

# **PENENTUAN KRITERIA MATERIAL ENERGETIK BARU UNTUK PENGEMBANGAN BAHAN PELEDAK, PROPELAN, DAN MESIU**

**Heri Budi Wibowo**  
Peneliti Pusat Teknologi Penerbangan, LAPAN  
e-mail: heribw@lapan.go.id

## **ABSTRACT**

This paper discusses the development of new energetic materials as explosives, propellants, and mesiu which have high energy but safe to use. New energetic materials are TNAZ, CL-20, ONC, FOX-7, and DAN. The character of energetic compounds, methods for preparation, and another aspects are analyzed and discussed. The selection is based on the availability and price; performance, sensitivity, ease of process, compatibility, chemical and thermal stability, mechanical behavior of temperature dependent, and the rate of combustion.

Based on energy values obtained, then the new compounds are discussed everything meets the criteria as a propellant, ammunition, and explosives. CL-20 has the greatest potential as a substitute for the NC because high explosive, high speed combustion, as well as high compatibility with another system. Second best potential is PETN. Sensitivity analysis and the availability of the method shows that CL-20 and PTEN has the greatest potential for development as energetic material for gunpowder, propellant, and explosives. Energetic materials for composite solid propellant is still unaccounted for material that could replace the AP.

Key words: *Material energetik, Mesiu, Propellant, Blasting material*

## **ABSTRAK**

Tulisan ini membahas perkembangan material energetik baru untuk menggantikan bahan-bahan peledak, propelan, dan mesiu yang memiliki energi tinggi namun aman digunakan. Bahan energik baru yang dibahas, TNAZ, CL-20, ONC, FOX-7, dan DAN. Hasil analisis diharapkan dapat diperoleh material yang memiliki potensi paling tinggi diterapkan menggantikan bahan propelan, mesiu, dan peledak yang telah ada. Analisis dilakukan dengan mengkaji karakter masing-masing senyawa serta proses pembuatannya untuk mendapatkan potensi energetiknya, kemudian dibahas beberapa aspek lain dan dibandingkan dengan standar minimal sebagai bahan propelan, mesiu dan peledak. Selain itu, juga dibandingkan dengan karakter material energetik yang telah dikembangkan. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan ketika menilai bahwa bahan-bahan tersebut aplikatif secara praktis adalah : ketersediaan dan harga; kinerja; sensitivitas; kemudahan proses; kompatibilitas; kimia dan stabilitas termal; perilaku mekanik suhu bergantung; dan laju pembakaran.

Berdasarkan nilai energi yang diperoleh, maka senyawa baru yang dibahas semuanya memenuhi kriteria sebagai bahan propelan, mesiu, maupun bahan peledak. Bahan CL-20 memiliki potensi paling besar sebagai bahan pengganti NC karena memiliki energi ledakan tinggi, kecepatan pembakaran tinggi, serta kompatibilitas yang tinggi. Potensi terbaik kedua adalah PETN. Analisis sensitivitas dan ketersediaan metode proses menunjukkan CL-20 dan PTEN memiliki potensi paling besar dikembangkan sebagai material energetik baik untuk mesiu, propelan, maupun sebagai bahan peledak. Khusus material untuk propelan komposit padat masih belum ditemukan material yang dapat menggantikan AP.

Kata kunci: *Material energetik, Propelan, Mesiu, Bahan peledak*

## 1 PENDAHULUAN

Selama bertahun-tahun telah dilakukan kegiatan untuk mengembangkan bahan energetik baru untuk aplikasi material eksplosif. Dalam 10 tahun terakhir, sejumlah bahan energetik baru telah dilaporkan berhasil disintesis. Beberapa bahan energetik baru yang telah dikembangkan dan menarik untuk diulas adalah TNAZ (1, 3, 3-trinitroazetidine); HNIW (hexanitro-hexazaisowurtzetane atau CL-20); ONC (octanitrocubane); FOX-7 (1,1-diamino-2,2-dinitroethene); serta DAN (dinitramide ammonium). Bahan-bahan tersebut diakui memiliki sifat energetik yang cukup tinggi.

Fokus penelitian material baru adalah seberapa jauh zat baru tersebut menawarkan keuntungan yang signifikan dibandingkan dengan bahan-bahan yang ada saat ini. Fokus kajian meliputi aspek aplikasi sebagai material energetik, aspek keselamatan kerja dan lingkungan yang ditimbulkan dalam proses produksi, serta stabilitas kimia dan karakterisasi pembakaran.

Namun demikian, dalam pemilihan material energetik baru tersebut, selain aspek kinerjanya, beberapa pertimbangan perlu diperhatikan, yaitu: *ketersediaan dan harga; sensitifitas termal dan mekanik; kemudahan proses; kompatibilitas; stabilitas kimia dan termal; dan sifat pembakaran.*

Tulisan ini mencoba menganalisis sejauhmana senyawa-senyawa baru tersebut memiliki potensi menggantikan senyawa yang telah lama digunakan sebagai bahan baku propelan, mesiu, dan bahan peledak dari beberapa aspek. Dengan demikian, diharapkan terdapat suatu peningkatan kinerja material energetik yang lebih kuat energinya, aman dalam pembuatan dan penyimpanan, serta murah.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan penggunaannya, material energetik secara luas digunakan untuk bahan propelan, mesiu, dan

bahan peledak. Kebutuhan akan bahan-bahan tersebut yang semakin meningkat menyebabkan pertumbuhan industri ketiga bahan tersebut semakin meningkat pula. Peningkatan yang sangat besar terdapat pada bahan peledak karena disamping untuk bahan militer, penggunaan bahan peledak sangat besar digunakan untuk pekerjaan konstruksi dan pertambangan yang semakin besar. Oleh karena itu, penggunaan bahan peledak tidak semata-mata didasarkan pada kekuatan ledakannya, tetapi lebih lagi perlu diperhatikan keselamatan pengoperasiannya, penyimpanan dan transportasi, serta keselamatan lingkungan.

Bahan-bahan baku untuk mesiu, bahan peledak, dan propelan pada dasarnya hampir sama, yaitu material-material energetik, dengan komposisi yang berbeda tergantung dari karakter pembakaran atau eksplosifitas yang diinginkan. Bahan propelan diinginkan memiliki waktu pembakaran yang relatif lebih lama dan eksplosifitas lebih rendah, bahan mesiu memiliki kecepatan pembakaran yang lebih cepat dan eksplosifitas sedang, sedangkan bahan peledak diinginkan memiliki kecepatan pembakaran sangat tinggi dan memiliki eksplosifitas yang tinggi.

Bahan-bahan yang biasa digunakan untuk propelan, mesiu, dan bahan peledak adalah TNT (2,4,6-Trinitrotoluene), RDX (Cyclo-1,3,5-Trimethylene-2,4,6 Trinitramine), HMX (*Cyclotetramethyl-Ene-tetra-Nitramine*), PETN (*Pentaerythrol Tetra-nitrate*), NTO (*3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one*), NG (*nitro glycerine*), TNT (*Trinitro Toluene*), AP (*Amonium Perchlorate*), NC (*Nitro-celullose*), dan AN (*Ammonium Nitrate*). Bahan-bahan tersebut diproduksi lebih dari tigapuluh tahun dan masih digunakan sampai saat ini karena memiliki kestabilan dan energi yang cukup handal.

Seiring dengan tuntutan kapasitas produksi yang besar, maka pencarian material-material energetik baru yang lebih besar energinya dan faktor keamanan

yang baik dilakukan. Beberapa material energetik baru dengan kekuatan yang sangat besar telah diper-oleh seperti TNAZ, CL-20, ONC, FOX-7, dan DAN. Namun upaya peningkatan tahapan menuju industrialisasi belum dilakukan karena masih perlu dikaji beberapa faktor penting lainnya.

**2.1 Aplikasi Bahan Energetik untuk Bahan Peledak**

Densitas padatan berperan penting terhadap kinerja bahan peledak. Densitas suatu senyawa berhubungan secara langsung dengan kecepatan ledakan dan energi pembentukan. Hubungan ini digambarkan oleh Kamlet-Jacobs dalam persamaan (1) dan (2) (Cooper PW, 1996).

$$D = A[NM^{0.5}(-\Delta H_d^0)]^{0.5}(1 + B\rho_0) \tag{2-1}$$

$$P_{CJ} = K\rho_0^2[NM^{0.5}(-\Delta H_d^0)]^{0.5} \tag{2-2}$$

Keterangan:

- D =kecepatan ledakan (mm/ms); kons-tanta A = 1,01, B =1.3;
- K =15,85;
- N =jumlah mol gas per gram bahan peledak;
- M =berat molekul rata-rata gas (g/mol);
- $\Delta H_d^0$  =panas peledakan (kal/gram);
- $\rho_0$  =densitas bahan peledak (g/cm<sup>3</sup>);
- $P_{CJ}$  =tekanan ledakan (kbar).

Karakteristik sensitifitas dipenga-ruhi oleh struktur kimianya. Modifikasi struktur kimia diperlukan untuk meng-hasilkan senyawa yang relatif tidak sensitif namun memiliki kandungan energi tinggi. Sensitifitas juga dipenga-ruhi oleh kombinasi sifat-sifat komponen penyusun bahan peledak.

**2.2 Aplikasi Bahan Energetik untuk Propelan Padat Komposit**

Parameter yang paling penting untuk formulasi roket propelan padat adalah impuls spesifik (Isp) dan karak-teristik pembakaran. Impuls spesifik adalah besarnya daya dorong dalam

waktu pembakaran dengan satuan detik. Persamaan untuk mendapatkan impuls spesifik dapat ditunjukkan pada per-samaan (2-3).

$$I_{sp} = K_1[K_cNM^{0.5}(-\Delta H_d^0)]^{0.5} \tag{2-3}$$

Keterangan

- $T_c$  = suhu di dalam ruang bakar,
- N = jumlah mol per satuan berat;
- M = berat molekul rata-rata gas-gas pembakaran, dan
- $k_1, k_2$  = konstanta.

Impuls spesifik akan tinggi jika panas reaksi cukup tinggi; produk propelan memiliki temperatur nyala yang tinggi; dan berat molekul rata-rata produk reaksi kecil.

Parameter penting lainnya selain impuls spesifik adalah kecepatan bakar yang nilainya tergantung pada tekanan ruang bakar, seperti ditunjukkan pada persamaan (2-4).

$$r = a p^n \tag{2-4}$$

Secara umum, laju pembakaran meningkat dengan kenaikan energi sistem. Jika eksponen tekanan yang terlalu tinggi ( $n > 0,7$ ), maka aplikasi praktis menjadi tidak layak, Walaupun dari sisi energi yang dihasilkan cukup menjanji-kan. Simbol r menunjukkan kecepatan pembakaran; a adalah sebuah konstanta; p adalah tekanan pembakaran, dan n adalah konstanta tekanan. Data Kinerja untuk roket propelan padat diberikan dalam Tabel 4. Impuls spesifik umumnya dibandingkan pada tekanan ruang 7 MPa, yang setara dengan 6.894 MPa. Propelan padat *Double-base* (DB) terutama terdiri dari Nitrogliserin dan Nitroselulose di-campur dengan beberapa aditif memiliki Impuls spesifik berkisar 2100-2300 sN/kg. Propelan DB memiliki kecepatan pem-bakaran rendah-sedang dengan tingkat  $r = 10 - 25$  mm/s pada 7 MPa dengan eksponen n tekanan = 0 - 0,3. Propelan DB relatif peka terhadap ledakan dan pembakaran bersuhu rendah.

### 2.3 Aplikasi Bahan Energetik untuk Bubuk Mesiu

Energi spesifik (gaya,  $E_s$ ) sering digunakan untuk membandingkan formulasi mesiu yang berbeda seperti ditunjukkan pada persamaan (2-5). Karakteristik bubuk mesiu disajikan pada Tabel 4-5.

$$E_s = N_G T_{ex} R_0 \quad (2-5)$$

Keterangan:

$N_G$  = jumlah mol gas;

$T_{ex}$  = suhu nyala api; dan

$R_0$  = konstanta gas ideal.

Makin rendah suhu pembakaran, makin rendah erosi dalam pembakaran atau nozel. Untuk suhu pembakaran di atas 3500 K, erosi dalam ruang pembakaran dapat menjadi kritis. Pada temperatur pembakaran di bawah 3000 K, erosi biasanya diabaikan. Efisiensi pembakaran yang baik jika semua komponen bubuk propelan menjadi gas molekuler.

## 3 METODOLOGI

Metodologi penelitian yang digunakan adalah *explanatory comparison*, yaitu penelitian terhadap beberapa bahan energetik, meliputi pengumpulan informasi mengenai karakter senyawa energetik dan cara pembuatan bahan energetik tersebut. Selanjutnya nilai besaran kinerja energi pembakaran,  $I_{sp}$ , dan energi spesifik dihitung dengan menggunakan persamaan-persamaan (2-1) sampai dengan (2-5) berbasiskan data-data kimia material tersebut. Berdasarkan hasil tersebut dianalisis sifat energetik senyawa yang bersangkutan dan kemudahan prosesnya. Selanjutnya

aspek-aspek keselamatan dan kestabilan dari mulai penyimpanan, pembuatan, dan transportasi serat lingkungan dianalisis berdasarkan karakter reaktifitas dan kestabilan senyawa tersebut dengan menimbang gugus-gugus fungsional yang terdapat dalam senyawa-senyawa energetik tersebut menggunakan prinsip efek induksi dan *steric hindrance*.

Material yang dikaji adalah material-material yang relatif baru ditemukan dan dipublikasikan dalam 5 tahun terakhir. Material baru tersebut baru dipublikasikan nilai energetiknya dan berhasil disintesis, namun belum diproduksi secara masal karena belum dikaji aspek kelayakannya untuk dilanjutkan ke arah industri. Material terpilih (TNAZ, CL-20, ONC, FOX-7, dan DAN) dianggap memiliki kinerja energetik yang sangat tinggi dibanding material yang selama ini sudah digunakan dan diproduksi masal (TNT, RDX, HMX, PETN, NTO, NG, TNT, AP, NC, dan AN). Hasil penelaahan terhadap material baru tersebut dibandingkan dengan material yang telah digunakan dan diproduksi secara masal.

## 4 PEMBAHASAN

### 4.1 Analisis Potensi Energetik

Untuk menilai potensi bahan baru yang dikembangkan, Tabel 4-1 memperlihatkan beberapa bahan eksplosif baru dan yang telah ada sebagai perbandingan. Perbandingan meliputi: *densitas, energi pembentukan, kandungan oksigen*. (Cooper PW, 1996). Terdapat tiga bidang utama aplikasi, yaitu: bahan peledak (HX), mesiu (GP) dan propelan roket padat (RP).

Tabel 4-1: SIFAT SENYAWA ENERGETIK BARU DAN LAMA

Nama	Nama kimia	Aplikasi	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	$\Delta G$ (kJ/mol)
<i>Senyawa Energetik yang sudah dikembangkan</i>				
TNT	2,4,6-Trinitrotoluene	HX	1.65	-45.4
RDX	Cyclo-1,3,5-trimethylene-2,4,6 trinitramine	HX; RP; GP	1.81	-92.6
HMX	Cyclotetramethyl- enetetranitramine	HX; RP; GP	1.96	-104.8
PETN	Pentaerythrol tetranitrate	HX	1.76	-502.8
NTO	3-Nitro-1,2,4-triazol-5-one	HX	1.92	-96.7
NG	Nitroglycerine	RP; GP	1.59	-351.5
NC	Nitrocellulose (13 % N)	RP; GP	1.66	-669.8
AN	Ammonium nitrate	HX; RP	1.72	-354.6
AP	Ammonium perchlorate	RP; HX	1.95	-283.1
<i>Senyawa energetik baru</i>				
TNAZ	1,3,3-Trinitroazetidine	HX; RP; GP	1.84	-26.1
CL-20 (HNIW)	2,4,6,8,10,12-(Hexanitro-hexaaza)tetracyclododecane	HX; RP; GP	2.04	-460.0
FOX-7	1,1-Diamino-2,2-dinitroethene	HX; GP; RP	1.89	-118.9
ONC	Octanitrocubane	HX	1.98	-465.3
ADN	Ammonium dinitramide	RP; HX; GP	1.81	-125.3

Berdasarkan nilai energi Gibbs-nya, maka dapat dianalisis nilai eksplosifitas senyawa yang bersangkutan. Energi Gibbs merupakan energi yang diperlukan oleh senyawa tersebut untuk terdekomposisi. Nilai negatif dari energi Gibbs menunjukkan bahwa semua senyawa dapat terdekomposisi secara spontan sehingga memiliki nilai eksplosifitas tinggi dan dapat dikatakan memiliki energi yang tinggi. Semakin besar nilai energi tersebut, maka dekomposisi akan menghasilkan energi yang semakin besar. Senyawa dengan nilai energi Gibbs sangat tinggi adalah PETN dan NC, oleh karena itu NC secara luas berkontribusi sangat besar untuk semua jenis propelan, mesiu, dan bahan peledak. PETN digunakan dalam jumlah lebih kecil karena memiliki kestabilan yang rendah. Bahan baru yang memiliki energi sangat tinggi adalah bahan ONC dan CL-20 sehingga memiliki potensi sebagai material energetik pengganti yang baik.

Bahan dengan kerapatan tinggi memberikan kenaikan kecepatan dan tekanan detonasi. Berdasarkan data tabel 4-1, CL-20 memiliki kerapatan tertinggi, memiliki kecepatan detonasi

tertinggi dengan nilai lebih dari dua kali lipat TNT. Bahan TNAZ memiliki kerapatan dibanding RDX dan HMX. Hal ini menunjukkan bahwa TNAZ dapat digunakan sebagai pengganti TNT dengan kinerja yang lebih baik karena relatif kurang sensitif.

FOX-7 sangat menarik sebagai bahan peledak yang tidak sensitif (*insensitive material, IM*) untuk menggantikan RDX, walaupun relatif lebih mahal dari sisi sintesis yang cukup kompleks dan sulit dikomersialkan. Namun demikian, FOX-7 memiliki potensi besar sebagai komponen dengan sifat IM yang tinggi. Dengan nilai densitas yang tinggi, maka semua senyawa energetik baru tersebut memiliki potensi digunakan sebagai bahan peledak yang baik.

Semua bahan energetik bisa diterapkan kedalam bahan peledak, bahan bakar roket (propelan), dan mesiu. Beberapa bahan cocok untuk suatu aplikasi sementara beberapa yang lain kurang cocok. Ketidak-cocokan ini disebabkan dari fungsi yang diinginkan. Misalnya untuk aplikasi bahan peledak dengan mempertimbangkan densitas, energi pembentukan dan kandungan oksigen.

Sementara untuk aplikasi bahan bakar roket (propelan) dengan mempertimbangkan sifat impuls spesifik dan laju pembakaran. Sedangkan untuk aplikasi mesiu penting untuk mempertimbangkan energi spesifik (Es). Masing-masing parameter ini masih tergantung pada parameter berikutnya. Atas dasar parameter yang ada maka beberapa bahan energetik sangat cocok dan beberapa yang lain kurang cocok. Bahan energetik baru merupakan bahan yang sudah ada namun dipakai untuk aplikasi yang baru.

Untuk analisis kekuatan atau energi peledakan, maka dilakukan dengan menghitung nilai energi spesifik dari senyawa energetik yang bersangkutan. Selanjutnya perhitungan nilai energi spesifik (Es) digunakan untuk menentukan kelayakan sebagai bahan mesiu.

Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4-2.

Nilai energi spesifik 1141 J/i g ditunjukkan oleh JA-2 dengan performa terbaik. JA-2, yang terdiri dari 59,5% NC, NG 15% dan 25% DGDN, memiliki energi mirip NC murni namun kemampuan plastisnya mirip plasticizer asam nitrat ester murni. Semi-Nitramine menggunakan NC sebagai pengikat matrik dan memasukkan pengisi bahan Nitramine menunjukkan kinerja yang lebih tinggi dari JA-2. Kandungan energi yang tinggi menyebabkan suhu pembakaran yang relatif tinggi (~ 4000 K).

Untuk menilai kinerja material energetik sebagai propelan, maka perhitungan nilai Isp dan r (kecepatan pembakaran) telah dilakukan dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 4-3.

Tabel 4-2: KARAKTERISTIK BUBUK PROPELAN

<b>Formulasi</b>	<b>Es (J/g)</b>	<b>Qex (J/g)</b>	<b>TE<sub>x</sub> (K)</b>	<b>MM (g/mol)</b>
<i>Conventional powders</i>				
Single-base A5020, 92 % NC (13.2 % N)	1011	3759	2916	23.98
Double-base JA-2, 59.5 % NC/15 % NG/25 % DGDN	1141	4622	3397	24.76
Triple-base M30, 28 % NC/22.5 % NG/47.5 % NIGU	1073	3980	2996	23.20
<i>HTPB formulations</i>				
30 % HTPB/70 % RDX	874	3702	2046	17.16
30 % HTPB/70 % HMX	867	3668	2034	17.19
30 % HTPB/70 % CL-20	930	4008	2286	17.99
30 % HTPB/70 % TNAZ	926	4020	2184	17.57
30 % HTPB/70 % ADN	915	3329	1935	17.58
<i>Semi-nitramine formulations</i>				
30 % NC/30 % NG/40 % RDX	1248	5700	3921	26.11
30 % NC/30 % NG/40 % HMX	1246	5681	3914	26.12
30 % NC/30 % NG/40 % CL-20	1224	5972	4042	27.46
30 % NC/30 % NG/40 % TNAZ	1239	5984	4016	26.95
<i>GAP formulations</i>				
30 % GAP/70 % RDX	1190	4116	2838	19.83
30 % GAP/70 % HMX	1181	4082	2816	19.83
30 % GAP/70 % CL-20	1280	4409	3332	21.64
30 % GAP/70 % TNAZ	1272	4420	3204	20.94
25 % GAP/75 % ADN	1294	5454	3604	23.15

Tabel 4-3: KARAKTER LAJU PEMBAKARAN BEBERAPA FORMULASI PROPELAN PADAT

Propelan	ISP (N s/kg)	r (mm/s)	N	Keterangan
Composite, AP/Al/HTPB/nitramine	2500-2600	6-40	0.3-0.5	High Existing
Composite (reduced smoke), AP/HTPB/nitramine	2400-2500	6-40	0.3-0.5	Reduced Existing
DB RP, NC/NG	2100-2300	10-25	0-0.3	Low Existing
AN RP GAP/AN/nitramine/plasticizer	2200-2350	5-10	0.4-0.6	Low
Nitramine RP, GAP/nitramine/AP/plasticizer	2300-2450	10-30	0.4-0.6	Low
ADN RP,	2400-2600			

Secara umum, propelan komposit relatif stabil namun cukup sensitif. Formulasi propelan berbasis HTPB pada umumnya menunjukkan sifat mekanik yang baik. Kelemahan propelan komposit terutama penggunaan AP yang menghasilkan gas HCl yang cukup korosif dan merusak lingkungan. Propelan performa tinggi biasanya mengandung bahan bakar aluminium karena memiliki suhu pembakaran tinggi dan oksidator AP. Aluminium yang terbakar menghasilkan aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang merusak lingkungan. Senyawa oksida tersebut dari sisi militer memudahkan dideteksi oleh radar. Bahan AND dan GAP memiliki kinerja yang masih lebih rendah dibanding AP-HTPB. Bahan tersebut memiliki eksplosifitas yang terlalu tinggi sehingga tidak baik digunakan sebagai propelan komposit.

Pengembangan propelan ditujukan untuk mendapatkan propelan tidak berasap, kinerja setara dengan propelan AP-Al (2600 ~ N s/kg). Selain itu, gas buang yang ramah lingkungan diperlukan. Propelan komposit biasanya memiliki komponen utama amonium perklorat, aluminium dan *Hydroxyl Terminated Polybutadiene* (HTPB). Mereka memiliki kinerja yang lebih tinggi dari propelan DB, dengan impuls spesifik 2500-2600 N/kg. Formulasi propelan komposit tanpa aluminium memiliki impuls spesifik

2400 -2500 sN/kg, dengan tingkat r adalah 6 - 40 mm/s pada 7 MPa dan tekanan eksponen n = 0.3 - 0.5. Sampai saat ini, belum terdapat material baru pengganti AP maupun HTPB sebagai bahan dasar pembuatan propelan komposit. Sampai saat ini, belum terdapat senyawa energetik baru sebagai pengganti AP, bahan-bahan energetik baru tersebut hanya sebatas sebagai aditif untuk menaikkan kecepatan pembakaran.

#### 4.2 Analisis Sensitifitas dan Kestabilan

Uji sensitifitas ada kaitannya dengan kestabilan karena senyawa yang sensitif akan memiliki kestabilan rendah. Hal ini berpengaruh terhadap kestabilan selama penyimpanan, proses pembuatan, transportasi, dan proses penggunaan lebih lanjut.

Material tidak sensitif ditandai dengan suhu dekomposisi tinggi; sensitivitas terhadap gesekan rendah; ekspansi volume cepat; tidak ada dekomposisi *autocatalytic*; morfologi kristal bulat; daya *adhesi* dengan binder yang baik; tidak ada *void* yang dibawa oleh gelembung pelarut atau gas; dan kemurnian bahan kimia tinggi.

Analisis sensitifitas dilakukan dengan melihat nilai sensitifitas terhadap gesekan, tekanan, dan titik deflagrasi (suhu dimana terjadi dekomposisi spontan). Tabel 4-3 memuat karakter sensitifitas

dari senyawa energetik tersebut. Senyawa CL-20 relatif sensitif terhadap pukulan dan gesekan. Berdasarkan nilai sensitifitas senyawa energetik yang dipelajari, maka senyawa dengan sensitifitas rendah adalah TATB dimana sensitifitas terhadap gesekan dan tekanan benturan rendah, dan titik dekomposisi yang tinggi sehingga mudah penanganan transportasi, penyimpanan, proses pembuatan, serta operasional. CL-20 walaupun memiliki energi yang tinggi, namun memiliki sensitifitas terhadap gesekan dan tekanan benturan sangat tinggi sehingga memerlukan penanganan khusus. Selanjutnya biaya yang diperlukan untuk operasional adalah tinggi dan katagori *high sensitivity*. Namun demikian, secara umum, senyawa baru memiliki sensitifitas yang lebih baik dibandingkan RDX dan HMX.

#### 4.3 Analisis Kelayakan Ekonomis

Analisis kelayakan ekonomis lebih didasarkan pada biaya pembuatan bahan energetik, ketersediaan metode proses dan kompleksitas tahapan sintesis, dan biaya operasionalnya. Semua senyawa baru memiliki gugus fungsional nitro sehingga memiliki bahan baku yang hampir sama, yaitu asam nitrat atau gas nitro. Ukuran kompleksitas dilihat dari tahapan proses kimia yang digunakan. Semakin kompleks reaksi yang terjadi,

maka biaya operasional pembuatan akan semakin mahal. Dengan demikian, biaya produksi dianalisis secara global dalam bentuk ukuran biaya proses (US \$/kg).

CL-20 saat ini tersedia unit produksi secara komersial kapasitas *batch* 50 kg. Sebagai produk mentah, CL-20 memiliki sensitivitas yang tinggi sebanding dengan PETN, dengan kemudahan proses sebanding. Biaya produksi CL-20 memiliki bahan baku dan kompleksitas tahapan proses yang cukup tinggi sehingga memunculkan biaya operasional dan biaya tetap yang tinggi. CL-20 memiliki kepadatan tertinggi, 2,04 g/cm<sup>3</sup>, stabilitas termal dan kompatibel dengan pengikat lain, CL-20 memiliki semua karakteristik yang dibutuhkan untuk aplikasi dalam ketiga sektor bahan energetik. Dengan demikian, biaya operasional yang tinggi akan sebanding dengan kinerja material tersebut. Sebanding dengan CL-20 adalah PETN dengan kompleksitas yang sama dengan CL-20. Stabilitas yang lebih baik serta ketersediaan unit produksi dengan kapasitas di atas 200 kg membuat PETN memiliki nilai komersial yang tinggi. Walaupun demikian metode proses PETN yang tersedia masih terbatas pada proses batch, sehingga kapasitas produksi maksimal masih terbatas.

Tabel 4-4: SENSITIFITAS MATERIAL-MATERIAL ENERGETIK

Material	Friction sensitivity (N)	Impact sensitivity (N m)	Deflagration point (°C)
TNT	353	15	300
RDX	120	7.4	230
HMX	120	7.4	287
CL-20	54	4	228
TNAZ	324	6	>240
TATB	353	50	>325
FOX-7	216	15-40	>240

Tabel 4-5:BIAYA PROSES PRODUKSI MATERIAL ENERGETIK KAPASITAS 200 KG

Material	US \$/kg
TNT	3,53
RDX	3,20
HMX	3,20
PETN	3,67
CL-20	3,71
TNAZ	-
TATB	-
FOX-7	-

Tidak seperti CL-20, TNAZ belum tersedia secara komersial. Rute sintesis saat ini lebih rumit dari proses pembuatan CL-20 sehingga biaya produksinya sangat mahal. Mahalnya biaya produksi menyebabkan belum memungkinkan untuk sintesis skala pilot. TNAZ memiliki kinerja antara HMX dan RDX. Dengan demikian, proses komersialisasi produk TNAZ masih cukup lama. FOX-7 belum diperoleh biaya produksi dan ketersediaan mesin yang ada.

DAN secara komersial tersedia mesin produksi kapasitas kecil (50 kg) dan biaya proses produksipun relatif lebih murah daripada produksi CL-20 dan PETN. DAN memiliki masalah stabilitas dimana mengkristal menjadi struktur berbentuk batang. Teknologi untuk menggiling DAN menjadi partikel bulat dan menstabilkan dalam proses produksi menjadi tantangan tersendiri dalam pengembangannya karena *product finishing* tersebut merupakan teknologi kunci yang membuat nilai lisensinya menjadi mahal. Untuk mendapatkan mesin produksi dengan kualitas sangat bagus (kristal seragam dan bulat) diperlukan biaya yang sangat mahal, setara dengan biaya produksi pembuatan PETN.

## 5 KESIMPULAN

Berdasarkan nilai energi yang diperoleh, maka senyawa baru yang dibahas semuanya memenuhi kriteria sebagai bahan propelan, mesiu, maupun bahan peledak. Bahan CL-20 memiliki potensi paling besar sebagai bahan pengganti NC karena memiliki energi

ledakan tinggi, kecepatan pembakaran tinggi, serta kompatibilitas yang tinggi. Potensi terbaik kedua adalah PETN.

Sensitifitas CL-20 yang lebih baik daripada NC dan NG memungkinkan menggantikan NG dan NC sebagai bahan propelan dan mesiu untuk yang akan datang. Hal ini dikarenakan NG memiliki keterbatasan masalah transportasi karena sensitifitas yang sangat tinggi terhadap gesekan maupun tekanan benturan sehingga pabrikasi NG harus dilakukan *insitu*. Sensitifitas terbaik ditunjukkan oleh senyawa TATB, yang relatif aman dari sisi proses produksi, penyimpanan, dan transportasi.

Berdasarkan ketersediaan mesin produksi, maka PTEN dan CL-20 sudah tersedia secara komersial. TATB, TNAZ, FOX-7 dan DAN memiliki keterbatasan mesin produksi yang tersedia. Nilai ekonomis PTEN dan CL-20 walaupun tinggi sepadan dengan kinerjanya yang tinggi sehingga PTEN dan CL-20 memiliki potensi yang sangat besar menggantikan NG dan NC untuk industri propelan, mesiu, dan bahan peledak yang akan datang.

## DAFTAR RUJUKAN

- Archibald TG, Gilardi RD, Baum K, George CF., 1990. *J. Org. Chem.* 55, 2920.
- Bircher HR, Mäder P, Mathieu J., 1998. *Properties of CL-20 Based High Explosives*, In: Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, p. 94.
- Bottaro JC., 1996. *Recent Advances in Explosives and Solid Propellants*, Chem. Ind. (London) 7, 249–252.

- Braithwaite PC, Hatch RL, Lee K, Wardle RB, Metzger M, Nicolich S., 1998. *Development of High Performance CL-20 Explosive Formulations*. In: Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe.
- Bunte G, Pontius H, Kaiser M., 1998. *Characterization of Impurities in New Energetic Materials*. In: Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe.
- Chan ML, DeMay SC., 1994. *Development of Environmentally Acceptable Propellants*, In: AGARD Conf. Proc. 559, Propulsion and Energetics Panel (PEP) 84th Symp., Aalesund, Norway.
- Chan ML, Turner A., 1996. *Challenges in Combustion and Propellants 100 Years after Nobel*. In: Kuo K (ed.), Proc. Int. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion, Stockholm, pp. 627-635.
- Chapman RD, Fronabarger JW, Sanborn WB, Burr G, Knueppel S., 1994. *Phase Behavior in TNAZ-based and Other Explosive Formulations*, DAAA21-93-C-0017, USA Gov. Rep.
- Cooper P.W., 1996. *Explosives Engineering*, Wiley-VCH, Weinheim.
- DeMay S, Braun JD, 1994. Use of new oxidizers and binders to meet clean air requirements. In: AGARD Conf. Proc. 559, Propulsion and Energetics Panel (PEP) 84th Symp., Aalesund, Norway, pp. 9-6-9-8.
- Doherty RM, Forbes JW, Lawrence GW, Deiter JS, Baker RN, Ashwell KD, Sutherland GT, 2000. *Detonation Velocity of Melt-cast ADN and ADN/nano Diamond Cylinders*. Proc. AIP Conference "Shock Compression of condensed Matter" American Inst. of Physics, 833-836.
- Fogelzang E, Sinditskii VP, Rgorshv VY, Levshenkov AI, Serushkin VV, Kolesov VI, 1997. *Combustion Behavior and Flame Structure of Ammonium Dinitramide*. In: Proc. 28th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, p. 99.
- Golfier M, Graindorge H, Longvialle Y, Mace H., 1998. *New Energetic Molecules and their Application in Energetic Materials*. In: Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, p. 3.
- Langlet A, Ostmark H, Wingborg N., 1997. *Method of Preparing Dinitramidic Acid and Salts Thereof*, Int. Patent Appl. PCT/SE/96/00976.
- Langlet A, Wingborg N, Ostmark H., 1996. *Challenges in combustion and propellants 100 years after Nobel*. In: Kuo K (ed.), Proc. Int. Symp. on Special Topics in Chemical Propulsion, Stockholm, pp. 616-626.
- Latypov NV, Bergman J, Langlet A, Wellmar U, Bemm U., 1998. *Tetrahedron* 54, 11525-11536.
- Latypov NV, Langlet A, Wellmar U., 1999. *New Chemical Compound Suitable for use as an Explosive, Intermediate and Method for Preparing the Compound*, World Patent WO99/03818.
- Löbbecke S, Bohn MA, Pfeil A, Krause H., 1998. *Thermal Behavior and Stability of HNIW (CL-20)*. In: Proc. 29th Int. Annual Conference of ICT, Karlsruhe, p. 145.
- Löbbecke S, Krause H, Pfeil A., 1997. *Propell. Explos. Pyrotech.* 22, 184-188.
- Nielsen AT, 1997. *Caged Polynitramine Compound*, US Patent 5 693 794.
- Nielsen AT, Nissan RA, Vanderah DJ, Coon CL, Gilardi RD, George CF, Flip-pen-Anderson J., 1990. *J. Org. Chem.* 55, 1459-1466.
- Östmark H, Bergman H, Bemm U, Goede P, Holmgren E, Johansson M, Langlet A, Latypov NV, Pettersson A, Pettersson M-L, Wingborg N, Vörde C, Stenmark H, Karlsson L, Hihkiö M., 2001. *2,2-Dinitroethene-1,1-diamine (FOX-7) - properties, analysis and scaleup*. In: Proc. 32nd Int. Conference of ICT,

- Karlsruhe, p. 26.
- Ostmark H, Langlet A, Bergman H, Wellmar U, Bemm U., 1998. In: *Proc. 11th Detonation Symp.*, Snowmass, CO, pp.18–21.
- Oxley J, Smith J, Zheng W, Rogers E, Coburn M., 1997. *J. Phys Chem A* 101, 4375–4383.
- Pak Z., 1993. *Some Ways to Higher Environmental Safety of Solid Rocket Propellant Application*. In: *Proc. AIAA/SAE/ASME/ASEE 29th joint Propulsion Conf. and Exhibition*, Monterey, CA, USA.
- Tartakovsky VA, Luk'yanov OA., 1994. *Synthesis of Dinitramide Salts*. In: *Proc. 25th Int. Annual Conference of ICT*, Karlsruhe, p. 13.
- Wardle RB, Edwards WW, 1998. Hydrogenolysis of 2, 4, 6, 8, 10, 12-hexabenzyl 2, 4, 6, 8, 10, 12-hexaazatetracyclododecane, *US Patent* 5 739 325.
- Wardle RB, Hinshaw JC, Braithwaite P, Johnstone G, Jones R, Poush K, Lyon VA, Collignon S., 1994. *Development of the Caged Nitramine Hexanitrohexaazaisowurtzitane*. In: *Proc. Int. Symp. Energetic Materials Technology*, American Defense Preparedness Association.
- Zhang M-X, Eaton PE, Gilardi RD., 2000. *Angew. Chem.* 112, 422–426.