

VOT 71901

**MENGGAKI PRESTASI POTTASIMUM NITRAT SEBAGAI
BAHAN DORONG PEPEJAL UNTUK ENJIN ROKET.**

**MD.NIZAM BIN DAHALAN (KETUA)
PROF. MADYA DR MOHD NAZRI MOHD JAAFAR
PROF. MADYA IR. DR. WAN KHAIRUDDIN WAN ALI
RIZALMAN MAMAT
MOHD SHAIFUL AZMAN ABD. GHANI**

NO. VOT PENYELIDIKAN:

71901

**Jabatan Aeronautik & Automotif,
Fakulti Kejuruteraan Mekanikal,
Universiti Teknologi Malaysia,
81310, Skudai, Johor.**

2004

PENGHARGAAN

Bersyukur kehadiran Ilahi dengan limpah rahmat dan kurniaNya serta selawat buat Junjungan Besar Nabi Muhammad S.A.W, keluarga dan para sahabatnya.

Dengan lafaz Alhamdulillah dan syukur nikmat dengan kehendakNya serta keizinanNya, projek ini “ Mengkaji Prestasi Pottasium Nitrat sebagai Bahan Dorong Pepejal untuk Enjin Rocket” dapat disiapkan. Semoga hasil kajian ini menyumbangkan kebaikan dan memberi ilmu pengetahuan kepada semua disamping dapat diperkembangkan lagi supaya negara tercinta ini tidak ketinggalan dalam teknologi ini.

Para penyelidik projek ini ingin merakamkan penghargaan dan ucapan terima kasih yang tidak terhingga kepada semua pihak yang terlibat dalam usaha menyiapkan projek ini terutama Pusat Pengurusan Penyelidikan (RMC), Universiti Teknologi Malaysia di atas geran penyelidikan melalui vot 71901 untuk menjalankan kajian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada pengurusan Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia kerana memberikan sokongan dalam menjayakan projek ini.

Juga diucapkan terima kasih kepada sesiapa jua yang terlibat secara langsung ataupun tidak dalam penghasilan projek ini, semoga dirahmati selalu.

ABSTRAK

Projek ini adalah untuk membangun dan mengkaji bahan dorong roket pepejal yang merangkumi ujian prestasi dan proses pengeluaran. Bahan dorong roket pepejal ini dihasilkan dengan menggunakan potassium nitrat sebagai bahan pengoksida dan sukros sebagai bahan api. Bahan dorong ini dihasilkan dengan menggunakan kaedah acuan termampat. Melalui kaedah penyediaan ini, didapati bahawa bahan dorong yang dihasilkan lebih stabil dan seragam. Terdapat dua ujian penting yang telah dilakukan bagi mendapatkan ciri-ciri bahan dorong yang dihasilkan iaitu ujian kadar pembakaran dan ujian daya tujah statik. Ujian kadar pembakaran pada tekanan atmosfera dilakukan dengan menggunakan bahan dorong yang mempunyai nisbah kandungan bahan pengoksida-bahan api yang berbeza-beza. Melalui ujian pembakaran ini, nisbah campuran yang optimum dapat diperolehi. Melalui ujian daya tujah statik, beberapa parameter penting yang mencirikan prestasi bahan dorong telah diperolehi. Daya tujah yang dihasilkan oleh motor roket dapat diperolehi terus daripada ujian ini. Hasil dan ujian daya tujah statik, didapati bahawa daya tujah maksimum yang dihasilkan sangat bergantung kepada nisbah kandungan bahan pengoksida-bahan api bagi bahan dorong. Berdasarkan bahan dorong yang dihasilkan dengan nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api (65/35), didapati bahan dorong ini dapat menghasilkan daya tujah maksimum melebihi 300 N dengan catatan denyut jumlah 150.04 Ns dan denyut tentu 154.8 s. Berdasarkan data prestasi yang diperolehi, didapati bahawa bahan dorong ini mempunyai ciri-ciri bahan dorong yang baik dan berpotensi untuk dibangunkan sebagai bahan dorong bagi sebuah kenderaan pelancar.

Penyelidik :

Md.Nizam Bin Dahalan (Ketua)
Prof. Madya Dr Mohd Nazri Mohd Jaafar
Prof. Madya Ir. Dr Wan Khairuddin Wan Ali
Rizalman Mamat
Mohd Shaiful Azman Abd. Ghani

E-mail : nizam@fkm.utm.my
Tel. No. : 07-5534692
Vote No. : 71901

ABSTRACT

Research and development on solid rocket propellant were carried out extensively on the whole process of production and performance testing. Solid rocket propellant was produced by using potassium nitrate as oxidiser and sucrose as organic fuel. Press-moulding method was selected to produce the propellant. Based on experiments, it was found that the compressed moulding method gives more uniform and stable propellant compared to the other method of preparation. Propellant burning rate test and static thrust test were carried out in order to determine the characteristic of solid propellant. Burning rate test was conducted on the standard strand burner test rig under atmospheric pressure. The effect of oxidizer and fuel composition on burning rate was studied. It was found that the burning rate was influenced by oxidizer-fuel (O/F) ratio. There are several characteristic parameters of solid propellant that could be found from the static thrust test. The thrust produced by the rocket motor was measured directly from static thrust test. Based on the propellant with O/F ratio of 65/35, the thrust produced was more than 300 N with total impulse of 150.04 Ns and specific impulse of 154.8 s. From experiments, it was found that the potassium nitrate based solid propellant has good characteristics and has the potential to be develop further as propulsion system for a launch vehicle.

Key researchers :

Md.Nizam Bin Dahalan (Head)
Prof. Madya Dr Mohd Nazri Mohd Jaafar
Prof. Madya Ir. Dr Wan Khairuddin Wan Ali
Rizalman Mamat
Mohd Shaiful Azman Abd. Ghani

E-mail : nizam@fkm.utm.my
Tel. No. : 07-5534692
Vote No. : 71901

KANDUNGAN

PERKARA

MUKA SURAT

PENGHARGAAN ABSTRAK

ii

iii

BAB I PENGENALAN

1

1.1 Pengenalan

1

1.2 Objektif Penyelidikan

2

1.3 Skop Penyelidikan

3

1.4 Kaedah Penyelidikan

3

BAB II KAJIAN LITERATUR

6

2.1 Klasifikasi Rocket

6

2.2 Rocket Propelan Pepejal

8

2.3 Prinsip Asas Pendorongan Rocket

12

2.4 Analisis Pembakaran Propelan Rocket Pepejal

19

2.4.1 Formula Kimia dan Nisbah Campuran

22

2.4.2 Haba Tentu Produk Pembakaran

26

2.4.3 Suhu Nyalaan Adiabatik

34

BAB III	TEKNIK PENYEDIAAN PROPELAN	38
3.1	Pottasium Nitrat	38
3.2	Sukros	40
3.3	Penyediaan Bahan Asas	41
3.3.1	Mengering	41
3.3.2	Mengisar	41
3.3.3	Mencampur	42
3.4	Proses Penyediaan Propelan	42
3.4.1	Kaedah Pembentukan	43
3.4.2	Kaedah Acuan Termampat	43
BAB IV	KADAR PEMBAKARAN PROPELAN	45
4.1	Pengenalan	45
4.2	Pembakaran Propelan	45
4.3	Ujian Kadar Pembakaran	48
BAB V	UJIKAJI	49
5.1	Kaedah Ujikaji	49
5.2	Pengaruh Tekanan Mampatan Ke Atas Kadar Pembakaran	51
5.3	Gayalaku Pembakaran Propelan	52

BAB VI KEPUTUSAN	55
6.1 Keputusan dan Perbincangan	55
6.2 Perubahan Komposisi Campuran Bahan Asas	55
BAB VII KESIMPULAN	61
7.1 Kesimpulan	61
RUJUKAN	64
LAMPIRAN	66

BAB 1

PENGENALAN

1.1 Pengenalan

Setelah sekian lama kita hanya menjadi pemerhati kepada pelbagai usaha negara-negara maju untuk menghantar pelbagai jenis peralatan ke angkasa lepas dengan menggunakan aplikasi teknologi terkini yang diterjemahkan. kepada penghasilan sesebuah roket berkuasa tinggi yang mampu menembusi atmosfera bumi, kini sudah sampai masanya untuk anak-anak tempatan Malaysia mengorak langkah dalam melakukan kajian demi kajian untuk menghasilkan roket yang setanding dengan mereka.

Malaysia bakal menjadi salah satu penyumbang dalam industri roket dunia sekiranya usaha berterusan dijalankan oleh pelbagai pihak. Universiti Teknologi Malaysia, UTM merupakan salah sebuah institusi pengajian tinggi tempatan yang menjalankan usaha ini. UTM hanyalah salah sebuah organisasi yang menjalankan kajian ke atas pembinaan roket di dalam satu konsortium yang dinamakan Space and Telecommunication Research Consortium (Maxstar) yang selainnya dianggotai oleh Binariang Sdn. Bhd., Telekom Malaysia Berhad, Bahagian Kajian Sains Angkasa (BAKSA), Institut Sistem Mikroelektronik Malaysia (MIMOS), Universiti Malaya, Universiti Kebangsaan Malaysia dan Universiti Putra Malaysia. Walaupun secara dasarnya Malaysia sudah pun ketinggalan selama 38 tahun di belakang Soviet Union. Namun pada masa sekarang, bidang sains berteknologi tinggi ini telah menarik minat ramai anak-anak tempatan untuk turut sama dalam penerokaannya yang mencabar.^[1]

Menurut Dr. Amad Sabirin Arshad^[2], Pengarah Urusan Astronautics Technologies Sdn Bhd (ATSB), buat masa sekarang ini industri angkasa masih lagi

belum wujud di Malaysia. Apa yang ada hanyalah industri yang boleh membantu menyokong industri angkasa. Antara teknologi yang sedia ada ialah berkaitan dengan pembuatan, pengujian komponen satelit, kepakaran dan segi elektromekanikal, teknologi maklumat dan telekomunikasi. Tambah beliau, industri angkasa di Malaysia sekarang masih di peringkat permulaan. Malaysia telah melancarkan satelit pertama iaitu dinamakan TiungSat-1 yang telah disempurnakan pembinaannya oleh ATSB, sebuah syarikat milik penuh kerajaan Malaysia dengan kerjasama Surrey Satellite Technologies Ltd. (SSTL). Satelit ini telah dilancarkan ke orbitnya pada ketinggian 650 km dan bumi menggunakan pelancar roket Dnepr, buatan Rusia. Malaysia seharusnya tidak melepaskan peluang untuk menjadi pusat teknologi angkasa di rantau Asia dan Pasifik Barat. Ini adalah berdasarkan kepada beberapa kelebihan yang ada di Malaysia seperti kedudukan geografi yang strategik selain mempunyai sumber asli (Petroleum) sendiri. Tambahan pula, Malaysia mempunyai aktiviti ekonomi sedia ada yang boleh menyokong industri angkasa.

1.2 Objektif Penyelidikan

1. Merekabentuk sebuah rig ujian yang dapat mengkaji daya tujah bahan dorong pepejal.
2. Mengkaji prestasi pottasium nitrat sebagai bahan dorong untuk enjin roket berbahan dorong pepejal iaitu mengkaji kadar pembakaran, daya tujah, suhu dan tekanan.

1.3 Skop Penyelidikan

1. Kajian literatur ke atas bahan dorong (propelan) roket.
2. Penyelesaian teoritikal.
3. Menghasilkan propelan roket pepejal berasas Pottasium Nitrat.

4. Merekabentuk, membina, dan menguji rig ujian kadar pembakaran.
5. Mendapatkan data-data kadar pembakaran propelan.
6. Merekabentuk, membina dan menguji rig ujian daya tujah statik.
7. Mendapatkan data-data daya tujah statik yang mampu dihasilkan oleh bahan dorong tersebut.

1.4 Kaedah Penyelidikan

Kajian literatur ke atas bahan dorong pepejal dijalankan dengan teliti bagi mengenalpasti ciri-ciri serta sifat asas bahan kimia yang digunakan. Penyelidikan awal bermula dengan mengumpul data-data bahan pengoksida dan bahan api yang digunakan. Sebagai contoh suhu lebur, ketumpatan, formula kimia, warna, saiz bijian, berat molekul, struktur molekul serta ketulinan bahan yang diperolehi.

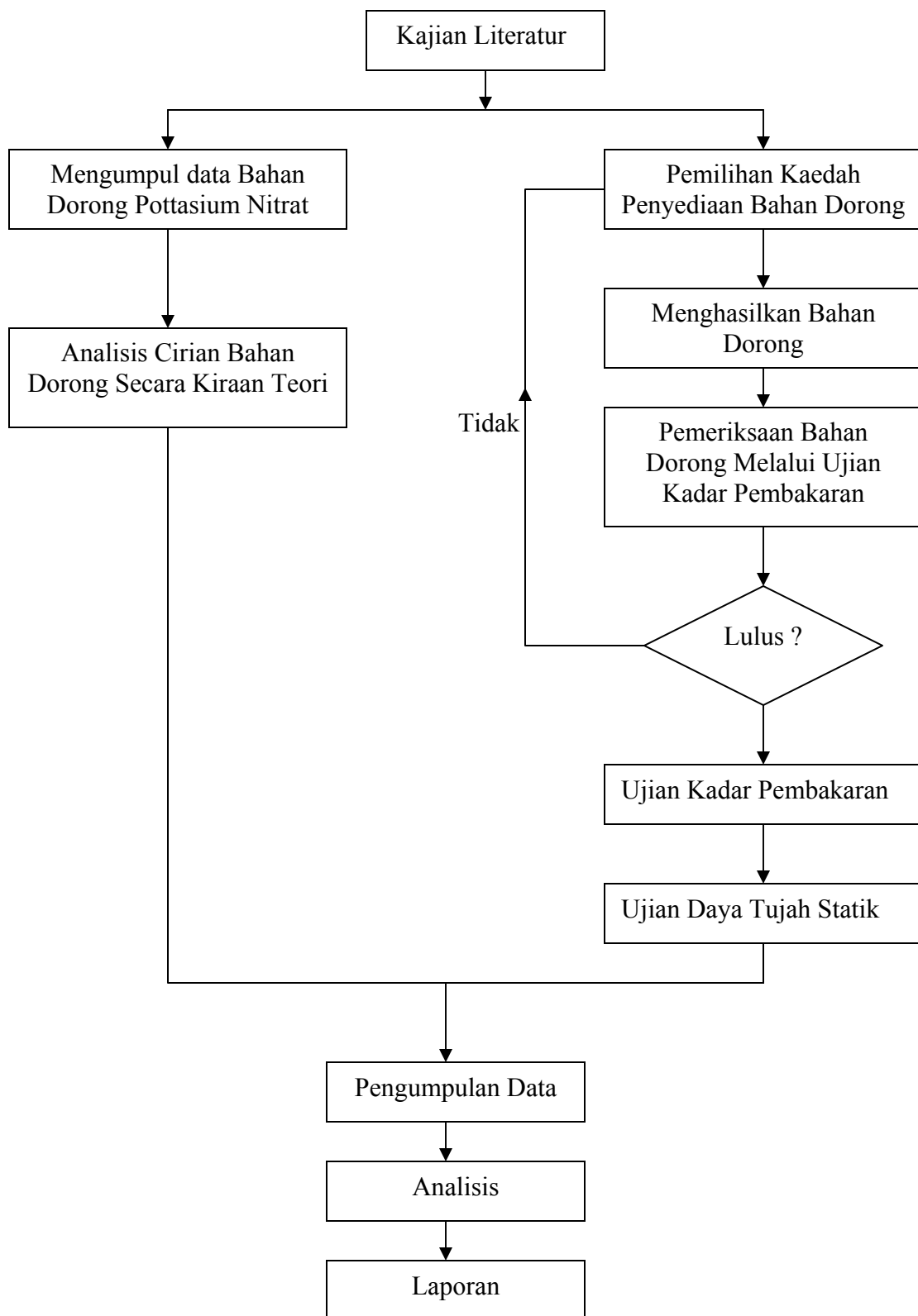
Analisis awal dilakukan ke atas bahan dorong dengan mendapatkan sifat-sifat cirian Pottasium Nitrat. Sebagai contoh formula kimia, formula tentu, berat molekul, suhu nyalaan adiabatik, nisbah haba tentu gas, persamaan tindakbalas, halaju ciri, halaju berkesan ekzos dan juga pekali daya tujah. Penyelesaian ini dibuat melalui kiraan teoritikal.

Kaedah penyediaan bahan dorong dikaji terlebih dahulu bagi memilih kaedah penyediaan yang paling sesuai dengan bahan dorong Pottasium Nitrat. Antara kaedah yang dipertimbangkan adalah kaedah acuan mampat, pembentukan, semperit dan kaedah tuangan. Berdasarkan ujian awal ke atas bahan dorong yang dihasilkan, didapati kaedah acuan mampat merupakan kaedah penyediaan yang paling sesuai.

Rig ujian pembakaran bahan dorong pada tekanan atmosfera direkabentuk bersesuaian dengan jalur bahan dorong yang dihasilkan. Rig ujian pembakaran ini terdiri daripada tapak pembakaran, pencucuk elektrik, pemasa automatik dan kebuk udara. Melalui ujian pembakaran pada tekanan atmosfera, data-data kadar pembakaran dapat

diperolehi. Secara umumnya, prestasi sesuatu bahan dorong roket dinilai dan aspek kadar pembakaran bahan dorong tersebut pada tekanan tertentu.

Setelah ujian kadar pembakaran selesai, sebuah motor roket direkabentuk bersama-sama rig ujian daya tujuh statik. Rig ujian daya tujuh ini pula terdiri dan pada tapak ujian, troli, pencucuk elektrik dan sel beban. Ujian daya tujuh dijalankan bagi mendapatkan data-data daya tujuh yang mampu dihasilkan oleh bahan dorong tersebut. Tumpuan khusus diberikan ke atas pengaruh nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api terhadap kadar pembakaran dan daya tujuh yang dihasilkan. Ujian kadar pembakaran dan daya tujuh dilakukan dengan menggunakan bahan dorong yang mempunyai nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api yang berbeza-beza. Data-data yang diperolehi direkodkan untuk tujuan analisis. Kaedah penyelidikan ini boleh diringkaskan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1.1.



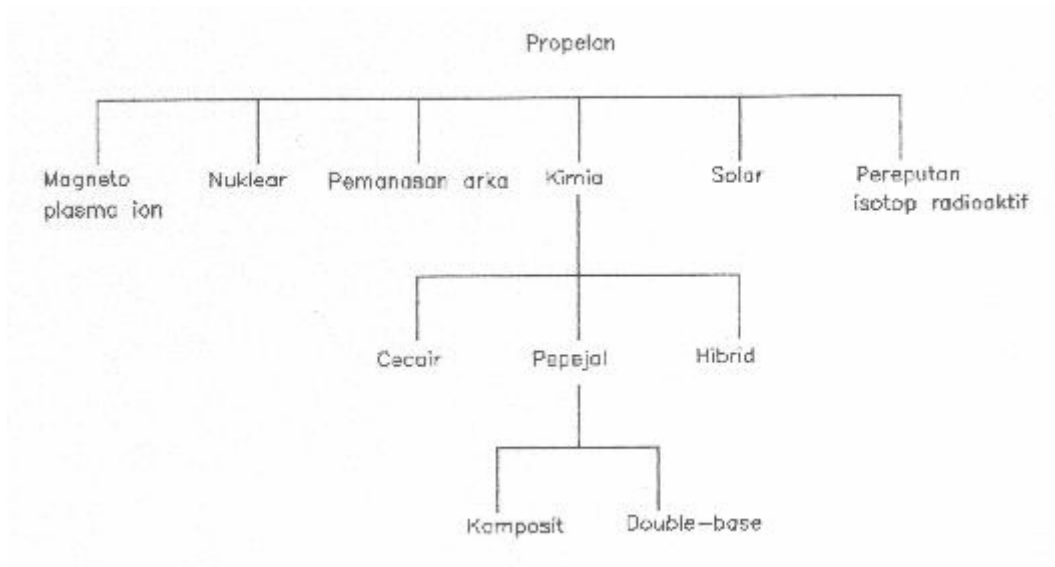
Rajah 1.1 Carta Alir Kaedah Penyelidikan

BAB II

KAJIAN LITERATUR

2.1 Klasifikasi Roket

Sumber tenaga yang diperlukan untuk menggerakkan Roket boleh diklasifikasikan kepada beberapa jenis sistem kuasa seperti kimia, nuklear, pereputan isotop radioaktif, pemanasan arka, magneto plasma, ion dan tenaga solar. Rajah 2.1 menunjukkan klasifikasi roket mengikut penggunaan tenaganya.

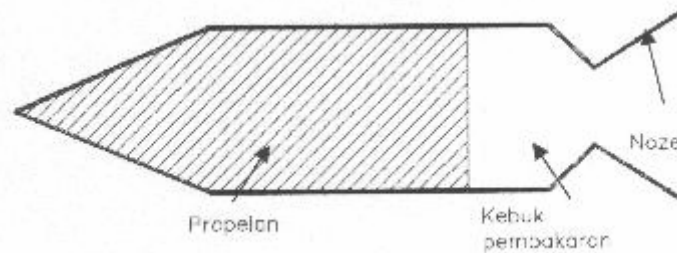


Rajah 2.1 Klasifikasi propelan mengikut penggunaan tenaganya

Sumber tenaga tersebut mempunyai ciri-ciri serta parameter prestasi yang berbeza-beza. Walau bagaimana pun, bahan api kimia boleh diklasifikasikan kepada 3 kategori utama iaitu propelan roket pepejal, cecair dan hibrid.

i) Roket propelan pepejal

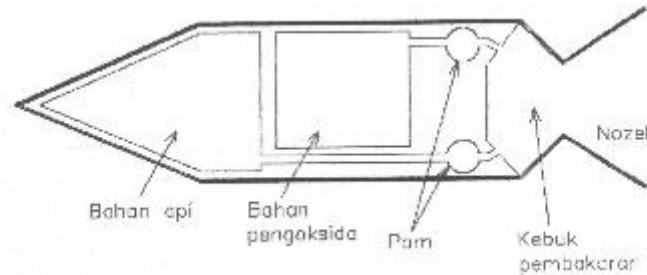
Roket ini menggunakan propelan pepejal untuk menghasilkan daya tujah. Rajah 2.2 menunjukkan binaan asas sebuah roket berbahan dorong pepejal. Binaannya ringkas di mana ia hanya terdiri dan kebuk pembakaran dan juga nozel. Sebelum pembakaran propelan bermula, kebuk pembakaran bertindak sebagai tangki propelan. Bagi roket propelan pepejal, enjinnya dikenali sebagai motor roket dan bukannya enjin roket.



Rajah 2.2 Roket propelan pepejal

ii) Roket propelan cecair

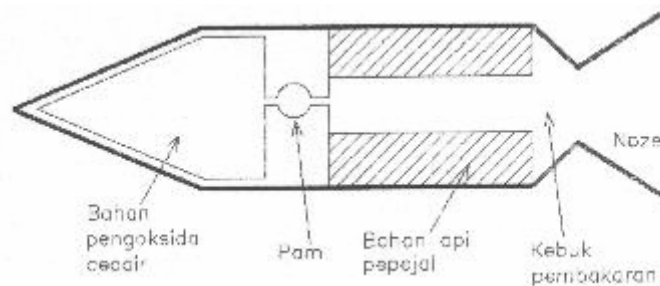
Roket ini menggunakan cecair kimia sebagai bahan api dan bahan pengoksida. Propelan roket cecair terdiri daripada bahan api dan bahan pengoksida di mana ia disimpan di dalam tangki simpanan yang berasingan. Sistem enjin roket cecair biasanya terdiri dan kebuk pembakaran, nozel, tangki simpanan bahan api dan bahan pengoksida, sumber kuasa untuk membekalkan tenaga kepada sistem pam, sistem paip untuk menghantar bahan api dan bahan pengoksida cecair serta sistem kawalan yang baik bagi mengawal kadar alir cecair bahan api dan bahan pengoksida. Rekabentuk enjin roket cecair adalah pelbagai namun pemilihan rekabentuk enjin tertentu adalah bergantung kepada aplikasi, saiz roket, propelan, daya tujah, masa penerbangan dan bentuk operasi roket tersebut.



Rajah 2.3 Raket propelan cecair

iii) Raket propelan hibrid

Raket ini menggunakan kedua-dua jenis propelan di atas iaitu propelan pepejal dan cecair. Biasanya propelan raket hibrid menggunakan bahan pengoksidasi cecair dan bahan api yang berbentuk pepejal. Ketika beroperasi, bahan pengoksidasi cecair akan disemburkan pada permukaan bahan api pepejal dan pembakaran berlaku di sepanjang permukaan bahan api pepejal tersebut. Kadar pembakaran propelan ini adalah sekitar 1.5 mm/s atau kurang, bergantung kepada keadaan operasi motor raket tersebut. Rajah 2.4 menunjukkan binaan asas raket propelan hibrid.



Rajah 2.4 Binaan asas raket propelan hibrid

2.2 Raket Propelan Pepejal

Motor raket propelan pepejal merupakan enjin raket yang paling mudah binaanya. Propelan yang diperlukan berada pada kebuk pembakaran. Apabila ia mula dibakar, pembakaran berlaku dengan licin dan tetap pada kadar tertentu. Gas yang terbebas hasil

pembakaran akan dipecutkan apabila melalui nozel. Momentum yang dihasilkan oleh pecutan gas ekzos ini seterusnya menghasilkan daya tujah pada roket.

Keseluruhan propelannya disimpan di dalam kebuk pembakaran. Terdapat dua cara bagaimana propelan boleh ditempatkan pada kebuk pembakaran sesuatu motor roket pepejal. Kaedah pertama dikenali sebagai lekatan sarung (case bonding). Melalui kaedah ini propelan melekat terus kepada dinding kebuk pembakaran atau sarung logam. Keadaan propelan yang kedua adalah propelan keadaan bebas (free standing). Propelan dihasilkan tanpa sarung (semasa proses penyediaan propelan) dan apabila diperlukan, propelan yang tersedia ini dimasukkan ke dalam kebuk pembakaran.

Sifat utama yang ada pada propelan ini adalah ia tidak memerlukan sistem suapan (feed system). Di sini, hukum tujahnya adalah tetap di mana daya tujah yang dihasilkan tidak boleh diubah-ubah atau dikawal lagi. Ia didapati sesuai digunakan bagi menghasilkan roket yang memerlukan tujah yang tinggi pada tempoh penggunaan yang singkat seperti pelonjak roket (booster) atau peluru berpandu.

Kelebihan utama yang ada padanya adalah mempunyai ketumpatan propelan yang tinggi. Ia mampu memenuhi kehendak rekabentuk motor roket yang mempunyai isipadu/ruang yang terhad. Propelan roket pepejal juga mempunyai hayat yang tinggi di mana sifat kimianya stabil. Ini bersesuaian dengan keperluan motor taktikal (khususnya bagi kegunaan peluru berpandu) di mana hayat khidmatnya adalah sekitar 15 tahun. Propelan roket pepejal juga mudah disimpan, diproses atau dibawa ke mana-mana. Ia tidak mengakibatkan masalah kakisan, keracunan dan perubahan sifat kimia sepanjang ia digunakan. Dengan itu, peralatan keselamatan yang kompleks tidak diperlukan. Keboleharapan bagi roket berpropelan pepejal juga tinggi berbanding roket cecair. Ini kerana roket pepejal tidak mempunyai komponen atau binaan yang kompleks

Ianya terdiri daripada tiga bahan utama iaitu bahan api, pengikat dan pengoksida. Terdapat banyak jenis bahan pengoksida yang biasa digunakan antaranya ammonium perklorat, kalium nitrat, sodium nitrat dan lain-lain lagi. Jadual 2.1 menunjukkan perbandingan sifat-sifat antara beberapa bahan pengoksida. Penggunaannya akan mempengaruhi prestasi serta parameter roket yang lain. Bahan api yang biasa digunakan

adalah seperti alumininum, berilium, boron dan lain-lain. Jadual 2.2 menunjukkan perbandingan bagi beberapa bahan api pepejal.

Jadual 2.1 Perbandingan sifat-sifat antara beberapa bahan pengoksida

Bahan Pengoksida	Simbol Molekul	Berat Molekul	Ketumpatan (kg/m ³)	Kandungan Oksigen (wt%)	Catatan
Kalium Nitrat (Potassium Nitrate)	KNO ₃	101.1	2109.23	39.6	Murah, prestasi rendah
Ammonium Perklorat	NH ₄ ClO ₄	117.5	1948.68	34.0	Indeks tekanan rendah, murah, mudah diperolehi
Kalium Perklorat	KClO ₄	138.6	2518.90	46.2	Kadar pembakaran rendah, prestasi sederhana.
Natrium Perklorat	NaClO ₄	122.4	2017.89	52.3	<i>Hygroscopic*</i> , prestasi tinggi
Litium Perklorat	LiClO ₄	106.4	2427.55	60.2	<i>Hygroscopic*</i> , prestasi tinggi
Ammonium Nitrat	NH ₄ NO ₃	80.0	1730.01	20.0	Kurang asap, prestasi sedarhana
Natrium Nitrat	NaNO ₃	89.0	2255.94	47.0	Murah, prestasi rendah
Litium Nitrat	LiNO ₃	68.9	2380.50	58.0	<i>Hygroscopic*</i> , murah
Nitronium Perklorat	NO ₂ ClO ₄	145.5	2197.81	66.0	Sangat reaktif, <i>Hygroscopic*</i> , prestasi tinggi, tidak stabil

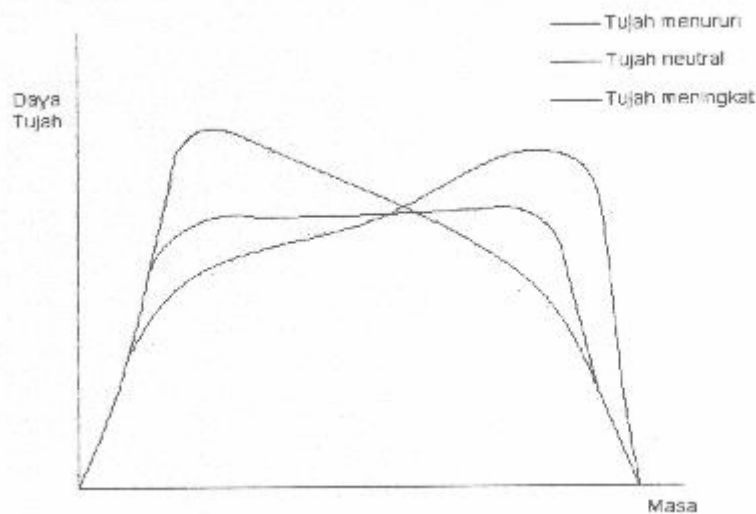
* *Hygroscopic* = Bersifat mudah menyerap lembapan

Jadual 2.2 P erbandingan bagi beberapa bahan api pepejal.

Bahan api	Simbol kimia	Suhu lebur (°C)	Berat molekul	Ketumpatan (kg/m ³)	Nilai I, teoritikal (14.7-1000 Psia)	Catatan
Bahan organik	-	-	-	-	240 (PU/AP)	
Aluminium	Al	658.89	26.98	74 736.51	265 (PU/AP/Al)	Murah, terbakar dengan baik, darjah toksik yang rendah
Beryllium	Be	1276.67	9.01	50 951.55	280 (PU/AP/Be)	Mahal, sangat toksik jika disedut, terbakar dengan sederhana
Boron	B	2304.44	10.81	63 664.43 (<i>crystalline</i>)	255 (PU/AP/B)	Sukar terbakar
Aluminium hidrat	AlH ₃	Sedia hancur	30.0	39 305.87	280 (PU/AP/AlH ₃)	Hayat yang pendek, sukar mendapatkan bahan yang tulen (>80%)
Beryllium hydrate	BeH ₂	Sedia hancur	11.03	17 715.32 - 18 268.92	310 (PU/AP/BeH ₂)	Ketumpatan tinggi, perlu dimampatkan, sangat toksik jika disedut.

2.3 Prinsip Asas Pendorongan Roket

Percampuran di antara bahan api dan bahan pengoksida di dalam kebuk pembakaran yang mana apabila dibakar akan menghasilkan gas bertekanan dan bersuhu tinggi di dalam kebuk pembakaran. Gas ekzos yang keluar melalui nozel pula akan dipecutkan dengan halaju yang tinggi. Dengan ini, momentum yang terhasil ke atas enjin roket adalah sama dengan momentum gas yang keluar melalui ekzos berdasarkan Hukum Keabadian Momentum. Walaubagaimana pun, arah tindakan daya adalah berlawanan dengan arah gas ekzos. Daya tujah yang dihasilkan oleh propelan roket pepejal telah dikelaskan kepada tiga kategori iaitu meningkat (progressive), neutral (neutral) dan menurun (regressive). Kesemua kelas daya tujah ini boleh difahaini dengan mudah dengan merujuk kepada graf daya tujah-masa pada Rajah 2.5. Pola graf daya tujah-masa ini dipengaruhi oleh corak propelan yang digunakan. Sekiranya geometri nozel yang digunakan sepanjang ujian adalah tetap, daya tujah yang dihasilkan oleh motor roket adalah bergantung kepada tekanan pada kebuk pembakaran.



Rajah 2.5 Graf daya tujah-masa

Daya tujah dihasilkan dan pengeluaran jisim (sebagai gas ekzos) melalui nozel pada halaju yang tinggi. Persamaan daya tujah diberi oleh

$$\begin{aligned}
 F &= \int P dA \\
 &= \dot{m} v_e + (P_e - P_a) A_e
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Bahagian pertama persamaan menunjukkan daya tujah dihasilkan oleh jumlah tekanan yang bertindak ke atas dinding kebek pembakaran. Bahagian kedua persamaan pula dikenali sebagai tujah tekanan (pressure thrust) dan nilainya adalah sifar apabila nisbah pengembangan optimum berlaku pada nozel. Hasilnya, tujah maksimum diperolehi dan persamaan boleh ditulis semula sebagai.

$$F = \dot{m} v_e = \dot{w} I_{sp} \tag{2.2}$$

Persamaan (2.1) diterbitkankan dengan menganggap bahawa daya tujah bertindak sepanjang paksi selari dengan garis tengah nozel. Dengan mengambil kira bahawa halaju ekzos tidak semuanya pada arah paksi, persamaan (2.1) ditulis semula sebagai

$$F = \lambda \dot{m} v_e + (P_e + P_a) A_e \tag{2.3}$$

dengan $\lambda = \frac{1 + \cos \alpha_d}{2}$

Dari persamaan keterusan, persamaan (2.1) boleh ditulis sebagai

$$F = \rho^* v^* A^* v_e + (P_e + P_a) A_e \tag{2.4}$$

dengan

A^* = Luas kerongkong nozel.

ρ^* = ketumpatan kritikal gas ekzos

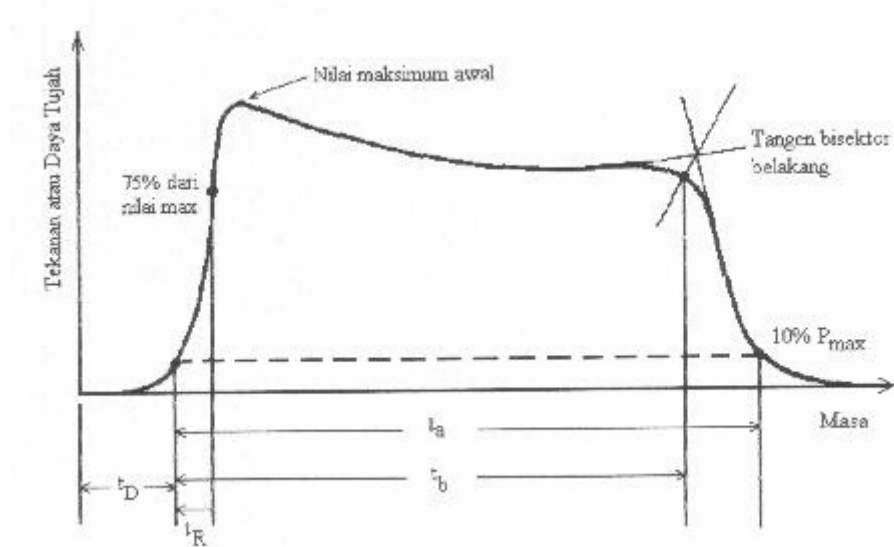
v^* = halaju kritikal gas ekzos

v_e = halaju keluaran nozel.

Dengan menyusun semula persamaan (2.4), maka persamaan ini boleh diungkapkan seperti persamaan (2.5)

$$F = A * P_o \sqrt{\frac{2k^2}{k-1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_a}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + (P_e + P_a)A_e \quad (2.5)$$

Daripada persamaan ini dapat disimpulkan bahawa daya tujah adalah berkadar terus dengan luas kerongkong nozel, tekanan kebuk, nisbah tekanan yang merentasi nozel, nisbah haba tentu dan tujah tekanan. Tekanan pada kebuk pembakaran motor roket ketika beroperasi lazimnya adalah antara 1.01 MPa hingga 30.4 MPa. Daya tujah (untuk kes geometri nozel yang tetap) biasanya bergantung secara langsung kepada tekanan kebuk. Adalah tidak bersesuaian untuk membuat anggapan bahawa $P_a = P_e$ di dalam kes ini.



Rajah 2.6 Hubungan daya tujah dengan masa pembakaran

Dengan

t_a = masa tindakan

t_b = masa pembakaran

t_D = masa lambatan pencucuh

t_R = masa kenaikan pencucuh

Malah adalah mustahil untuk membuat anggapan sedemikian pada roket yang beroperasi di angkasa. Rajah 2.6 menunjukkan hubungan antara daya tujah dengan masa pembakaran propelan. Pengamiran daya tujah terhadap masa akan menghasilkan jumlah denyut, I .

Berikut disenaraikan beberapa parameter yang penting dan perlu diketahui sepanjang kajian terhadap motor roket.

i) Kadar pembakaran propelan.

Pembakaran permukaan propelan yang berserenjang dengan permukaannya diukur dengan mengambilkira kadar bagi propelan tersebut untuk habis terbakar. Biasanya ia diukur dalam unit jarak per unit masa.

$$r = \frac{L}{t_b} \quad (2.6)$$

dengan

r = kadar pembakaran

L = panjang jalur propelan

t_b = masa pembakaran bagi jalur propelan tersebut.

ii) Kadar alirjisim.

Ditakrif sebagai nisbah aliran jisim yang meialui sesuatu titik terhadap satu unit masa. Bagi kes motor roket, aliran jisim adalah hasil dan pembakaran propelan. Maka persamaan mi boleh ditulis sebagai,

$$\dot{m} = \rho_p Ar \quad (2.7)$$

dengan

- r = kadar pembakaran
- A = luas permukaan pembakaran propelan.
- ρ_p = ketumpatan propelan.
- \dot{m} = kadar alir jisim

iii) Kadar alir berat, W

Kadar alir berat diberi oleh persamaan berikut,

$$W_p = g \dot{m} \quad (2.8)$$

iv) Halaju keluar ekzos, v_e

Pengiraan halaju keluar ekzos boleh diperolehi dari persamaan (2.1) di atas dengan,

$$F = \int P dA = \dot{m} v_e (P_e + P_a) A_e \quad (2.9)$$

Maka

$$v_e = \frac{F - (P_e - P_a) A_e}{\dot{m}} \quad (2.10)$$

Halaju keluar ekzos hanya boleh ditingkatkan dengan mengembangkan aliran gas yang melalui nozel (pada tekanan kebuk yang tetap). Oleh itu untuk mendapatkan halaju keluar ekzos yang maksimum, rekabentuk nozel perlulah sebaik mungkin bagi menghasilkan pengembangan gas yang maksimum berlaku pada nozel. Persamaan ini juga boleh dinyatakan dalam ungkapan yang lebih ringkas. Beberapa anggapan telah dibuat bagi memudahkan analisis.

$$v_e = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left(\frac{RT_c}{M} \right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2.11)$$

dengan

- R = pemalar gas universal
- M = berat molekul gas ekzos
- T_c = suhu kebuk pembakaran k nisbah haba tentu
- k = nisbah haba tentu

Dengan menggantikan halaju had, V_L pada persamaan (2.11) akan memberikan persamaan yang lebih ringkas

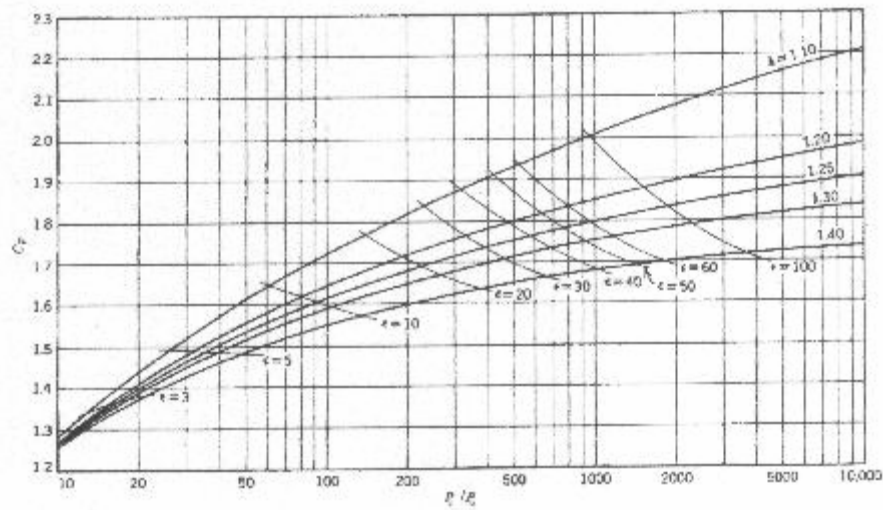
$$v_e = V_L \sqrt{\left[1 - \left(\frac{P_e}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (2.12)$$

Persamaan (2.11) dan persamaan (2.12) menunjukkan parameter-parameter yang boleh mempengaruhi halaju ekzos. Antara parameter yang terlibat adalah nisbah tekanan P/P_e , suhu kebuk pembakaran, T_c berat molekul gas, M dan nisbah haba tentu, k .

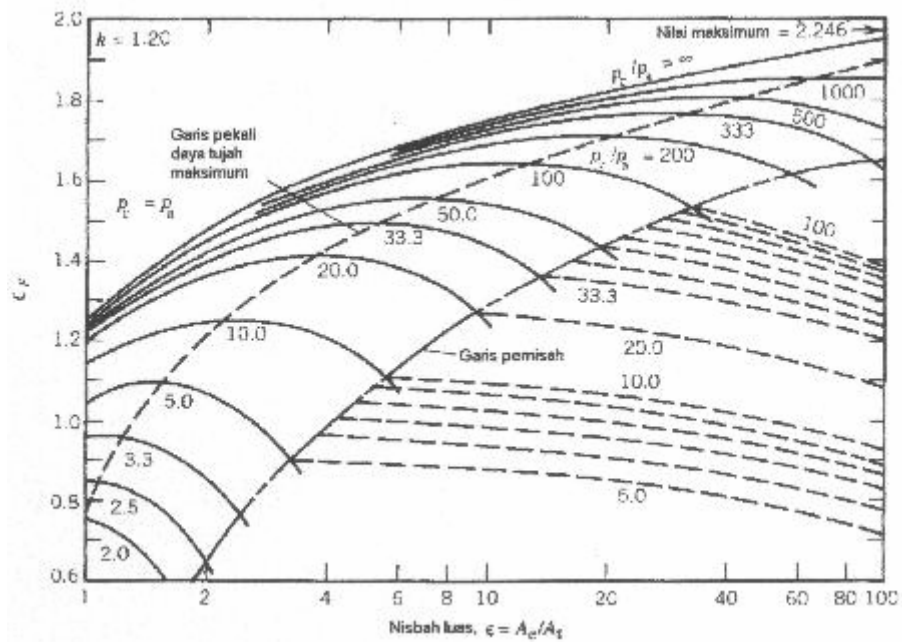
v) Pekali daya tujuh, C_F

Pekali daya tujuh adalah fungsi kepada nisbah tekanan, nisbah luas dan nisbah haba tentu untuk keadaan pengembangan yang optimum.

$$C_F = \frac{F}{P_c A_t} \quad (2.13)$$



Rajah 2.7 Pekali daya tujuh adalah fungsi kepada nisbah tekanan, nisbah luas dan nisbah haba tentu untuk keadaan pengembangan yang optimum



Rajah 2.8 Pekali daya tujuh, C_F berubah terhadap nisbah luas nozel bagi $k=1.2$

2.4 Analisis Pembakaran Propelan

Analisis pembakaran pada motor roket perlu mengambil kira kes sebelum dan selepas pembakaran. Ini bertepatan dengan Hukum Pertama Termodinainik yang mengatakan tenaga tidak boleh dicipta atau dimusnahkan. Ketika motor roket beroperasi, tenaga kimia yang tersimpan pada propelan (propelan kimia) ditukar kepada tenaga haba seterusnya kepada tenaga kinetik (gas). Gas ini dipecutkan melalui nozel dan menghasilkan momentum pada motor roket.

Pembakaran adalah merupakan tindakbalas eksotermik kimia mudah di mana beberapa prinsip asas diguna dalam analisis kimianya. Prinsip asas yang terlibat ialah persamaan keabadian tenaga dan keabadian jisim.

Tindakbalas kimia berlaku dengan cepat dan mendadak pada proses isoterma pada suatu suhu rujukan. Tindakbalas ini boleh digambarkan dalam persamaan berikut.

$$\Delta_r H = \sum n_i \int_{T_{ref}}^{T_1} C_p dT = \sum_1^n n_j \Delta h_g \Big|_{T_{ref}}^{T_1} \quad (2.14)$$

dengan

$\Delta_r H$ = tenaga yang terbebas

n_i = mol spesis

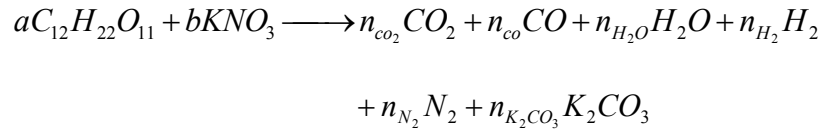
T_1 = suhu pembakaran akhir

T_{ref} = suhu rujukan

C_p = haba tentu

Δ_{hg} = entalpi gas produk

Sebagai contoh, dengan mengambil tindakbalas kimia propelan pepejal kalium nitrat-sukros, prinsip keabadian jisim boleh digambarkan seperti notasi kimia di bawah.



Ambil unsur karbon sebagai spesis kajian bagi melihat bagaimana keseimbangan jisim berlaku bagi tindakbalas ini. Jisim spesis ini (karbon) sebelum dan selepas pembakaran mesti sama.

untuk karbon; $12a = n_{CO_2} + n_{CO} + n_{K_2CO_3}$

untuk oksigen; $11a + 3b = 2n_{CO_2} + n_{CO} + n_{H_2O} + 3n_{K_2CO_3}$

Atau dengan pernyataan lain,

$$\left[\sum_{j=1}^n a_{ij}n_j \right]_{propelan} = \left[\sum_{j=1}^n a_{ij}n_j \right]_{produk} \quad (2.15)$$

dengan

n = bil spesis

n_j = mol molekul dalam persamaan tindakbalas kimia
seimbang

a_{ij} = bilangan atom unsur i path formula molekul

Bagi propelan yang hanya mengandungi karbon, oksigen, hidrogen dan nitrogen (C, H, O dan N), sekurang-kurangnya 12 produk yang mungkin dihasilkan, iaitu C, CO₂, CO, H₂, H₂O, O₂, N₂, NH₃, CH₄, KOH dan NO. Jika propelan mengandungi elemen logam (metallic) seperti kalium (K), natrium (Na), aluminium (Al) atau klorin (Cl), ini

akan menghasilkan hasil pembakaran sama ada gas atau cecair seperti kalium karbonat, aluminium oksida atau kalium klorida (KCl).

Kebanyakan tindakbalas kimia yang berlaku menghasilkan produk sahaja di mana tindakbalas ini dikenali sebagai tindakbalas tidak boleh balik. Walaubagaimanapun, terdapat kes di mana tindakbalas berlaku dalam kedua-dua arah. Tindakbalas ini disebut tindakbalas boleh balik (reversible reaction).

Apabila keseimbangan berlaku, pemalar setara, K_p dibentuk untuk menghubungkan tekanan separa dan pecahan mol (mol fraction) untuk setiap spesis. Pemalar ini adalah fungsi suhu.

$$K_p = \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} (P_o)^{c+d-a-b} \quad (2.16)$$

dengan

K_p = pemalar setara dalam fungsi pecahan tekanan.

P_o = tekanan rujukan

A = mol molekul A

P_A = pecahan tekanan molekul A

P_B = pecahan tekanan molekul B

P_C = pecahan tekanan molekul C

P_D = pecahan tekanan molekul D

Apabila $a + b = c + d$, K_p tidak bergantung kepada tekanan. Pemalar setara juga boleh dinyatakan dalam sebutan pecahan mol (molar fraction), n_j kerana setiap pecahan tekanan (*partial pressure*), P_{nj} bersamaan dengan tekanan sebenar, P (ketika tindakbalas berlaku) didarab dengan pecahan mol ($P_{nj} = P n_j$). Persamaan di atas boleh ditulis sebagai,

$$K_N = \frac{n_C^c n_D^d}{n_A^a n_B^b} \left(\frac{P}{P_o} \right)^{c+d-a-b} \quad (2.17)$$

dengan

K_N = pemalar setara dalam fungsi pecahan mol

n_c = jumlah nombor atom C

P_o = tekanan rujukan

Namun apa yang lebih penting adalah samada tindakbalas tersebut lebih ke kanan atau ke kiri. Di sinilah nilai K_N menjadi penting. Nilai-nilai ini boleh didapati dari jadual termokimia JANNAF. Hasil tindakbalas (produk) yang wujud pada suhu pembakaran tinggi adalah sangat berbeza dengan produk yang dihasilkan pada suhu pembakaran rendah. Pada suhu tinggi (melebihi 3000 K) penceraian produk terjadi, kesan dan tenaga terma.

2.4.1 Formula Kimia Propelan dan Nisbah Campuran

Berat molekul (*molecular weight*), M sesuatu propelan di perolehi berdasarkan formula berikut:

$$M = CM_C + HM_H + \dots + FM_F \quad (2.18)$$

dengan, M_C , M_H dan M_F adalah berat atom C, H dan F

Bagi sukros, $C_{12}H_{22}O_{11}$

$$M = 12(12.01) + 22(1.008) + 11(16.0)$$

$$= 342.18$$

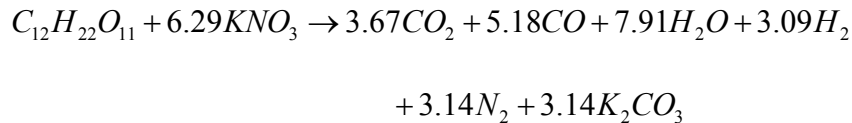
Bagi kalium nitrat, KNO_3

$$M = 1(39.096) + 1(14.008) + 3(16)$$

$$= 101.104$$

Senarai berat molekul bagi beberapa atom yang terlibat dalam pembakaran propelan kalium nitrat-sukros adalah seperti pada Jadual 2.3. Nilai pada lajurjadual yang

ketiga ($M \times \text{mol}$), adalah hasil darab nilai berat molekul dengan nilai mol yang terlibat dalam tindakbalas pembakaran bagi propelan kalium nitrat-sukros. Tindakbalas pembakaran propelan kalium nitrat-sukros adalah seperti berikut:



Nama kimia	Formula empirikal	M (g/mol)	Mxmol (g)
Sukros	$C_{12}H_{22}O_{11}$	342.3	342.3
Kalium nitrat	KNO_3	101.11	635.98
Karbon dioksida	CO_2	44.01	161.52
Karbon monoksida	CO	28.01	145.09
Air	H_2O	18.02	142.54
Hidrogen	H_2	2.02	6.24
Nitrogen	N_2	28.01	87.95
Kalium karbonat	K_2CO_3	138.21	433.98

Jadual 2.3 Formula empirikal dan jisim molekul bagi propelan dan gas produk

Formula tentu (*specific formula*) adalah ditakrif sebagai nisbah formula molekul bagi 1 kg bahan terhadap jisim molekul (atau berat) dan ditulis sebagai

$$C_c H_h B_b \dots O_o F_f \quad (2.19)$$

Dengan, c,h,b,o dan f ialah nombor bagi gram-atom untuk elemen tersebut per unit jisim bahan tersebut.

Sebagai contoh, formula tenth untuk 1 kg sukros adalah:

$$\frac{1000}{M} C_{12} H_{22} O_{11} = C \frac{12000}{346.286} H \frac{22000}{346.286} O \frac{11000}{346.286} \\ = C_{34.653} H_{63.531} O_{31.766}$$

manakala formula tentu bagi kalium nitrat, KNO_3 adalah

$$\begin{aligned} \frac{1000}{101.104} KNO_3 &= K \frac{1000}{101.104} N \frac{1000}{101.104} O \frac{1000}{101.104} \\ &= K_{9.89} N_{9.89} O_{29.67} \end{aligned}$$

Nisbah campuran (*mixture ratio*), ϕ didefinisikan sebagai nisbah bahan api per bahan pengoksida,

$$\phi = \frac{\text{jisim bahan api}}{\text{jisim bahan pengoksida}} = \frac{\text{aliran jisim bahan api}}{\text{aliran jisim bahan pengoksida}} \quad (2.20)$$

Nisbah stoikiometri, ϕ_s adalah nisbah campuran antara bahan api dan bahan pengoksida yang paling ideal untuk pembakaran, dengan

$$\phi = \frac{\left(\sum_i i' v_{I'} \right)_{\text{bahan pengoksida}}}{(-1) \left(\sum_i i v_I \right)_{\text{bahan api}}} \quad (2.21)$$

dengan

$\sum_i i' v_{I'}$ = Jumlah hasil darab valensi dengan gram-atom formula tentu untuk setiap elemen bagi bahan pengoksida

$\sum_i i v_I$ = Jumlah hasil darab valensi dengan gram-atom formula tentu untuk

setiap elemen bagi bahan api

$v_{I'}$ = valensi elemen I'

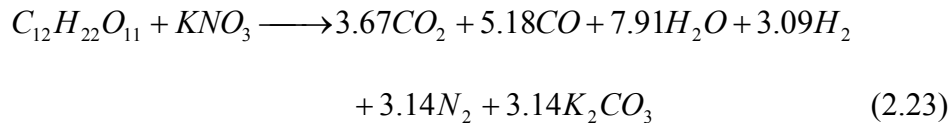
i' = gram-atom pada formula tentu bahan pengoksida atau

$$\phi = \frac{[(n)(M)]_{\text{bahan pengoksida}}}{[(n)(M)]_{\text{bahan api}}} \quad (2.22)$$

n = mol atom pada persamaan tindakbalas

M = berat molekul

Unsur nitrogen dan fosfor adalah neutral, oleh itu ia tidak mempunyai valensi atom. Nisbah stoikiometri, ϕ_s bagi nisbah O/F-Kalium nitrat-Sukros boleh dikira berdasarkan tindakbalas kimia bagi pembakaran propelan tersebut.



Ini bermakna pembakaran lengkap bagi bahan dorong kalium nitrat-sukros akan berlaku apabila 1 mol sukros dicampurkan dengan 6.29 mol kalium nitrat. Dengan menggunakan persamaan (2.22), nisbah stoikiometri bagi propelan kalium nitrat-sukros dikira seperti berikut.

$$\begin{aligned} \phi_s &= \frac{[(n)(M)]_{\text{bahan pengoksida}}}{[(n)(M)]_{\text{bahan api}}} \\ &= \frac{[(6.29)(101.104)]}{[(1)(342.18)]} \\ &= 1.86 \\ &= \frac{65}{35} \end{aligned}$$

Ini bermakna pembakaran lengkap bagi bahan dorong kalium nitrat-sukros akan berlaku apabila 35 gram sukros dicampurkan dengan 65 gram kalium nitrat. Walaubagaimana pun, ujikaji kadar pembakaran pada tekanan atmosfera menunjukkan kadar pembakaran propelan paling tinggi pada O/F 63.7%. Pada nisbah ini, propelan

adalah kaya dengan bahan api dan hal ini adalah perkara yang biasa bagi beberapa jenis propelan roket pepejal.

Nisbah bahan api kepada bahan pengoksida biasa juga disifatkan sebagai nisbah setara, ϕ^* dengan

$$\phi^* = \frac{\phi}{\phi_s} \quad (2.24)$$

Oleh itu campuran kaya bahan api ditunjukkan dengan nilai $\phi^* > 1.0$ dan campuran kaya bahan pengoksida ditunjukkan dengan nilai $\phi^* < 1.0$. Apabila nisbah campuran telah ditentukan, maka nilai ketumpatan ideal untuk propelan tersebut boleh dikira berdasarkan persamaan berikut

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{f_o}{\rho_o} + \frac{f_f}{\rho_f} \quad (2.25)$$

dengan

f_o = pecahanjisim bahan pengoksida

f_f = pecahanjisim bahan api

ρ_o = ketumpatan bahan pengoksida

ρ_f = ketumpatan bahan api

ρ_p = ketumpatan propelan

Bagi propelan kalium nitrat-sukros dengan nisbah campuran 65/35, ketumpatan ideal dapat diperolehi dengan merujuk kepada Jadual 3.1 dan 3.2 di mana ketumpatan kalium nitrat dan sukros masing-masing adalah 2.019 g/cm dan 1.588 g/cm

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho_p} &= \frac{0.65}{2.109} + \frac{0.35}{1.588} \\ &= 0.529 \text{ cm}^3/\text{g} \end{aligned}$$

maka, $\rho_p = 1.892 \text{ g/cm}$

Nilai ini didapati 7.5% lebih tinggi berbanding nilai ketumpatan sebenar bagi propelan yang dihasilkan dengan kaedah acuan mampat iaitu 1.75 g/cm^3 .

2.4.2 Habu Tentu Produk Pembakaran

Nombor mol bagi semua gas produk hasil pembakaran dapat diperolehi menggunakan persamaan keabadianjisim di dalam sistem, di mana, jisim atom sebelum dan selepas tindakbalas kimia yang berlaku adalah malar. Nilai yang diperolehi boleh dibandingkan dengan menggunakan kaedah penyelesaian berkomputer iaitu dengan menggunakan aturcara Propellant Evaluation Programme (PEP 0.04) dan Traxel Labs, Inc. Berdasarkan kepada jadual berkala, berat atom bagi semua atom yang terlibat di dalam tindakbalas pembakaran propelan kalium nitrat-sukros adalah boleh diringkaskan dalam Jadual 2.4

Jadual 2.4 Jisim atom bagi beberapajenis atom

Atom	Karbon	Hidrogen	Kalium	Nitrogen	Oksigen
Simbol	C	H	K	N	O
Jisim atom (g)	12.011	1.009	39.098	14.007	15.999

Dari persamaan (2.18), berat molekul bagi semua spesis molekul dapat diperolehi dan ringkasannya disenaraikan dalam Jadual 2.5.

Nisbah stoikiometri bagi propelan kalium nitrat-sukros menunjukkan bahawa 65 gram kalium nitrat akan bertindakbalas dengan 35 gram sukros untuk menghasilkan pembakaran lengkap. Sekiranya jisim propelan diambil 100 gram sebagai kajian kes, maka nombor mol bagi sukros boleh dikira seperti berikut

$$mol_R = \frac{m_s}{M_s} \quad (2.26)$$

dengan

mol_R = mol spesis reaktan

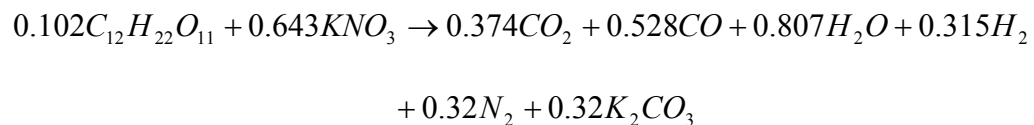
m_s = jisim spesis

M_s = berat molekul spesis

Oleh itu,

$$\begin{aligned} mol_{sukros} &= \frac{35}{342.319} \\ &= 0.102 \text{ mol} \end{aligned}$$

Ini bermakna, sekiranya 100 gram propelan kalium nitrat- sukros dengan nisbah 65:35 bertindakbalas, nombor mol sukros yang terlibat di dalam tindakbalas tersebut adalah 0.102 mol. Oleh itu, kesemua nombor mol dalam persamaan tindakbalas seimbang didarab dengan 0.102 akan memberikan nombor mol bagi semua spesis dalam tindakbalas tersebut. Dengan itu, persamaan tindakbalas seimbang boleh ditulis sebagai,



Jisim bagi setiap spesis produk yang terhasil semasa tindak balas stoikiometri berlaku antara bahan api dan bahan pengoksida boleh dikira seperti ditunjukkan pada persamaan 2.27.

$$m_s = n_s \times M_s \quad (2.27)$$

Jadual 2.5 Berat molekul, mol dan jisim setiap sepesis reaktan dan produk

Spesis	Formula empirikal	Fasa	M (g/mol)	n	m (g)
Sukros	$C_{12}H_{22}O_{11}$	Pepejal	342.319	0.102	35.00
Kalium nitrat	KNO_3	Pepejal	101.102	0.643	65.00
Karbon dioksida	CO_2	Gas	44.009	0.374	16.459
Karbon monoksida	CO	Gas	28.01	0.528	14.789
Wap air	H_2O	Gas	18.017	0.807	14.540
Hidrogen	H_2	Gas	2.018	0.315	0.636
Nitrogen	N_2	Gas	28.014	0.32	8.964
Kalium karbonat	K_2CO_3	Cecair	138.204	0.32	44.225
Jumlah mol reaktan				0.745	
Jumlah mol produk				2.664	
Jumlah mol gas produk				2.344	
Jumlah mol cecair produk				0.32	
Jumlah jisim reaktan					100
Jumlah jisim produk					99.613
Jumlah jisim gas produk					55.388
Jumlah cecair produk					44.225

Kesemua keputusan pengiraan jisim spesis diringkaskan dalam Jadual 2.5. Jadual 2.6 pula menunjukkan nilai haba tentu pada tekanan tetap bagi gas dan cecair produk. Suhu pembakaran propelan kalium nitrat-sukros adalah 1755 K, oleh itu nilai haba tentu pada suhu ini diperolehi dengan membuat interpolasi linear antara suhu 1700K dan 1800K untuk mendapatkan nilai C_p dan C_s bagi gas produk pada suhu pembakaran ideal untuk propelan kalium nitrat-sukros iaitu pada 1755 K. Dengan itu, nilai C_p dan C_s pada suhu 1755K dapat disenaraikan dalam Jadual 2.7.

Jadual 2.6 Nilai haba tentu dan cecair bagi hasil pembakaran propelan pada tekanan tetap

	C_s	C_p				
Molekul	K_2CO_3	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O	N ₂
Fasa	Cecair	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
Suhu (K)						
300	114.70	29.14	37.221	28.849	33.60	29.125
400	128.14	29.34	41.325	29.181	34.26	29.249
500	140.05	29.75	44.627	29.260	35.23	29.580
600	150.67	30.44	47.321	29.327	36.33	30.110
700	160.48	31.17	49.564	29.441	37.50	30.754
800	170.04	31.90	51.434	29.624	38.72	31.433
900	179.52	32.58	52.999	29.881	39.99	32.090
1000	188.95	33.18	54.308	30.205	41.27	32.697
1100	198.32	33.71	55.409	30.581	42.54	33.241
1200	205.26	34.18	56.342	30.992	43.77	33.723
1300	209.20	34.57	57.137	31.423	44.95	34.147
1400	209.20	34.92	57.802	31.861	46.05	34.518
1500	209.20	35.22	58.379	32.298	47.09	34.843
1600	209.20	35.48	58.886	32.725	48.05	35.128
1700	209.20	35.71	59.317	32.139	48.94	35.378
1800	209.20	35.91	59.701	33.537	49.75	35.600

Jadual 2.7 Nilai C_p dan C_s pada suhu pembakaran ideal, 1755K

	C_s	C_p				
Molekul	K_2CO_3	CO	CO_2	H_2	H_2O	N_2
Fasa	Cecair	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
Suhu (K)						
1700	209.2	35.71	59.317	32.139	48.94	35.378
1755	209.2	35.82	59.528	32.908	49.39	35.500
1800	209.2	35.91	59.701	33.537	49.75	35.600

Nilai C bagi gas produk dapat diperolehi dengan menggunakan persamaan (2.28) seperti di bawah.

$$C_{p_{gas}} = \frac{1}{n} \sum_i n_i C_{pi} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned}
 C_{p_{gas}} &= \frac{1}{n} \left[n_{CO} C_{p_{CO}} + n_{CO_2} C_{p_{CO_2}} + n_{N_2} C_{p_{N_2}} + n_{H_2O} C_{p_{H_2O}} + n_{H_2} C_{p_{H_2}} \right] \\
 &= \frac{1}{2.344} \left[0.528(35.82) + 0.374(59.528) + 0.32(35.5) + 0.807(49.39) + \right. \\
 &\quad \left. 0.315(32.908) \right] \\
 &= 43.84 \text{ J/mol-K}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan persamaan tindakbalas kimia didapati tidak semua gas yang dihasilkan selepas tindakbalas (pembakaran) berlaku. Salah satu dan produk pembakaran iaitu kalium karbonat, K_2CO_3 yang berupa cecair jernih dihasilkan. Oleh itu, nilai pecahan fasa cecair ini perlu diperolehi bagi analisis prestasi propelan. Dan Jadual 2.5, pecahan jisim pepejal/cecair dan gas dapat diperolehi berdasarkan peratus kandungan bahan tersebut di dalam hasil pembakaran. Pecahan jisim cecair produk diwakili oleh simbol ε dan pecahan jisim gas produk adalah $(1-\varepsilon)$. Di sini, pecahan fasa cecair diberi oleh persamaan (2.29).

$$\varepsilon = \frac{M_{K_2CO_3} x n_{K_2CO_3}}{m_p} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon = \frac{138.204 \times 0.32}{100}$$

$$= 0.442$$

dengan

$M_{K_2CO_3}$ = berat molekul fasa cecair (K_2CO_3)

$n_{K_2CO_3}$ = nombor mol fasa cecair

m_p = jumlah jisim produk

Oleh itu, pecahan jisim cecair dan gas masing-masing adalah 0.442 dan 0.554. Hasil pembakaran propelan kalium nitrat-sukros bukan sahaja terdiri daripada gas malah ia juga mengandungi cecair kalium karbonat. Oleh itu, nisbah haba tentu bagi campuran gas dan cecair ini diperolehi menggunakan persamaan berikut.

$$\overline{C_p} = (1 - \varepsilon)C_p + \varepsilon C_s \quad (2.30)$$

$$= 0.554(43.84) + 0.442(209.2)$$

$$= 116.75 \text{ J/mol-K}$$

dengan

C_{pi} = haba tentu untuk gas spesis i

C_s = haba tentu fasa cecair pada tekanan tetap.

C_p = haba tentu fasa gas pada tekanan tetap.

$\overline{C_p}$ = haba tentu bagi campuran gas dan cecair hasil pembakaran

Nilai nisbah haba tentu, k bagi gas produk propelan kalium nitrat-sukros yang beroperasi pada tekanan 6.9 MPa (1000 psi) boleh ditentukan berdasarkan persamaan (2.31). Jisim propelan yang diambil adalah 100 g.

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.31)$$

$$= \frac{C_p}{C_p - R_o}$$

dengan

R_o = pemalar gas semesta

$$= 8.314 \text{ J/mol-K}$$

C_v = haba tentu pada isipadu tetap

$$k = \frac{C_{p_{gas}}}{C_{p_{gas}} - R_o} \quad (2.32)$$

$$= \frac{43.84}{43.84 - 8.314}$$

$$= 1.234$$

$$\bar{k} = \frac{\bar{C}_p}{\bar{C}_p - R_o} \quad (2.33)$$

$$= \frac{116.75}{116.75 - 8.314}$$

$$= 1.07$$

dengan

k = nisbah haba tentu bagi campuran gas dan cecair

k_{gas} = nisbah haba tentu gas produk

Parameter yang kerap kali digunakan dalam analisis prestasi propelan adalah berat molekul efektif bagi produk gas ekzos, M . Nilai ini dikira berdasarkan persamaan tindakbalas kimia seimbang bagi pembakaran propelan di mana berat molekul efektif, M diberi oleh persamaan berikut.

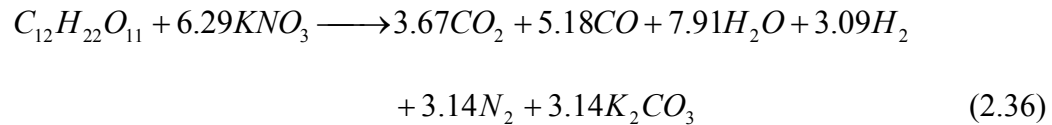
$$\begin{aligned}
 M &= \sum_{n=i} \frac{n_i M_i}{n_i} & (2.34) \\
 &= \frac{1}{n_i} \left[n_{CO_2} M_{CO_2} + n_{CO} M_{CO} + n_{H_2O} M_{H_2O} + n_{H_2} M_{H_2} + n_{N_2} M_{N_2} + n_{K_2CO_3} M_{K_2NO_3} \right] \\
 &= \frac{1}{2.344} \left[0.374(44.009) + 0.528(28.01) + 0.807(18.017) \right. \\
 &\quad \left. + 0.315(2.018) + 0.32(28.014) + 0.32(138.204) \right] \\
 &= 42.496 \text{ g/mol}
 \end{aligned}$$

Dengan n_i dan n_t adalah nombor mol spesis dan jumlah nombor mol gas masing masing. Manakala M pula adalah berat molekul spesis. Dengan memperolehi nilai berat molekul efektif, pemalar gas bagi produk pembakaran propelan kalium nitrat-sukros boleh diperolehi seperti berikut;

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{R_o}{M} & (2.35) \\
 &= \frac{8.314}{42.496 \times 10^{-3}} \\
 &= 195.642 \text{ J/kg-K}
 \end{aligned}$$

2.4.3 Suhu Nyalaan Adiabatik

Pembakaran propelan kalium nitrat-sukros merupakan satu tindakbalas kimia di mana tenaga kimia yang tersimpan di dalam propelan telah ditukar kepada tenaga haba. Suhu adiabatik di akhir pembakaran boleh diperolehi dari hukum keabadian tenaga. Haba pembakaran isobarik bagi bahan api adalah sama dengan pembakaran ideal bahan api tersebut di dalam oksigen. Ambil pembakaran propelan kalium nitrat-sukros sebagai kajian kes. Pengiraan suhu nyalaan adiabatik ini adalah berasaskan kepada propelan kalium nitrat-sukros, dengan nisbah campuran 65/35-O/F. Persamaan tindakbalas kimia seimbang bagi pembakaran propelan tersebut dalam kebuk pembakaran adalah seperti berikut:



Sifat termokimia bagi beberapa bahan kimia yang terlibat dalam pembakaran propelan ini disenaraikan seperti dalam Jadual 2.8. Kesemua nilai dalam jadual ini juga boleh diperolehi melalui pengiraan teori dan kaedah pengiraannya ditunjukkan dengan terpennci oleh Goodger.

Jadual 2.8 Nilai haba pembentukan bagi propelan kalium nitrat-sukros dan gas produknya

Spesis	$\Delta_f H^\circ$ (kJ/mol)
$C_{12}H_{22}O_{11}$	-2222.1
KNO_3	-494.63
CO_2	-393.52
CO	-110.53
H_2O	-241.83
H_2	0
N_2	0
K_2CO_3	-1150.18

Dengan menggunakan persamaan keseimbangan tenaga[3],

$$\sum_{\text{tindakbalas}} n_i (h_f + \Delta h_f)_i = \sum_{\text{hasil}} n_e (h_f + \Delta h_f)_e \quad (2.37)$$

dengan

$$n_i = \text{mol spesis bagi tindakbalas (reaktant)}$$

n_e = mol spesis bagi produk/hasil

h_f = entalpi spesis

Δh_f = perubahan entalpi spesis

nilai-nilai h_f , n_i dan n_e dimasukkan ke dalam persamaan akan memberikan,

$$1(-2222.10 + 0) + 6.29(-494.63 + 0) = 3.67(-393.52 + \Delta h_{CO_2}) + 5.18(-110.53 + \Delta h_{CO}) + 7.91(-241.83 + \Delta h_{H_2O}) + 3.09(0 + \Delta h_{H_2}) + 3.14(0 + \Delta h_{N_2}) + 3.14(-1150.18 + \Delta h_{K_2CO_3})$$

Persamaan di atas dipermudahkan menjadi,

$$2212.9 = 3.67\Delta h_{CO_2} + 5.18\Delta h_{CO} + 7.91\Delta h_{H_2O} + 3.09\Delta h_{H_2} + 3.14\Delta h_{N_2} + 3.14\Delta h_{K_2CO_3} \quad (2.38)$$

Untuk mendapatkan suhu nyalaan adiabatik, nilai di sebelah kanan perlu menyamai nilai di sebelah kiri persamaan (iaitu menyamai nilai 2212.9).Oleh itu dengan merujuk kepada Jadual 2.9, pengiraan dilakukan bagi kedua-dua keadaan iaitu pada suhu 1700K dan juga suhu 1800K.

Suhu, T (K)	Δh_{CO_2} (kJ/mol)	Δh_{CO} (kJ/mol)	Δh_{H_2O} (kJ/mol)	Δh_{H_2} (kJ/mol)	Δh_{N_2} (kJ/mol)	$\Delta h_{K_2CO_3}$ (kJ/mol)
1700	73.48	45.94	57.76	42.84	45.43	280.28
1800	79.43	49.43	62.69	46.17	48.98	301.20

Jadual 2.9 Nilai perubahan entalpi mengikut suhu pembakaran propelan

Oleh itu dengan memasukkan nilai-nilai Δh pada suhu 1700 K,

$$3.67(73.48) + 5.18(45.94) + 7.91(57.76) + 3.10(42.84) + 3.14(280.28)$$

$$= 2121.2 \text{ kJ/mol}$$

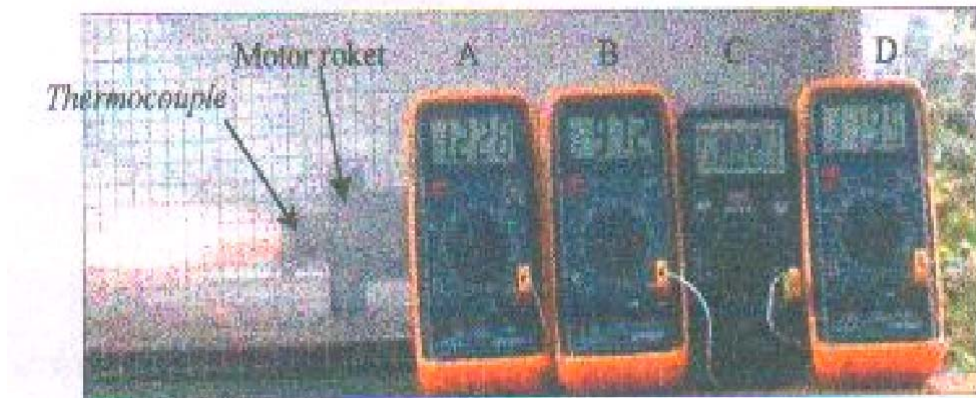
Jika suhu nyalaan 1800 K,

$$3.672(79.43) + 5.18(49.53) + 7.91(62.69) + 3.10(46.17) + 3.14(48.98) + 3.14(301.20) \\ = 22287.8 \text{ kJ/mol}$$

Dengan membuat interpolasi linear,

$$T_{AFT} = \frac{2212.9 - 2121.2}{2287.8 - 2121.2} (1800 - 1700) + 1700 \\ = 1755 \text{ K}$$

Walau bagaimanapun, suhu nyalaan sebenar yang maksimum pernah dicatatkan adalah 1228°C sahaja (1501 K). Ini disebabkan oleh kehilangan yang berlaku sepanjang ujikaji dijalankan. Sebagai contoh, haba dibebaskan ke persekitaran ketika pembakaran propelan berlaku. Bacaan pada pengganding suhu pada Rajah 2.9 menunjukkan suhu pada beberapa kawasan yang penting seperti kebulut pembakaran, A, nozel, D dan permukaan luar sarung, B dan C.



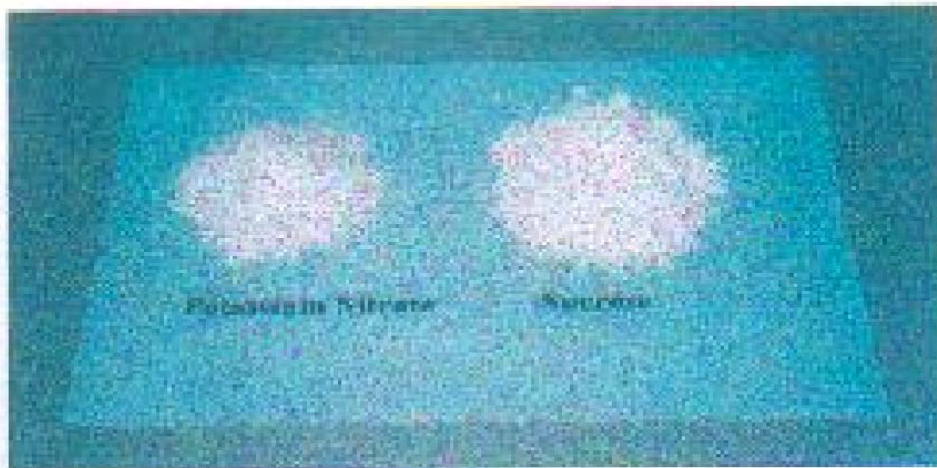
Rajah 2.9 Suhu nyalaan propelan pada titik yang berlainan pada motor roket

BAB III

TEKNIK PENYEDIAAN BAHAN DORONG (PROPELAN)

3.1 Pottasium Nitrat (Kalium Nitrat)

Pottasium nitrat merupakan propelan yang awal pernah digunakan untuk sistem pendorongan enjin roket. Pottasium nitrat adalah bahan pembakar yang dikelaskan sebagai letupan rendah (low explosives). Penyediaan ini hanya tertumpu kepada penghasilan propelan dengan menggunakan Pottasium nitrat sebagai bahan propelan. Bahan ini diperolehi dengan ketulenan 99% dan wujud dalam keadaan pepejal pada suhu bilik, berwarna putih kristal, mempunyai ketumpatan 2.109 g/cm dan larut di dalam air. Dalam teknologi propelan, ia digunakan sebagai agen pengoksida. Bahan ini sangat merbahaya sehingga boleh menyebabkan kebakaran dan letupan yang dahsyat.



Rajah 3.1 Bahan pengoksida dan bahan api

Sepanjang penyelidikan dijalankan, didapati bahan ini tidak terbakar dengan sendiri apabila terkena nyalaan sebaliknya hanya hangus dan menjadi bahan hitam serta mengeluarkan bau yang hangit. Walau bagaimanapun, apabila bahan ini dicampurkan dengan bahan organik seperti arang atau sukros, ia terbakar dengan aktif. Berdasarkan persamaan tindakbalas seimbang, pembakaran propelan pottasium nitrat-sukros tidak menghasilkan gas toksik yang kritikal (kecuali CO).

Oleh kerana bahan ini mudah terbakar maka langkah keselamatan sangat diperlukan ketika membawa, menyimpan, atau ketika menanganinya. Secara ringkas, Pottasium nitrat mempunyai sifat seperti disenaraikan pada Jadual 3.1.

Bahan Pengoksida	Pottasium Nitrat
Formula Molekul	KNO_3
Ketulenan	99%
Saiz Bijian	$\pm 200\mu\text{m}$
Warna	Putih Kristal
Fasa	Pepejal
% Berat Oksigen	47.47
Ketumpatan	2.109 g/cm^3
Berat Molekul	101.102 g/mol
Kapasiti Haba (25°)	23.01 cal/mol
Suhu Lebur	333°C
ΔH_f	117.76 kcal/mol

Jadual 3.1 Sifat Pottasium nitrat sebagai bahan pengoksida

3.2 Sukros

Penyelidikan ini menggunakan sukros sebagai pengikat dan juga bahan api. Pada suhu bilik, sukros wujud dalam keadaan pepejal berwarna putih kristal, tidak berbau serta larut dalam air dengan nisbah 190: 100 pada suhu 10°C. Sukros dikelaskan sebagai bahan organik karbohidrat

Bahan api/ pengikat	Sukros
Nama saintifik	β -D-Fructofuranosyl α -D-Glucopyranoside
Formula kimia	$C_{12}H_{22}O_{11}$
Warna	Putih
Berat Molekul	342.24 g/mol
Ketumpatan	1.5881 g/cm ³
Suhu Lebur	160°C

Jadual 3.2 Sifat-sifat sukros sebagai bahan api organik

Sukros adalah bahan organik dan sangat berbahaya apabila bercampur dengan Pottasium nitrat. Oleh itu, peralatan yang digunakan untuk menyediakan Pottasium nitrat dan sukros perlulah berasingan bagi mengelakkan percampuran antara bahan ini.

3.3 Penyediaan Bahan Asas

3.3.1 Mengering

Sebelum dijadikan propelan, Pottasium nitrat perlu dikeringkan terlebih dahulu. Ia perlu dihancurkan kepada ketulan yang lebih kecil (1 cm) sebelum dikeringkan. ini bagi memastikan agar proses pengeringan menjadi lebih cepat dan mudah. Proses pengeringan ke atas Pottasium nitrat dilakukan di dalam ketuhar. Pottasium nitrat ditimbang sebanyak 1 kg menggunakan neraca elektronik. Ia kemudiannya dimasukkan ke dalam sebuah bekas tahan haba. Pottasium nitrat dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu 90°C dan dibiarkan selama 24 jam. Setelah cukup tempoh pengeringan, Pottasium nitrat dikeluarkan dari ketuhar dan dibiarkan sejuk pada suhu bilik selama sejam. Pottasium nitrat sudah sedia untuk dikisar. Sukros tidak perlu dikeringkan terlebih dahulu. Dalam keadaan awal, bahan ini didapati telah cukup kering dan sedia untuk dikisar.

3.3.2 Mengisar

Kadar pembakaran propelan sangat dipengaruhi oleh saiz bijian bahan propelan, oleh itu Pottasium nitrat yang diperolehi perlu dikisar terlebih dahulu sebelum digunakan untuk menghasilkan propelan. Bagi mendapatkan saiz bijian yang halus, proses mengisar perlu dilakukan dengan teliti dan cermat. Setiap kali kisaran dibuat, hanya 100 g hingga 200 g Pottasium nitrat digunakan. Ini bagi memastikan proses mengisar menjadi lengkap dan saiz bijian bahan asas yang dikisar menjadi halus dan seragam. Kisaran dilakukan selama 30 minit untuk setiap kumpulan (batch).

Selepas dikisar, ia akan disaring menggunakan penapis berjaring halus. Proses ini dilakukan bagi memastikan agar semua bijian bahan asas mempunyai saiz yang sama. Setelah dikisar, bentuk bijian Pottasium nitrat didapati masih tidak seragam. Walau bagaimanapun ia berbentuk bulat. Dalam keadaan asal saiz bijian sukros adalah besar ($\pm 1.5\text{mm}$). Oleh itu, bijian sukros dikisar menggunakan pengisar yang sama seperti yang

digunakan untuk mengisar Pottasium nitrat. Walau bagaimanapun, bekas kisan serta mata kisan yang berlainan digunakan. Ini bagi mengelakkan sukros bercampur dengan Pottasium nitrat walaupun dalam jumlah/kuantiti yang kecil. Proses kisan bagi sukros juga sama dengan proses kisan Pottasium nitrat. Setelah dikisar, ia disaring menggunakan penapis yang berlainan tetapi mempunyai ciri fizikal yang sama seperti penapis Pottasium nitrat.

3.3.3 Mencampur

Pottasium nitrat yang telah dikisar, ditimbang dengan cermat menggunakan neraca mikro dan dicampurkan bersama-sama dengan sukros pada suhu bilik mengikut nisbah tertentu. Campuran tersebut digaulkan sehingga sebati. Masa yang diambil untuk menggaul campuran ini ialah selama 12 jam dan dilakukan dengan menggunakan sebuah penggaul elektrik. Mesin ini menggunakan motor elektrik untuk memutarakan bekas plastik yang mengandungi campuran bahan asas propelan. Bekas plastik akan berputar dengan kelajuan 5 putaran per minit. Campuran ini digaulkan di dalam bekas plastik yang tertutup. Campuran ini dihasilkan dalam kuantiti yang kecil agar proses mencampur menjadi lebih mudah dan menghasilkan campuran yang benar-benar sebati.

3.4 Proses Penyediaan Propelan

Proses penyediaan propelan merupakan peringkat yang paling bahaya di mana ia cenderung kepada risiko nyalaan dan letupan. Proses ini meliputi proses memanaskan serta merawat. Terdapat dua kaedah penghasilan propelan yang telah dijalankan. Kaedah tersebut adalah proses pembentukan dan proses acuan termampat. Semua kaedah penyediaan propelan menggunakan 100 gram serbuk propelan. Ini bagi memastikan agar suhu serta masa pemanasan adalah sekata untuk setiap kaedah. Ketuhar yang digunakan untuk memanaskan propelan mempunyai muatan maksimum 52.8 liter, berkuasa 1400 Watt dan boleh beroperasi pada suhu maksimum 220°C.

3.4.1 Kaedah Pembentukan

Acuan propelan dimasukkan ke dalam relau pada suhu 180°C dan dibiarkan selama 1 jam. Ini bagi memastikan suhu acuan adalah sama dengan suhu sekitar relau. Seterusnya serbuk propelan (campuran bahan asas) dimasukkan ke dalam acuan tadi dan dibiarkan selama 30 minit di dalam relau pada suhu 180°C. Seterusnya, acuan serta propelan dikeluarkan dan relau dan dibiarkan sejuk pada suhu bilik selama 12 jam. Propelan dikeluarkan dan acuan dan dibersihkan. Ia disimpan di dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika.

3.4.2 Kaedah Acuan Termampat

Acuan propelan dimasukkan ke dalam relau pada suhu 180°C dan dibiarkan selama 1 jam. Suhu serta masa pemanasan bergantung kepada suhu awal acuan serta kuantiti propelan. Setelah suhu acuan menyamai suhu sekitar relau, serbuk propelan dimasukkan ke dalam acuan tadi dan dibiarkan selama 30 ininit. Setelah dikeluarkan dan relau, omboh pemampat dimasukkan ke dalam silinder acuan berserta sel beban di atasnya. Pemampat hidraulik digunakan bagi memampatkan propelan. Beban yang dikenakan adalah bergantung kepada keluasan propelan yang dihasilkan. Tekanan dikenakan ke atas omboh, dengan ini omboh akan bergerak ke bawah dan memaksa buih buih udara keluar melalui laluan khusus di tepi omboh. Tekanan yang dikenakan ke atas omboh kemudiannya dibiarkan selama 5 minit. Selepas itu tekanan dan pemampat hidraulik dilepaskan. Ini bagi membenarkan lebih banyak buih-buih udara terbebas. Bacaan tekanan ke atas propelan dibuat berdasarkan bacaan pada multimeter. Sel beban yang dipasangkan pada omboh akan mengalami tekanan dalam arah paksi dan nilai terikan diukur menggunakan tolok terikan.

Setelah tekanan dilepaskan, omboh dikeluarkan. Ruang silinder acuan ditutup menggunakan gumpalan tisu industri. Ini bagi mengelakkan propelan dan menyerap lembapan ketika ia dirawat pada suhu bilik. Propelan bersama acuan dibiarkan sejuk selama 24 jam. Setelah selesai proses rawatan, propelan dikeluarkan dan acuan dan

dibersihkan. Propelan yang telah siap dimasukkan ke dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika. Bekas ini disimpan di tempat yang sejuk dan kering pada suhu bilik.

BAB IV

KADAR PEMBAKARAN BAHAN DORONG

4.1 Pengenalan

Analisis ke atas prestasi kimia propelan (bahan dorong) roket biasanya dibahagikan kepada dua bahagian yang utama. Analisis pertama adalah melibatkan proses pembakaran. Proses ini berlaku di dalam kebuk pembakaran yang berdimensi tetap. Di sini, tindakbalas kimia berlaku dengan cepat dan suhu meningkat dengan pantas. Isipadu kebuk perlu cukup untuk membolehkan tindakbalas kimia berlaku.

Analisis kedua dilakukan ketika proses pengembangan gas yang berlaku di bahagian nozel. Hasil pembakaran yang berupa gas dan cecair akan dipecutkan melalui nozel. Di bahagian masukan nozel, gas akan dimampat, halaju diperlahankan dan apabila gas telah melepasi kerongkong, gas yang panas akan dipecutkan dan proses pengembangan berlaku. Kes ini hanya berlaku bagi nozel tumpu-capah sahaja.

4.2 Pembakaran Propelan

Proses pembakaran bagi propelan adalah merupakan satu tindakbalas yang biasa di mana bahan api akan bercampur dengan sejumlah tertentu oksigen (dan bahan pengoksida). Bahan api yang terlibat boleh wujud dalam semua keadaan fasa. Walau bagaimanapun, keadaan gas jarang sekali digunakan. Hal ini adalah sama bagi bahan pengoksida sama ada cecair atau pepejal. Oksigen yang terlibat boleh wujud dalam keadaan cecair oksigen atau dalam bentuk sebatian lain seperti KNO_3 , NH_3O_4 dan NaNO_3 . Manakala hasil pembakaran (produk) biasanya adalah gas. Terdapat juga pepejal

atau cecair yang dihasilkan (bagi propelan tertentu). Sekiranya kuantiti suatu zarah pepejal dan cecair yang dihasilkan adalah kecil, maka andaian bahawa gas adalah unggul boleh diterima dan ralatnya adalah kecil. Bagi gas unggul, persamaan $pV = nRT$ boleh digunakan dengan n adalah kg mol per kilogram gas.

Pembakaran propelan pepejal berlaku di kawasan yang tipis pada permukaan propelan. Apabila pembakaran berlaku pada suatu permukaan propelan, haba yang dihasilkan oleh tindakbalas kimia akan memanaskan bahagian bawah pembakaran. Propelan yang panas akan melembut serta cair dan apabila propelan ini mempunyai cukup haba untuk terbakar serta suhu propelan mencapai suhu nyalaan (flash temperature), ia akan mula terbakar. Haba ini menyebabkan propelan terbakar, seterusnya pembakaran berlaku dengan lancar pada kadar tertentu. Kadar pembakaran linear bagi propelan pepejal boleh dihubungkan mengikut persamaan fungsi berikut.

$$r_o = f(P_c, t_p, u_g, O/F, C-F, O-P, G) \quad (4.1)$$

dengan

P_c = tekanan statik pada permukaan propelan

t_p = suhu awal propelan

t_f = suhu nyalaan propelan

u_g = halaju pergerakan melintang (transverse velocity) bagi gas pembakaran yang melalui permukaan propelan

O/F = komposisi bahan pengoksida /bahan api pada propelan

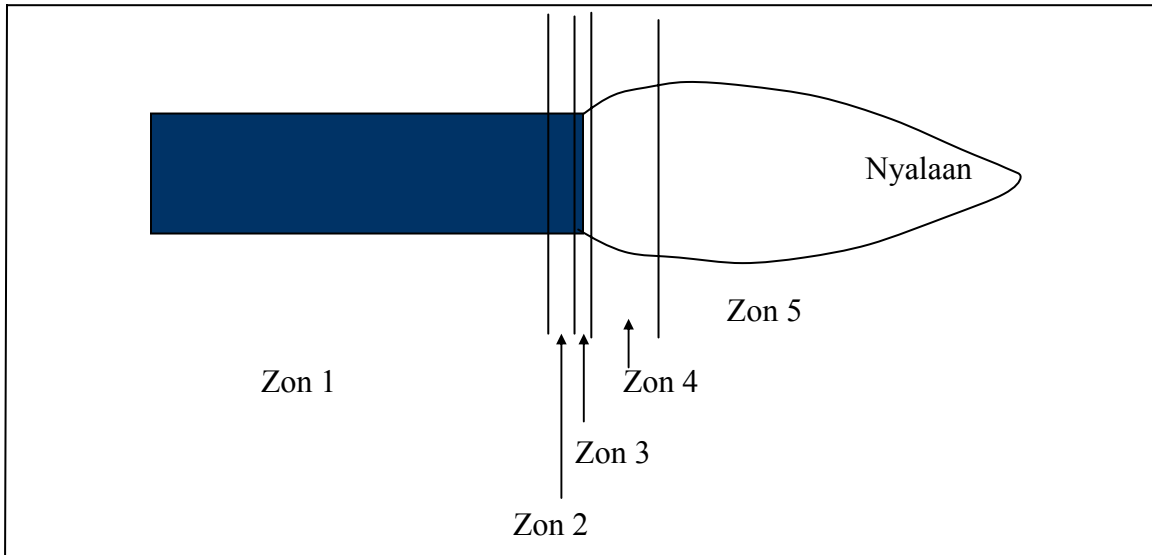
$C-F$ = formula kimia bagi propelan (bahan)

$O-P$ = saiz bijian bahan pengoksida (untuk propelan komposit)

G = faktor corak propelan

Walau bagaimanapun, kadar pembakaran propelan boleh di ubah dengan mencampurkan pengubah kadar pembakaran (burning rate modifier) ke dalam propelan

tersebut. Pembakaran pada permukaan propelan pepejal boleh dibahagikan kepada beberapa zon. Pembahagian zon ini dibuat berdasarkan sifat-sifat khusus yang ada pada kawasan tersebut dirujuk kepada *extruded double base propellant* (EDB)



Rajah 4.1 Zon pembakaran bagi propelan *double-base*

Zon 1. Pada zon ini, suhu propelan adalah menyamai suhu awal propelan di mana pada kawasan ini haba di permukaan propelan meningkatkan suhu propelan.

Zon 2. Zon ini juga dikenali sebagai zon buih (foam zone). Ini berdasarkan keadaan propelan pada kawasan tersebut di mana pembakaran propelan telah menyebabkan kawasan ini memanas dan berubah sifat fizikalnya kepada cecair. Sehingga pada satu tahap, cecair ini telah memiliki cukup tenaga haba untuk ia berubah bentuk kepada gas. Zon ini sangat tipis (10^{-2} hingga 10^{-3} cm) pada suhu mencecah 600 K.

Zon 3. Zon ini juga dikenali sebagai zon fizz (fizz zone). Zon ini merupakan zon awal nyalaan. Pada zon ini pembentukan gas hasil pembakaran telah berlaku dan nisbahnya bergantung kepada komposisi kimia propelan tersebut. Pada zon inilah fungsi sebenar pemangkin kadar pembakaran akan berlaku kerana ia boleh mengubah komposisi gas yang akan dihasilkan. Sebenarnya, gas pembakaran sebaik-baiknya mempunyai jisim

mol yang rendah dan haba pembentukan (heat of formation) ΔH_f^o yang rendah agar denyut tentu, I_{sp} yang tinggi dapat diperolehi.

Zon 4. Zon ini juga dikenali sebagai zon gelap kerana ia bersesuaian dengan warna zon ini, semua gas pembakaran awal bercampur dengan rawak. Suhu pada zon ini sangat tinggi.

Zon 5. Pada zon ini, pembakaran telah berlaku dengan lengkap dan merupakan zon nyalaan akhir. Pada zon ini, gas yang dihasilkan pada zon 4 menjadi tepu. Suhu nyalaan adiabatik (SNA) diukur pada zon ini.

Ujian pembakaran propelan dilakukan ke atas jalur pembakaran (strand burner) di dalam gas lengai seperti N_2 pada tekanan dan 10 hingga 30 atm. Tekanan ini didapati telah mempengaruhi jarak antara zon. Sebagai contoh, apabila tekanan meningkat, ketebalan zon gelap mengurang, panjang nyalaan nampak (visible flame) menjadi semakin pendek dan haba terbebas per unit isipadu pada permukaan propelan meningkat. Begitu juga dengan kadar pembakaran, ia meningkat dengan kenaikan tekanan.

4.3 Ujian Kadar Pembakaran

Pembakaran propelan akan menyusutkan permukaan propelan dalam arah berserenjang dengan permukaan propelan. Kadar penyusutan propelan yang diakibatkan oleh pembakaran ini dikenali sebagai kadar pembakaran. Kajian ke atas kadar pembakaran merupakan satu analisis yang sangat penting yang mana ia akan menentukan prestasi sesuatu propelan.

Data-data kadar pembakaran diperolehi melalui tiga kaedah yang biasa digunakan iaitu pembakaranjalur propelan, penilaian motor balistik (Ballistic evaluation motor, BEM) dan kaedah ultrasonic (Ultrasonic method).

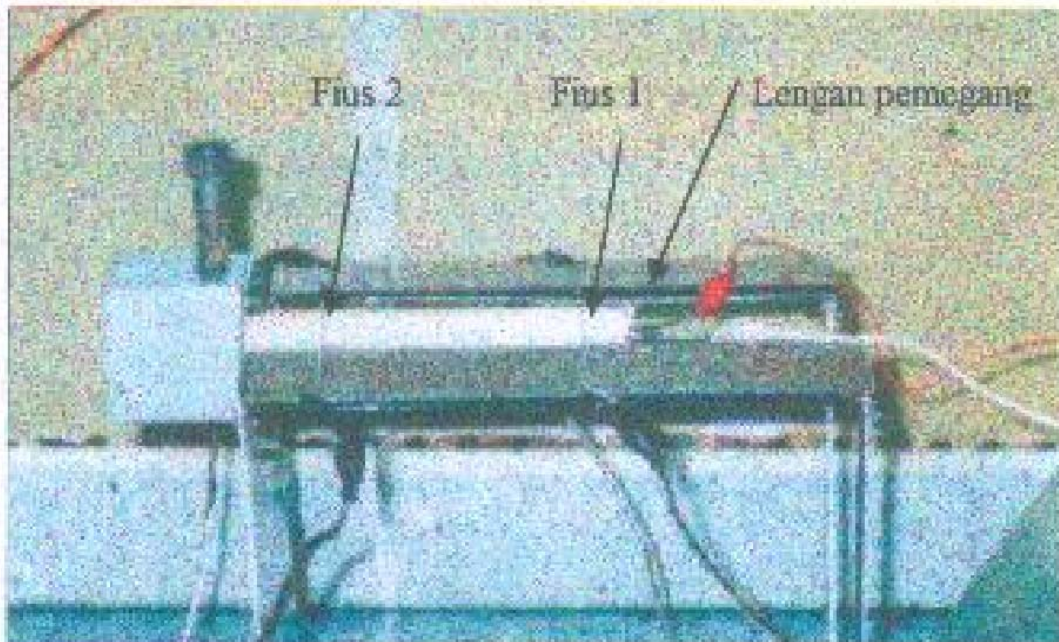
BAB V

UJI KAJI

5.1 Kaedah Ujikaji

Ujian kadar pembakaran dilakukan dengan menggunakan jalur propelan. Saiz jalur propelan yang dihasilkan adalah mengikut spesifikasi yang telah ditetapkan. Jalur propelan yang piawai digunakan adalah berbentuk rod silinder dengan diameter rod 1.5 cm dan mempunyai panjang keseluruhan 15 cm. Panjang jalur propelan yang digunakan adalah seragam tetapi jisim propelan yang diuji adalah berbeza bergantung kepada ketumpatan propelan tersebut. Tekanan yang dikenakan untuk memampatkan propelan yang dipanaskan (kaedah acuan mampat) akan mempengaruhi ketumpatan propelan.

Jalur propelan yang telah siap dihasilkan akan ditandakan dengan dua titik berjarak 10 cm antara satu sama lain. Rajah 5.1 menunjukkan bagaimana jalur propelan ditempatkan pada pemegang jalur propelan. Dua dawai fuis digunakan untuk merentangi jalur propelan pada dua titik yang telah ditandakan. Dawai fuis ini diregangkan pada lengan pemegang. Dawai fuis ini kemudiannya disambungkan kepada pemasa. Pencucuh diletakkan di bahagian hujung yang bebas. Bekalan kuasa elektrik 30 V dikenakan pada pencucuh. Pencucuh akan mula menghasilkan percikan dan nyalaan awal bermula. Pembakaran akan berlaku dengan licin dan mula menghampiri titik pertama pada jalur propelan.



Rajah 5.1 Jalur propelan diletakkan pada pemegang jalur propelan

Apabila nyalaan mula menyentuh titik 1 (fius 1), dawai fius akan putus dan secara automatik pemasa akan memulakan pengukuran masa. Pembakaran akan berterusan dan apabila nyalaan menyentuh titik 2 (fius 2) dawai fius kedua akan putus dan serentak dengan itu pemasa akan menghentikan kiraan masa. Masa yang diambil untuk membakar 10 cm jalur propelan direkodkan. Dengan itu, kadar pembakaran dapat dikira dengan menggunakan persamaan mudah seperti di bawah:

$$r = \frac{L}{t_b} \quad (5.1)$$

dengan

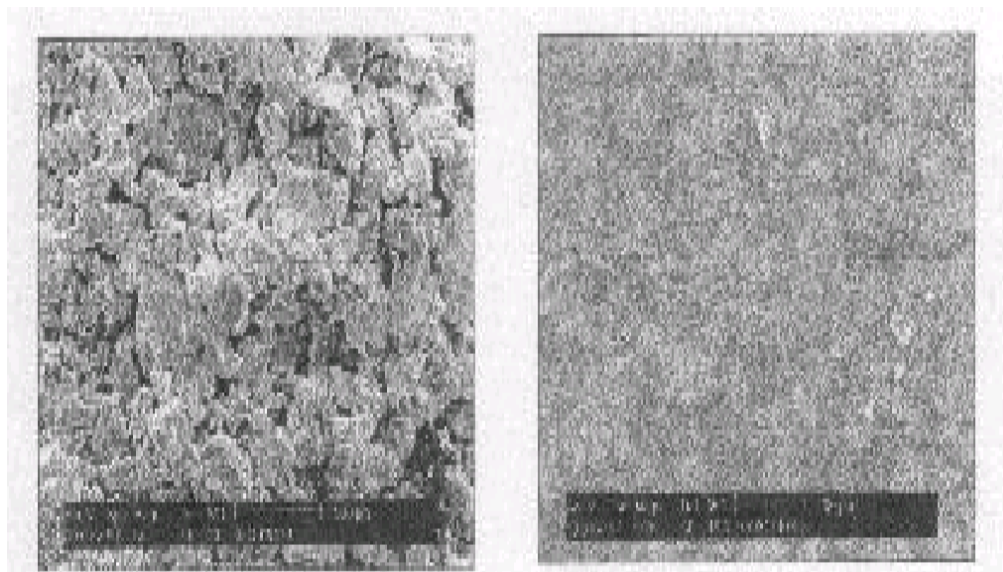
r = kadar pembakaran

L = jarak antara dua titik path jalur propelan

t_b = masa pembakaran jalur propelan

5.2 Pengaruh Tekanan Mampatan Ke Atas Kadar Pembakaran

Kadar pembakaran propelan Pottasium nitrat-sukros juga didapati sangat dipengaruhi oleh ketumpatan propelan tersebut. Keadaan ini diperolehi secara langsung dengan memampatkan propelan ketika proses penyediaannya. Kaedah ini dikenali sebagai kaedah acuan termampat. Dengan ini, propelan yang dihasilkan menjadi lebih tumpat kerana tiada ruang udara yang wujud pada propelan tersebut. Rajah 5.2 menunjukkan perbezaan antara propelan yang dihasilkan tanpa mampatan dan juga dengan mampatan. Propelan yang dihasilkan melalui kaedah ini mempunyai ketumpatan yang berubah-ubah bergantung kepada tekanan yang dikenakan. Keadaan ini telah mengubah kadar pembakaran bagi propelan yang dihasilkan. Semua propelan yang dihasilkan untuk tujuan ujikaji ini adalah menggunakan nisbah campuran 65% kalium nitrat dan 35% sukros (peratusan dalam jisim).

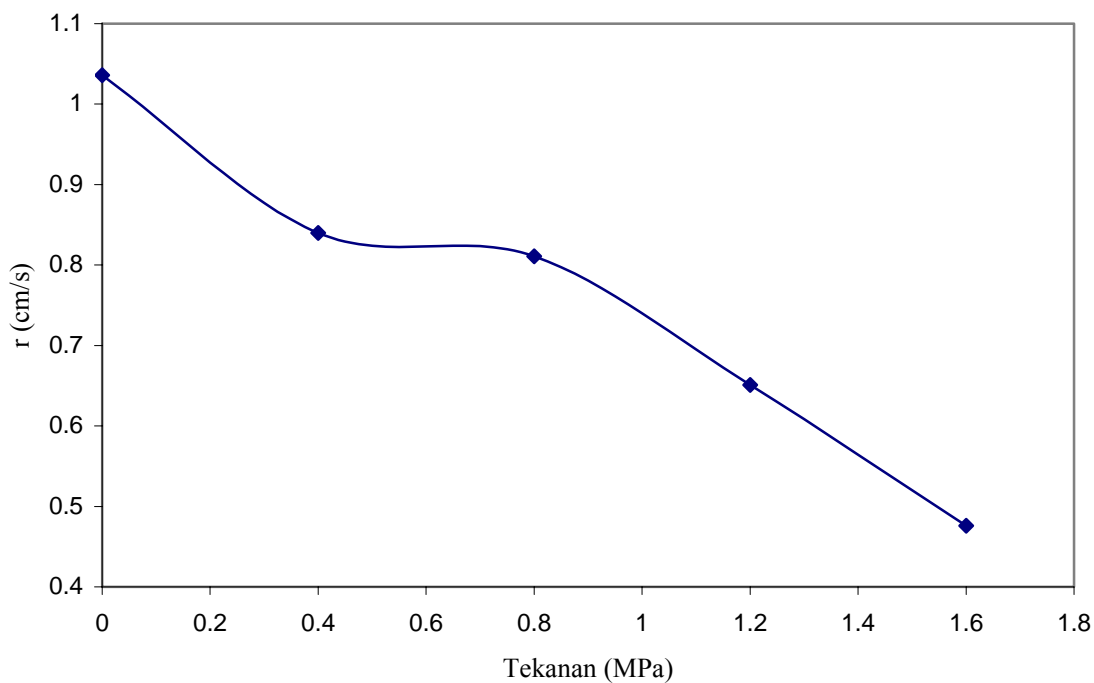


(a)

(b)

Rajah 5.2 Permukaan propelan yang dihasilkan (a) tanpa tekanan, (b) tekanan 1.6 MPa.

Melalui ujian kadar pembakaran, didapati bahawa kadar pembakaran semakin rendah apabila tekanan ditingkatkan. Keadaan ini jelas dilihat pada Rajah 5.3 di mana apabila tekanan tidak dikenakan, kadar pembakarannya adalah paling tinggi iaitu 1.036 cmls. Berdasarkan Rajah 5.3 juga didapati pada julat tekanan 0.4 MPa hingga 0.8 MPa, kadar pembakaran tidak menunjukkan perubahan yang ketara. Oleh itu, tekanan ini didapati juga sesuai digunakan bagi penghasilan propelan pottasium nitrat- sukros untuk mendapatkan sifat yang seragam pada julat tekanan yang lebih besar.

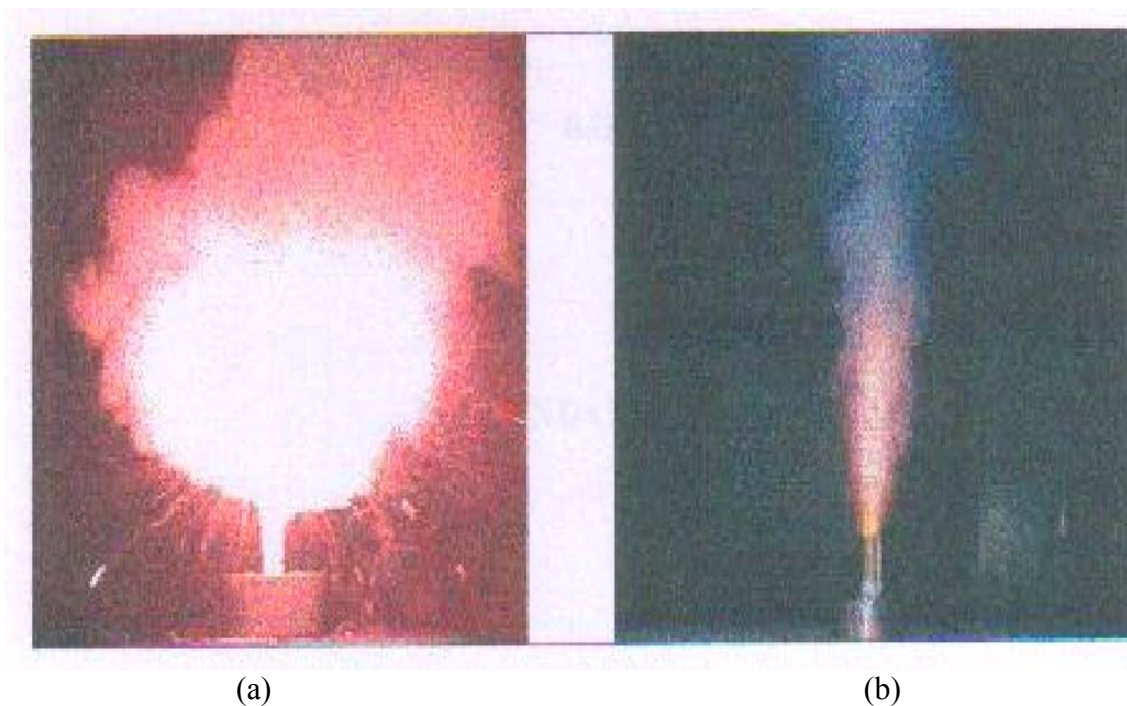


Rajah 5.3 Kadar pembakaran berubah terhadap tekanan yang dikenakan semasa propelan dihasilkan.

5.3 Gayalaku Pembakaran Propelan

Didapati bahawa terdapat perbezaan nyalaan yang nyata antarajalur propelan yang dihasilkan melalui kaedah penghasilan yang berbeza. Pembakaran jalur propelan yang

dihasilkan melalui kaedah pembentukan adalah lebih cepat berbanding jalur propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan termampat pada komposisi kimia yang sama. Nyalaan bagi kedua-dua propelan juga menunjukkan perbezaan yang nyata (rujuk Rajah 5.4). Nyalaan jalur propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan menunjukkan nyalaan mencapah. Berbeza sekali dengan jalur propelan acuan termampat di mana semua daun-daun nyalaan menghala ke arah bertentangan dengan arah pembakaran iaitu berserenjang dengan permukaan pembakaran jalur propelan. Keadaan ini boleh diterangkan dengan merujuk kepada Rajah 5.2. Kaedah pembentukan menghasilkan propelan yang mengandungi terlalu banyak liang udara menyebabkan kewujudan bijian pottasium nitrat seolah-olah bersendirian dan hanya diselaputi oleh satu lapisan sukros yang nipis di sekelilingnya. Oleh itu, pembakaran akan berlaku dalam semua arah bijian tersebut. Berbeza dengan jalur propelan acuan termampat, susunan pottasium nitrat sangat padat dengan dipenuhi oleh sukros di sekelilingnya. Ini menyebabkan pembakaran lebih sekata dan hanya berlaku di permukaan luar pembakaran.



Rajah 5.4 Perbezaan nyalaan antara kaedah (a) pembentukan dan (b) acuan termampat

Sisa pembakaran untuk kedua kes adalah sama di mana terdapat serbuk-serbuk hitam (karbon) dan juga pepejal putih terhasil. Jumlah sisa pembakaran yang dihasilkan didapati berkait rapat dengan peratus bahan pengoksida/bahan api. Sisa hitam didapati lebih banyak dihasilkan (secara relatif) apabila peratus bahan api meningkat manakala sisa hitam akan berkurangan sekiranya peratus bahan api lebih kecil. Jumlah sisa hitam didapati bergantung kepada kandungan sukros. Ini berikutan unsur karbon yang wujud di dalam sukros.

Semasa pembakaran terdapat juga titisan cecair dihasilkan. Titisan cecair berwarna jernih ini dibebaskan dalam bentuk wap dan bergerak dalam bentuk asap putih. Apabila bersentuhan dengan sebarang permukaan yang sejuk seperti perspek atau cermin, ia akan membentuk titisan cecair yang jernih pada permukaan tersebut. Cecair ini telah dikenalpasti sebagai pottasium karbonat, (KCO_3). Cecair ini bersifat alkali dengan nilai pH 11. Didapati cecair ini sangat menghakis dan boleh mengoksidakan aluminium dan keluli lembut dengan lebih cepat. Disebabkan sifat cecair yang terbentuk ini menghakis, kipas ekzos kebuk udara rosak sebanyak dua kali.

BAB VI

KEPUTUSAN

6.1 Keputusan dan Perbincangan

Melalui ujikaji kadar pembakaran, prestasi propelan dapat dikenalpasti. Banyak parameter lain seperti daya tujah, tekanan serta denyut tentu propelan boleh diperolehi apabila data-data kadar pembakaran propelan tersebut diperolehi. Walaubagaimanapun, dengan peralatan yang ada, ujian kadar pembakaran hanya dilakukan pada tekanan 101.33 kPa. Ujian ini sudah memadai bagi menentukan komposisi kimia yang paling optimum.

Sekiranya ujian dilakukan pada kebuk bertekanan, nilai kadar pembakarannya tidak sama dengan nilai kadar pembakaran pada tekanan atmosfera. Ini kerana kadar pembakaran bagi propelan komposit sangat dipengaruhi oleh tekanan kebuk. Ujian kadar pembakaran pada kebuk bertekanan hanya dilakukan bagi mendapatkan pemalar tekanan dan indeks tekanan.

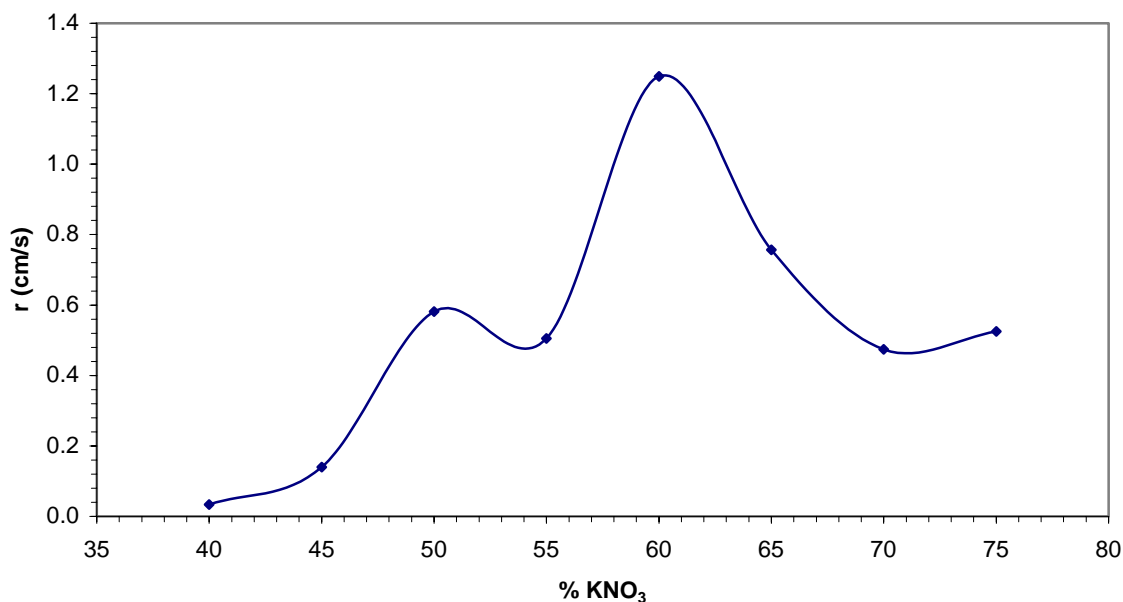
6.2 Perubahan Komposisi Campuran Bahan Asas

Propelan yang diuji adalah dalam kelas propelan komposit yang mana bahan api dan bahan pengoksida adalah dalam bentuk kimia yang berasingan. Bahan pengoksida dan bahan api ini kemudiannya dicampurkan bersama menjadi satu campuran yang sekata. Rawatan haba dilakukan bagi ‘menggabungkan’ bersama secara fizikal kedua dua bahan ini. Namun, sifat-sifat asal bahan ini masih boleh dikenalpasti. Berdasarkan imej yang dicerap menggunakan minikroskop electron jelas menunjukkan bijian sukros dan pottasium nitrat tidak bercampur menjadi sebatian kimia yang satu sebaliknya wujud

secara bersendirian. Ini menunjukkan campuran bahan tersebut tidak bertindak balas secara kimia semasa ia dicampurkan, dirawat atau dipanaskan.

Ujian kadar pembakaran yang dilakukan menunjukkan perubahan yang ketara apabila komposisi bahan pengoksida bahan api diubah mengikut nisbah bahan pengoksida. Komposisi kandungan potassium nitrat-sukros diubah mengikut nisbah 40/60, 45/55, 50/50, 55/45, 60/40, 65/35, 70/30 dan 75/25. Data-data ujikaji direkodkan dan graf kadar pembakaran melawan peratus bahan pengoksida diplotkan. Semua ujian dilakukan/diulangi sebanyak tiga kali bagi mendapatkan nilai purata. Ini bagi mengurangkan ralat yang mungkin wujud sernasa ujikaji dijalankan.

Hasil ujikaji menunjukkan bahawa nilai kadar pembakaran maksimum dicapai pada 60% potassium nitrat dan 40% sukros di mana kadar pembakarannya adalah 1.249 cm/s (rujuk Rajah 6.1).

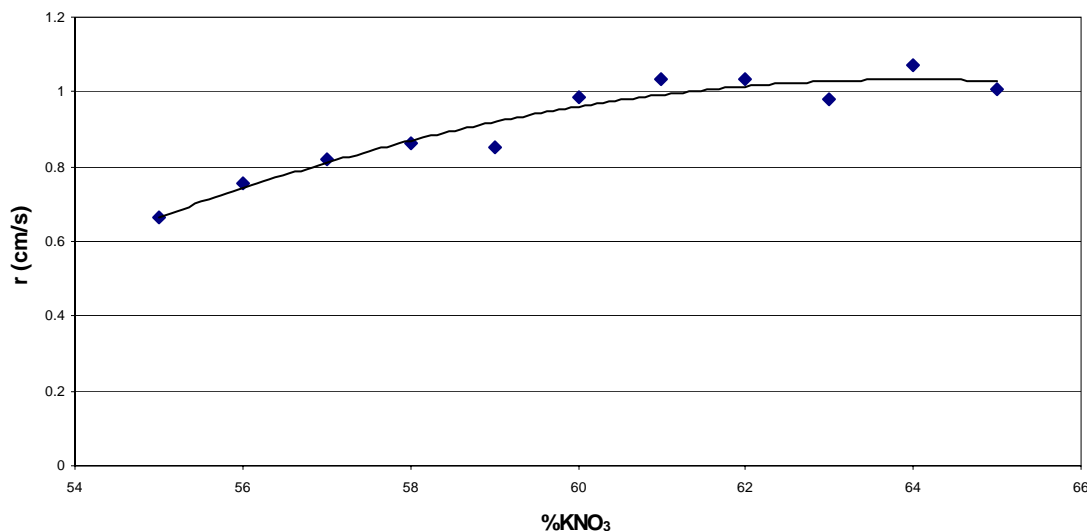


Rajah 6.1 Hubungan kadar pembakaran terhadap nisbah campuran bahan pengoksida bahan api (O/F) bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan

Secara amnya, apabila nisbah bahan pengoksida/ bahan api (O/F) melebihi 60/40, kadar pembakaran menjadi semakin kecil semula dan jatuh sehingga 0.4 cm/s. Apabila kandungan sukros melebihi 60%, kadar pembakaran menjadi sangat perlahan dan bahan ini dikatakan boleh bertindak sebagai pelengah (delay). Secara teori, kadar pembakaran yang maksimum dicatat pada komposisi 65/35 peratus O/F (nisbah jisim bahan pengoksida terhadap bahan api) iaitu pada keadaan stoikiometrinya.

Graf yang diplot tidak menunjukkan pola yang sekata. Beberapa langkah telah diambil bagi memperbaiki lagi data ini. Langkah pertama adalah dengan ‘menghalusi’ data pada kawasan antara 55% hingga 65%. Ini bagi mendapatkan peratus yang lebih tepat di mana takat kadar pembakaran maksimum dicapai. Bermula dengan 55, 56, 57 sehingga 65. Dengan hanya kenaikan sebanyak 1% sahaja diharapkan dapat memberikan kadar pembakaran yang tepat bagi keadaan optimum. Hasilnya, graf yang diplotkan menunjukkan bahawa kadar pembakaran yang maksimum adalah 1.033 cm/s (rujuk Rajah 6.2). Sebanyak 66 jalur propelan telah diuji bagi mendapatkan graf tersebut.

Adalah dijangkakan pola kadar pembakaran yang tidak seragam adalah disebabkan kaedah penghasilan propelan yang tidak tetap. Apabila kaedah pembentukan digunakan untuk menghasilkan propelan, ketumpatan propelan tidak tetap bagi setiap jalur propelan. Kepadatan serbuk propelan di dalam acuan adalah bergantung kepada bagaimana serbuk propelan dimasukkan dan dimampatkan. Sekiranya jisim serbuk propelan ditetapkan pada nilai tertentu untuk setiap jalur propelan, ketumpatan propelan didapati masih tidak seragam. Ketumpatan propelan juga didapati berubah sepanjang jalur propelan. Masalah ini telah di atasi dengan memampatkan propelan (tekanan mampatan, 1.6 MPa) semasa proses pemanasan dilakukan ke atas propelan.

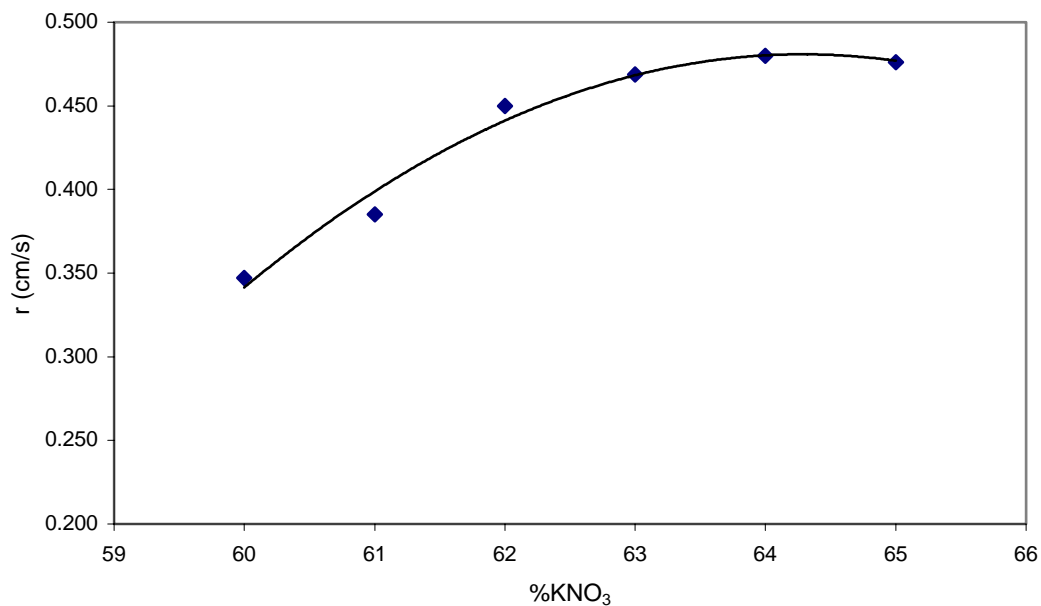


Rajah 6.2 Hubungan kadar pembakaran terhadap perubahan nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api (O/F) bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan

Apabila permukaan propelan diimbas menggunakan minikroskop elektron, didapati propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan terbukti mempunyai banyak liang udara. Didapati saiz liang udara yang wujud adalah tidak sekata dan ini menunjukkan bagaimana ketumpatan propelan boleh berubah sepanjang jalur propelan. Sifat poros pada propelan ini telah menyebabkan data kadar pembakaran yang diperolehi tidak seragam. Kenyataan ini dikuatkan lagi oleh Baschung dalam jurnalnya yang menyatakan bahawa bagi kebanyakan propelan pepejal, keadaan garis graf boleh diterangkan oleh kesan mekanikal terutama sekali permukaan propelan yang poros.

Oleh itu, kaedah acuan termampat digunakan bagi memperbaiki kelemahan tersebut. Berdasarkan kaedah ini, jisim propelan untuk setiap jalur propelan diukur dengan tepat dan tekanan yang dikenakan juga tetap iaitu pada 1.6 MPa. Hasilnya menunjukkan propelan yang dihasilkan adalah lebih baik berbanding propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan.

Ujian kadar pembakaran ke atas jalur propelan menunjukkan data yang lebih seragam. Walau bagaimanapun didapati kadar pembakarannya adalah lebih rendah berbanding kadar pembakaran yang diperolehi dan pembakaran jalur propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan. Kadar pembakaran bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan adalah dua kali lebih besar berbanding kadar pembakaran bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan termampat (pada komposisi bahan yang sama).

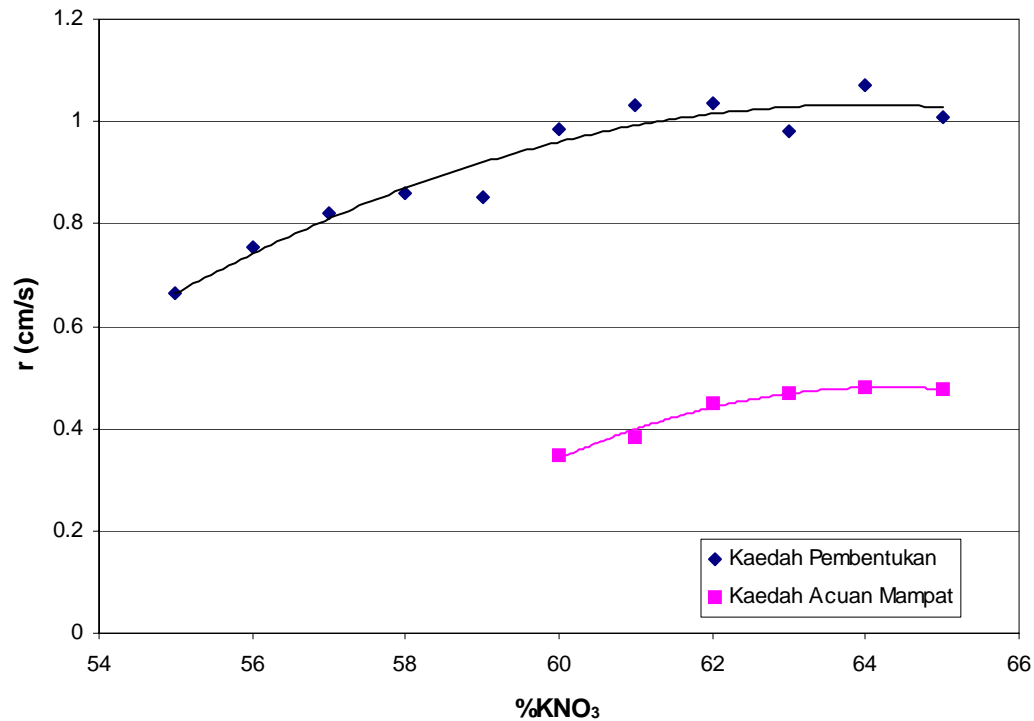


Rajah 6.3 Hubungan kadar pembakaran terhadap perubahan komposisi bahan pengoksida-bahan api (O/F) bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan termampat

Namun, pola pertambahan kadar pembakaran adalah sama seperti pada propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan di mana kadar pembakarannya meningkat secara polinomial. Pada komposisi kimia 60 peratus potassium nitrat dan 30 peratus sukros, didapati kadar pembakarannya adalah 0.347 cm/s.

Kadar pembakaran meningkat sehingga mencapai maksimum pada 64 peratus potassium nitrat dan 36 peratus sukros dan kadar pembakaran yang dicatatkan adalah

0.48 cm/s. Sebagai perbandingan, Rajah 6.4 menunjukkan perbezaan antara kadar pembakaran yang diperolehi dan propelan yang dihasilkan menggunakan kaedah pembentukan dan kaedah acuan termampat.



Rajah 6.4 Hubungan kadar pembakaran terhadap perubahan komposisi bahan pengoksida-bahan api (O/F) bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan dan acuan termampat

BAB VII

KESIMPULAN

7.1 Kesimpulan

Daripada hasil penyelidikan ini, dua rig ujian berjaya direkabentuk, dibina dan diuji. Rig ujian kadar pembakaran pada tekanan atmosfera telah diuji keberkesanannya melalui ujian kadar pembakaran propelan pottasium nitrat-sukros. Dengan menggunakan rig ujian ini, data-data kadar pembakaran propelan pada tekanan atmosfera dapat direkodkan dengan tepat. Manakala rig ujian daya tujah statik didapati beroperasi dengan baik ketika ujian daya tujah statik dilakukan.

Daripada hasil penyelidikan ini, satu teknik penyediaan propelan potassium nitrat sukros berjaya dibangunkan dengan sebahagian besar peralatannya direkabentuk dan dibina sendiri di Universiti Teknologi Malaysia, Skudai. Propelan yang dihasilkan telah melalui beberapa siri ujian seperti ujian kadar pembakaran dan ujian daya tujah statik.

Hasil ujikaji menunjukkan bahawa:

1. Propelan pottasium nitrat-sukros boleh dihasilkan melalui beberapa teknik seperti kaedah pembentukan dan acuan termampat.
2. Propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan termampat didapati memberikan sifat mekanikal dan kimia yang baik ke atas prestasi propelan tersebut. Tekanan mampatan yang paling sesuai ialah 1.6 MPa. Propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan mampat didapati lebih tumpat, keras, menunjukkan pembakaran

- yang tetap, stabil serta selamat diuji. Melalui kaedah ini juga, proses penyediaan menjadi lebih mudah dan selamat.
3. Ujian pemanasan ke atas propelan menunjukkan julat masa pemanasan yang sesuai adalah antara 20 hingga 30 minit pada suhu 180°C.
 4. Propelan yang dihasilkan didapati berbentuk pepejal pada suhu bilik, berwarna kuning madu, keras tetapi rapuh, berketumpatan 1.75 g/cm³, larut di dalam air, mudah menyerap lembapan dan mudah terbakar.
 5. Pembakaran propelan pottasium nitrat-sukros tidak menghasilkan gas toksik seperti kebanyakan propelan lain.
 6. Ujian kadar pembakaranjalur propelan telah menunjukkan prestasi propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan tidak menunjukkan pola perubahan yang sekata bagi perubahan nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api. Walaubagaimanapun, nilai kadar pembakaran maksimum iaitu 1.033 cm/s dicapai pada kandungan 64.9% pottasium nitrat dan 35.1% sukros.
 7. Kadar pembakaran bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan termampat adalah bergantung kepada nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api dan juga tekanan mampatan yang dikenakan semasa proses menghasilkan propelan tersebut. Semakin besar nilai tekanan yang dikenakan, semakin rendah kadar pembakaran propelan. Kadar pembakaran maksimum 0.48 cm/s dicapai pada 65% pottasium nitrat dan 35% sukros.
 8. Daripada ujian daya tujah statik didapati bahawa pembakaran propelan pottasium nitrat-sukros dengan menggunakan corak silinder padu tidak menghasilkan daya tujah.
 9. Dengan menggunakan propelan corak silinder berlubang, daya tujah dihasilkan dengan baik. Daripada ujian yang dijalankan nilai daya tujah dan lengkung graf secara amnya bergantung kepada nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api. Semakin hampir nisbah campuran bahan pengoksida-bahan api kepada nisbah stoikiometri, semakin besar daya tujah yang dihasilkan.

Jadual 7.1 menunjukkan parameter cirian propelan tersebut. Secara umum, semua nilai yang diperolehi secara ujikaji lebih kecil berbanding nilai yang diperolehi secara ujikaji. Walau bagaimana pun, perbezaan yang dicatatkan adalah kecil antara 4.7% hingga 5.0%.

Parameter	Kiraan teori	Hasil ujikaji
Berat molckul efektif, M	42.496 g/mol	-
Nisbah haba tentu, k	1.07	-
Pemalar gas ekzos, R	195.642 J/kg-K	-
Halaju ciri, C^*	942.066 m/s	-
Faktor alir jisim, C_m	1.06×10^{-3} s/m	-
Denyut tentu, I_{sp}	162.21 s	154.8 s
Halaju ekzos efektif, C	1,591.3 m/s	1,518.7 m/s
Pekali daya tujah, C_F	1.69	1.61
Kadar pembakaran, r_p (pada 1.035 MPa)	-	0.726 cm/s
Pekali tekanan, α	-	1.5×10^{-4} m ² s/kg
Indeks tekanan, n (pada 1.035 MPa)	-	0.3
Kadar pembakaran, r (pada tekanan atmosfera)	-	0.48 cm/s

Jadual 7.1 Parameter cirian propelan pottasium nitrat-sukros

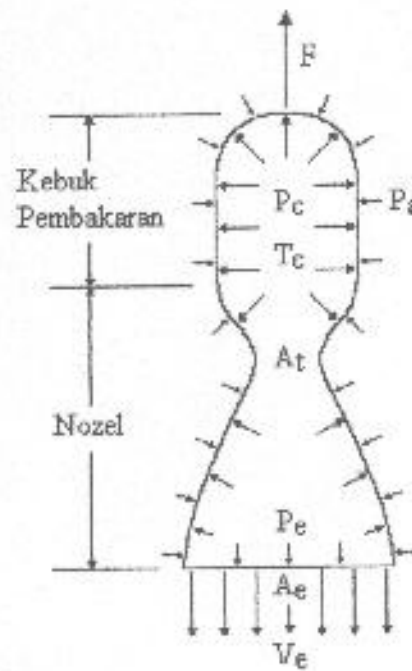
RUJUKAN

1. Marzita Abdullah (2001), 'Industri Angkasa Malaysia Bakal Lahirkan Pakar Satelit', Utusan Malaysia, 9 April 2001
2. Sooraj Nair (1996), 'Malaysia Aims High With Space Industry', The Star, 22 Januari 1996
3. Barrere, M. et. al (1960), 'Rocket Propulsion', Elsevier Publishing Co, Paris
4. Braun, W.V & Ordway, F.I (1976), 'The Rockets' Red Glare', Anchor Press, New York
5. Sutton, G.P (1992), 'Rocket propulsion Element', John Willy & Sons, MIT
6. Chasman, D (2000), 'Characteristic Gap: A New Design Criterion for Solid Rocket Motor', Technical Note, Journal of Propulsion, AIAA, Vol 17, m/s 216-218
7. Sarner, S. F (1966), 'Propellant Chemistry', Reinhold Publications, New York
8. Fordham. S (1980), 'High Explosives and Propellant' Pergamon Press, Britain
9. Lo, R (1970), 'Advanced Chemical Rocket Propellants: On the Way from Theory to Hardware', Proceeding of The Second International Conference on Space Engineering, Holland, mis 1155-162
10. Boyars, Carts & Klager, K. (1969), 'Propellant Manufacture, Hazards and Testing' , American Chemical Society Publications, Washington
11. Holzmann, R.T (1969), 'Chemical Rockets', Marcel Dekker, New York
12. Bozic, V.S & Blagojevic, D.D (2000), 'Burning rate Modifier Effects on a Modified Polivinyll Chloride-Based Propellants, Journal of Propulsion & Power, AIAA, Vol 17, No 5, m/s 10 17-1022
13. Davenas, A. et. al (1993), 'Solid Rocket Propulsion Technology', Pergamon Press, France

14. Cornelisse, J.W. et al. (1979), 'Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics'. Pitman Publishing, Northern Ireland
15. Renganathan, K et. al (2000), 'A Multilayered Thick Cylindrical Shell Under Internal Pressure & thermal Loads Applicable to Solid Propellant Rocket Motors', Springer-Verlag, India
16. Stark, J.G & Wallace, H.G (1970), 'Chemistry Data Book', John Murray, London

LAMPIRAN

Terbitan persamaan (2.1) dalam teks utama (Bab II) adalah seperti berikut.
 Pertimbangkan satu motor roket seperti Rajah A.1



Rajah A.1 Motor roket

Dengan

F =Dayatujah

P_c = Tekanan kebuk

P_e = Tekanan keluaran nozel

P_a = Tekanan atmosfera

v_e = Halaju ekzos

A_e = Luas keluaran nozel

A_t = Luas kerongkong nozel

Untuk memudahkan analisis, daya graviti diabaikan. Takrifan daya tindakbalas, \bar{R} yang dihasilkan oleh daya tujah dalaman yang bertindak pada roket ialah

$$\bar{R} = \int P dA \bar{1}_{\text{int}} \quad (\text{A.1})$$

$\bar{1}_{\text{int}}$ adalah unit vektor normal kepada permukaan. P adalah tekanan setempat pada elemen dA . Kamiran dibuat ke atas keseluruhan permukaan sama ada permukaan dalaman (int) atau permukaan luaran (ex). Dengan itu,

$$\bar{R} = \int_{\text{ex}} P dA \bar{1}_{\text{int}} + \int_{\text{int}} P dA \bar{1}_{\text{int}} \quad (\text{A.2})$$

P_a adalah tekanan atmosfera, oleh itu persamaan daya seret dalaman di beri oleh

$$D = \int_{\text{ex}} (P - P_a) dA \bar{1}_{\text{int}} \quad (\text{A.3})$$

Ambil luas keluaran nozel, A_e dan $\bar{1}_{\text{int}}$ adalah unit vektor yang bertentangan arah (sebagai contoh arah aliran gas ekzos). Maka persamaan matematik identiti diperolehi

$$\int_{\text{ex}} P dA \bar{1}_{\text{int}} = P_a A_e \bar{1}_n + \int_{\text{int}} P dA \bar{1}_{\text{int}} \quad (\text{A.4})$$

Dengan ini, persamaan (A.3) boleh ditulis sebagai

$$\bar{D} = \int_{\text{ex}} P_a dA \bar{1}_{\text{int}} - P_a A_e \bar{1}_n \quad (\text{A.5})$$

dan

$$\bar{R} = \bar{D} + \int_{\text{int}} P dA \bar{1}_{\text{int}} + P_a A_e \bar{1}_n \quad (\text{A.6})$$

Daya tindakbalas, \bar{R} adalah sama dengan jumlah daya tujah dalaman, \bar{F} dan geseran luaran, \bar{D} .

$$\bar{R} = \bar{F} + \bar{D} \quad (\text{A.7})$$

maka

$$\bar{F} = \int_{\text{int}} P dA \bar{1}_{\text{int}} + P_a A_e \bar{1}_n \quad (\text{A.8})$$

Jika anggapan aliran nozel adalah mantap dan satu-dimensi, prinsip momentum boleh diaplikasikan dalam kes ini. Ambil \dot{m} sebagai kadar alirjisim dan v_e adalah halaju keluaran nozel. Maka

$$\dot{m} v_e = - \int_{\text{int}} P dA \bar{1}_{\text{int}} + P_a A_e \bar{1}_n \quad (\text{A.9})$$

Dengan itu, daya tujah boleh ditulis sebagai

$$\bar{F} = -\dot{m} v_e - (P_e - P_a) A_e \bar{1}_n \quad (\text{A.10})$$

Oleh itu, daya tujah yang bertindak ke atas roket, F adalah

$$|F| = \dot{m} v_e - (P_e - P_a) A_e \quad (\text{A.11})$$