots\dots\dots (2-2)$$

Dengan k = konstanta laju reaksi  
A = faktor frekuensi  
E = energi aktivasi  
T = temperatur absolut

Mengingat propelan terdiri dari komponen *fuel binder* dan oksidiser, pada dasarnya laju/regresi yang terjadi adalah berdasarkan "two temperature postulate", baik *fuel binder* dan oksidiser memiliki faktor pre-eksponensial dan energi aktivasi yang berbeda. Jadi untuk *fuel* berlaku

$$r_f = A_f e^{-(E_f/RT_f)} \dots\dots\dots (2-3)$$

Dan untuk oksidiser

$$r_o = A_o e^{-(E_o/RT_o)} \dots\dots\dots (2-4)$$

Dengan  $r_f$  dan  $r_o$  masing-masing adalah kecepatan reaksi *fuel* dan oksidiser ;  $A_f$  dan  $A_o$  masing-masing adalah faktor frekuensi *fuel* dan oksidiser;  $E_f$  dan  $E_o$  masing-masing adalah energi aktivasi *fuel* dan oksidiser; serta  $T_f$  dan  $T_o$  masing-masing adalah temperatur absolut pembakaran *fuel* dan oksidiser.

Dikaitkan dengan kinerja propelan, didasari bahwa kecepatan pembakaran memungkinkan untuk terjadinya peningkatan kondisi kesetimbangan antara gas-gas yang dihasilkan dari proses pembakaran dan gas-gas yang dikeluarkan melalui *nosel*, dengan demikian tekanan akan meningkat. Hubungan ini dinyatakan dengan rumus berikut ini :

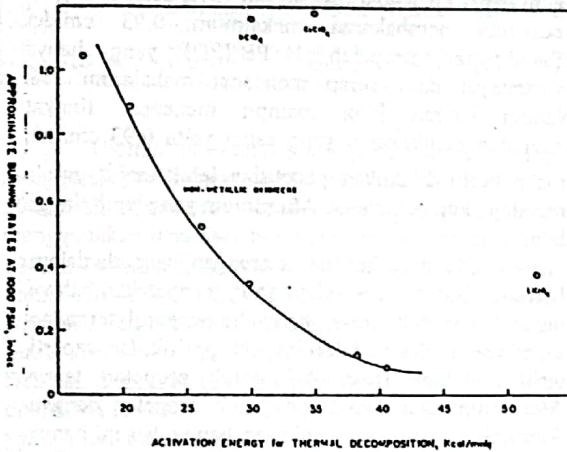
$$P = (r/C_D \rho K)^{1/1-n} \dots\dots\dots (2-5)$$

<sup>\*)</sup> Peneliti Bidang Propelan, PUSROPEN - LAPAN

- dengan P = tekanan  
 R = kecepatan pembakaran  
 $C_D$  = koefisien aliran masa  
 $\rho$  = massa jenis  
 n = indeks pembakaran  
 K = perbandingan area propelan (propellant area ratio)

Tabel 2-1 : EFEK BINDER TERHADAP KECEPATAN PEMBAKARAN (Samer F. Stanley, 1966)

Binder	Decomposition Temp. (°C)	Burning Rate with NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> (in./sec at 1000 psia)
Polyurethane	>350	0.22
Polybutadiene-acrylic acid	300	0.30
Polysulfide	150	0.50
Nitrocellulose	90	0.65
Silicone	75*	0.72
N-H Binders	100-200**	>1.0



Gambar 2-1 : Kecepatan pembakaran vs energi aktivasi dekomposisi oksidator (Samer F. Stanley, 1966)

3. METODOLOGI

3.1. Konsep dasar

Kecepatan atau laju pembakaran merupakan salah satu sifat internal balistik dari suatu propelan. Metoda yang paling umum dipakai dalam menentukan kecepatan pembakaran adalah dengan menggunakan "strand burner" (Samer F. Stanley).

Berdasarkan pada mekanisme "burning surface" proses pembakaran propelan tersebut merupakan dekomposisi termal dari bahan-bahan yang ada. Namun mengingat sifat peruraiannya dengan dekomposisi oksidiser yang berlangsung dengan cepat seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1 serta mengingat jumlahnya yang banyak, oksidiser merupakan penentu laju dekomposisi tersebut. Dengan demikian oksidiser merupakan komponen penentu kecepatan pembakaran propelan. Adapun besarnya laju dekomposisi ini dinyatakan sebagai fungsi energi aktivasi seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1. Sementara, pengaruh fuel binder ditunjukkan pada Tabel 2-1. Jadi, semakin tinggi energi aktivasi oksidiser kecepatan reaksi akan semakin rendah dan demikian juga pengaruh temperatur dekomposisi fuel. Temperatur dekomposisi fuel yang tinggi kecepatan reaksi semakin rendah.

Mengingat proses pembakaran propelan berlangsung dalam arah normal terhadap permukaan atau dikenal dengan "linear burning rate" yang hanya dipengaruhi temperatur serta tekanan, maka berdasarkan hukum Saint-Robert atau Veille (Samer F. Stanley) kecepatan pembakaran tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut;

$$r = aP^n \dots\dots\dots (3-1)$$

atau  
 $r = a (P/1000)^n \dots\dots\dots (3-2)$

- dengan  
 r = kecepatan pembakaran  
 P = tekanan ruang bakar; P/1000 adalah tekanan standar pada 1000 psia (~ 70 kg/cm<sup>2</sup>)  
 a = konstanta (bergantung jenis dan temperatur awal propelan)  
 n = indeks pembakaran

3.2 Penetapan Kecepatan Pembakaran

Metode penetapan kecepatan pembakaran propelan yang dikenal dengan "strand burner" ini dilakukan terhadap batang propelan berukuran panjang 4-5 in serta dengan luas penampang sekitar 1/8 s/d 1/4 in<sup>2</sup> dan proses pembakaran propelan berlangsung secara "sigaret burning". Setiap pengukuran dilakukan pada dua kondisi tekanan yang berbeda, yaitu 50 atm dan 60 atm, pada pengujian sesuai kondisi riil uji terbang dan dilakukan secara triplo (3 sampel), pada pengujian sesuai kondisi riil uji terbang.

3.3. Bahan

Bahan yang digunakan berasal dari propelan dengan isian padat (solid content) sebesar 80%, yang diproses dalam sebuah mixer berkapasitas 3 kg, serta dicetak dalam ukuran K-Round secara triplo. Adapun komposisi bahan terdiri dari oksidiser AP serta serbuk Aluminium secara bervariasi seperti yang dapat dilihat dalam Tabel 4-1, dengan berat total 80%, sementara 20 % adalah fuel binder HTPB/IPDI dengan perbandingan 5:1.

3.4. Peralatan

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- Alat untuk pembuatan propelan K-Round ( terdiri dari mixer, casting, dan oven) yang dilengkapi dengan pemanas air atau water bath circulation.
- Satu set alat uji strand burner.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk meneliti setiap parameter propelan, sebagaimana biasanya propelan dibuat dalam ukuran "K-Round". "Fuel binder" yang terdiri dari HTPB dan IPDI dalam perbandingan 5:1 sebanyak 20% (%berat total bahan) dicampur dengan oksidiser AP serta serbuk Aluminium secara bervariasi dengan batas isian padat total 80%. Variasi penambahan

Aluminium yang dibuat serta data yang diperoleh diperlihatkan pada Tabel (4-1). Dari tabel ini dapat terlihat bahwa kecepatan pembakaran propelan HTPB/IPDI untuk berbagai komposisi yang berdasarkan pada variasi penambahan terhadap kandungan serbuk Aluminium adalah lebih tinggi dibandingkan dengan propelan sejenis apabila tanpa Aluminium.

Tabel 4-1 : KECEPATAN PEMBAKARAN R (CM/DET) DARI PROPELAN HTPB/IPDI, VARIASI %AL HTPB DAN IPDI 5:1

No.	Tekanan bakar (atm)	%Al				
		0	3	5	7	10 <sup>*)</sup>
1.	50 atm	0,55	0,73	0,72	0,84	-
2.	60 atm	0,51	0,67	0,74	0,93	-

\*) Campuran propelan tidak bias dicetak (unstable)

Adapun kecepatan pembakaran terbesar terlihat pada penambahan serbuk Aluminium sebesar 7% yaitu 0,93cm/det (pengukuran dilakukan pada 60 atm); dibandingkan propelan tanpa Aluminium sebesar 0,51 cm/det. Jadi terdapat perbedaan/kenaikan kecepatan sebesar 0,42 cm/det.

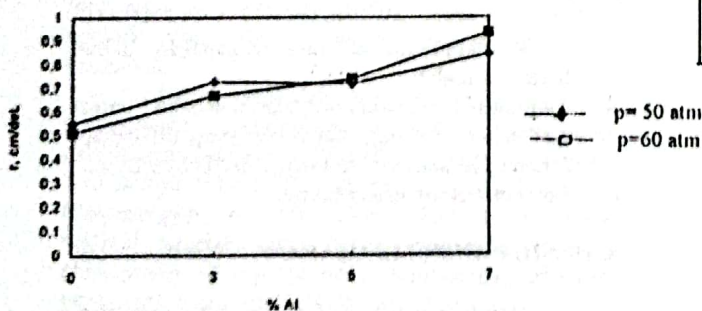
Jika hasil ini dibandingkan dengan data kecepatan pembakaran propelan HTPB/TDI dengan komposisi bahan : HTPB/TDI 20% dengan perbandingan fuel binder HTPB : TDI = 19 :1, dan isian padat yang terdiri dari AP dan Al = 80%.

Berdasarkan variasi dari persentase Aluminium yang ditambahkan, maka kecepatan pembakarannya adalah seperti ditunjukkan pada Tabel 4-2. Data di atas menggambarkan bahwa dengan penambahan Aluminium serbuk dapat meningkatkan kecepatan pembakaran secara bervariasi juga seperti diperlihatkan pada Gambar 4-1 yakni untuk propelan Polibutadien yang menggunakan bahan fuel kuratif baru yaitu IPDI dan Gambar 4-2 untuk propelan Polibutadien yang mana selama ini menggunakan fuel kuratif TDI.

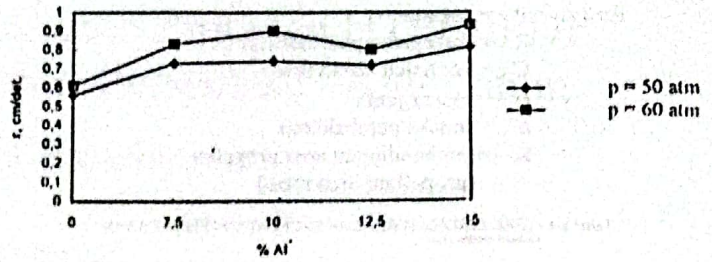
Tabel 4-2 : KECEPATAN PEMBAKARAN R (CM/DET) DARI PROPELAN HTPB/IPDI, VARIASI %AL HTPB DAN IPDI 19:1

No.	Tekanan bakar (atm)	%Al					
		0	7,5	10	12,5	15	17,5 <sup>*)</sup>
1.	50 atm	0,56	0,73	0,74	0,72	0,81	-
2.	60 atm	0,61	0,83	0,90	0,80	0,93	-

\*) Campuran propelan tidak bias dicetak (unstable)



Gambar 4-1 : Pengaruh %-Al terhadap kecepatan pembakaran propelan HTPB/IPDI



Gambar 4-2 : Pengaruh %-Al terhadap kecepatan pembakaran propelan HTPB/IPDI

Melihat persentase serbuk Aluminium yang dapat ditambahkan, ternyata propelan HTPB/TDI memiliki kemampuan/daya serap yang lebih tinggi, yakni dapat mencapai maksimum 15%, dengan tingkat kecepatan pembakaran maksimum 0,93 cm/det dibandingkan propelan HTPB/IPDI yang hanya mempunyai daya serap mencapai maksimum 7%. Namun karena juga mampu mencapai tingkat kecepatan pembakaran yang sama yaitu 0,93 cm/det, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan persentase Aluminium yang lebih tinggi lagi.

Mengacu kepada keterangan yang ada dalam literatur (Sarnar F. Stanley) yang menyatakan bahwa penambahan Aluminium hanya berpengaruh terhadap kinerja serta efisiensi dari impuls spesifik, Isp, seperti terlihat dalam Tabel 4-3 untuk propelan tanpa Aluminium dan Tabel 4-4 untuk propelan dengan Aluminium, dapat dikemukakan bahwa hal ini hanya dimungkinkan oleh perbedaan ukuran partikel oksidiser yang dipakai.

Tabel 4-3 : Isp PROPELAN TANPA PENAMBAHAN AL (Sarnar F. Stanley, 1966)

Fuel	Wt. % Fuel	Oxidiser	Specific Impulse (sec)	Chamber Temp. (°K)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
CH <sub>4</sub>	0.5	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	252.8	3018	1.76
CH <sub>4</sub>	18	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	246.8	2950	1.66
CH <sub>4</sub>	18	LiClO <sub>4</sub>	244.1	3020	1.91
CH <sub>4</sub>	21	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	238.6	3003	1.70
Hydrazine	14	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	246.1	2942	1.68
Polyurethane	16	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	245.2	2912	1.70
Polyulfide	14	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	241.9	2926	1.81
Polyester	20	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	237.7	2831	1.73
Polyester	20	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	202.8	1753	1.51
Polyester	32	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	255.0	3378	1.78
Double base	40	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	250.7	3051	1.73

Tabel 4-4 : I<sub>sp</sub> PROPELAN DENGAN PENAMBAHAN AL (Chen F. Sheng, 1966)

Grain (in %)	Additive (in %)	Oxidizer	Specific Impulse (sec)	Chamber Temp (°K)	Pressure (kg/cm <sup>2</sup> )
CH <sub>2</sub> (15)	Al (19)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	261.1	3170	1.74
CH <sub>2</sub> (20)	Al (15)	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	281.5	3591	1.76
CH <sub>2</sub> (15)	Al (20)	LiClO <sub>4</sub>	231.0	3126	1.97
CH <sub>2</sub> (11)	Al (16)	KClO <sub>4</sub>	226.0	3192	2.01
Double-base (15)	Al (20)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	263.5	3160	1.60
CH <sub>2</sub> (15)	AlH <sub>3</sub> (31)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	271.2	2516	1.53
CH <sub>2</sub> (15)	AlH <sub>3</sub> (25)	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	295.3	3763	1.66
CH <sub>2</sub> (15)	AlH <sub>3</sub> (25)	LiClO <sub>4</sub>	269.0	3119	1.72
Double-base (40)	AlH <sub>3</sub> (28)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	255.2	3417	1.61
CH <sub>2</sub> (17.5)	LiAlH <sub>4</sub> (25)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	265.0	2331	1.32
CH <sub>2</sub> (17.5)	LiAlH <sub>4</sub> (20)	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	292.4	3507	1.45
CH <sub>2</sub> (15)	LiAlH <sub>4</sub> (20)	LiClO <sub>4</sub>	237.4	2639	1.54
CH <sub>2</sub> (18)	Be (12)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	285.6	3172	1.66
CH <sub>2</sub> (25)	Be (8)	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	291.2	3210	1.61
CH <sub>2</sub> (14)	Be (17.5)	LiClO <sub>4</sub>	261.9	3151	1.64
Double base (40)	Be (16.6)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	259.3	4011	1.72
CH <sub>2</sub> (20)	Bell <sub>2</sub> (25)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	301.0	2611	1.14
CH <sub>2</sub> (17.5)	Bell <sub>2</sub> (17.5)	NO <sub>2</sub> ClO <sub>4</sub>	313.8	3208	1.34
CH <sub>2</sub> (20)	Bell <sub>2</sub> (27)	LiClO <sub>4</sub>	300.8	2132	1.71
Double base (50)	Bell <sub>2</sub> (20)	NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub>	313.8	3154	1.28

Ukuran partikel dalam penelitian ini yang menggunakan AP kasar 50-60 mesh dan AP halus 180-200 mesh sementara propelan yang ada di literatur menggunakan oksidiser berukuran masing-masing 10-33  $\mu\text{m}$  (<400 mesh) dan 70-90  $\mu\text{m}$  (170-200 mesh) untuk AP halus dan AP kasar. Sementara ukuran partikel serbuk Aluminium dalam hal ini diperkirakan sama dengan ukuran yang tidak bersifat variatif. Dengan demikian efek partikel pada propelan yang diteliti ini masih terlihat dan sistem campuran partikel yang biasa dikenal secara bimodal menjadi trimodal dapat meningkatkan kecepatan pembakaran propelan.

## 5. KESIMPULAN

1. Energi aktivasi dari dekomposisi oksidiser dan temperatur dekomposisi *fuel* yang semakin rendah merupakan kontributor utama terhadap peningkatan kecepatan pembakaran propelan.
2. Penambahan serbuk Aluminium sebanyak 7% terhadap propelan HTPB/IPDI dengan persentase isian padat 80% telah dapat menaikkan kecepatan pembakaran sebesar 0,42 cm/det.

## DAFTAR RUJUKAN

- Bruins, P.F., 1969, *Polyurethane Technology*, John Wiley and Sons Inc., New York.
- Henny, S., Atwirman Sjakawi, dan Sumargono, 1997, *Pengaruh Perubahan Perbandingan Jumlah AP Kasar dan AP halus Terhadap Kecepatan Pembakaran Propelan Pada Berbagai Persentase Aluminium*, Proceeding Siptekgan, Diedit oleh Atik Bintoro, LAPAN, Jakarta.
- Setyaningsih, H., Choirul Fatchan, Atwirman Sjakawi, dan Siti Prangili, 1996, *Penelitian Fuel/Binder HTPB/IPDI Dengan Variabel Suhu Sebagai dasar Pembuatan Propelan*, Majalah LAPAN. No.77.
- Satyanarayanan, R., Chakravarthy, Edward W. Price, and Robert K. Sigman, 1997, *Mechanism of Composite Solid Propellants by Ferric Oxide*, Journal of Propulsion and Power, Vol 13.
- Lansbaum, Ellis M., and Manuel P. Salinas, 1997 *Solid Propellant Specific Impulse Prediction*, The Aerospace Corporation, 2350 E., El Segundo, California.
- Sarner F., Stanley, 1966 *Propellant Chemistry* Reinhold Publishing Corp., New York.