

## UJIAN PEMBAKARAN PROPELAN ROKET PEPEJAL

MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR<sup>1</sup>, WAN KHAIRUDDIN WAN ALI<sup>2</sup>  
& AHMAD SAUFI MOHAMED ZAHRI<sup>3</sup>

**Abstrak.** Komposisi laker dan bahan api yang digunakan dalam fabrikasi propelan pepejal mempengaruhi kadar pembakaran. Kajian ini melihat pengaruh mengubah peratusan komposisi kedua-dua bahan tadi. Hasil ujikaji yang diperolehi, menunjukkan bahawa kadar pembakaran berkurangan dengan pertambahan peratusan laker apabila bahan api dimalarkan pada 29%. Bagaimanapun, apabila laker ditetapkan kepada 22% dan komposisi bahan api diubah-ubah, kadar pembakaran menunjukkan plot parabola dengan komposisi optimum bahan api pada 28.6%.

*Kata kunci:* Kalium nitrat; sulfur; aluminium; kadar pembakaran; roket pepejal

**Abstract.** The composition of lacquer and fuel used during fabrication of solid propellant affects the burning rates. This study shows the effect of varying the percentage composition of both items. Results obtained show that the burning rates reduce with increase in laker percentage when fuel was set constant at 29%. However, when lacquer was set constant at 22% and at varied fuel compositions, the burning rates show a parabolic plot with the optimum composition at 28.6% fuel.

*Keywords:* Kalium nitrate; sulfur; aluminium; burning rate; solid rocket

### 1.0 PENDAHULUAN

Apabila kita menyebut perkataan roket, pasti kebanyakan daripada kita akan terbayangkan pesawat *Space Shuttle* yang besar dan boleh membawa manusia meneroka ke angkasa raya ataupun roket *Apollo* yang telah berulang kali terbang ke luar atmosfera, menghantar satelit-satelit pelbagai saiz, mengorbit bumi bagi memenuhi tujuan dan matlamat yang pelbagai.

Aplikasi roket adalah banyak. Dari sebesar-besar *booster* roket ke angkasa lepas sehinggalah kepada sekecil-kecil roket peluru berpandu [1]. Boleh dikatakan hampir kesemua roket ini diperolehi dari negara luar terutama negara maju dan kos untuk memperolehnya boleh mencecah jutaan ringgit setiap satu. Oleh sebab setiap propelan roket ini terutama sekali propelan pepejal mempunyai jangka hayatnya yang tersendiri, adalah sangat merugikan sekiranya peluru-peluru berpandu yang berharga jutaan

---

<sup>1-3</sup> Jabatan Kejuruteraan Aeronautik, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia  
81310 Skudai, Johor

ringgit ini terbiar dan tidak dapat digunakan akibat propelan yang sudah tamat tempoh.

Penggunaan roket juga tidak hanya tertumpu kepada sektor ketenteraan dan aeroangkasa sahaja. Ianya juga boleh diaplikasikan secara meluas ke sektor komersial seperti alat bantuan kecemasan/keselamatan seperti penunjuk isyarat (flare), roket pembenihan awan dan tidak kurang juga dijadikan sebagai permainan hobi dan pertandingan yang mana sekali gus dapat mengembangkan daya kreativiti dan kemahiran sains individu [2].

Jenis roket dapat diklasifikasikan berdasarkan kepada jenis propelan yang digunakan. Perbezaan jenis propelan ini sangat bergantung kepada jenis kegunaan dan roket sama ada untuk tujuan penerokaan angkasa ataupun untuk tujuan pemulihan alam sekitar seperti pembenihan awan dan sebagainya. Roket yang lazim digunakan pada masa kini adalah roket bahan api kimia yang mana ianya terbahagi kepada tiga kategori utama, iaitu propelan pepejal, cecair dan hibrid.

## 2.0 ROKET PROPELAN PEPEJAL

Propelan pepejal merupakan sistem dorongan roket yang paling awal digunakan dengan serbuk hitam sejak kurun ke-13 di China [3]. Bahan api roket pepejal adalah terdiri daripada bahan api dan bahan pengoksida yang dicampurkan bersama terlebih dahulu sebelum dibentuk di dalam acuan ke bentuk pepejal.

Ramuan asas sesebuah propelan pepejal terdiri daripada tiga bahan utama, iaitu:

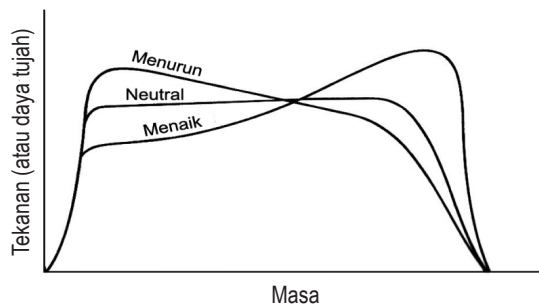
- (1) Bahan api
- (2) Bahan pengoksida
- (3) Bahan pengikat

Penggunaan bahan api dan pengoksida yang berbeza sangat bergantung kepada jenis aplikasi propelan tersebut. Sebagai contoh propelan yang bertindak sebagai pelonjak (booster) perlu mempunyai denyut tentu yang tinggi semasa berlepas manakala bagi roket biasa seperti roket pembenihan awan pula hanya memadai mempunyai denyut tentu yang rendah atau sederhana.

Bahan pengikat pula berfungsi untuk membentuk struktur atau sebagai matriks bagi mengikat ramuan propelan. Bahan pengikat selalunya terdiri daripada polimer. Pemilihan bahan pengikat yang sesuai memberikan kesan utama ke atas sifat mekanikal, keboleharapan, penyimpanan, jangka hayat dan kos sesebuah propelan. Sesetengah polimer akan melalui reaksi kimia yang kompleks, rangkaian silang (cross-linking) dan

rantai cabang semasa proses rawatan propelan. Polimer rantai silang yang lazim digunakan adalah polybutadiene-acrylic acid polymer (PBAA), polybutadiene-acrylic acid-acrylonitrile terpolymer (PBAN), hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB), carboxy-terminated polybutadiene (CTPB) dan polyurethane (PU).

Namun begitu, keperluan daya tujah bagi sesebuah roket juga berkait rapat dengan konfigurasi atau bentuk bijian propelan itu sendiri yang secara ringkasnya boleh dipecahkan kepada tiga jenis, iaitu yang memberikan hasil tekanan atau tujahan menaik, neutral dan menurun. Rajah 1 menunjukkan beberapa jenis konfigurasi propelan berdasarkan graf tekanan lawan masa.



**Rajah 1** Graf tekanan lawan masa bagi beberapa jenis konfigurasi propelan

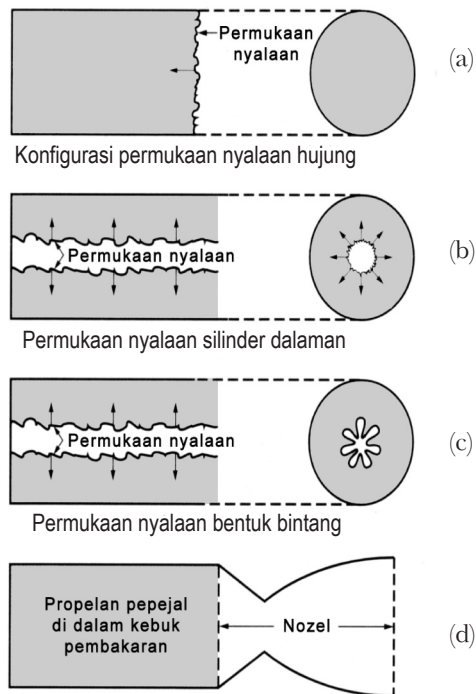
Konfigurasi propelan ini ditentukan oleh bentuk nyalaan propelan (lihat Rajah 2) yang mana ianya dimulakan oleh pencucuh pada permukaan bijian propelan dan selepas itu propelan akan terus menyala. Seseengah propelan direka untuk nyalaan hujung dan ada juga yang direka bentuk supaya pembakaran bermula dari arah pulur propelan bagi mendapatkan luas permukaan pembakaran yang lebih besar, sekali gus meningkatkan kadar pembakaran propelan tersebut.

Jadual 1 menyenaraikan kelebihan dan kekurangan propelan pepejal berbanding propelan yang lain.

### 3.0 PRINSIP DAN PERKAITAN ASAS PRESTASI PROPELAN

Penghasilan daya tujah hasil pembakaran di dalam kebuk pembakaran serasi dengan Hukum Keabadian Momentum dengan:

$$\begin{aligned} \text{momentum awal} &= \text{momentum akhir} \\ mu_1 + mv_1 &= mu_2 + mv_2 \end{aligned} \tag{1}$$



**Rajah 2** Beberapa contoh konfigurasi nyalaan propelan pepejal

**Jadual 1** Kelebihan dan kekurangan propelan pepejal

Kelebihan	Kekurangan
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Roket pepejal adalah ringkas, selamat dan lebih dipercayai. Tidak memerlukan pam dan sistem suapan yang kompleks.</li> <li>2. Propelan pepejal boleh disimpan dan stabil. Seseengah roket pepejal boleh disimpan berdekad-dekad sebelum digunakan.</li> <li>3. Propelan pepejal adalah mampat, dengan itu isi padu keseluruhan propelan adalah kecil berbanding sistem yang lain seperti roket propelan cecair.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Denyut tentu, <math>I_{sp}</math> adalah lebih kecil berbanding propelan cecair. Secara am denyut tentu bagi propelan pepejal adalah dalam lingkungan 200 ke 300 s.</li> <li>2. Setelah dinyalakan, kebiasaannya ianya tidak boleh dipadamkan.</li> <li>3. Sukar untuk dikawal kadar pembakaran bagi mendapatkan daya tujah yang dikehendaki.</li> </ol>

Berikut disenaraikan beberapa parameter penting yang perlu diketahui untuk menentukan prestasi propelan.

a) Kadar pembakaran propelan,  $r$

$$r = \frac{L}{t_b} \quad (2)$$

dengan  $r$  = kadar pembakaran  
 $L$  = panjang jalur propelan  
 $t_b$  = masa pembakaran

b) Kadar alir jisim gas pembakaran,  $\dot{m}$

$$\dot{m} = \rho_p A r \quad (3)$$

dengan  $A$  = luas permukaan pembakaran propelan  
 $\rho_p$  = ketumpatan propelan  
 $r$  = kadar pembakaran

c) Denyut tentu,  $I_{sp}$

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} = \frac{C}{g} \quad (4)$$

dengan  $C$  = halaju berkesan ekzos  
 $g$  = daya graviti  
 $\dot{m}$  = kadar alir jisim gas pembakaran

d) Tujah maksimum,  $F$

$$F = \dot{m}v_e \quad (5)$$

dengan  $\dot{m}$  = kadar alir jisim gas pembakaran  
 $v_e$  = halaju ekzos

e) Halaju ekzos,  $v_e$

$$v_e = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left( \frac{RT_c}{M} \right) \left[ 1 - \left( \frac{P_e}{P_c} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (6)$$

dengan  $R$  = pemalar gas universal  
 $M$  = berat molekul gas ekzos  
 $T_c$  = suhu kebuk pembakaran  
 $k$  = nisbah haba tentu gas pembakaran  
 $P_e$  = tekanan ekzos  
 $P_c$  = tekanan genangan dalam kebuk pembakaran

f) Pekali kadar alir jisim,  $C_m$

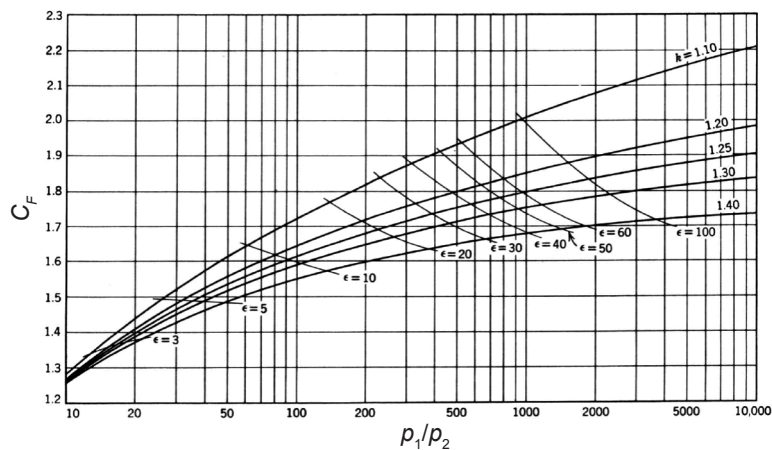
$$C_m = \frac{\dot{m}}{P_c A_t} \quad (7)$$

dengan  $P_c$  = tekanan genangan dalam kebuk pembakaran  
 $\dot{m}$  = kadar alir jisim gas pembakaran  
 $A_t$  = luas kerongkong nozel

g) Pekali daya tujah,  $C_F$

$$C_F = \frac{F}{P_c A_t} \quad (8)$$

dengan nilai  $C_F$  untuk aliran pengembangan optimum boleh didapati dari Rajah 3.



**Rajah 3** Pekali daya tujah sebagai fungsi kepada nisbah tekanan, nisbah luas nozel dan nisbah haba tentu untuk keadaan pengembangan optimum ( $p_2 = p_3$ ) [1]

h) Halaju ciri,  $C^*$

$$C^* = \frac{C}{C_f} = \frac{1}{C_m} = \frac{F}{mC_f} = \frac{P_c A_t}{\dot{m}} \quad (9)$$

## 4.0 PENYEDIAAN PROPELAN

### 4.1 Bahan Pengoksida

Untuk kajian ini, kalium nitrat telah dipilih sebagai bahan pengoksida. Kandungan kimia kalium nitrat pada semulajadinya mengandungi sumber mineral nitrat. Ia juga dikenali sebagai *saltpetre* (berasal dari perkataan latin, *sal petrae* yang bermaksud “garam batu” dan mungkin juga berasal dari perkataan *salt of Petra*) [4]. Kalium nitrat juga digunakan sebagai baja, propelan roket dan juga sebagai komponen bom asap. Ianya juga merupakan komponen pengoksida bagi serbuk hitam selain berfungsi sebagai bahan mentah bagi penghasilan asid nitrik.

Kalium nitrat dikelaskan sebagai bahan pembakar letupan rendah yang membawa sendiri bahan pengoksida untuk mudah terbakar tetapi tidak meletup. Bahan ini berbentuk kristal berwarna putih dan mempunyai ketumpatan jisim  $2.1 \text{ g/cm}^3$ , berat molekul  $101.1 \text{ g/mol}$  dan lebur pada suhu  $334^\circ\text{C}$ . Kalium nitrat sangat mudah menyerap lembapan (hygroscopic) oleh itu perhatian yang lebih harus ditumpukan kepada kaedah penyimpanan agar serbuk ini sentiasa berada dalam keadaan kering.

### 4.2 Bahan Bakar

#### 4.2.1 Aluminium

Aluminium merupakan salah satu logam metaloid di dalam jadual berkala unsur, iaitu logam yang menunjukkan ciri-ciri bukan logam. Ianya berwarna keperakan dan diperolehi dari bijih bauksit. Aluminium terkenal dengan sifatnya yang ringan, mudah dibentuk dan tahan hakisan. Mempunyai ketumpatan jisim  $2.70 \text{ g/cm}^3$  dan lebur pada suhu  $933.45 \text{ K}$  [5].

Serbuk aluminium juga terkenal sebagai bahan api pepejal yang digunakan secara meluas dalam penghasilan propelan komposit dan propelan CMDB (composite modified double-base) dan kebiasaannya hanya melibatkan kuantiti sebanyak 14% ke 18% dari berat propelan. Zarah aluminium yang kecil boleh terbakar di dalam udara dan ianya agak bertoksik jika disedut terus [6]. Memandangkan aluminium yang

akan digunakan adalah dalam bentuk serbuk sehalus 40  $\mu\text{m}$ , maka langkah-langkah keselamatan yang sewajarnya seperti memakai topeng pernafasan adalah penting bagi mengelakkan sebarang kemudaratan pada masa akan datang.

Ruang penyimpanan serbuk aluminium juga harus kedap dari udara dan lembapan memandangkan saiznya yang halus memungkinkan ianya teroksida dengan lebih mudah. Serbuk aluminium yang telah teroksida tidak akan bertindak balas semasa proses penyalaan propelan.

#### 4.2.2 Sulfur

Sulfur dalam bentuk asalnya adalah berbentuk pepejal kristal kuning. Ia juga dikenali sebagai belerang, sulfur secara semulajadinya boleh dijumpai dalam bentuk mineral sulfat dan sulfida. Ianya merupakan satu elemen yang penting dalam kehidupan. Dari segi komersial, sulfur digunakan sebagai baja [7] dan juga digunakan secara meluas sebagai serbuk peledak [8], racun serangga dan racun kulat [9]. Ianya juga merupakan salah satu ramuan penting dalam penghasilan serbuk hitam.

Pada suhu bilik, sulfur mempunyai ketumpatan jisim 2.08  $\text{g}/\text{cm}^3$  dan mula melebur pada suhu 388.36 K [10, 11]. Walaupun sulfur dioksida secara sedikit adalah selamat digunakan sebagai bahan tambahan makanan, tetapi pada kepekatan yang tinggi, ia bertindak balas dengan lembapan dan membentuk asid sulfurik. Dalam kuantiti yang tertentu boleh menjejaskan paru-paru, mata dan tisu badan yang lain.

#### 4.3 Bahan Pengikat

HTPB (Hydroxy-Terminated Polybutadiene) merupakan pilihan yang agak popular dalam penghasilan propelan pepejal kerana ianya dapat memberikan sifat kebolehbentukan yang baik di samping dapat bertindak sebagai bahan api tambahan. Toluene-2,4-Diisocyanate (TDI) dan Isophorone Diisocyanate (IPDI) pula boleh digunakan sebagai bahan pengeras atau *curing agent* bagi HTPB. Akan tetapi atas sebab kesukaran mendapatkan HTPB serta bahan pengerasnya (barang kawalan eksport oleh negara pengeluar) maka laker telah dipilih sebagai bahan alternatif menggantikan HTPB.

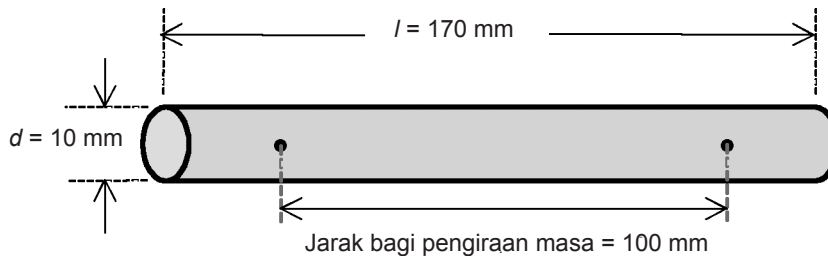
Laker adalah satu bahan yang lazim digunakan dalam industri perabot bagi mendapatkan permukaan yang cantik dan licin. Kebanyakan laker pada umumnya mengandungi resin yang dilarutkan di dalam larutan mudah kering seperti nafta, xylene, toluene, dan ketone, termasuk acetone. Laker pada keadaan suhu bilik adalah dalam bentuk cecair yang likat seperti gam kertas dan ia tidak memerlukan sebarang pengeras untuk mengeras. Laker dikelaskan dalam kategori bahan mudah terbakar dan memberikan kesan sampingan yang hampir sama jika terdedah dalam jangka



masa yang lama. Oleh sebab itu laker haruslah disimpan di tempat yang jauh dari sumber api dan haba.

### 5.0 PENYEDIAAN JALUR PROPELAN

Sebelum ujian kadar pembakaran dapat dilakukan, jalur propelan haruslah disediakan terlebih dahulu. Ini adalah penting dalam menentukan hasil pembakaran yang akan diperolehi adalah seragam dan berterusan. Penentuan dimensi propelan juga penting dalam usaha mendapatkan isi padu serta ketumpatan propelan yang mana akan digunakan dalam persamaan mencari kadar alir jisim pembakaran. Oleh itu dimensi propelan ditentukan terlebih dahulu bagi memudahkan pengiraan kadar pembakaran. Rajah 4 menunjukkan dimensi jalur propelan yang dihasilkan.



**Rajah 4** Dimensi propelan

Pada jalur propelan ini telah ditetapkan jarak untuk pengiraan masa sepanjang 100 mm. Pada titik mula dan tamat pembakaran akan ditanda bagi menempatkan suis fuis signal pemasa.

### 6.0 KAEDAH MEMBENTUK PROPELAN

Propelan yang dihasilkan melalui acuan termampat lebih tumpat kerana semua liang udara yang wujud antara bijian telah dikeluarkan dari propelan semasa proses mampatan. Kaedah ini telah menyebabkan kadar pembakaran menjadi lebih rendah tetapi jisim sistem yang terlibat adalah lebih tinggi berbanding propelan yang mempunyai isi padu yang sama tetapi dihasilkan melalui kaedah pembentukan [12]. Oleh itu untuk tujuan kajian ini, hanya kaedah mampatan sahaja yang akan dipraktikkan. Namun begitu langkah-langkah keselamatan yang lebih tinggi haruslah dipraktikkan bagi mengurangkan risiko kemalangan yang tidak diinginkan seperti pembakaran yang tidak disengajakan, kerana ianya melibatkan geseran antara ombok pemampat dengan dinding acuan.

Acuan yang digunakan adalah dari tiub aluminium berdiameter dalam 10 mm dengan ketebalan 1 mm. Bahagian dalam tiub ini kemudiannya akan dibalut dengan gulungan kertas sebagai pelapik antara propelan dengan dinding acuan bagi mengurangkan kesan geseran logam antara omboh dengan dinding acuan selain untuk memudahkan propelan dikeluarkan dari acuan.

Bagi tujuan mendapatkan taburan data yang lebih bermakna, beberapa set propelan perlu dihasilkan mengikut komposisi yang berbeza. Jadual 2 dan Jadual 3 menyenaraikan komposisi propelan yang telah dihasilkan.

**Jadual 2** Set propelan dengan komposisi laker yang berbeza

Set	Komposisi (%)				Berat (g)
	KNO <sub>3</sub>	Al	S	Laker	
1	54	29	17	20	21.461
2	54	29	17	22	22.144
3	54	29	17	24	24.385
4	54	29	17	26	22.242
5	54	29	17	28	23.138
6	54	29	17	30	22.827

Perhatikan di sini bagi set propelan dalam Jadual 2, komposisi bahan pengoksida dan bahan api ditetapkan pada nilai 100% bagi membolehkan kesan peningkatan bahan pengikat dilihat dengan lebih jelas. Komposisi propelan dalam Jadual 3 mengambil kira hasil terbaik dari Jadual 2, iaitu propelan dengan kandungan laker 22%. Dalam set ini, kandungan bahan api diubah. Begitu juga dengan komposisi set propelan dalam Jadual 3 di mana peratusan bahan pengoksida dan bahan pengikat bagi set komposisi terbaik dari Jadual 2 (54% KNO<sub>3</sub> + 29% Al + 17% S + 22% Laker) ditetapkan bagi membolehkan kesan perubahan peratusan bahan api dilihat dengan lebih jelas.

## 7.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Data-data pembakaran yang telah diperolehi dari ujian kadar pembakaran dapat menentukan prestasi pembakaran. Ujian kadar pembakaran ini penting kerana banyak lagi parameter-parameter prestasi yang boleh diperolehi seperti kadar alir jisim, daya tujah, denyut tentu dan sebagainya.

**Jadual 3** Set propelan dengan komposisi bahan api yang berbeza

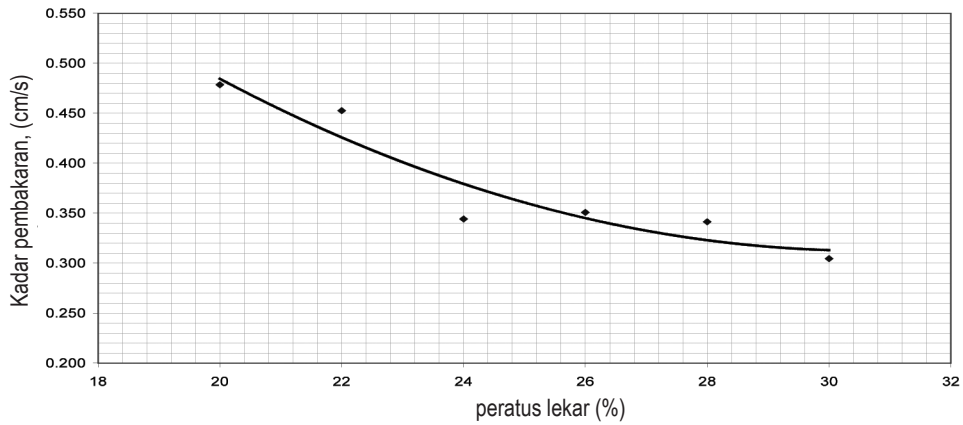
Set	Komposisi (%)			
	KNO <sub>3</sub>	Al	S	Laker
1	54	32	14	22
2	54	31	15	22
3	54	30	16	22
4	54	29	17	22
5	54	28	18	22
6	54	27	19	22
7	54	26	20	22



**Rajah 5** Pembakaran jalur propelan

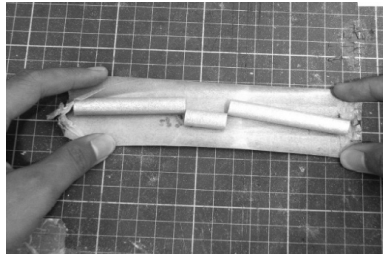
### 7.1 Kesan Perubahan Komposisi Laker Terhadap Kadar Pembakaran

Berdasarkan Rajah 6, didapati nilai kadar pembakaran semakin menurun apabila komposisi laker semakin bertambah. Berdasarkan pemerhatian terhadap sifat fizikal propelan, propelan dengan 20% laker didapati agak “berdebu” yakni meninggalkan kesan serbuk aluminium apabila disentuh. Ini menunjukkan bahawa bahan propelan tidak sepenuhnya diikat oleh bahan pengikat. Dalam jangka masa yang panjang, jisim propelan ini boleh menyusut dari jisim asal jika tidak disimpan dengan cermat walaupun perubahannya boleh dikatakan tidak begitu ketara. Akan tetapi ia akan tetap mempengaruhi kadar pembakaran propelan tersebut kelak. Ini kerana kadar pembakaran adalah berkadar langsung dengan ketumpatan propelan [6]. Namun begitu, sifat permukaannya yang porous itu juga secara tidak langsung membantu propelan dengan 20% laker ini mencapai kadar pembakaran yang tinggi kerana serbuk aluminium yang terbang bebas di udara sangat mudah untuk terbakar akibat kehadiran udara yang banyak di celah bijian propelan.



**Rajah 6** Graf kadar pembakaran lawan peratus laker

Propelan dengan 22% laker boleh dikatakan lebih unggul berbanding set propelan yang lain. Ini kerana selain mempunyai kadar pembakaran yang tinggi, ia juga mempunyai sifat fizikal yang agak baik. Boleh dikatakan tiada serbuk aluminium yang terlekat di tangan apabila disentuh selain sifat permukaan yang keras. Namun begitu, adalah lumrah bagi setiap permukaan yang keras memiliki sifat fizikal yang rapuh. Oleh itu penting untuk mengendalikan propelan ini dengan berhati-hati agar tidak mudah patah terutama sekali semasa proses mengeluarkan propelan dari acuan.



**Rajah 7** Propelan yang terpatah semasa proses mengeluarkannya dari acuan

Kejatuhan kadar pembakaran yang mendadak bagi propelan dengan 24% laker berkemungkinan besar disebabkan oleh ketumpatan propelan yang tinggi berbanding propelan yang lain. Berdasarkan Persamaan (3) dengan;

$$\rho_p \propto \frac{1}{r} \quad (10)$$

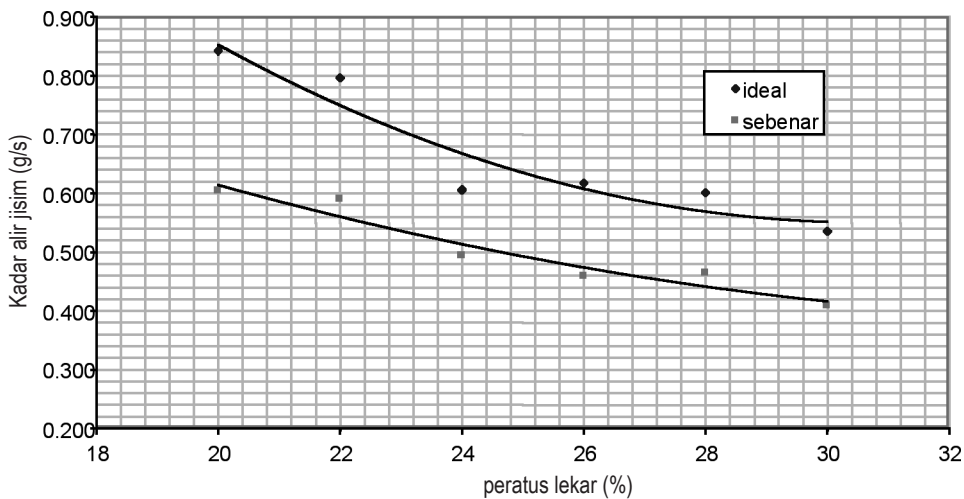
Ini bermakna semakin tumpat propelan tersebut, maka kadar pembakaran akan semakin berkurang. Dengan menggunakan persamaan ketumpatan unggul propelan;

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{f_{KN}}{\rho_{KN}} + \frac{f_s}{\rho_s} + \frac{f_{Al}}{\rho_{Al}} \tag{11}$$

- dengan  $f_{KN}$  = pecahan jisim Kalium Nitrat
- $f_s$  = pecahan jisim Sulfur
- $f_{Al}$  = pecahan jisim Aluminium
- $\rho_{KN}$  = ketumpatan Kalium Nitrat
- $\rho_s$  = ketumpatan Sulfur
- $\rho_{Al}$  = ketumpatan Aluminium
- $\rho_p$  = ketumpatan propelan

Satu graf perbandingan antara ketumpatan unggul dengan ketumpatan sebenar melalui nilai kadar alir jisim dapat diplotkan seperti dalam Rajah 8.

Dapat dilihat dengan jelas di sini bahawa ketumpatan unggul yang mana nilainya lebih tinggi berbanding nilai sebenar memberikan perestasi kadar alir jisim yang lebih tinggi.



**Rajah 8** Graf kadar alir jisim lawan peratus laker

## 7.2 Kesan Perubahan Komposisi Bahan Api Terhadap Kadar Pembakaran

Propelan dengan 22% laker diambil sebagai komposisi asas dan peratusan kalium nitrat juga dikekalkan pada 54%. Ini bagi membolehkan kajian terhadap perubahan bahan api dapat dilakukan dan hasil ujian ditunjukkan dalam Rajah 9, lengkung berbentuk kubah. Di sini nilai kadar pembakaran yang optimum adalah dalam lingkungan 28.6% aluminium atau sebanyak 17.4% sulfur, iaitu pada kadar pembakaran sebanyak 0.46 cm/s.

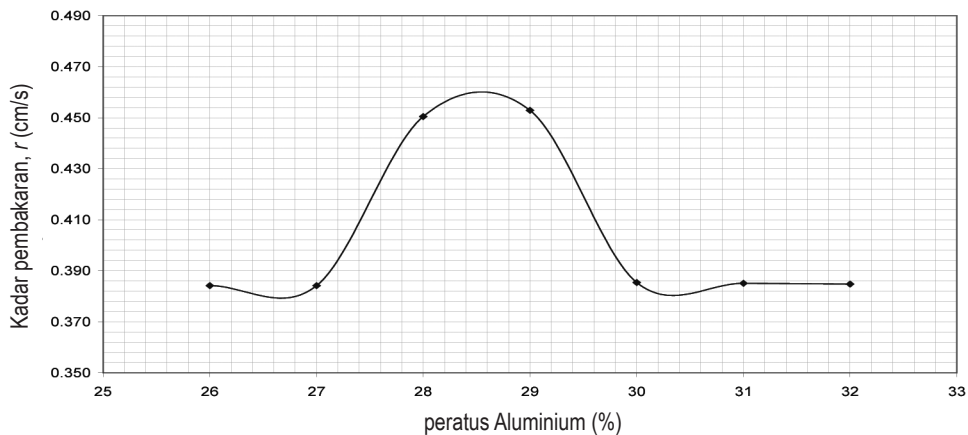
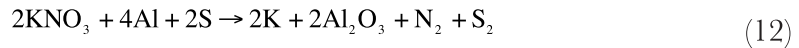
Nilai yang diperolehi ini adalah lebih menghampiri kepada nilai stoikiometri propelan yang memberikan nilai kadar pembakaran 0.453 cm/s iaitu pada komposisi:

$\text{KNO}_3$  : 54%

Al : 29%

S : 17%

Persamaan kimia stoikiometri adalah:



**Rajah 9** Graf kadar pembakaran lawan peratus aluminium

Nilai ini menunjukkan bahawa pembakaran yang optimum boleh dicapai pada keadaan keseimbangan, iaitu pada nilai stoikiometri. Ini bermakna sebarang penambahan bahan api melebihi tahap keseimbangan hanyalah sia-sia kerana berdasarkan Persamaan kimia (12), sebarang pertambahan bilangan mol pada bahan api tidak akan memberikan sebarang kesan positif kerana bilangan mol bahan pengoksida telah habis digunakan. Akan tetapi dalam ujian ini lebih mol bahan api ini masih lagi boleh terbakar dan sekali gus membantu mempertingkatkan prestasi propelan kesan dari kehadiran udara persekitaran.

### 8.0 KESIMPULAN

Daripada seksyen 7.2, nilai-nilai prestasi yang telah diperolehi adalah:

Kadar pembakaran,  $r$  : 0.453 cm/s

Kadar alir jisim,  $\dot{m}$  : 0.797 g/s

Berdasarkan persamaan (5), (6), (7), (8) dan (9), nilai-nilai berikut dapat diperolehi:

**Jadual 4** Senarai hasil pengiraan

Perkara	Nilai
Halaju berkesan ekzos, $C$ :	2067.948 m/s
Pekali daya tujah, $C_F$ :	2.589
Pekali kadar alir jisim, $C_m$ :	0.001252
Tujah maksimum, $T$ :	1.649 N

Dari keputusan yang telah diperolehi, dapat dilihat di sini bahawa nilai tujah maksimum yang diperolehi adalah terlalu kecil jika dibandingkan dengan nilai yang dijangkakan (iaitu melebihi 300 N). Perbezaan nilai ini berlaku memandangkan saiz serta bentuk propelan yang berbeza telah digunakan dalam ujikaji ini di mana saiz propelan yang lebih besar telah digunakan oleh Rizalman [12] iaitu silinder berlubang yang mempunyai saiz diameter luar dan dalam sebanyak 25.5 mm dan 13.0 mm serta panjang sebanyak 157 mm. Ini secara tidak langsung telah meningkatkan luas permukaan pembakaran propelan.

Berdasarkan Persamaan (3), kadar alir jisim berkadar terus dengan luas permukaan pembakaran manakala daya tujah pula adalah berkadar langsung dengan kadar alir

jisim dalam Persamaan (5). Corak konfigurasi nyalaan yang berbeza juga memainkan peranan penting dalam perbezaan nilai yang telah diperolehi di mana corak silinder berlubang telah digunakan oleh Rizalman [12] sementara bagi ujikaji ini menggunakan corak silinder padu.

## RUJUKAN

- [1] Braun, W. V. dan Orday, F. I. 1976. *The Rocket's Red Glare*. New York: Anchor Press,
- [2] Davenas, A. *et al.* 1993. *Solid Rocket Propulsion Technology*. France: Pergamon Press.
- [3] Mohammad Nazri Mohd Jaafar, Wan Khairuddin Wan Ali, dan Rizalman Mamat. 2009. *Pembangunan Roket Motor Bersaiz Kecil*. Penerbit UTM.
- [4] Wikipedia The Free Encyclopedia. 2009. Potassium Nitrate. Retrieved August 2009, from <http://en.wikipedia.org/wiki/Saltpetre>
- [5] Vargel, C., M. Jacques, dan M. P. Schmidt. 2004. Corrosion of Aluminium. Elsevier Ltd. p. 19–20.
- [6] Sutton, G. P. dan O. Biblarz. 2001. *Rocket Propulsion Element*, Edisi ke-7. John Wiley & Sons, MIT.
- [7] Komanirsky, L. A., R. J. Christopherson, dan T. K. Basu. 2003. Sulfur: Its Clinical and Toxicologic Aspects. *Nutrition*. 19(1): 54–61.
- [8] Yinon, J. 2000. Explosives. *Handbook of Analytical Separations*. Elsevier Science. p. 603–616.
- [9] Garthwaite, D. G. dan M. R. Thomas. 2004. *Pesticide Usage Survey Report 204*. Department for Environment, Food & Rural Affairs, York.
- [10] Scholar Chemistry. 2009. Sulfur. Retrieved August 2009, from <http://noshadow.cnc.net/table/S.shtmlwww>.
- [11] Matter-AntiMatter.com. 2009. Sulfur-AntiSulfur. Retrieved August 2009, from <http://www.matter-antimatter.com/sulfur-antisulfur.htm>
- [12] Rizalman Mamat. 2002. *Ciri-Ciri Propelan Roket Pepejal Berasaskan Kalium*. Universiti Teknologi Malaysia. Tesis Sarjana.