

PROPELAN PEPEJAL KALIUM NITRAT DIFABRIKASI KAEDAH PENGACUANAN MAMPAT

MOHAMMAD NAZRI MOHD. JA'AFAR¹, WAN KHAIRUDDIN WAN ALI²,
MD NIZAM DAHALAN³ & RIZALMAN MAMAT⁴

Abstrak. Propelan pepejal untuk kegunaan roket berbahan dorong pepejal yang telah dihasilkan di Universiti Teknologi Malaysia (UTM) adalah dari kumpulan propelan komposit kalium nitrat sebagai pengoksida dan sukros sebagai bahan api. Antara kaedah fabrikasi propelan adalah teknik pembentukan (*forming*), penyemperitan (*extrusion*), tuangan (*casting*) dan pengacuanan mampat (*compressed moulding*). Semua kaedah ini telah menghasilkan pelbagai propelan dengan sifat serta gaya laku yang berbeza-beza.

Bergantung kepada bagaimana ia difabrikasi, propelan ini telah menunjukkan perkaitan sifat mekanikal yang begitu ketara. Dari setiap kaedah, propelan dibentuk mengikut satu bentuk serta dimensi yang piawai. Ujian kadar pembakaran dibuat ke atas setiap jalur propelan menggunakan alat uji kaji (*test rig*) yang telah direka bentuk. Ujian kadar pembakaran dilakukan pada tekanan atmosfera. Melalui ujian ini, kadar pembakaran propelan telah diperolehi. Hasil uji kaji menunjukkan kadar pembakaran propelan yang menggunakan teknik pembentukan dan teknik pengacuanan mampat masing-masing adalah 1.033 cm/s dan 0.429 cm/s. Manakala kaedah penyemperitan dan kaedah tuangan didapati tidak sesuai kerana sifat propelan kalium nitrat-sukros yang likat. Hasil uji kaji menunjukkan kaedah pengacuanan mampat ialah kaedah yang paling sesuai berbanding kaedah yang lain kerana dapat menghasilkan propelan yang seragam dan stabil.

Kata kunci: Propelan; komposit; pengoksida; bahan api; kadar pembakaran

Abstract. Solid propellant used on solid fuel rocket developed at Universiti Teknologi Malaysia (UTM) is from the composite propellant group with potassium nitrate as the oxidizer and sucrose as the fuel. Among the propellant fabrication techniques are forming, extrusion, casting and compressed moulding. All of these techniques are used to fabricate several types of propellant with different characteristics and performances.

Depending upon the technique of fabrication, these propellants have shown strong relationship with their mechanical properties. With every technique, the propellants are formed according to a standard shape and dimension. Burning rate tests were performed for each propellant strand fabricated using the test rig designed. The burning rate tests were performed at atmospheric pressure. Through this test, the propellant burning rates were obtained. Experimental results show that the burning rate for propellant developed using forming and compressed moulding are 1.033 cm/s and 0.429 cm/s, respectively. Meanwhile, the extrusion and casting methods were found not suitable due to the property of potassium nitrate-sucrose that is viscous. Experimental results show that the pressed moulding method is the most suitable method compared to the other techniques since it can produce propellant that is uniform and stable.

Keywords: Propellant; composite; oxidizer; fuel; burning rates

^{1,2&3}Jabatan Kejuruteraan Aeronautik, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia, 81310 UTM Skudai, Johor Bahru, Malaysia

⁴ Faculty of Mechanical Engineering, University College of Engineering and Technology Malaysia, MBC Campus, Kuantan, Pahang

1.0 PENGENALAN

Secara umum propelan roket telah diklasifikasikan mengikut jenis penggunaan sumber tenaganya seperti kimia, nuklear, pereputan isotop radioaktif, pemanasan arka, magneto plasma, ion dan tenaga solar (Sutton, 1992; Barrere *et al.* 1960). Kumpulan propelan roket kimia pula boleh dibahagikan kepada tiga, iaitu propelan roket pepejal, cecair dan juga hibrid. Penyelidikan ke atas propelan roket pepejal telah dibangunkan di UTM untuk mendapatkan satu propelan pepejal yang boleh menghasilkan nilai tujuh yang tinggi (Mohammad Nazri Mohd. Jaafar *et al.* 2004).

Namun, sejak ia mula diterokai, masalah timbul apabila ujian pada kebuk pembakaran dilakukan. Setiap ujian yang dilakukan akan mengalami letupan yang sangat kuat (Rizalman, 2002). Ini adalah disebabkan propelan yang dihasilkan tidak begitu stabil. Oleh itu penyelidikan tertumpu ke atas proses/teknik penyediaan propelan untuk mendapatkan propelan yang selamat dan stabil. Kajian dilakukan ke atas propelan komposit menggunakan kalium nitrat sebagai pengoksida dan sukros sebagai bahan api. Propelan ini dipilih sebagai bahan kajian kerana mudah diperolehi, tidak toksik dan tidak mudah meletup atau menyala.

2.0 TEKNIK FABRIKASI PROPELAN ROKET PEPEJAL

Sebelum dijadikan propelan, kalium nitrat perlu diberikan rawatan haba. Kalium nitrat dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu antara 50°C hingga 90°C dan dibiarkan melebihi 3 jam. Kemudian ia dikeluarkan dan dikisar menggunakan pengisar kering elektrik.

Kalium nitrat perlu dikisar agar bijian yang lebih halus diperolehi, iaitu kira-kira 50 μm . Kalium nitrat yang telah dikisar, ditimbang dengan cermat menggunakan neraca mikro serta digaulkan dengan sukros dan bahan tambahan (additives) pada suhu bilik mengikut nisbah yang telah ditentukan. Campuran tersebut digaulkan bersama-sama sehingga sebati. Masa yang diambil untuk menggaulkan campuran ini ialah sekitar 12 jam menggunakan penggaul elektrik. Campuran ini digaulkan di dalam bekas plastik yang tertutup. Sebaik-baiknya campuran ini dibuat dalam kuantiti yang kecil agar proses mencampur menjadi lebih mudah dan menghasilkan campuran yang benar-benar sebati. Setiap sampel propelan dihadkan ke 100 gram. Ini bagi memastikan agar suhu serta masa pemanasan adalah sekata untuk setiap kaedah.

2.1 Teknik Pembentukan

Acuan propelan dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu melebihi 130°C dan dibiarkan sehingga suhu acuan menyamai suhu ketuhar. Kemudian serbuk propelan dimasukkan ke dalam acuan yang telah dipanaskan. Acuan bersama-sama dengan propelan dikeluarkan dari ketuhar dan dibiarkan sejuk pada suhu bilik selama 12

jam. Propelan dikeluarkan dari acuan dan dibersihkan. Propelan disimpan di dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika.

2.2 Teknik Penyemperitan

Silinder penyemperit berserta dengan omboh dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu melebihi 130°C . Setelah suhu alat penyemperit menyamai suhu ketuhar, serbuk propelan dimasukkan ke dalam silinder penyemperit. Silinder penyemperit dimasukkan ke dalam ketuhar sehingga kesemua propelan lebur. Setelah dikeluarkan dari ketuhar, omboh pemampat dimasukkan ke dalam silinder acuan. Kemudian ia diletakkan pada sebuah pemampat hidraulik. Tekanan dikenakan ke atas omboh pemampat sehingga propelan keluar melalui muncung. Tekanan dikenakan berterusan sehingga mencapai panjang propelan yang diperlukan. Propelan diputuskan dari muncung dan dibersihkan. Propelan disimpan di dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika.

2.3 Teknik Tuangan

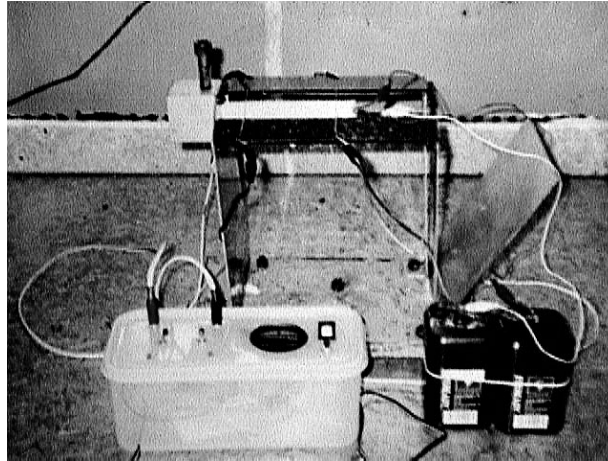
Propelan dimasukkan ke dalam sebuah bikar kaca dan diletakkan di dalam ketuhar pada suhu melebihi 130°C . Sepanjang tempoh pemanasan, propelan dikacau agar pemanasan yang sekata berlaku ke atas propelan. Setelah semua serbuk propelan lebur, ia dituang ke dalam acuan dan dibiarkan sejuk pada suhu bilik selama 12 jam. Propelan dikeluarkan dari acuan dan dibersihkan. Propelan disimpan di dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika.

2.4 Teknik Acuan Mampat

Acuan propelan dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu melebihi 130°C dan dibiarkan sehingga suhu acuan menyamai suhu ketuhar. Setelah suhu acuan menyamai suhu ketuhar, serbuk propelan dimasukkan ke dalam acuan dan dimasukkan semula ke dalam ketuhar sehingga kesemua propelan melebur. Setelah dikeluarkan dari ketuhar, omboh pemampat dimasukkan pada silinder acuan. Kemudian ia diletakkan pada sebuah pemampat hidraulik. Tekanan dikenakan ke atas omboh pemampat. Nilai tekanan yang dikenakan dikawal. Setelah tekanan yang dikehendaki dikenakan, ia dibiarkan selama 5 minit. Pemampat hidraulik dilepaskan. Propelan dikeluarkan dari acuan dan dibersihkan. Propelan disimpan di dalam bekas plastik kedap udara yang mengandungi gel silika.

3.0 KADAR PEMBAKARAN PROPELAN

Pembakaran lengkap propelan kalium nitrat-sukros akan menghasilkan beberapa gas seperti gas karbon dioksida, karbon monoksida, wap air, gas hidrogen, nitrogen



Rajah 1 Alat ujian kadar pembakaran

dan cecair kalium karbonat (Rizalman, 2002). Didapati tiada gas yang toksik dihasilkan. Walaupun gas CO telah diketahui umum sebagai gas yang sangat berbahaya, namun kuantitinya adalah kecil. Untuk mendapatkan pembakaran yang lengkap, pembakaran propelan ini dengan nisbah stoikiometri kalium nitrat-sukros. Ujian kadar pembakaran dilakukan ke atas setiap jalur propelan yang terhasil menggunakan alat ujian kadar pembakaran yang direka bentuk khusus seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1. Semua ujian pembakaran jalur propelan dilakukan pada keadaan yang terkawal dan selamat. Ujian pembakaran propelan akan menyusutkan permukaan propelan dalam arah serenjang dengan permukaan propelan. Kadar penyusutan propelan ini dikenali sebagai kadar pembakaran. Kajian kadar pembakaran merupakan satu analisis yang sangat penting bagi menentukan prestasi propelan (Cornelisse *et al.* 1979).

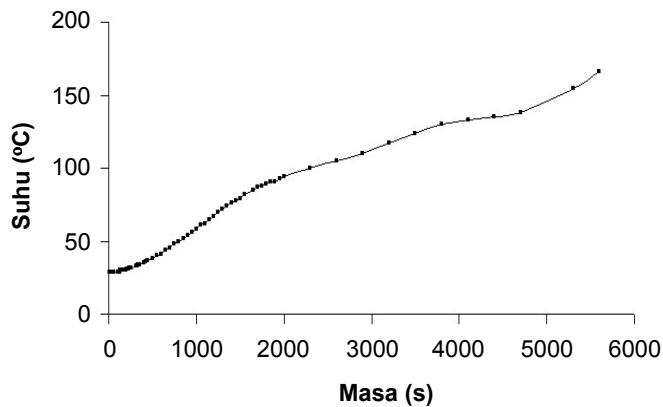
Data kadar pembakaran boleh diperolehi melalui tiga kaedah yang lazim dilakukan (Davenas *et al.* 1993):

- (i) Pembakaran jalur propelan
- (ii) Penilaian motor balistik (Ballistic evaluation motor)
- (iii) Kaedah ultrasonik

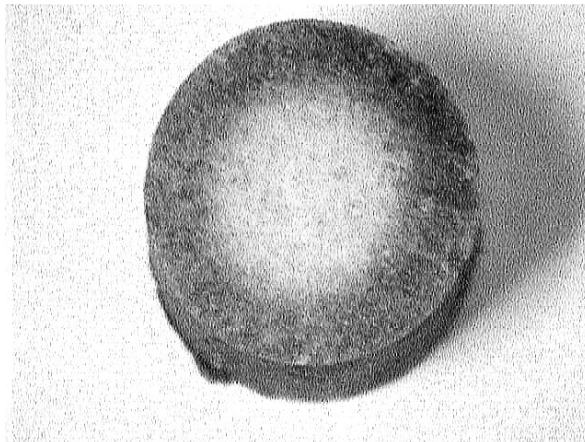
Dalam kajian ini, kaedah pertama akan digunakan.

4.0 KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Proses pemanasan propelan merupakan satu langkah yang penting kerana masa serta suhu pemanasan propelan ini akan menentukan sifat propelan tersebut. Hasil uji kaji pemanasan propelan menunjukkan bahawa apabila 100 g serbuk propelan dipanaskan, suhu di bahagian tengahnya akan meningkat dan berubah terhadap



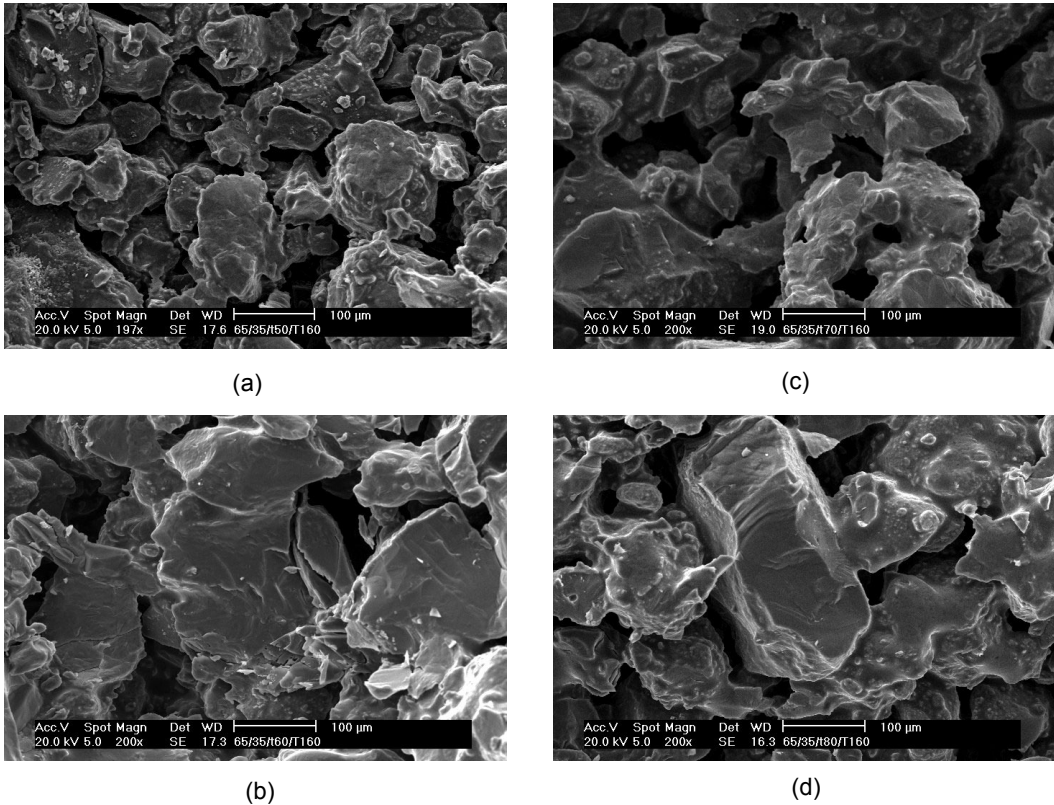
Rajah 2 Kesan masa ke atas suhu propelan



Rajah 3 Propelan lebur di bahagian yang bersentuhan dengan dinding logam

masa seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2. Apabila suhu mencecah 140°C , propelan akan mula lebur dan propelan yang bersentuhan dengan dinding bikar akan mula melebur seterusnya merebak ke bahagian tengah seperti ditunjukkan dalam Rajah 3.

Apabila suhu mencecah 160°C dengan catatan masa selama 5450 saat (1 jam 30 minit) kesemua propelan didapati telah lebur. Dalam kes ini, propelan dimasukkan ke dalam ketuhar dengan suhu awal pada suhu bilik, iaitu 25°C . Apabila propelan dimasukkan ke dalam ketuhar pada suhu awal 180°C , masa yang diambil untuk semua propelan lebur ialah 30 minit. Apabila propelan dihasilkan melalui lekatan sarung (*case bonding*), didapati propelan yang bersentuhan dengan permukaan dinding silinder akan mula lebur dahulu. Kesannya boleh dilihat berdasarkan warna yang lebih gelap untuk kawasan propelan yang telah lebur.

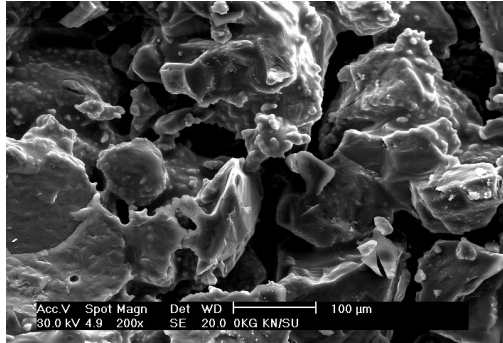


Rajah 4 Kesan masa pemanasan ke atas struktur mikro propelan; (a) $t_b=50$ min, (b) $t_b=60$ min (c) $t_b=70$ min, (d) $t_b=80$ min

Kesan masa pemanasan ke atas peleburan propelan ini boleh dilihat berdasarkan gambar yang diimbas melalui SEM.

Rajah 4(a) jelas menunjukkan pada minit ke 50, bijian sukros telah mula lebur tetapi hanya pada kuantiti yang kecil. Hanya bijian yang kecil ($25\ \mu\text{m}$) akan mula melebur. Pada minit ke 60, didapati lebih banyak sukros lebur. Seterusnya apabila masa mencecah 80 minit, didapati kesemua sukros lebur dan telah menyeliputi propelan. Walau bagaimanapun, kaedah pembentukan digunakan pada ketika ini, oleh itu terdapat banyak liang udara dihasilkan.

Kesan yang ketara boleh dilihat pada propelan yang dihasilkan melalui kaedah yang berlainan. Melalui gambar yang diimbas menggunakan SEM, didapati struktur mikronya sangat dipengaruhi oleh teknik penyediaan. Terdapat perbezaan yang ketara antara propelan yang dihasilkan melalui kaedah pembentukan dan pelbagai kaedah yang lain (tuangan, semperitan dan acuan mampat). Struktur mikronya menunjukkan kaedah pembentukan menghasilkan banyak liang udara (45% udara). Lintang-liang udara didapati terdapat di sekeliling bijian propelan (rujuk Rajah 5).



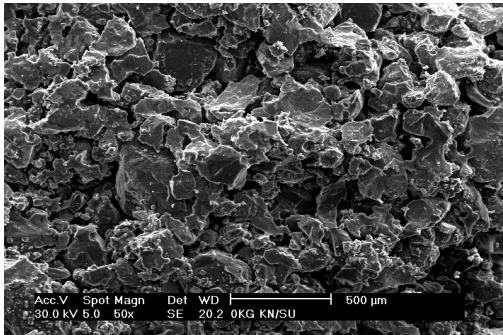
Rajah 5 Liang udara terbentuk apabila kaedah pembentukan digunakan untuk menghasilkan propelan

Manakala bagi kaedah pengacuanan mampat, liang udara yang terdapat pada propelan bergantung kepada tekanan yang dikenakan ke atas propelan. Dalam Rajah 6, jelas kelihatan liang udara semakin berkurangan apabila tekanan yang dikenakan bertambah.

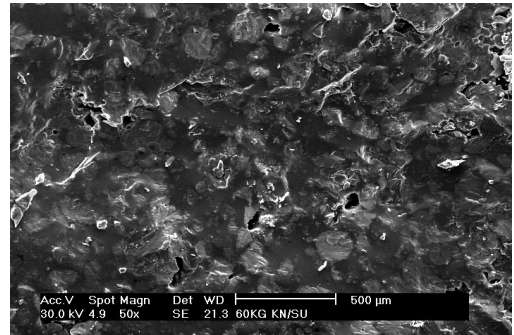
Semakin tinggi tekanan yang dikenakan, semakin kurang liang udara yang terdapat pada propelan. Didapati pada tekanan 1.6 MPa, propelan yang dihasilkan mempunyai liang udara kurang dari 5%. Pada tekanan 2.0 MPa, hasilnya didapati hampir sama dengan propelan yang dihasilkan pada tekanan 1.6 MPa. Walau bagaimanapun, pada tekanan 2.0 MPa, didapati propelan sukar dihasilkan. Ini adalah disebabkan propelan yang cair telah mula keluar melalui celah liang udara yang direka bentuk bagi laluan keluar udara. Oleh itu, tekanan yang ideal untuk menghasilkan propelan komposit kalium nitrat-sukros ialah pada 1.6 MPa.

Semua ujian kadar pembakaran adalah menggunakan propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan mampat dan kaedah pembentukan. Secara umum, didapati kadar pembakaran propelan kalium nitrat-sukros sangat dipengaruhi oleh nisbah kandungan bahan pengoksida/bahan api. Semakin tinggi kandungan bahan pengoksida (kalium nitrat), kadar pembakaran menjadi semakin tinggi. Namun terdapat titik maksimum dengan kadar pembakaran tidak lagi meningkat walaupun kandungan bahan pengoksida ditambah.

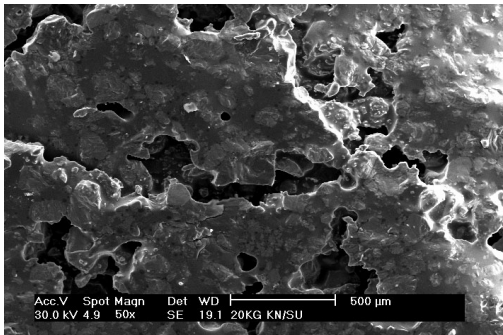
Rajah 7 menunjukkan hubungan ini. Pada komposisi kimia 60 peratus kalium nitrat dan 40 peratus sukros, didapati kadar pembakarannya adalah 0.347 cm/s. Kadar pembakaran meningkat sehingga mencapai nilai maksimum pada kerencaman 64 peratus kalium nitrat dan 36 peratus sukros. Kadar pembakaran yang dicatatkan adalah 0.476 cm/s. Apabila kandungan kalium nitrat melebihi 64 peratus, kadar pembakaran menjadi semakin rendah. Secara teori, campuran stoikiometri dengan tindak balas berlaku dengan sempurna pada kandungan 65 peratus kalium nitrat dan 35 peratus sukros. Oleh itu, didapati kadar pembakaran maksimum diperolehi pada campuran yang menghampiri kerencaman stoikiometri bahan asas propelan.



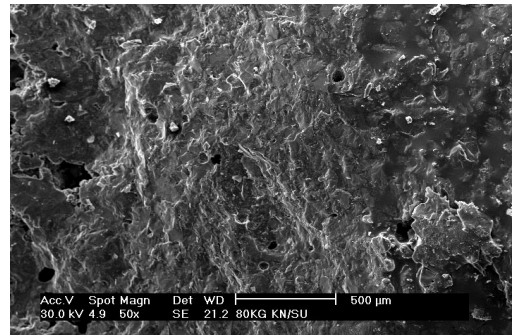
(a)



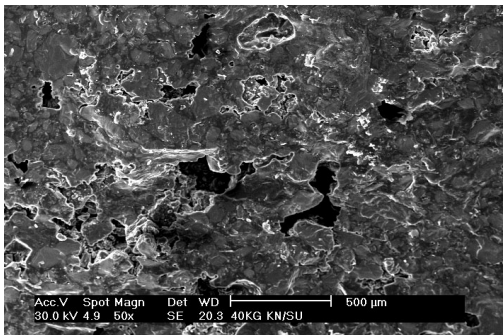
(d)



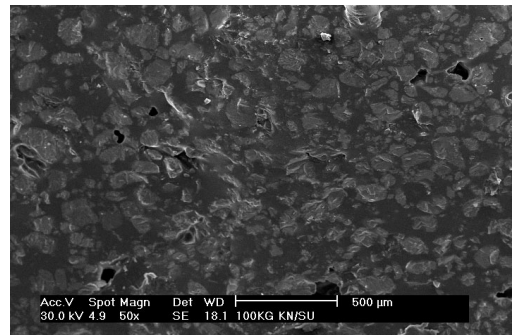
(b)



(e)



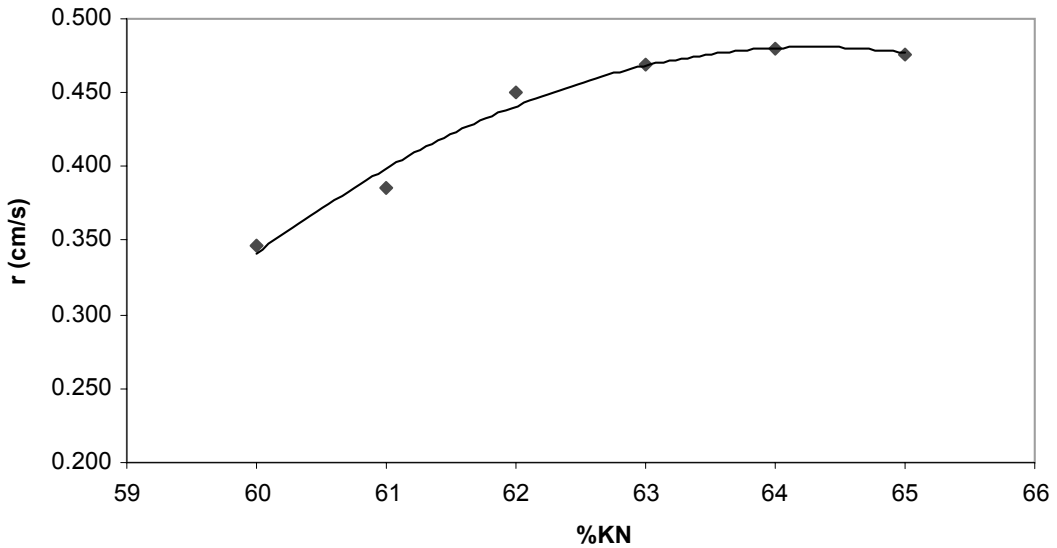
(c)



(f)

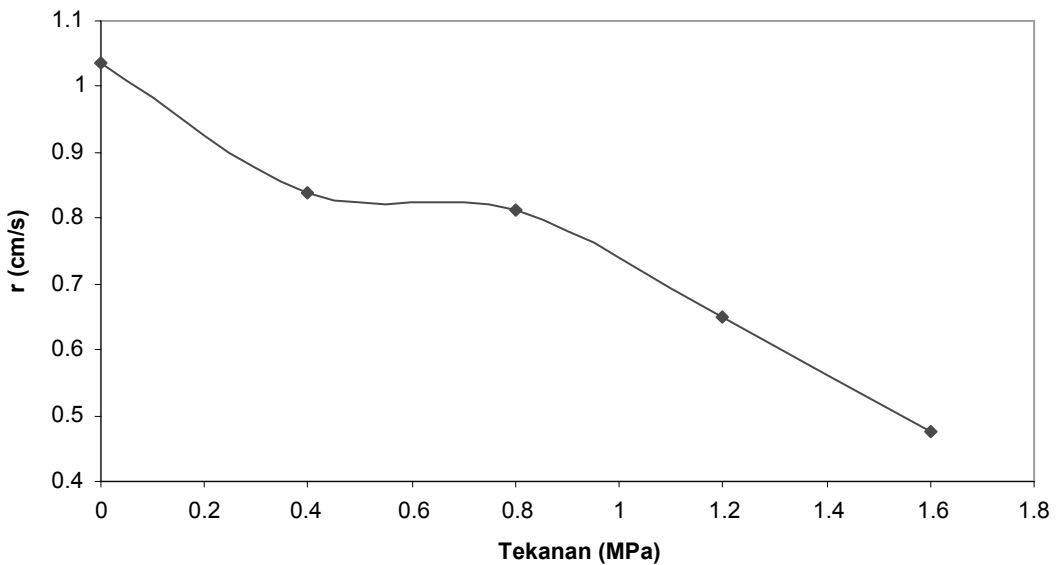
Rajah 6 Tekanan yang berlainan menghasilkan struktur propelan yang berlainan; (a) P=0 kPa, (b) P=400 kPa, (c) P=800 kPa, (d) P=1.2 MPa, (e) P=1.6 MPa, (f) P=2.0 Mpa

Kadar pembakaran propelan kalium 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 mampat. Dengan ini, propelan yang dihasilkan didapati lebih tumpat kerana tiada ruang udara yang wujud pada propelan tersebut. Rajah 8 menunjukkan perbezaan antara propelan yang dihasilkan tanpa mampatan dan dengan mampatan.



Rajah 7 Hubungan kadar pembakaran terhadap perubahan komposisi bahan pengoksida-bahan api (O/F) bagi propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan mampat

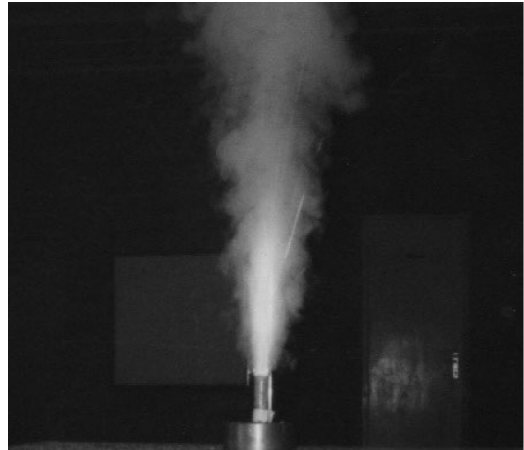
Propelan yang dihasilkan melalui kaedah ini mempunyai ketumpatan yang berubah-ubah bergantung kepada tekanan yang dikenakan. Keadaan ini telah mengubah kadar pembakaran bagi propelan yang dihasilkan. Semua propelan yang dihasilkan untuk tujuan uji kaji ini menggunakan nisbah campuran 65% kalium nitrat dan 35% sukros. Melalui ujian kadar pembakaran, didapati bahawa kadar pembakaran



Rajah 8 Kadar pembakaran berubah terhadap tekanan yang dikenakan semasa propelan dihasilkan



(a)



(b)

Rajah 9 Perbezaan nyalaan antara dua kaedah penyediaan propelan yang berbeza; (a) Kaedah pembentukan (b) Kaedah acuan mampat

semakin rendah apabila tekanan ditingkatkan. Keadaan ini jelas dilihat pada Rajah 8, iaitu apabila tekanan tidak dikenakan, kadar pembakarannya paling tinggi, iaitu 1.036 cm/s. Berdasarkan Rajah 8 juga didapati pada julat tekanan 0.4 MPa hingga 0.8 MPa, kadar pembakaran tidak menunjukkan perubahan yang ketara. Oleh itu, tekanan ini didapati sesuai digunakan untuk menghasilkan propelan kalium nitrat-sukros.

Daun nyalaan juga menunjukkan perbezaan yang nyata (rujuk Rajah 9). Nyalaan jalur propelan melalui kaedah pembentukan menunjukkan daun nyalaan yang mencapah. Berbeza sekali dengan jalur propelan yang dihasilkan melalui kaedah acuan mampat. Arah nyalaannya adalah berserenjang dengan permukaan pembakaran jalur propelan.

Kaedah pembentukan menghasilkan terlalu banyak liang udara menyebabkan kewujudan bijian kalium nitrat seolah-olah bersendirian dengan hanya diselaputi oleh lapisan sukros yang tipis di sekelilingnya. Oleh itu pembakaran akan berlaku dalam semua arah bijian tersebut. Berbeza dengan jalur propelan acuan mampat, susunan kalium nitrat sangat padat dan dipenuhi oleh sukros. Ini menyebabkan pembakaran hanya berlaku pada permukaan yang menerima cukup haba untuk terbakar.

Sisa pembakaran untuk kedua-dua kes adalah sama, iaitu terdapat serbuk hitam (karbon) dan juga pepejal putih terhasil. Jumlah sisa pembakaran yang terhasil didapati berkait rapat dengan peratus kandungan pengoksida-bahan api. Sisa hitam didapati lebih banyak dihasilkan (secara relatif) apabila peratus sukros meningkat. Semasa pembakaran berlaku, terdapat juga titisan cecair yang dihasilkan. Titisan

cecair berwarna jernih ini dibebaskan dalam bentuk wap dan berterbangan dalam bentuk asap putih. Cecair ini didapati sangat mengakis dan boleh mengoksidakan aluminium dan keluli lembut dengan lebih cepat.

5.0 KESIMPULAN

Keseluruhan uji kaji menunjukkan terdapat beberapa kaedah yang boleh dilakukan untuk menghasilkan propelan komposit. Namun kesesuaian kaedah adalah banyak bergantung kepada sifat propelan itu sendiri. Bagi propelan komposit kalium nitrat-sukros, kaedah acuan mampat didapati telah menghasilkan sifat propelan yang stabil. Melalui kaedah ini juga, proses penyediaan menjadi lebih mudah dan selamat.

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada pihak Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar kerana telah menganugerahkan geran penyelidikan bagi menjayakan projek ini.

RUJUKAN

- [1] Barrere, M., A. Jaumotte, B. Veubeke dan J. Vandenkerckhove. 1960. *Rocket Propulsion*. Amsterdam: Elsevier.
- [2] Cornelisse, J. W., H. F. R. Schoyer dan K. F. Wakker. 1979. *Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics*. London: Pitman.
- [3] Davenas, A. 1993. *Solid Rocket Propulsion Technology*. France: Pergamon Press.
- [4] Rizalman Mamat. 2002. *Ciri-Ciri Propelan Roket Pepejal Berasaskan Kalium*. Tesis Sarjana, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknologi Malaysia.
- [5] Mohammad Nazri Mohd. Jaafar, Wan Khairuddin Wan Ali, Md Nizam Dahalan dan Rizalman Mamat. 2004. Development of Solid Rocket Propulsion System At UTM. *Jurnal Mekanikal*, Disember 2004, Bil. 18, ms 111-121, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, UTM.
- [6] Sutton, G. P. 1992. *Rocket Propulsion Element*. Edisi ke-6. New York: John Willy & Sons.