



Warta

LAPAN

LEMBARAN TAMBAHAN MAJALAH LAPAN

NO. 51

TAHUN KE XXI

BULAN APRIL 1997

ISSN 0216-9754

DAFTAR ISI

	Hal
• KONSEP PEMILIHAN BAHAN BAKAR ROKET PROPELAN PADAT H. Loekman Satibi, Siti Prangili, Mashuda Jusup	1
• PENGARUH SUNSPOT TERHADAP IKLIM DENGAN PENGUJIAN HIPOTESIS Tatty Kurniaty	10
• ANALISIS GENANGAN BANJIR DAERAH SEMARANG DENGAN ERS - 1 SAR Wikanti Asriningrum, Hidayat Gunawan, Achmad Surkani H.	18
• POLA SIRKULASI ATMOSFER DAN KAITANNYA DENGAN KARAKTERISTIK SST DI WILAYAH PASIFIK Nurzaman Adikusumah, Bambang Siswanto, Hariadi TE, Ina Juani	27
✓ • HUBUNGAN SOLAR FLUKS DAN INDEKS GEOMAGNET DENGAN foF2 PADA SAAT AKTIVITAS MATAHARI MENJELANG MINIMUM Sity Rachyany, Habirun, Sarmoko Saroso, Mamat Ruhimat	36

DITERBITKAN OLEH :

LEMBAGA PENERBANGAN DAN ANTARIKSA NASIONAL

JL. PEMUDA, PERSIL No. 1, JAKARTA 13220, INDONESIA

Konsep Pemilihan Bahan Bakar Roket Propelan Padat

H. Loekman Satibi, Siti Prangili, Mashuda Jusuf *)

ABSTRACT :

This paper describes the concept of selecting solid propellant fuel, based on chemical properties requirement, ballistic, mechanical and physical properties of cured fuel having been confirmed through tensile strength, molecular weight, micro structure and glass transition temperature measurements. It is expected that the preparation of good quality solid rocket fuel can further be planned and conducted.

ABSTRAK

Tulisan ini membahas konsep pemilihan bahan bakar propelan padat berdasarkan pada sifat kimia, sifat-sifat balistik, mekanik dan fisik dari bahan bakar termatangkan yang telah dikonfirmasi melalui pengukuran-pengukuran kuat tarik, berat molekul, struktur mikro dan temperatur transisi gelas. Diharapkan bahwa selanjutnya preparasi bahan bakar roket yang baik dapat direncanakan dan dilakukan.

1. PENDAHULUAN

Motor roket atau mesin pancar gas adalah salah satu mesin kalor yang mengubah energi kalor (energi termal) menjadi energi mekanik, baik berupa gerakan translasi maupun rotasi.

Roket memperoleh energi termal dari reaksi pembakaran bahan bakar oleh oksidator. Oleh karena itu roket dituntut untuk mampu beroperasi di ruang hampa tanpa oksigen, maka roket harus membawa serta oksidator.

Sistem pembakaran terdiri dari tiga unsur yang biasanya digambarkan sebagai sisi-sisi segitiga yang dikenal sebagai segitiga pembakaran (combustion triangle). Unsur-unsur tersebut adalah bahan bakar (fuel) oksidator (oxidizer) dan tenaga aktivasi penyala (penyala mula/igniter). Gabungan bahan bakar dan oksidator inilah yang dikenal sebagai propelan atau bahan pendorong.

Energi thermal merupakan energi yang unik. Energi bentuk ini sangat berbau dalam arah. Tidak seperti energi potensial maupun kinetik. Energi thermal tidak mungkin dikonversikan secara sempurna ke dalam energi bentuk lain sesuai dengan pernyataan Nicolas Leonard Sadi Carnot dalam tulisannya berjudul "Sur la puissance motrice du feu", bahwa tidak ada mesin kalor yang berhasil dikembangkan sampai saat ini yang mampu mengubah energi thermal sepenuhnya menjadi kerja.

Prestasi kerja mesin diukur dengan membandingkan keluaran terhadap masukan. Pada mesin kalor, prestasi adalah perbandingan antara kerja yang dihasilkan dengan panas masuk. Tampak bahwa prestasi suatu mesin kalor ditentukan oleh mesin itu sendiri dan mutu bahan bakar yang digunakan. Pemilihan bahan bakar yang tepat akan memberikan prestasi mesin yang lebih baik.

*) Peneliti Pusat Propulsi & Energetik - LAPAN

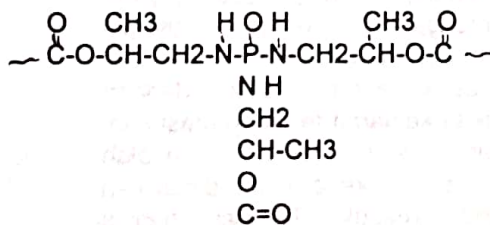
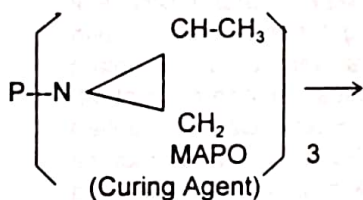
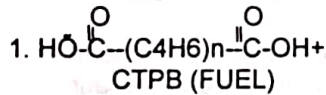
2. TEORI

2.1 Dasar Pemilihan

Agar supaya suatu senyawa kimia dapat digunakan sebagai bahan bakar roket padat, maka senyawa kimia tersebut harus dalam fasa cair yang kemudian penambahan bahan lain akan membentuk massa padat yang matang (cured). Dilihat dari struktur kimia, maka senyawa-senyawa yang memenuhi kriteria tersebut adalah senyawa-senyawa kimia yang mempunyai gugus fungsi minimum dua buah, sementara bahan tambahan untuk mengubahnya menjadi massa padat harus mempunyai gugus fungsi minimum tiga buah sehingga keduanya akan bereaksi membentuk struktur tridimensional yang berkembang ketiga arah dalam ruangan.

Merupakan suatu perjanjian bahwa senyawa kimia mempunyai gugus fungsi lebih rendah yaitu dua buah, disebut bahan bakar (fuel) dan senyawa yang mempunyai gugus fungsi lebih tinggi yaitu tiga buah atau lebih, lazim disebut reagent pematang (curing agent) atau pengeras (hardener). Aturan ini terlepas dari panjang rantai atau berat molekul dari kedua macam senyawa itu. Beberapa contoh reaksi pematangan adalah sebagai berikut :

a. Pematangan pada propelan polibutadien.



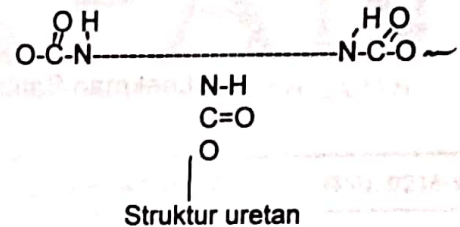
b. Pematangan pada Poliuretan



- HTPB
- PEG
- PPG

NCO

- Hardener R
- Hardener VL



Catatan :

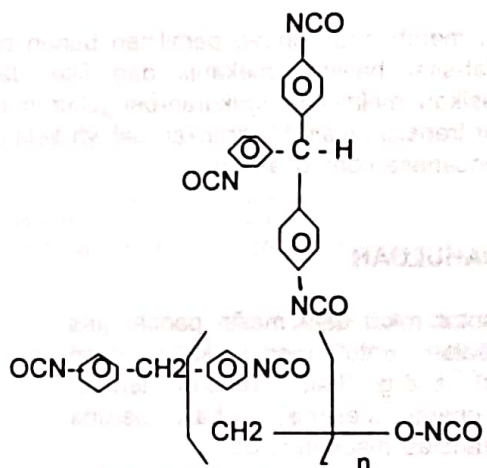
HTPB : Hydroxy Terminated

Poly Butadiene : $\text{HO}(\text{C}_4\text{H}_6)_n\text{OH}$

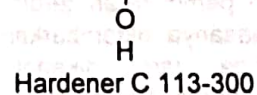
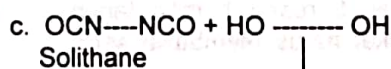
PEG : Poly Ethylene Glycol : $\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$

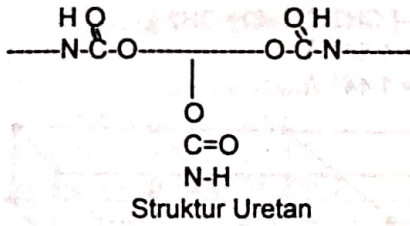
PPG : Poly Propylene Glycol : $\text{HO}(\text{C}_3\text{H}_6\text{O})_n\text{H}$

Hardener R : Triisocyanat 4,4

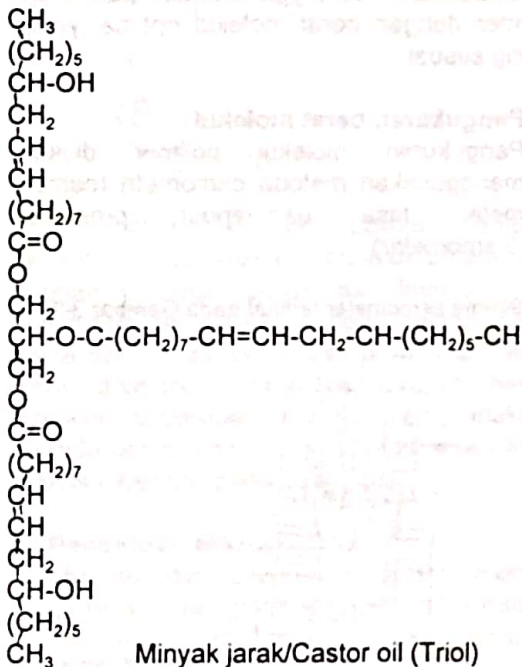
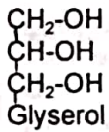
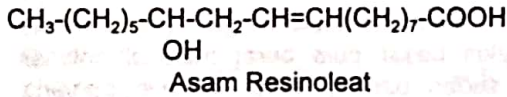


Hardener VL





Minyak jarak (CASTOR OIL) merupakan ester dari glyserol dan asma resinoleat



Hasil penelitian mengungkapkan bahwa hardener C113-300 adalah minyak jarak/castor oil. Hal ini terdeteksi menggunakan sinar spektra merah infra menyatakan bahwa kedua bahan tersebut menunjukkan kesamaan total. Perlu diketahui bahwa spektra merah infra adalah " Finger Italic Print " dari suatu senyawa (Gambar 2-1 dan 2-2).

Adanya gugus fungsi dan sekaligus jumlahnya dapat diketahui menggunakan spektrofotometer resonansi magnetik nuklir proton (^1H - NMR), seperti halnya penentuan mikrostruktur bahan bakar yang akan dibahas kemudian.

3. MUTU

Mutu bahan bakar roket padat dinilai dari tiga sifat penting yang dimiliki oleh propelan padat.

3.1. Sifat Balistik

Sifat Balistik yang penting adalah impuls spesifik atau I_{sp} . I_{sp} ini terutama ditentukan oleh temperatur pembakaran propelan. Makin tinggi temperatur pembakaran makin tinggi pula I_{sp} seperti terlihat pada rumus berikut :

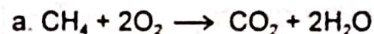
$$I_{sp} = \sqrt{\frac{T_c \cdot R}{M \cdot g} \left(\frac{2k}{k-1} \right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3-1)$$

$$\text{atau } I_{sp} \propto \sqrt{\frac{T_c}{M}} \quad \text{dimana}$$

T_c = Temperatur

Bahan bakar yang baik hendaknya mempunyai nilai kalor (heating value) tinggi sehingga menghasilkan gas hasil pembakaran temperatur tinggi. Hal ini selaras dengan mesin kalor pada umumnya

Sebagai gambaran, di sini diberikan perhitungan sederhana tentang reaksi pembakaran sempurna.



$$\begin{aligned}
 \Delta H_c &= \sum \Delta H_f \text{product} - \sum \Delta H_f \text{reactant} \\
 &= \Delta H_f \text{CO}_2 + 4\Delta H_f \text{H}_2\text{O} - 2\Delta H_f \text{CH}_3\text{OH} \\
 &= 2(-94,052) + (-57,7979) - 2(-57,04) \\
 &= -305,2156 \text{ kcal/ 2 mol} \\
 &= 4,76899 \text{ kcal/g}
 \end{aligned}$$

Dari contoh sederhana di atas dapat dikatakan bahwa bahan bakar yang baik hendaknya mengandung sejumlah besar atom-atom hidrogen dan kandungan oksigen sekecil mungkin. Sehingga dari nilai kalor, I_{sp} propelan akan mempunyai urutan sebagai berikut :

HTPB > CTPB > PPG based - PU > PEG based - PU

Impuls spesifik suatu propelan dapat ditentukan melalui uji statik motor roket standar.

3.2 Sifat Mekanik

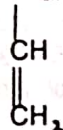
Sifat mekanik propelan padat ditentukan oleh bahan bakar yang telah matang (cured fuel), sehingga sifat tersebut (kuat tarik, elongation, kekerasan) ditentukan oleh panjang kisi-kisi jaringan tridimensional setelah terjadi cross link. Semakin panjang kisi, berarti semakin panjang rantai bahan bakar (biasanya merupakan senyawa polimer), maka :

- Besar pula jumlah motif monomer yang terangkat di dalam polimer, bahan bakar dan curing agent);
- Semakin rendah kuat tarik, dan kekerasannya;
- Semakin besar "elongation", semakin fleksibel masa padat yang terbentuk.

Keadaan di atas dapat juga dikatakan semakin besar kepadatan simpul, semakin besar masa padat tersebut. Panjang rantai polimer ditentukan oleh berat molekul, dan strukturnya, CTPB dan HTPB merupakan dua buah contoh yang baik untuk menjelaskan panjang rantai dan struktur.

Butadien-1,3 $CH_2=CH-CH=CH_2$

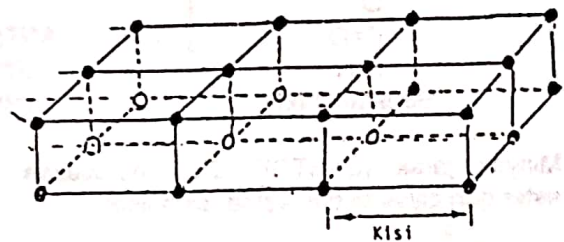
Struktur -1-2- $[CH_2-CH]_n$



Struktur 1-4- $[CH_2-CH=CH-CH_2]_n$

Jarak C-C = $1,54^{\circ} \text{ \AA}$

C=C = $1,44^{\circ} \text{ \AA}$



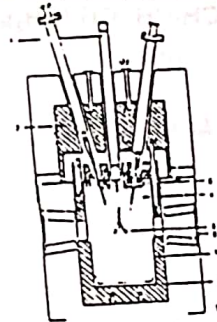
Semakin besar harga n (monomer) semakin besar pula berat molekul polimer dan sudah barang tentu semakin panjang rantai polimer.

Perlu diketahui bahwa semakin tinggi berat molekul polimer mentah semakin kental. Hal ini akan membatasi jumlah oksidator yang mampu ditampung (ditambahkan), sehingga dituntut pemilihan polimer dengan berat molekul optimal yang paling sesuai.

a. Pengukuran berat molekul

Pengukuran molekul polimer diukur menggunakan metoda osmometri (osmometer fase uap/vapour pressure osmometer).

Skema osmometer terlihat pada Gambar 3-1



1. Probe pengukur, 2. Blok Aluminium untuk pengontrol temperatur syringe, 3. Balok, 4. Busbu, 5. Termistors, 6. Celah, 7. Bejana tempat pelarut, 8. Sel pengukur (Aluminium)

Gambar 3-1 :SKEMA OSMOMETER

Hukum termodinamika yang berlaku untuk larutan polimer memberikan hubungan sebagai berikut:

$$\frac{\alpha}{C} = \frac{RT}{Mn} + RT (A_1C + A_2C^2 + \dots) \dots\dots (3-2)$$

α = tekanan osmotik;
 C = konsentrasi;
 R = konstanta gas ideal;
 T = temperatur absolut;
 A_i = koefisien viriel;
 M_n = berat molekul polimer.

Dalam praktek alat ini tidak mengukur tekanan osmotik tetapi mengukur tahanan (listrik) ΔR yang proposional dengannya, maka :

$$\frac{\Delta R}{C} = k \frac{RT}{M_n} + k RT (A_1 C + A_2 C^2 + \dots) \quad (3-3)$$

Dan pada konsentrasi mendekati nol maka :

$$\left(\frac{\Delta R}{C} \right)_{C \rightarrow 0} = k \frac{RT}{M_n} \text{ atau}$$

$$M_n = \frac{K}{\left(\frac{\Delta R}{C} \right)_{C \rightarrow 0}}$$

Untuk pasangan polimer dengan pelarut tertentu, maka hubungan antara ΔR dengan C dapat diukur dan konstanta K ditentukan dari larutan dengan pelarut yang sama dan solute dengan berat molekul yang telah diketahui. Hasil pengukuran berat molekul beberapa polimer menggunakan metoda osmometri dibandingkan harga berat teoritis diberikan pada Tabel 3 -1.

B. Penentuan Mikrostruktur

Mikrostruktur ditentukan dalam menggunakan pengukuran spektrofotometer resonansi magnetik nuklir proton (1H -NMR).

Bahan bakar roket umumnya merupakan senyawa polimer organik seperti misalnya polibutadiena. Monomer polibutadiena 1- 3, dapat tersusun menurut dua atau tiga cara seperti terlihat pada Tabel 3 - 2.

Penyusun utama senyawa organik adalah C, H dan kadang-kadang O dan N.

Unsur H (hidrogen) mempunyai tiga macam isotop masing-masing 1H , 2H , dan 3H (proton, deuterium dan trinium), namun kandungan 1H di dalam (natural abundance) mencapai 99,98 % dari seluruh isotop hidrogen yang ada (Tabel 3 - 3). Inti 1H bermuatan dan ber-spin ini (Gambar 3-2) sangat membantu para ahli kimia menentukan mikro-struktur senyawa organik dengan ditemukannya spektrofotometer resonansi magnetik nuklir, khususnya proton (Gambar 3-3).

Tabel 3-1 : HARGA BERAT MOLEKUL TEORITIS DAN HASIL PENGUKURAN MENGGUNAKAN METODE OSMOMETRI.

Polimer	M_t	M_{os}
HTPB - 21	1894	1920
HTPB - 22	3060	3240
HTPB - 23	2250	2240
HTPB - 24	2034	2050
HTPB - 24	1062	1200
HTPB - 26	2682	2820
HTPB - 32	2826	3060
HTPB - 33	2178	2330
HTPB - 34	2560	2750
HTPB - 35	1240	1220
HTPB - 36	1386	1390

M_t = Berat molekul teoritis

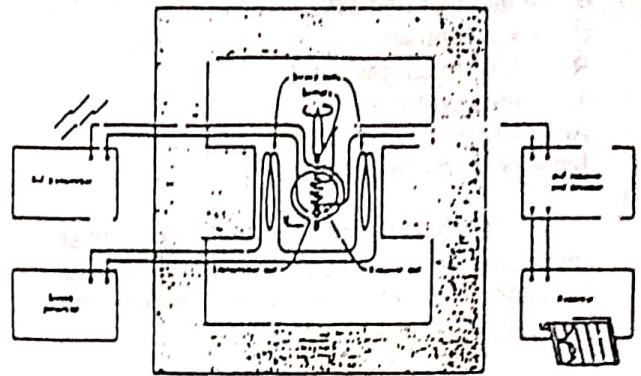
M_{os} = Berat molekul pengukuran menggunakan metode osmometri

Tabel 3-2 : STRUKTUR POLIBUTADIEN

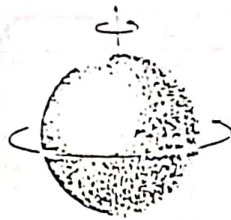
$CH_2-CH-CH=CH_2$ $\left[\begin{array}{c} -CH_2-CH- \\ \\ CH \\ \\ CH_2 \end{array} \right]_n$	butadien 1-3 struktur 1-2
$\left[\begin{array}{c} -CH_2-CH-CH_2 \\ \quad \quad \\ \quad \quad CH=CH \end{array} \right]_n$	struktur 1-4 cis
$\left[\begin{array}{c} -CH_2-CH-CH_2 \\ \quad \quad \\ \quad \quad CH=CH \end{array} \right]_n$	struktur 1-4 trans
$\left[\begin{array}{c} -[CH_2-CH-]_x- \\ \\ CH=CH-CH_2 \end{array} \right]_y - [CH_2-$	struktur campuran 1-2 dan 1-4

TABEL 3-3 : SIFAT-SIFAT MAGNETIK BEBERAPA INTI ATOM, YANG PENTING DALAM NMR.

Atom	Bil. Spin	Momen magnetik / nuclir magneton	Kandungan di alam
¹ H	1/2	2.79768	99.98
² H	1	0.85741	0.016
¹³ C	1/2	0.7023	1.1
¹⁴ H	1	0.4037	99.63
¹⁶ N	0	0	99.76
¹⁹ F	1/2	2.628	100
³¹ P	1/2	1.1305	100



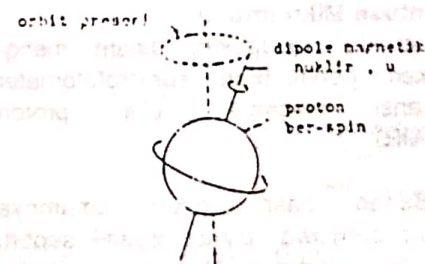
Gambar 3-3 : SKEMA 'HSPEKTROFOTO-METER



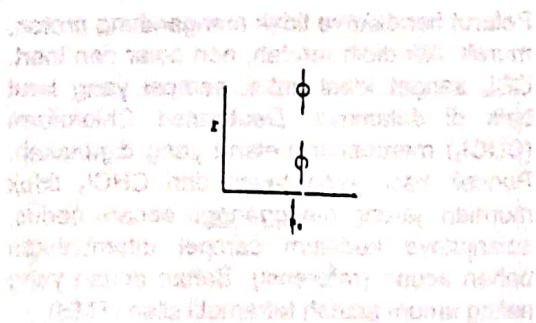
Gambar 3.2. MUATAN YANG BERPUTAR DALAM PROTON MEMBANGKITKAN "DIPOLE MAGNETIK".

Proton yang bermuatan dan ber-spin apabila diletakan di dalam medan magnet/ antara kutub-kutub magnet (magnetic gap) akan menghasilkan "dipole magnetik nuclear" yang berprosesi (Gambar 3-4). Banyaknya orientasi spin yang mungkin dimiliki oleh proton adalah dua macam yaitu searah dengan medan magnet bila proton berada dalam keadaan berenergi rendah (ground state), dan berlawanan arah dengan medan magnet apabila proton berenergi tinggi (excited state) (Gambar 3-5).

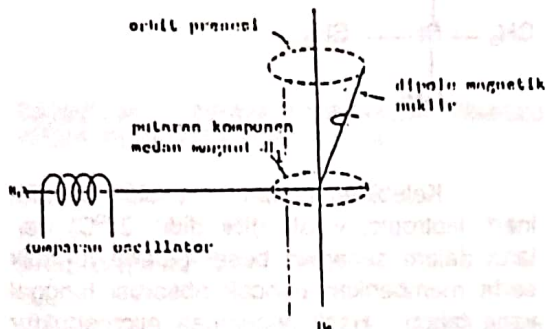
Proton energi rendah dapat berubah menjadi proton energi tinggi apabila menerima energi dari luar. Hal ini terjadi apabila proton berprosesi itu beresonansi dengan sumber yang berenergi lebih tinggi. Syarat utama resonansi adalah apabila frekuensi prosesis proton sama dengan frekuensi sumber. Frekuensi prosesis proton ditentukan oleh kuat medan magnet yang digunakan. Pada kuat medan 14000 gauss, frekuensi resonansi adalah 60 Mhz. Harga frekuensi resonansi ini merupakan daerah frekuensi radio dengan $\lambda = 5$ m. Jadi penyapuannya dilakukan dengan menggunakan frekuensi radio (RF) (Gambar 3-6).



Gambar 3-4 : PROTON YANG SEDANG BERPROSESI DALAM SUATU MEDAN MAGNET.

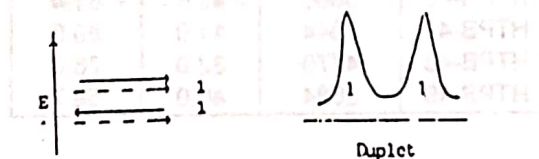


Gambar 3-5 : TINGKAT ENERGI SUATU PROTON



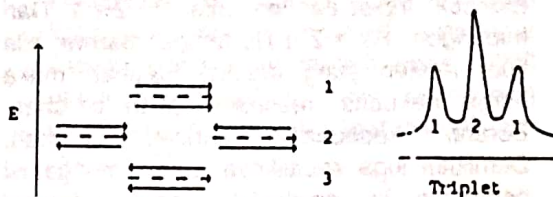
Gambar 3-6 : OKSILATOR MEMBANGKITKAN KOMPONEN MEDAN MAGNET YANG BERPUTAR, H_1

Resonansi proton juga dipengaruhi oleh kedudukan H dan lingkungannya dalam suatu senyawa walaupun perbedaannya hanya dalam rentang ppm (parts permillion) adanya fenomena "spin-spin coupling" antar suatu proton yang ditinjau dengan proton tetangga dapat dimanfaatkan untuk menentukan jumlah gugus fungsi suatu senyawa.



Bila proton tetangga 2 (dua) buah maka kemungkinan resonansinya digam-

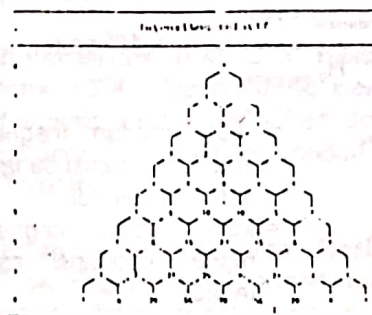
barkan dalam tingkat energi, E sebagai berikut :



Untuk proton tetangga 3 buah, distribusinya adalah sebagai berikut :



Dengan cara yang sama dapat diperoleh dengan menggunakan segitiga pascal atau ekspansi binomium Newton, seperti Gambar : 3-7



Gambar 3-7 : SEGITIGA PASKAL

Ekspansi binomium Newton :

$$(a-b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} a^{n-i} b^i \dots \dots \dots (3-7)$$

dimana

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} \dots \dots \dots (3-8)$$

Dengan mudah dapat dimengerti bahwa proton $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$ yang dikelilingi oleh dua buah proton tetangga akan memberikan peak (puncak) triplet dengan porsi 1 : 2 : 1. Dari hubungan $H_v = 2 u H_o$ tampak bahwa, bila kuat medan yang dipakai berubah maka harga frekuensi resonansi akan berubah. Berarti, kedudukan puncak berubah. Demikian juga sebaliknya. Untuk mengatasi persoalan ini dipakailah bahan referensi (acuan). Selanjutnya kedudukan puncak (pergeseran kimia, chemical shift) setiap jenis proton dinyatakan relatif terhadap puncak proton bahan acuan. Untuk sistem kuat medan tetap penyapuan oleh R.F (radio frekuensi) maka :

$$\delta = \frac{v(\text{sampel}) - v(\text{referensi})}{v(\text{referensi})} \times 10^6 \text{ ppm}$$

dimana

δ = pergeseran kimia, ppm

$v(\text{sampel})$ = frekuensi resonansi untuk bahan sampel

$V(\text{referensi})$: frekuensi resonansi untuk bahan referensi.

Untuk sistem R.F tetap, penyapuan oleh medan magnet maka :

$$\delta = \frac{H_o(\text{referensi}) - H_o(\text{sampel})}{H_o(\text{referensi})} \times 10^6 \text{ ppm}$$

dimana

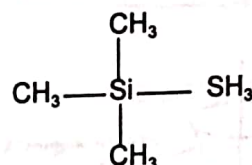
$H_o(\text{referensi})$ = kuat medan magnet di mana resonansi bahan referensi terjadi.

$H_o(\text{sampel})$ = kuat medan magnet di mana resonansi sampel terjadi.

Tata kerja dan percobaan, secara singkat adalah sebagai berikut :

Setelah sampel dibuat melalui proses polimerisasi, maka polibutadien yang diperoleh, sebagian kecil dilarutkan dalam pelarut yang sesuai misalnya dalam CCl_4 . Sampel dimasukkan ke dalam tabung gelas, diameter luar 5 mm. Sampel biasanya sebanyak 0,4 ml untuk sampel cair / sampel zat padat yang dilarutkan kedalam 0,4 ml pelarut.

Pelarut hendaknya tidak mengandung proton, murah, titik didih rendah, non polar dan inert. CCl_4 sangat ideal untuk sampel yang larut baik di dalamnya. Deuterated Chloroform (CDCl_3) merupakan pelarut yang digunakan. Puncak kecil yang tajam dari CHCl_3 tidak murian, jarang mengganggu secara serius, selanjutnya kedalam sampel ditambahkan bahan acuan (referensi). Bahan acuan yang paling umum adalah tetrametil silan (TMS).

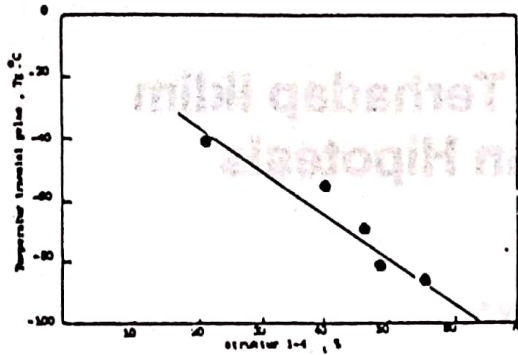


Kelebihan bahan ini adalah bersifat inert, isotropic, volatil (titik didih 27°C) dan larut dalam sebagian besar pelarut organik serta memberikan puncak absorpsi tunggal yang tajam. Hasil penentuan mikrostruktur menggunakan metode spektroskopi magnetik nuklir ($^1\text{H-NMR}$) untuk beberapa polibutadien disajikan bersama-sama dengan berat molekulnya hasil penentuan secara osmometri pada Tabel 3-4.

Tabel 3-4 : HASIL PENENTUAN MIKROSTRUKTUR POLIBUTADIEN DENGAN METODA SPEKTROSKOPI MAGNETIK NUKLIR ($^1\text{H-NMR}$)

Polimer	B.M.	Mikrostruktur (%)	
		1-4	1-2
HTPB-44	3960	42.6	53.8
HTPB-45	3690	55.9	44.1
HTPB-46	3800	48.6	51.4
HTPB-47	1044	11.0	89.0
HTPB-48	4770	32.0	78.0
HTPB-49	3884	40.0	59.7

Hubungan antara temperatur transisi gelas dengan mikrostruktur untuk polimer dengan berat molekul (kira-kira) hampir sama, diberikan oleh Gambar : 3-8



Gambar 3-8 : VARIASI TEMPERATUR TRANSISI GELAS (Tg) DENGAN STRUKTUR 1-4

4. KESIMPULAN

Dari uraian teoritis, hasil perhitungan pengamatan identifikasi dan pengukuran dapat ditarik kesimpulan bahwa :

- Bahan bakar harus merupakan senyawa kimia fase cair yang mempunyai gugus fungsi minimum dua buah.
- Bahan bakar hendaknya mempunyai nilai kalor tinggi atau mengandung oksigen serendah mungkin.
- Berat molekul bahan bakar sedemikian sehingga reaksi pematangannya akan memberikan panjang kisi-kisi yang cukup untuk membentuk massa padat yang lentur atau kenyal.

d. Untuk polibutadien maka temperatur transisi gelas menurun dengan bertambahnya mikrostruktur 1-4. Mengingat roket sering harus melewati ketinggian yang mempunyai temperatur transisi gelas lebih rendah pada -50°C maka bahan bakar harus mempunyai temperatur transisi gelas lebih rendah dari pada -50°C .

e. Adanya interaksi antara pengaruh berat molekul bahan bakar, mikrostruktur, jenis senyawa pematang (curing agent) maka pemilihan bahan bakar roket propelan padat harus ditinjau kasus per kasus.

5. DAFTAR PUSTAKA

- PEOSOK, RI, 1976 : *"Modern Methods of Chemical analysis"*, 2nd ed, John wiley and Sons, New York.
- SATIBI, L, 1984 : *"Synthese et etude de polybutadienes hydroxy telecheliques purliant combustibledde propelgols solides"* These Docter Ingenieu USTL, Montpellier.
- SILVERSTEIN, R.M, C.G, Bassler, T.C, Morrill, 1974 : *"spectrometic identification of organic compounds"* 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc New York, London - Sydney - Toronto.
- Zemansky, Abbott, Van Ness, 1975, *"Basic Engineering Thermodynamics"* 2nd edition International student edition, Mcgraw-Hill, Kogakusha, LTD, Tokyo).