

# Kinerja Propelan Padat Komposit Polibutadien dalam Kaitannya dengan Komposisi Bahan-Bahannya

Atwirman Syarkawi\*)

\*) Peneliti Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN

## ABSTRACT

The performance of propellant are strongly depend on the materials composition to be used. Tsiolkovsky equation gave two important criterias for basic performance parameters i.e. specific impuls (Isp) and propellant mass, both of them were burning rate implication.

This paper discussed the correlation between these parameters from which the performance of the polybutadiene to be evaluated.

## ABSTRAK

Kinerja suatu propelan adalah sangat tergantung kepada komposisi bahan yang digunakan. Persamaan Tsiolkovsky, yang digunakan sebagai acuan, menunjukkan bahwa ada dua besaran penting yang menjadi dasar ukuran kinerja tersebut, yaitu impuls spesifik (Isp), dan masa propelan, yang keduanya berhubungan erat dengan kecepatan pembakaran,  $r$ . Tulisan ini membahas keterkaitan antara besaran tersebut dengan komposisi bahan yang dipergunakan, yang dapat digunakan sebagai dasar evaluasi terhadap peningkatan kinerja propelan polibutadien.

## 1 PENDAHULUAN

Propelan padat jenis komposit telah berkembang dan dikembangkan secara luas. Hal ini tidak terlepas dari fenomena sifat-sifat fisikomekanis dan fisikokimia yang dimiliki oleh bahan-bahan dasar yang dipergunakan sebagai bahan baku untuk membuat sebuah propelan. Bahan-Bahan tersebut memungkinkan untuk membentuk suatu dispersi isian padat yang tinggi sehingga dengan demikian memberikan kemudahan serta keleluasaan untuk memvariasi komposisi, peningkatan sifat energetik, dan sifat balistik. Variasi ini menjadikan propelan dapat dikembangkan agar lebih berdaya guna untuk berbagai misi/keperluan, khususnya untuk digunakan pada sistem propulsi roket. Analisis yang tidak terlalu kompleks dapat dilakukan terhadap sifat

mekanis dan kinetis dari propelan ini. Sehingga dalam peningkatan keandalan kinerjanya pun sangat memungkinkan untuk dioptimalkan.

Komponen bahan propelan padat komposit terdiri atas prepolimerik fuel-binder, bahan kuratip (curing agent), dan oksidiser. Formulasi komposisi dari komponen bahan-bahan ini baik ditinjau dari segi kualitatifnya maupun kuantitatifnya secara langsung akan mempengaruhi kinerja propelan tersebut.

Propelan polibutadien, baik dari jenis CTPB (carboxy terminated polybutadiene) maupun HTPB (hydroxy terminated polybutadiene), kedua-duanya telah dikembangkan di LAPAN. CTPB telah digunakan beberapa tahun yang lalu, sementara HTPB dilakukan pada tahun berikutnya sampai sekarang. Hal ini dilakukan di samping sebagai program

diversifikasi pemanfaatan bahan-bahan. Alasan yang lebih bersifat teknis ialah mengingat proses pematangan (curing process) propelan CTPB memerlukan dua zat sebagai curing agent, yakni MAPO dan EPON, sementara propelan CTPB dapat dimatangkan oleh salah satu zat di antara dua pilihan yaitu TDI atau IPDI. Di samping itu gas-gas hasil pembakaran propelan HTPB memiliki berat molekul yang relatif lebih rendah, sehingga berdasarkan Persamaan (2-2) Isp yang dihasilkan akan lebih tinggi.

**2 KINERJA PROPELAN PADAT KOMPOSIT DAN ASPEK DASAR YANG MEMPE-NGARUHINYA**

Persamaan Tsiolkovsky, menyatakan bahwa kinerja propelan pada dasarnya dapat dinilai dari kemampuan propelan untuk dapat menyebabkan atau membuat sebuah roket yang telah dirancang sedemikian rupa dapat meluncur/melesat pada suatu kecepatan tertentu.

Kecepatan tersebut juga lebih dikenal dengan "boost velocity" atau BV. Bentuk yang selengkapnya dapat dinyatakan dengan persamaan dasar sebagai berikut ini:

$$v = I_{sp} \cdot g \ln \left\{ \frac{m_0}{(m_0 - m_p)} \right\} \dots\dots\dots(2-1)$$

- dengan: v = kecepatan luncur roket;  
 Isp = impuls spesifik;  
 g = percepatan gravitasi;  
 m<sub>0</sub> = masa awal roket;  
 m<sub>p</sub> = masa propelan

Di sini impuls spesifik, Isp, adalah berkaitan dengan tinggi rendahnya energi yang dapat dihasilkan oleh sebuah propelan; sementara harga m<sub>0</sub> dan m<sub>p</sub> besaran yang memberikan aspek rasio masa tertentu yang akan berdampak langsung pada kemungkinan untuk melakukan pengurangan terhadap dimensi motor roket.

Adapun Isp lebih lanjut dapat dihitung berdasarkan rumus berikut ini:

$$I_{sp} = \sqrt{2\gamma/(\gamma-1)}(R_0/M)T_c[1-(p_e/p_c)^{(\gamma-1)/\gamma}] \dots\dots\dots (2-2)$$

atau

$$I_{sp} = 4,562 \sqrt{[k/(k-1)](R_0/M)T_c[1-(p_e/p_c)^{(k-1)/k}]} \dots\dots\dots (2-3)$$

dengan:

- γ = rasio panas spesifik;  
 k = koefisien isentropik nosel;  
 R<sub>0</sub> = konstanta gas universal atau = 8,31434 J/mol.OK;  
 M = masa molar dari gas-gas (sebagai hasil pembakaran);  
 T<sub>c</sub> = temperatur pembakaran;  
 p<sub>e</sub> = tekanan di eksit nosel;  
 p<sub>c</sub> = tekanan di tabung motor roket

Jadi, dari persamaan di atas terlihat bahwa Isp di samping bergantung kepada sifat-sifat/karakteristik enjineri motor roket seperti rasio tekanan eksit dan tekanan pembakaran, bergantung pula pada sifat gas hasil pembakaran yang akan mempengaruhi masa molar, M, rasio panas spesifik, γ, dan temperatur pembakaran T<sub>c</sub>.

Masa molar produk pembakaran seyogyanya serendah mungkin. Ini berarti bahwa propelan diusahakan agar sedapat mungkin mengandung banyak unsur-unsur yang dapat menghasilkan gas-gas dengan berat molekul yang ringan seperti hidrogen. Rasio panas spesifik harus setinggi mungkin agar diperoleh harga C<sub>p</sub> yang rendah, yakni C<sub>p</sub> yang dihasilkan oleh gas-gas monoatom;

di mana

$$C_p = [\gamma/(\gamma-1)](R_0/M) \dots\dots\dots(2-4)$$

sementara,

$$T_c = -(\Delta H/C_p) \dots\dots\dots(2-5)$$

di mana

(ΔH adalah panas reaksi yang dapat dihitung dari:

$$\Delta H(T) = \sum [n\Delta H_f^\theta(T)]_p - \sum [n\Delta H_f^\theta(T)]_R \dots (2-6)$$

n adalah fraksi mol zat.

Dengan demikian, beberapa persyaratan penting yang perlu diperhatikan dalam

meningkatkan kinerja propelan a.l; 1). Karakteristik energi yang tinggi; 2). Densitas propelan yang tinggi; 3). Konstanta laju/kecepatan pembakaran propelan yang tidak telalu sensitif terhadap pengaruh temperatur maupun tekanan.

### 3 KOMPONEN BAHAN-BAHAN

#### 3.1 Fuel-Binder Organik

Fuel-binder organik merupakan komponen bahan yang berwujud cairan yang terdiri dari fuel basis dan fuel kuratif, dan seringkali juga disertai dengan penambahan suatu plastisizer organik. Ketiga bahan ini sudah barang tentu haruslah memiliki sifat kompatibilitas tinggi pada pembentukan sistem polimerisasinya. Sehingga dengan demikian dapat diperoleh bahan polimerisasi komposit-binder dengan sifat fisis/mechanis yang baik.

Pada propelan polibutadien jenis fuel bindernya ada dua macam yaitu 1). CTPB sebagai fuel basis, sementara MAPO dan EPON sebagai fuel kuratif. MAPO dan EPON masing-masing akan bereaksi dengan CTPB dalam bentuk reaksi, imine (imine reaction) dan reaksi epoksi (epoxy reaction); dan 2). HTPB sebagai fuel basis, sementara TDI atau IPDI sebagai fuel kuratif. Apakah TDI atau IPDI keduanya bereaksi dengan HTPB berdasarkan NCO/OH equivalent ratio = 1.0/1.0. Adapun plastisizer organik yang dipakai saat ini adalah DBP (Dibutyl Pthalate).

#### 3.2 Bahan Isian (zat padat)

Bahan isian (solid contents) merupakan komponen bahan propelan yang berwujud padatan (solid crystal). Agar diperoleh kandungan isian padat yang tinggi dalam rangka mendapatkan tingkat energetik propelan yang maksimal, perlu diperhatikan ukuran serta distribusi butiran dari isian padat tersebut. Sementara kualitas dari isian padat sangat penting dalam menunjang perolehan propelan yang semakin energetik.

Isian padat yang digunakan sampai saat ini terdiri dari: 1) AP (Ammonium Perchlorate) yang berfungsi sebagai oksidator; 2) Serbuk Al (Aluminum) yang berfungsi sebagai fuel metalik; 3). Oksida besi ( $Fe_2O_3$ ) atau oksida tembaga (CuO) sebagai additives. Total isian padat ini adalah sekitar 80-85% dari berat total propelan.

### 4 UJI KINERJA PROPELAN

Data yang diperlukan dalam rangka pengembangan prestasi propelan lewat R & D modifikasi komposisi bahan-bahan, suatu uji kinerja perlu dilakukan. Ada dua jenis metoda uji kinerja propelan, yaitu Pertama, metoda gasifikasi yang menggunakan gassification chamber yang dilengkapi dengan venting system. Kedua, dengan metoda strand burning yang menggunakan alat strand-burner. Pada metoda-1, akan dihasilkan profil tekanan puncak (peak pressure) yang dapat dicapai dalam perioda waktu tertentu berdasarkan karakteristik laju dekomposisi bahan-bahan dari suatu formulasi propelan, sementara dari metoda-2 akan dapat diperoleh karakteristik laju dekomposisi hasil pembakaran propelan pada berbagai variasi tekanan uji. Untuk keperluan uji kinerja tersebut, haruslah digunakan suatu tabung motor roket standar sehingga komparasi hasil-hasil yang diperoleh dapat dibuat. Adapun sebagai contoh adalah sebagai berikut ini. Spesifikasi tabung motor roket standar untuk ukuran kecil a.l. adalah

- o panjang tabung,  $l = 24$  in;
- o diameter,  $\varnothing = 2$  in;
- o area throat,  $A_t = 1,156$  in<sup>2</sup>;
- o tekanan kerja  $P = 500$  psi

Spesifikasi propelan a.l., adalah

- o laju pembakaran,  $R_B = 0,447$  in/sec;
- o konstanta pembakaran,  $a = 0,2$ ;
- o eksponen tekanan,  $n = 0,5$ ;
- o densitas =  $0,061$  lb/in<sup>3</sup>
- o konduktivitas termal,  $k = 0,8 \times 10^{-4}$  kkal/sec.in.<sup>o</sup>K;
- o panas jenis spesifik,  $c = 0,3$  kkal/kg.<sup>o</sup>K

Adapun sebagai contoh hasil yang diperoleh pada uji kinerja dengan metoda-1 ditunjukkan pada Gambar 4-1, yang merupakan hasil percobaan yang dilakukan oleh Imperial Metal Industries Ltd., sementara Gambar 4-2, dan Gambar 4-3, hasil uji kinerja dengan metoda-2 yang dilakukan di laboratorium Jet Propulsion.

## 5 DISKUSI

Propelan sebagai sumber energi pendorong roket, yang dapat menghasilkan tekanan tinggi di ruang bakar (motor roket) adalah hal utama yang diinginkan. Agar hal ini tercapai, maka Pertama, komposisi bahan harus dapat menghasilkan temperatur pembakaran yang tinggi dengan produk pembakaran berupa spesies gas-gas berberat molekul rendah/ ringan. Kedua, proses pembakaran berlangsung dalam jangka waktu yang relatif singkat agar propelan tidak menjadi beban yang dapat mengurangi jarak jangkauan/ketinggian selama proses peluncuran berlangsung. Aspek temperatur tersebut dapat diwujudkan dari komposisi fuel bahan di mana sebagai reaktan memiliki panas pembentukan (positif) yang besar dan sebagai produk dengan panas pembentukan yang sekecil mungkin. Implikasinya ialah bahwa energi ikatan dari persenyawaan bahan-bahan yang ada (sebagai reaktan) dalam propelan haruslah sekecil mungkin, sementara produk pembakaran memiliki energi ikatan yang tinggi. Dengan demikian sesuai dengan Persamaan 2-6, perbedaan entalpi yang besar yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur yang tinggi bisa diperoleh.

Terkait dengan hal ini, maka polibutadien yang terdekomposisi pada temperatur 300°C, menjadi lebih baik dibandingkan dengan poliuretan yang terdekomposisi pada temperatur di atas 350°C. Sifat internal balistik  $R_B$  dan  $I_{sp}$  untuk propelan polibutadien dan poliuretan masing-masing adalah  $R_B$  (puB) = 0,30in/sec;  $R_B$ (pu) = 0,22in/sec dan pada tekanan,  $P = 1000$ psia,  $I_{sp}$  (puB) = 250sec;  $I_{sp}$ (pu) = 240sec.

Peningkatan kinerja propelan, juga tidak terlepas dari proses pembakaran propelan yang sudah barang tentu haruslah sesempurna mungkin. Untuk itu perlu oksigen yang cukup. Jadi, oksidiser AP yang berfungsi sebagai oksidator secara stoikiometri harus memenuhi atau secara prinsip lebih banyak fuel yang dapat dioksidasi mengingat lazimnya gas-gas berasal dari pembakaran propelan yang kaya fuel. Namun, mengingat untuk meningkatkan kinerja propelan juga harus dengan memaksimalkan  $T_c/M$  sedangkan oksigen mempunyai masa molar yang tinggi, maka ketepatan dari tingkat stoikiometri yang dapat menjamin kesempurnaan reaksi redoks antara fuel dan oksidiser amat diperlukan. Dengan demikian evaluasi yang seksama terhadap proses pembakaran dan ekspansi lanjutannya melalui nosel menjadi sangat diperlukan/dibutuhkan sehingga dapat dinilai keseimbangan antara temperatur pembakaran yang tinggi dan produk pembakaran dengan masa molar yang rendah.

Pemakaian polibutadien sangat menunjang tercapainya prasyarat seperti disebutkan di atas. Polibutadien yang merupakan salah satu produk sintesis elastomerik dapat diandalkan baik sebagai fuel maupun binder, di mana di samping mudah terbakar mampu menghasilkan spesies gas berberat molekul yang relatif rendah dalam jumlah yang besar. Sementara dengan daya serapnya terhadap isian padat yang tinggi dapat menghasilkan sistem propelan komposit yang memiliki sifat fisis/mekanis yang baik.

Tabel 5-1 memperlihatkan komposisi serta sifat-sifat bahan yang digunakan pada propelan polibutadien. Sementara pada Tabel 5-2 dan 5-3 masing-masing menunjukkan sifat-sifat propelan padat komposit dan sifat-sifat fisika dan kimia dari sejumlah oksidiser yang biasa digunakan.

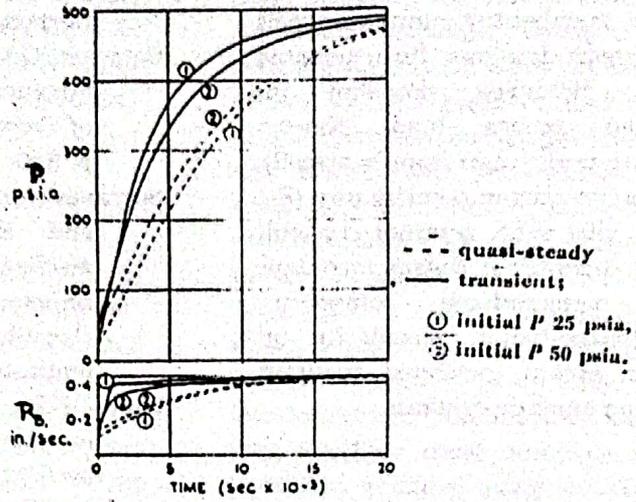
## 6 KESIMPULAN

Kinerja propelan polibutadien telah diuraikan melalui tulisan ini.

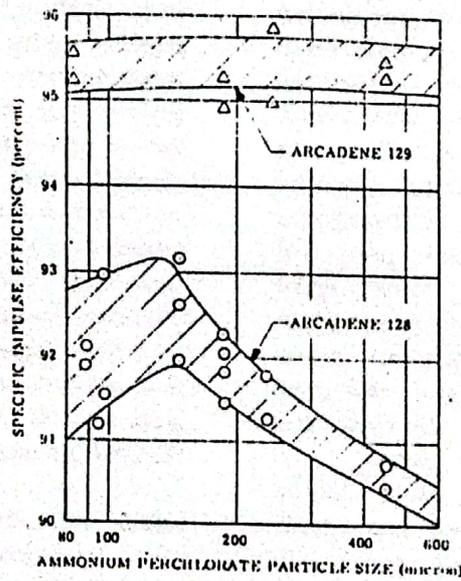
Mengingat Polibutadien sebagai suatu senyawa dari jenis elastomerik fuel-binder, maka dengan bahan-bahan isian padat yang dibutuhkan bagi berlangsungnya proses pembakaran propelan, secara mudah dapat membentuk suatu komposit propelan dengan kualitas fisis/mechanis yang baik. Sehingga propelan ini dikembangkan secara luas. Kinerja propelan yang terdiri dari impuls spesifik (Isp) dan laju/kecepatan pembakaran ( $R_B$ ) merupakan sifat-sifat internal balistik yang sangat diperlukan dalam menetapkan dan mengevaluasi komposisi/kombinasi bahan-bahan. Untuk itu uji kinerja baik secara gasifikasi maupun *strand burning* amat diperlukan.

#### DAFTAR RUJUKAN

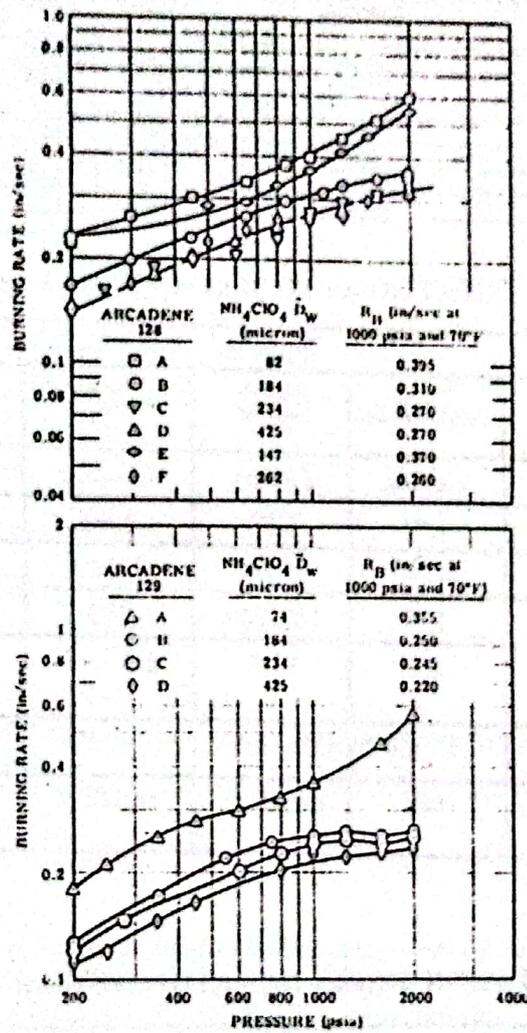
- Landsbaun, E.M., and Manuel P. Salinas, 1997, *Solid Propellant Specific Impulse Prediction*, The Aerospace Corporation, El Segundo, California.
- Satovich, G.V., 1995, Design Principles of Advanced Solid Propellants, *Journal of Propulsion and Power*, 11, No.4, p. 830.
- Satyanarayanan, R.C., Edward W. Price, and Robert K. Sigman, 1998, *Mechanism of Burning Rate Enhancement of Composite Solid Propellants by Ferric Oxide*, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Wallis, F.R., 1969, Initial Pressure Peaks in Rocket Motors and Interrupting by Venting, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 6, No.6, p. 270.



Gambar 4-1 : Profil tekanan vz kecepatan pembakaran roket standar ukuran kecil



Gambar 4-2 : Spesifik impuls vs ukuran partikel AP



Gambar 4-3 : Kecepatan pembakaran vs tekanan pada berbagai variasi ukuran partikel AP

Tabel 5-1: BAHAN-BAHAN YANG DIPAKAI PADA PROPELAN POLIBUTADIEN

No.	Nama Bahan	Rumus Kimia	B.M.	Sp.gr.	Fungsi
1.	CTPB(Carboxy Terminated Polybutadiene)	$\text{HOOCCH}_2(\text{C}_4\text{H}_6)_n\text{CH}_2\text{COOH}$	2794 (n=50)	0,900	Fuel Basis
2.	HTPB(Hydroxy Terminated Polybutadiene)	$\text{HOCH}_2(\text{C}_4\text{H}_6)_n\text{CH}_2\text{OH}$	2762 (n=50)	0,880	Fuel Basis
3.	MAPO (sebagai Imin Function)	$\text{C}_9\text{H}_{15}\text{N}_3\text{OP}$	213,00	0,920	Fuel Kuratip CTPB
4.	EPON (sebagai Epoxy Function)	$\text{C}_{15}\text{H}_{19}\text{NO}_4$	277,00	1,010	Fuel Kuratip CTPB
5.	TDI(Toluene Diisocyanate)	$\text{C}_9\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$	174,00	0,960	Fuel Kuratip HTPB
6.	IPDI(Isophoron Diisocyanate)	$\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_2$	222,00	1,040	Fuel Kuratip HTPB
7.	DBP(Dibutyl Phthalate)	$\text{C}_{18}\text{H}_{22}\text{O}_4$	178,00	1,045	Plasticizer
8.	AP(Ammonium Perchlorate)	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	117,50	1,950	Oksidiser
9.	Al(powder)	Al	26,97	2,700	Fuel Metallic
10.	Cupric Oxide	CuO	79,57	6,450	Burning Rate Increaser
11.	Ferric Oxide	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	159,70	5,120	Burning Rate Increaser
12.	Calcium Carbonate	$\text{CaCO}_3$	100,09	2,930	Burning Rate Suppressor

Tabel 5-2 : SIFAT-SIFAT PROPELAN PADAT KOMPOSIT

Sifat-Sifat	Propelan					
	80% $\text{KClO}_4$ , Asphalt, dan Rubber	$\text{NH}_4\text{NO}_3$ Cellulose Asetat	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$ Polyester	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$ PVC	60% $\text{NH}_4\text{ClO}_4$ Polyurethane Al	$\text{NH}_4\text{ClO}_4$ Polybutadiene
Prosesing	Ekstrusi	Casting	Casting	Casting	Casting	Casting
Density ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	1,8	1,55	1,88	1,64	1,72	1,74
Tekanan (Atm)	50-200	1-140	30-140	1-120	1-140	1-140
Isp (sec)	180	175	180-200	225	240	250
Kecepatan Pembakaran ( $\text{mm}/\text{sec}$ )	10 - 15	2,2	17,5	6,5 - 13	5 - 10	12
Exponent tekanan (n)	0,7 - 0,54	0,5 - 0,47	0,6 - 0,59	0,4 - 0,3	0,5 - 0,4	0,24 - 0,21
Sifat-Sifat Mekanik	good	fair	excellent	excellent	excellent	excellent

Tabel 5-3 : SIFAT-SIFAT FISIKA DAN KIMIA SEJUMLAH OKSIDISER

Oksidator	Berat Molekul	Kandungan Oksigen (% Berat)	Panas Pembentukan (Kcal / mole)	Hasil Pembakaran Senyawa	Berat Jenis ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )
$\text{LiClO}_4$	106,397	60,152	-106,000	LiCl	2,429
$\text{NaClO}_4$	122,454	52,265	- 92,180	NaCl	-
$\text{KClO}_4$	138,552	46,192	-103,600	KCl	2,520
$\text{NH}_4\text{ClO}_4$	117,497	34,040	- 69,420	$\text{N}_2$ , HCl, $\text{H}_2\text{O}$	1,950
$\text{LiNO}_3$	68,948	58,020	-115,280	$\text{Li}_2\text{O}$	2,380
$\text{NaNO}_3$	89,015	47,056	-101,540	$\text{Na}_2\text{O}$	2,263
$\text{KNO}_3$	101,104	39,56	-117,760	$\text{K}_2\text{O}$	2,109
$\text{NH}_4\text{NO}_3$	80,048	19,988	- 87,270	$\text{N}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$	1,725