

Bab IX

Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal

Kendra Hartaya, Luthfia Hajar Abdillah, dan
Retno Ardianingsih

A. Peran Roket dalam Perkembangan Teknologi Keantariksaan

Perkembangan teknologi keantariksaan tidak dapat lepas dari kemajuan yang terjadi dalam teknologi roket. Roket adalah wahana (kendaraan) antariksa yang membawa satelit ke lintasan tertentu yang disesuaikan dengan tujuan atau misi satelit tersebut. Satelit beresolusi spasial tinggi, pada umumnya memiliki orbit yang lebih rendah dibandingkan dengan satelit beresolusi spasial rendah. Dalam hal ini, rencana orbit dan beban satelit akan menjadi pertimbangan penting dalam menentukan kebutuhan spesifikasi daya roket.

Secara garis besar roket terdiri dari dua bagian, yaitu bagian depan dan bagian belakang. Bagian depan berisi misi roket. Misi roket berisi

K. Hartaya, L. H. Abdillah & R. Ardianingsih*

*Badan Riset dan Inovasi Nasional, *e-mail*: re_ardian@yahoo.com

© 2025 Editor & Penulis

Hartaya, K., Abdillah, L. H., & Ardianingsih, R. Upaya Mewujudkan Propelan Padat Komposit Andal. Dalam T. Djameluddin & F. Nuraeni (Ed.), *Keantariksaan untuk Masyarakat dan Kemajuan Bangsa: Sains dan Teknologi* (285–312). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.1425.c1492
E-ISBN: 978-602-6303-86-8

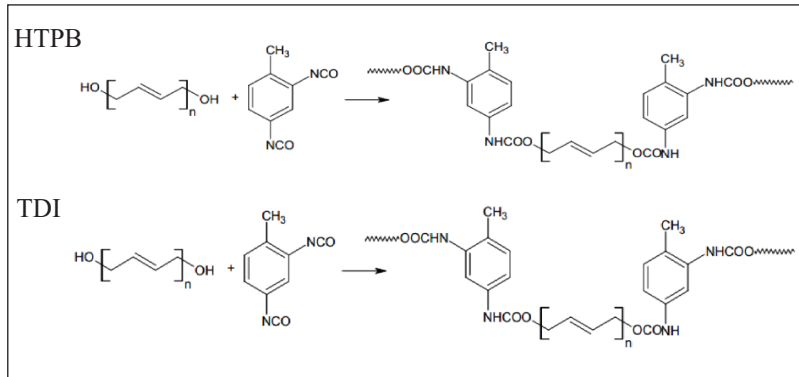
bahan dan alat yang digunakan untuk tujuan tertentu, misalnya untuk penelitian, ataupun untuk persenjataan. Bagian belakang merupakan motor roket yang menggerakkan roket agar meluncur ke angkasa. Penelitian dan pengembangan motor roket umumnya dilakukan melalui pengembangan propulsi, pengembangan struktur, dan pengembangan propelan. Propelan merupakan zat yang digunakan untuk menciptakan daya dorong melalui pemuaiian atau pengeluaran gas, cairan, atau padatan. Pengembangan propelan dirasakan penting menjadi pijakan untuk pengembangan lainnya karena pengembangan bagian-bagian motor roket menuntut adanya propelan yang andal.

Dalam roket, propelan dapat berupa padat atau cair. Sebutan roket padat adalah roket dengan bahan bakar padat, bahan bakar ini dibuat dengan mencampur komponen penyusun dan dipadatkan. Roket cair adalah roket dengan bahan bakar cair. Di Indonesia, roket padat lebih banyak dikembangkan daripada roket cair. Beberapa lembaga/institusi pemerintah, bahkan perguruan tinggi, berpartisipasi dalam pengembangan roket ini.

Propelan yang andal bertumpu pada proses yang baku, dengan kata lain proses yang baku akan menghasilkan propelan yang andal. Propelan andal adalah propelan yang dibuat pada waktu kapan pun, dengan bahan baku yang kualitasnya sama, dan akan menghasilkan kinerja serta sifat-sifat yang sama. Propelan andal ini akan memudahkan evaluasi terhadap hasil-hasil penelitian motor roket. Jika propelan tidak andal, hasil pengembangan motor roket akan banyak kendala dalam evaluasi kinerja propelan. Lebih jauh, hal itu juga akan menimbulkan banyak kesulitan dalam evaluasi kinerja roket secara keseluruhan. Hal tersebut yang menjadi alasan penting perlunya mewujudkan propelan andal melalui pembakuan proses dan pembakuan pengujian.

B. Komponen dan Proses Umum Pembuatan Propelan Padat

Propelan padat komposit tersusun atas bahan-bahan padat dan cair. Bahan padat meliputi *ammonium perklorat* (AP) sebagai oksidator,



Gambar 9.1 Struktur kimia HTPB dan TDI

dan aluminium (Al) sebagai sumber energi termal. Bahan cair meliputi *hydroxyl terminated polybutadiene* (HTPB) sebagai prepolimer (polimer rantai pendek) dan *toluene diisocyanate* (TDI) sebagai pematang. Struktur kimia HTPB dan TDI tersaji pada Gambar 9.1. Selain bahan padat dan bahan cair tersebut, ada beberapa bahan yang ditambahkan dalam kuantitas sedikit sesuai karakter propelan yang diinginkan seperti besi oksida Fe_2O_3 sebagai katalis pembakaran, bahan pemlastis dioktil adipat (DOA).

Perlu diketahui bahwa komponen propelan yang digunakan dalam pembuatannya adalah komponen-komponen teknis, bukan murni. Mayoritas komponen tersebut diperoleh secara mengimpor. Sementara bahan aditif, misalnya besi oksida dan DOA, ditambahkan dengan jumlah sedikit dalam bentuk murni (pa).

Proses pembuatan propelan dilakukan dengan mencampur bahan penyusun satu demi satu ke dalam mesin pencampur yang sudah dikondisikan. Mesin pencampur diselubungi oleh jaket berisi aliran air hangat dan dilengkapi dengan pengaduk bilah tunggal dengan 60 rotasi per menit. Mesin pencampur ini dirancang dan dibuat oleh penelitian yang dilakukan tersendiri dengan kapasitas tiga kilogram adonan. Pembuatan propelan diawali dengan pencampuran HTPB dan Al, diaduk selama waktu tertentu hingga dianggap homogen. Kemudian ditambahkan AP dan diaduk lagi hingga homogen, dan di-

akhiri dengan pemasukan TDI, diaduk lagi hingga dianggap homogen. Proses ini dinamakan proses *mixing*. AP yang selama ini digunakan adalah dua ukuran, kasar dan halus. AP merupakan sumber oksigen yang paling banyak kandungannya dibanding sumber-sumber oksigen lainnya. Kandungan AP dalam propelan dibuat melimpah agar mampu membakar Al sebagai bahan bakar utama dan mampu membakar komponen lainnya.

Setelah selesai proses *mixing*, adonan dituang ke dalam cetakan berbentuk silinder yang sudah disiapkan untuk dibentuk sesuai keinginan. Proses ini disebut *casting*. Lalu ditusukkan *mandrel* ke dalam adonan yang sudah memenuhi cetakan (proses *coring*). Penukusan *mandrel* ini untuk membuat bentuk permukaan bagian dalam silinder propelan (*grain*). Terakhir, adonan yang sudah berada dalam cetakan, dan *mandrel* di dalamnya, dimasukkan ke dalam oven untuk dipanaskan pada suhu dan waktu tertentu guna menyempurnakan pematangan/pemadatan. Setelah matang, propelan hasil (padat) dilepas dari cetakan dan *mandrel* (proses *decoring*). Propelan hasil siap dilakukan berbagai pengujian, termasuk uji *homogeny*, yaitu pengujian sebaran komponen, apakah merata atau tidak.

Gambar 9.2 menyajikan beberapa peralatan yang digunakan untuk pembuatan propelan padat komposit, yaitu mesin pencampur, ruang pencetakan vakum, kompresor, pelapisan cetakan dengan lembaran aluminium dan penyemprotan dengan McLube, *mandrel*, cetakan yang terpadat dalam ruang vakum, propelan yang dihasilkan dan propelan yang sudah terpasang pada motor roket siap uji statis, dan nyala propelan yang menyembur akibat adanya tekanan dalam ruang bakar.

Cetakan yang ada di laboratorium komposisi, LAPAN Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (sekarang BRIN, Badan Riset dan Inovasi Nasional) ada dua jenis yaitu berbentuk balok dan berbentuk silinder. Bentuk balok ditujukan jika kita mengharapkan pengujian sampel propelan, sedangkan untuk cetakan silinder dimaksudkan jika kita menginginkan untuk uji *static* guna mengetahui kinerja propelan (nilai Isp). Pengujian karakteristik propelan yang bisa dilakukan di



Keterangan:

a.Mesin pencampur; b. Ruang cetak vakum; c.Kompresor; d.Cetakan berlapis Al; e. Madrel silinder; f.Cetakan dalam Vakum; g.Propelan hasil; h.Propelan dalam Motor roket; i.Nyala propelan.

Gambar 9.2 Peralatan untuk pembuatan propelan padat komposit

laboratorium pusat teknologi roket di antaranya, uji densitas, uji kekerasan, uji kekeroposan dengan sinar-x, uji kuat tarik, uji *static* untuk mengetahui kinerja propelan (impuls spesifik, Isp).

Biasanya evaluasi kinerja propelan dilakukan dengan menghubungkan antara komposisi propelan dengan impuls spesifik (Isp). Impuls spesifik adalah ukuran energi propelan per satuan massa, yang juga menunjukkan seberapa efektif sebuah mesin roket menggunakan propelan. Sebelum tahun 2017, banyak sekali dijumpai data yang tidak punya hubungan yang jelas antara komposisi propelan dengan impuls spesifik. Beberapa kasus yang terkadang muncul:

- a. Komposisi propelan sama, tetapi impuls spesifik berbeda
- b. Komposisi propelan beda, tetapi impuls spesifik dekat
- c. Kandungan Al dalam propelan rendah, tetapi impuls spesifik tinggi
- d. Kandungan Al dalam propelan tinggi, tetapi impuls spesifik rendah.
- e. Tidak ada *tren* hubungan yang jelas antara Al dengan impuls spesifik

Tidak adanya tren hubungan yang jelas antara kandungan Al dengan impuls spesifik, mengakibatkan kesulitan mendapatkan nilai kinerja yang sesungguhnya. Karena tidak ada alasan yang logis untuk meyakini bahwa nilai tersebut adalah nilai yang sesungguhnya sehingga nilai kinerja tersebut tidak bisa digunakan sebagai pijakan penelitian dan pengembangan berikutnya.

Menurut reaksi kimia pembakaran, reaksi pembakaran Al menghasilkan besaran energi tertentu per gram. Sehingga bisa dikatakan bahwa kandungan Al akan berhubungan dengan Isp. Makin tinggi kandungan Al makin tinggi Isp, dan sebaliknya makin rendah kandungan Al makin rendah Isp. Kalau pun banyaknya data yang dihasilkan pada masa lalu, bisa dibuat tren hubungan antara kandungan Al dengan Isp, meskipun masih ada pertanyaan, apakah benar bahwa Isp itu benar-benar nilai yang sesungguhnya dari kandungan Al tersebut.

Hal inilah yang menjadi dasar pengembangan berikutnya untuk membakukan proses pembuatan propelan agar diperoleh propelan yang andal. Propelan andal adalah propelan yang memiliki karakteristik sama pada komposisi yang sama meskipun dibuat pada waktu yang berlainan. Tentu saja, kualitas bahan baku diasumsikan tidak mengalami degradasi selama penyimpanan. Berikut ini diuraikan pencapaian tentang pembakuan tersebut dalam bentuk kekayaan intelektual yang sudah ada baik dalam proses terdaftar maupun yang sudah dikabulkan (*granted*).

C. Pengembangan Propelan

Berikut adalah beberapa pengembangan yang telah dilakukan untuk mewujudkan propelan andal di Indonesia, khususnya di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

1. Uji Homogenitas Propelan Padat Komposit

Hasil pengembangan ini telah memperoleh paten dengan nomor IDP000064239 (2019), yang dapat menunjukkan uji homogenitas propelan padat komposit dengan data densitas dan kekerasan. Sampel diambil dengan memotong dari silinder propelan hasil cetakan. Dalam sekali mencetak (satu komposisi) atau sekali proses, menghasilkan 3 silinder propelan. Tiap-tiap silinder diambil sebanyak 15 buah sampel dari atas ke bawah, sehingga mendapatkan 45 sampel dari 3 silinder tersebut. Pengambilan sampel diupayakan pada posisi yang sama antara satu silinder dengan silinder yang lain untuk memperkecil kesalahan dalam analisis data.

Setiap sampel tersebut diukur kekerasannya, dilanjutkan dengan pengukuran densitas dalam air, sehingga setiap sampel memiliki dua data, yaitu densitas dan kekerasan. Karena tiap silinder propelan diambil 15 sampel, maka tiap silinder propelan memiliki 15 data kekerasan dan 15 data densitas. Untuk silinder kedua dan silinder ketiga juga diambil data kekerasan dan data densitas. Pengolahan data dilakukan dengan metode statistik analisis variansi satu jalur (anova satu jalur), dengan taraf signifikansi 5%. Dengan menggunakan anova

ini, bisa dihitung rerata densitas tiap-tiap silinder. Rerata densitas silinder kesatu ini dibandingkan rerata densitas silinder kedua dan rerata densitas silinder ketiga. Dengan perhitungan anova, ketiga rerata densitas ini akan diperoleh nilai “F hitung (F_h)”. Nilai sebagai rujukan diambil dari *table* anova, “F *table*” (F_t) dengan derajat kebebasan $N-1$ (N banyaknya sampel=45). Jika F_h lebih kecil daripada F_t maka dinyatakan ketiga silinder tidak berbeda. Dengan cara yang sama, pembedaan ketiga silinder juga dilakukan terhadap data kekerasan. Jika dengan data kekerasan ternyata tidak ada perbedaan dari ketiga silinder maka dinyatakan ketiga silinder propelan tidak berbeda. Dengan kata lain, propelan adalah homogen (sebaran komponen penyusun merata).

Adakalanya dari ketiga silinder diperoleh kesimpulan bahwa tidak ada perbedaan dari data densitas, tetapi ada perbedaan pada data kekerasan. Oleh sebab itu, propelan dianggap homogen apabila baik rerata densitas maupun rerata kekerasan menunjukkan tidak adanya perbedaan. Perulangan dilakukan pada langkah proses pembuatan yang sama dengan komposisi yang berbeda. Perbedaan komposisi ini hanya pada kandungan aluminium. Kandungan aluminium sangat menentukan kinerja propelan karena pembakaran aluminium akan menghasilkan energi yang jauh lebih besar daripada pembakaran binder. Proses pembakaran propelan pada dasarnya pembakaran aluminium (Al) dan pembakaran binder (HTPB, TDI) dengan sumber oksigen dari ammonium perklorat (AP).

Dalam paten ini, hal yang utama adalah pengenalan cara uji homogenitas propelan. Propelan yang homogeni akan memiliki densitas dan kekerasan yang sama pada semua bagian. Karena propelan homogen, maka adonan dalam cetakan selama proses pematangan dalam oven tidak akan mengalami penurunan (proses menurun dari atas ke bawah) komponen penyusun terutama komponen padat (AP, Al). Uji semacam ini disebut uji merusak karena silinder asal sampel mengalami kerusakan sehingga silinder yang ditinggalkan rusak dan tidak bisa dipakai lagi uji berikutnya terutama uji kinerja (uji *static*) yang menggunakan silinder propelan utuh. Pada paten

ini, uji homogenitas memang dilakukan dengan data yang diambil dengan merusak sampel. akan lebih baik lagi jika dilakukan dengan tanpa merusak sampel agar propelan yang diuji homogenitas bisa dipakai lagi untuk uji lainnya seperti uji statik untuk mengetahui kinerja propelan berupa impuls spesifik (Isp).

Pengembangan propelan berikutnya adalah dengan memperkenalkan uji homogen tidak merusak sampel yaitu melalui film sinar-x. Upaya ini telah memperoleh paten dengan nomor IDS000002503 (2019). Film sinar-x merupakan hasil pemindaian propelan padat komposit hasil cetakan. Untuk meyakinkan bahwa film sinar-x bisa digunakan untuk uji homogenitas, maka setelah dipindai kemudian propelan diambil 15 sampel untuk diukur data densitasnya. Karena data densitas lebih sensitif dari pada data kekerasan, maka pengukuran hanya dilakukan untuk data densitas.

Melalui perhitungan dengan anova satu jalur, data densitas dihitung reratanya tiap silinder untuk memperoleh nilai F_h . Pembandingan nilai F_h dengan F_t dilakukan untuk melihat ada-tidaknya perbedaan. Jika F_h lebih kecil daripada F_t , disimpulkan tiga silinder propelan adalah tidak berbeda (homogeni, sebaran komponen penyusun merata). Dengan menggunakan alat densitometer, gelap-terang (tingkat kegelapan) film sinar-x bisa dibaca. Nilai “gelap-terang” yang tinggi menunjukkan banyaknya kandungan padatan (terutama Al) yang kecil, sedangkan nilai gelap-terang yang rendah menunjukkan kandungan Al yang besar. Nilai gelap-terang akan berbanding terbalik dengan nilai kinerja propelan (Impuls spesifik, Isp). Keuntungan uji homogenitas ini adalah tidak banyak biaya yang dikeluarkan, tetapi agak sulit mendapatkan potongan sampel yang tidak berubah selama pengambilan.

Proses perhitungan dengan anova satu jalur juga dilakukan terhadap data gelap-terang film sinar-x. Rerata gelap-terang ketiga silinder propelan dihitung untuk memperoleh nilai F_h . Pembandingan F_h dengan F_t dilakukan untuk mendapatkan kesimpulan ada-tidaknya perbedaan dari ketiga silinder propelan tersebut. Jika ketiga silinder propelan dengan data gelap-terang tersebut ternyata tidak berbeda,

disimpulkan bahwa ketiga silinder propelan adalah homogen (sebaran komponen penyusun merata). Kesesuaian antara kesimpulan dari data densitas dengan kesimpulan dari data gelap-terang menunjukkan bahwa uji homogenitas dengan data gelap-terang dari film sinar-x dapat digunakan.

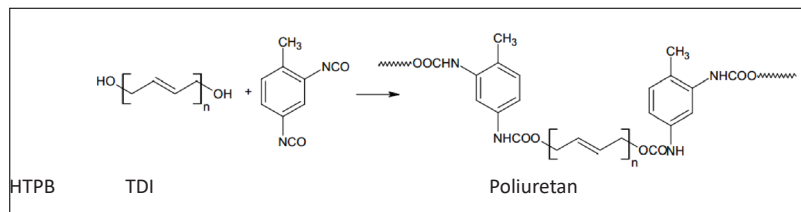
Salah satu keuntungan uji homogenitas dengan paten ini adalah tidak merusak sampel sehingga sampel masih bisa digunakan untuk uji lainnya, seperti uji static untuk mengetahui nilai impuls spesifik sebagai ukuran kinerja propelan. Ke depannya, metode ini bisa dikembangkan sebagai dasar pembuatan *software* dengan komputisasi untuk lisensi uji homogen. Untuk propelan ukuran besar, akan memerlukan banyak film sinar-x untuk mengambil data ke semua bagian propelan dan memerlukan biaya yang tidak sedikit.

Dari paten uji homogenitas baik secara merusak atau tidak merusak, bisa dilakukan pembakuan proses propelan agar hasil propelan yang diperoleh andal. Andal dalam arti propelan dibuat kapan pun akan memiliki kinerja yang sama selama komposisi dan kualitas bahan baku sama. Karena energi utama propelan berasal dari aluminium, maka akan ada hubungan yang pasti antara kandungan aluminium dengan kinerja propelan. Dengan kata lain, perubahan kandungan aluminium akan mencerminkan perubahan nilai kinerja propelan (Isp).

2. Pengembangan Proses Andal

Penulis dan tim telah berhasil memperoleh paten (IDS000002980, 2020) yang menyajikan pembuatan langkah kerja (urutan proses) yang andal (baku) dalam pembuatan propelan. Di antara bahan baku (komponen penyusun) propelan tersebut, semua akan bercampur secara fisik, kecuali HTPB dan TDI. Bahan HTPB dan TDI akan mengalami reaksi kimia polimerisasi. HTPB adalah propelimer (polimer rantai pendek) yang kedua ujung rantainya memiliki gugus kimia hidroksil (-OH), sedangkan TDI adalah senyawa kimia yang kedua ujungnya memiliki gugus kimia isocyanat (-NCO). Bila gugus -OH bertemu dengan -NCO, keduanya akan bereaksi secara polimerisasi dan

menghasilkan poliuretan (-NH-COO-). Poliuretan (polimer uretan) yang dihasilkan makin lama makin panjang rantainya, makin besar berat molekulnya, makin kental (naiknya viskositas) adonan. Reaksi polimerisasi berhenti sampai salah satu reaktannya habis. Dalam hal ini kandungan TDI jauh lebih sedikit daripada kandungan HTPB. Jika kandungan TDI banyak, dengan cepat terjadi pengerasan sehingga tidak ada kesempatan memasukkan komponen lainnya. Oleh sebab itu, sebelum proses pembuatan propelan, lebih dulu diadakan penelitian pendahuluan untuk mengetahui pada rasio berapa HTPB/TDI yang tepat sebagai *binder* (perekat) komponen propelan. Reaksi polimerisasi antara HTPB (gugus diol) dan TDI (gugus NCO) bisa dilihat pada Gambar 9.3.



Sumber: Mahanta et al. (2010)

Gambar 9.3 Reaksi antara HTPB (diol) dengan Diisosianat (TDI)

Pengadukan tiap-tiap penambahan bahan baku dilakukan dalam waktu yang besarnya ditentukan. Karena hanya HTPB dan TDI yang bereaksi secara kimia, maka TDI ditambahkan pada tahap akhir. Hal tersebut menyebabkan pada pembakuan proses pembuatan propelan, pencapaian homogenitas campuran dilakukan dengan variasi lamanya pengadukan (periode) sebelum penambahan TDI. Hal yang dilakukan adalah membuat variasi periode pengadukan terhadap tingkat homogenitas propelan. Dari variasi periode pengadukan 20 menit, 35 menit, 50 menit, 65 menit, ditemukan tingkat homogenitas paling tinggi pada periode 50 menit sebesar 83%.

Dengan menggunakan paten di atas, diaplikasikan untuk membuat tren kandungan Al dengan Isp, propelan yang dihasilkan sekali proses adalah tiga silinder dengan *grain* silinder. Hasil pengujian

Tabel 9.1 Impuls spesifik (Isp) Propelan dengan %Al

Kandungan Al	Isp, detik
8%	215–220
10%	217–224
12%	225–228

disajikan pada Tabel 9.1. Nilai Isp silinder propelan yang ketiga berada dalam rentang tersebut. Dari tabel di bawah tampak pada kandungan Al 10%, Isp memiliki rentang 7 detik. Rentang sebesar ini masih dianggap besar. Hasil yang diharapkan penyimpangan Isp sebesar maksimum 5 detik. Ketika hasil menunjukkan rentang Isp 7 detik, proses perlu diulangi pada komposisi tersebut. Hal lain yang bisa juga dilakukan adalah memperhalus variasi kandungan Al di sekitar periode pencampuran 50 detik, atau malah justru lebih lama daripada 50 detik. Dengan proses yang dibakukan dalam bentuk paten ini diharapkan di masa depan bisa diyakini hasil yang sesungguhnya dan bisa menjadi pijakan pengembangan berikutnya, baik pengembangan dalam kegiatan *in-house*, kerja sama dengan institusi luar, maupun untuk kepentingan riset pendidikan.

Dengan suksesnya pembakuan proses pembuatan propelan sesungguhnya sudah tercapai upaya mewujudkan propelan andal. Namun bagaimana pun kondisi homogenitas adonan yang bisa dicapai pada upaya ini tidaklah sempurna (100%). Oleh sebab itu, di masa depan perlu diupayakan penyempurnaan proses agar homogenitas bisa mencapai 100%. Namun, selain homogenitas, upaya lain yang perlu dilakukan untuk mendapatkan produk propelan yang utuh dan tidak cacat, terutama cacat fisik, yaitu paten pelapisan *mandrel* agar cacat permukaan dalam propelan menjadi minimal. Bagaimana pun hal ini penting dilakukan mengingat biaya untuk mendapatkan propelan utuh memang mahal. Hal lain lagi yang perlu diupayakan adalah mengantisipasi kegagalan nyala penyal awal (*igniter*) dengan penerapan filamen ganda pada isian penyalan awal. Kegagalan

penyalaaan *igniter* membuat propelan tidak nyala dan cacat sehingga membuat seluruh proses pengembangan propelan menjadi gagal juga.

3. Pengembangan Penggunaan Pelumas dan Filamen

Pengembangan propelan terus dilakukan dengan menyajikan penggunaan pelumas dua jenis untuk melapisi mandrel dan cetakan. Langkah ini telah dipatenkan dalam paten IDP000075279 (2021). Cacat fisik pada propelan yang dihasilkan sangat dihindari agar tidak menimbulkan masalah pada pembakarannya saat uji *static*. Cacat fisik terutama retak biasanya terjadi akibat pencabutan dari cetakan atau saat pelepasan *mandrel*. Agar propelan bisa dilepas dengan mudah dari cetakan, pada tabung harus diberi lapisan berupa lembaran aluminium. Lalu lembaran aluminium ini disemprot dengan pelumas agar mudah dilepas dari propelan hasil. Pelepasan propelan dan aluminium dari cetakan dilakukan dengan cara didorong keluar dengan mudah. Pelepasan lembaran aluminium dari propelan dilakukan hati-hati agar permukaan propelan luar tidak cacat fisik. Hal yang paling sulit adalah pelepasan *mandrel* dari propelan. *Mandrel* pun sebelum ditusukkan ke dalam adonan, dilapisi pelumas dua jenis dengan cara disemprotkan. Penyemprotan tersebut dilakukan dua kali dengan cara dikeringkan dan diangin-anginkan di udara terbuka.

Pengembangan dan penelitian propelan ukuran kecil ini menggunakan *mandrel* bentuk silinder, sehingga tidak banyak meninggalkan cacat permukaan bagian dalam propelan dan mudah pelepasannya. Namun begitu, dengan menggunakan pelumas, proses pelepasan *mandrel* menjadi lebih mudah karena kesulitan pelepasan bukan hanya akibat kuatnya ikatan antara propelan dengan *mandrel*, tetapi juga karena tekanan propelan kepada *mandrel*. Penggunaan pelumas pada *mandrel* berbentuk bintang sangat penting karena permukaan dalam propelan yang berbentuk bintang mudah cacat fisik, bahkan patah.

Cacat permukaan fisik sebelah dalam sangat dihindari karena tidak mudah dilihat dengan mata telanjang. Munculnya cacat fisik permukaan dalam merupakan kegagalan proses yang tidak murah,

karena bahan baku dan biaya deteksi termasuk mahal, serta ada juga kerugian aspek lainnya. Selain itu, pemusnahan propelan yang gagal menimbulkan masalah tersendiri. Sebelum digunakannya pelumas untuk pelapisan *mandrel*, cara-cara lain sudah digunakan, seperti pelapisan *mandrel* dengan selotip dan bahan lain semacam minyak. Pada akhirnya pelumas jenis McLube 1725 dan McLube 1733 dipakai dan menjadi pelapis *mandrel* terbaik.

Selain penggunaan pelumas, pengembangan propelan andal juga dilakukan dengan penambahan filamen. Paten (IDP000080162, 2021) menyajikan pentingnya penambahan filamen dengan nilai tahanan (resistor) yang sama secara paralel pada *squib* untuk memperbesar kemungkinan menyala bagi *igniter* pembakaran motor roket. Tindakan ini didasari oleh gagasan bahwa persamaan matematis antara arus listrik dan voltase yang melibatkan resistor yaitu $V=IR$ dengan V adalah tegangan, I adalah arus listrik, dan R adalah resistor. Pada tegangan yang tidak berubah, dengan memperkecil nilai resistor, maka arus yang akan mengalir menjadi lebih besar. Ketika resistor disusun secara seri, maka resistor resultan (pengganti) akan menjadi lebih besar. Namun, ketika resistor disusun secara paralel, resistor resultan akan menjadi lebih kecil sehingga arus yang mengalir akan menjadi besar. Hal tersebut menyebabkan tingkat kegagalan pembakaran oleh *igniter* akan makin kecil.

Selama ini, resistor yang digunakan dalam *squib* adalah tunggal. Pernah ada berita bahwa uji *static* gagal nyala. Meski kegagalan nyala belum bisa dipastikan bersumber dari kegagalan nyala *squib*, tetapi penggunaan *squib* filamen paralel ini mengantisipasi kegagalan nyala karena *squib*. Kegagalan nyala bisa saja karena *squib* propelan tidak homogen. Propelan yang tidak homogen bisa saja karena Al banyak di dalam propelan atau Al banyak di permukaan dalam. Permukaan dalam propelan yang banyak mengandung Al akan lebih mudah terbakar daripada permukaan dalam propelan yang lebih sedikit mengandung Al. Pentingnya penggunaan propelan homogen adalah bisa mempermudah analisis jika terjadi kegagalan nyala. Bahkan,

penggunaan propelan homogen tersebut bisa menjadi bahan evaluasi kinerja alat penyalat awal pembakaran motor roket.

4. Evaluasi Kinerja

Setelah rangkaian pengembangan propelan berakhir pada uji *static*, perlun dilakukan perbandingan antara kurva-kurva yang diperoleh dari uji *static* untuk melihat ada-tidaknya perbedaan, meskipun hasil Isp yang diperoleh tidak berbeda secara signifikan. Hal ini penting dilakukan sebagai bahan evaluasi di masa depan. Paten IDS000004276 (2021) yang telah diperoleh menyajikan cara mengetahui perbandingan kinerja satu motor roket dengan kinerja motor roket yang lain pada komposisi propelan yang sama. Selain sudah ada pernyataan bahwa propelan yang digunakan andal pada komposisi yang sama, kinerja motor roket pun bisa dibandingkan melalui kurva uji *static* yang dihasilkan. Caranya, kedua kurva ditempatkan ke dalam koordinat X-Y. Kedua kurva dibagi menjadi segmen-segmen yang bisa dibandingkan. Kemudian, pada titik-titik sumbu X, dibaca nilai sumbu Y-nya. Kemudian tiap segmen dari dua kurva tersebut nilai rerata Y dibandingkan dengan menggunakan statistik uji beda. Dari hasil uji beda, bisa dilihat pada segmen mana terdapat perbedaan. Lebih lanjut, bisa dievaluasi faktor-faktor apa yang mengakibatkan perbedaan. Hasil evaluasi ini bisa menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan berikutnya.

Melalui inspirasi dari paten uji homogenitas dengan tidak merusak sampel, upaya mewujudkan propelan andal merambah ke propelan dengan ukuran besar. Hal ini mungkin dilakukan karena tersedianya film-film sinar-x hasil pemindaian propelan ukuran besar. Upaya mewujudkan propelan ukuran besar yang andal penting dilakukan karena panjang propelan yang diperlukan untuk motor roket tidak dipenuhi oleh panjang propelan hasil sekali cetak sehingga masih ada penambahan panjang.

Paten dengan nomor IDS000003686 (2021) ini sesungguhnya dibuat dengan berangkat dari fakta bahwa tidak ada jaminan propelan andal dan propelan yang tersedia tidak sepanjang yang dibutuhkan.

Propelan yang dibutuhkan adalah propelan dengan panjang 200 cm *grain* ganda (*hollow* dan bintang), sedangkan propelan yang tersedia sebagai hasil cetakan adalah propelan dengan panjang 120 cm *grain hollow* atau *grain* bintang. Dalam sekali cetak hanya satu bentuk *grain*. Jika memerlukan propelan dengan *grain* ganda, harus mencetak *grain hollow* dan *grain* bintang. Kemudian propelan *grain* ganda yang dibutuhkan disiapkan dengan penyambungan kedua *grain* tersebut.

Propelan dengan panjang 200 cm dengan *grain* ganda (*hollow* dan bintang) dipenuhi dengan penyambungan *grain hollow* dengan *grain* bintang. Sekali cetak, propelan sepanjang 120 cm. Agar bisa mendapatkan propelan andal, perlu mengatur bagian-bagian yang akan diambil (dipotong). Baik *grain* bintang maupun *grain hollow*, kita bagi menjadi tiga segmen, yaitu bagian atas, bagian tengah, dan bagian bawah, masing masing sepanjang 40 cm. Pembagian tersebut dilakukan agar lebih mudah mengaturnya dalam penyambungan. Karena selama proses *curing* propelan berdiri tegak dalam ruang pemanas, ada dugaan terjadi aliran komponen padat menurun sehingga densitas bagian bawah akan lebih besar daripada densitas bagian atas. Kehadiran paten ini akan mengantisipasi perbedaan densitas tersebut, sehingga propelan yang dihasilkan pascapenyambungan akan senantiasa tidak berbeda.

Proses penyambungan tersebut dilakukan dengan cara sebagai berikut. Propelan *grain hollow* dibagi menjadi tiga segmen masing-masing sepanjang 40 cm ; A (segmen atas), T (segmen tengah), B (segmen bawah). Sementara itu, propelan *grain* bintang dibagi juga tiga segmen masing masing sepanjang 40 cm ; a (segmen atas), t (segmen tengah), b (segmen bawah). Dengan berlakunya asumsi bahwa densitas segmen tengah sama dengan rerata dari densitas segmen atas dan densitas segmen bawah, maka dibuat kombinasi sebagaimana tersaji pada Tabel 9.2.

Tabel 9.2 Kombinasi Susun Segmen Propelan

ATBAb	ATBBa	ATBTt
-------	-------	-------

Dengan memperhatikan kombinasi di atas, maka perlu dicetak empat buah propelan *grain hollow* dan satu buah propelan *grain* bintang untuk tiga kali pemakaian dan propelan hasil perakitan bisa diharapkan senantiasa andal. Jika propelan yang dicetak dari adonan, ada jaminan homogen, maka aturan yang telah dijadikan invensi ini tidak berlaku karena di bagian mana pun tidak ada perbedaan densitas. Propelan yang homogen, tidak ada penurunan komponen padat selama proses *curing* dengan posisi berdiri dalam oven sehingga densitas segmen bawah sama dengan densitas segmen tengah sama dengan densitas segmen atas.

Bisa saja mendapatkan propelan andal sepanjang 200 cm tanpa memperhatikan homogen-tidak homogen, yaitu dengan cara sekali cetak 200 cm. Bisa juga dengan cara mencetak dengan panjang kelipatan, yaitu sepanjang 100 cm dengan dua kali cetak atau 50 cm dengan empat kali cetak, dan lain-lain.

Pemenuhan kebutuhan propelan sepanjang 200 cm, akan memerlukan perubahan banyak hal, yaitu

- a. Ruangan proses casting, proses coring, proses decorating perlu ditinggikan,
- b. Wadah cetakan, mandrel, stick mandrel perlu diperpanjang,
- c. Instalasi proses coring dan proses decorating perlu diperpanjang, dan
- d. Kebutuhan sarana lainnya seperti tangga untuk casting dan coring perlu disesuaikan

Uji homogenitas tanpa merusak sampel bisa diterapkan pada propelan ukuran besar. Namun penggunaan film sinar-x akan mempersulit proses dan mahal biayanya. Oleh karena itu, perlu diterapkan penggunaan data digital. Agar bisa diperoleh data digital, media film sinar-x harus diganti dengan media lainnya, seperti media DR (*direct radiography*) atau media CR (*computerized radiography*).

Paten S00201905226 (2019) ini menyajikan cara uji homogenitas propelan padat komposit dengan data digital hasil pemindaian pro-

pelan dengan sinar-x. Paten ini merupakan pengembangan dari uji tak merusak (*non-destructive test*). Kalau pada metode sebelumnya, pemindaian propelan dengan sinar-x menghasilkan film sinar-x. Dari film ini, data gelap-terang dibaca pada film sinar-x dengan menggunakan alat densitometer. Kemudian hasil pembacaan film berupa sekelompok data gelap-terang beberapa bagian dalam sampel propelan dibandingkan reratanya. Pembandingan rerata dengan menggunakan statistik uji beda atau anova satu jalur, untuk melihat ada tidaknya perbedaan. Dalam paten ini juga mirip cara pengujiannya. Bedanya dalam paten ini, data gelap-terang diperoleh secara digital.

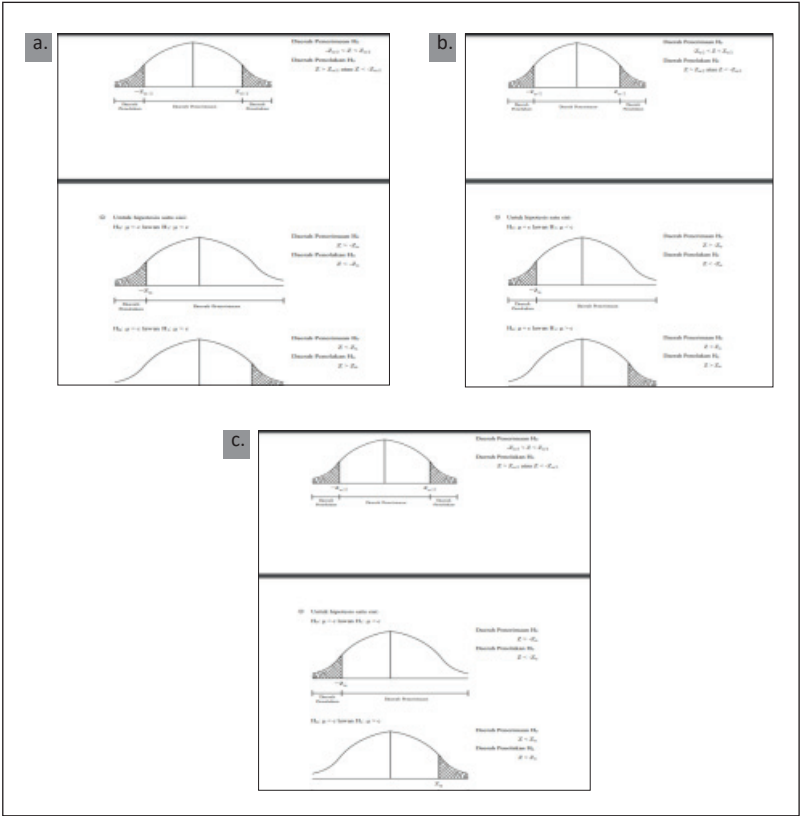
Dalam paten ini, hasil pemindaian propelan padat komposit tidak lagi menggunakan film sinar-x, tetapi berupa media *computed radiography* (CR) atau *directed radiography* (DR). Dari kedua media ini nilai gelap-terang berupa data digital. Data digital ini memiliki banyak digit di belakang koma, sehingga hasil kesimpulan homogenitas propelan bisa lebih halus. Keuntungan paten ini adalah sebagai berikut.

- a. Hasil kesimpulan uji homogenitas lebih halus
- b. Tidak lagi menggunakan film sinar-x yang mahal
- c. Pengerjaannya lebih mudah dan cepat
- d. Di masa depan bisa menjadi dasar pembuatan lisensi software uji homogenitas
- e. Tidak merusak sampel sehingga sampel bisa digunakan lagi untuk uji lainnya

D. Pengujian

Statistik uji beda digunakan di sini untuk menguji ada tidaknya perbedaan. Statistik uji beda ada dua macam yaitu uji beda satu sampel dan uji beda dua sampel. Uji beda (uji t) satu sampel adalah untuk melihat ada tidaknya perbedaan rerata kelompok data dengan suatu nilai tertentu. Sementara itu, uji beda dua sampel adalah untuk mengetahui ada tidaknya perbedaan antara kelompok pertama dengan kelompok kedua. Uji beda dua sampel terdiri dari 2 macam, yaitu uji

beda dua kelompok data yang bebas dan uji beda kelompok data yang tidak bebas. Kurva yang digunakan dalam statistik uji beda ini adalah kurva distribusi *student* (Gambar 9.4). Dalam proses pengujiannya, perlu mendapatkan nilai t-hitung (th) dari kelompok data tersebut. Kemudian nilai t-hitung dibandingkan dengan nilai t-tabel (tt) pada taraf signifikansi tertentu. Nilai t-tabel dilihat pada tabel nilai t.



Keterangan: a. Uji beda sisi kiri; b. Uji beda dua sisi; c. Uji beda sisi kanan

Gambar 9.4 Kurva *Statistic Student*

Dalam uji beda, cara uji bisa dilakukan dengan 3 cara, yaitu uji dua pihak, uji pihak kiri, dan uji pihak kanan. Pada uji dua pihak, hipotesis nol H_0 : tidak terdapat perbedaan pada rerata X_1 dan rerata X_2 , dan hipotesis alternative H_a : terdapat perbedaan pada rerata X_1 dan rerata X_2 . Daerah penerimaan hipotesis H_0 berada di tengah kurva distribusi, sedangkan daerah penolakan hipotesis (H_a) berada pada daerah di ekor kanan dan ekor kiri. Nilai t-hitung untuk uji dua pihak adalah $-t_{\alpha/2}$ dan $+t_{\alpha/2}$, sedangkan nilai t-hitung uji satu pihak adalah $+t_{\alpha}$. Kesimpulan ada tidaknya perbedaan terlihat pada posisi nilai t-hitung berada pada sebelah kanan (lebih besar) atau sebelah kiri (lebih kecil) nilai t-tabel.

Pada uji beda satu pihak, uji kanan dengan hipotesis nol H_0 : nilai rerata X_1 lebih kecil sama dengan rerata X_2 , hipotesis alternative H_a : rerata X_1 lebih besar daripada rerata X_2 . Daerah H_0 berada pada sebelah kiri, sedangkan daerah H_a berada di sebelah kanan. Pada uji kiri dengan hipotesis nol H_0 : rerata X_1 lebih besar sama dengan rerata X_2 , sedangkan hipotesis alternative H_a : rerata X_1 lebih kecil rerata X_2 . Daerah H_0 berada pada sebelah kanan, sedangkan daerah H_a berada di sebelah kiri pada kurva. Untuk lebih jelasnya, bisa dilihat pada kurva *statistic student* (Gambar 9.4).

Statistik uji beda untuk melihat ada tidaknya perbedaan di antara 2 kelompok data atau kelompok data lama dengan kelompok data baru (setelah mendapat perlakuan/*treatment*), biasanya digunakan penelitian pendidikan atau penelitian ilmu sosial. Dari teori-teori yang dibangun, diharapkan dugaan terhadap klas yang mendapat *treatment* akan memiliki rerata yang berbeda (naik) dibanding klas yang tidak mendapat *treatment*. Pada awalnya kedua klas tersebut tidak berbeda dalam reratanya sebelum ada *treatment* terhadap salah satu klas. Upaya *treatment* tersebut tidak lain adalah menaikkan nilai t-hitung agar nilai t-hitung klas yang mendapat *treatment* naik memasuki daerah penolakan hipotesis (daerah H_a). Jika upaya perlakuan bisa menghasilkan nilai t-hitung yang jatuh pada daerah H_a , penelitian bisa dianggap berhasil. Meski pada awalnya kedua klas tidak berbeda, setelah salah satu klas mendapat *treatment* maka kedua klas menjadi

berbeda, atau klas yang baru memiliki perbedaan dengan klas yang lama setelah klas lama diberi *treatment*.

Berbeda dengan suasana klas dalam penelitian ilmu sosial atau ilmu pendidikan di atas, upaya mewujudkan homogenitas campuran propelan ini adalah peristiwa sebaliknya. Dalam campuran yang belum diaduk, antarbagian memiliki komposisi yang berbeda. Namun setelah diaduk lama, kondisi homogen tercapai dan bagian-bagian tersebut memiliki komposisi yang sama. Kalau dalam contoh peristiwa klas di atas, *treatment* itu menaikkan nilai hitung sehingga nilainya menjadi lebih besar dari nilai *t*-tabel (masuk daerah H_a). Namun, dalam pengadukan campuran bahan baku propelan (proses homogenisasi), hal tersebut justru menurunkan nilai *t*-hitung menuju nilai yang lebih rendah daripada nilai *t*-tabel sehingga yang diinginkan diterimanya H_0 (tidak ada perbedaan).

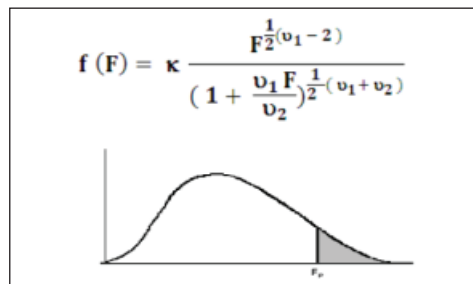
Di sini, uji homogenitas propelan menggunakan uji beda, untuk melihat terdapat perbedaan densitas atau tidak. Hasil yang homogen adalah tidak terdapat perbedaan densitas di bagian mana pun. Pada awalnya uji homogenitas dilakukan dengan uji yang namanya benar-benar “uji homogenitas”. Namun meskipun propelan dinyatakan homogen dari data propelan (berupa densitas), hasil uji *static* menunjukkan bahwa propelan memiliki nilai *Isp* yang jauh (selisihnya besar) padahal komposisinya sama. Bahkan pada komposisi yang berbeda memiliki *Isp* yang mirip (selisih kecil). Hal ini menjadi alasan untuk mengevaluasi cara uji homogenitas tersebut. Kemudian muncul gagasan untuk menggunakan cara statistik uji beda, dan berhasil. Di masa depan, metode uji beda ini menjadi dasar-dasar untuk menyusun paten-paten di propelan.

Ternyata pengertian uji homogenitas dalam statistik yang benar-benar dengan kata “uji homogen” adalah untuk prasyarat analisis digunakannya statistik parametris. Artinya agar metode uji beda bisa digunakan maka kelompok data harus homogen dan pengujiannya dilakukan dengan uji homogen. Selain uji homogen, prasyarat analisis lainnya adalah kelompok data harus berdistribusi normal (uji normalitas) dan pengambilan sampel harus acak.

Pengadukan campuran dalam upaya mencapai kondisi campuran homogen dilakukan dengan cara menurunkan nilai t-hitung. Dari besar menjadi kecil, dari daerah H_a (terdapat perbedaan) mengarah ke daerah H_o (tidak ada perbedaan). Dengan pemahaman ini maka dapat disimpulkan kondisi homogenitas tertinggi adalah jika nilai t-hitung mendekati nol.

Statistik analisis variansi satu jalur (Anova), merupakan perluasan dari uji beda. Uji beda hanya membandingkan rerata dari dua kelompok data, sedangkan anova satu jalur membandingkan rerata lebih dari dua kelompok data. Jika jumlah kelompok data masih sedikit, misalnya 2 hingga 4 kelompok, pelaksanaan uji beda tidak lebih lama dilakukan daripada pelaksanaan anova satu jalur, apalagi bisa dilakukan dengan komputer (terutama dengan program excel). Hal itu karena dengan menggunakan anova satu jalur, jika hasilnya menunjukkan perbedaan, perlu dilanjutkan menguji dengan uji Tuckey untuk melihat kelompok data mana yang menunjukkan perbedaan tersebut.

Untuk menguji ada tidaknya perbedaan dengan anova satu jalur, kurva yang digunakan tidak lagi kurva *statistic student*, tetapi kurva F (Gambar 9.5). Nilai F hitung (F_h) dihitung dari kelompok data yang digunakan, lalu nilai F_h dibandingkan dengan F-tabel (F_t) pada taraf signifikansi tertentu. Ketika F_h lebih kecil daripada F_t , maka disimpulkan tidak terdapat perbedaan (campuran homogen) di antara kelompok data yang diuji. Jika F_h lebih besar daripada F_t , berarti terdapat perbedaan, kemudian dilakukan uji Tuckey untuk menemukan kelompok data mana yang berbeda.



Gambar 9.5 Kurva F

Korelasi dan regresi linier statistik anova juga bisa digunakan untuk mengetahui homogenitas kelompok data, yaitu dengan cara membagi variansi terbesar dengan variansi terkecil di antara kelompok data tersebut. Hasil bagi ini disebut sebagai F-hitung (F_h) yang kemudian nilai F_h dibandingkan dengan F-tabel (F_t) pada taraf signifikansi tertentu (biasanya $\alpha=5\%$). Bila F_h lebih kecil dari F_t , bisa disimpulkan kelompok data adalah homogen. Agar kelompok data homogen dan normal, biasanya data yang digunakan untuk penelitian sebanyak minimal 30.

Selain uji beda dan anova satu jalur, ada bab statistik yang kadang digunakan dalam penelitian yaitu korelasi. Korelasi ini sudah umum dan banyak digunakan dalam penelitian pendidikan dan sosial. Biasanya korelasi berpasangan dengan regresi, terutama regresi linier. Korelasi bermakna “hubungan” yaitu hubungan antara sesuatu dengan sesuatu yang lain, hubungan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Korelasi bisa digunakan untuk menghitung sejauh mana besarnya hubungan antara variabel bebas (X) dengan variabel terikat (Y). korelasi juga bisa digunakan untuk menghitung besarnya hubungan antara variabel ganda (X_1, X_2) dengan variabel terikat (Y), atau hubungan parsial antara X_1 dengan Y jika X_2 dijaga tetap. Nilai korelasi akan punya makna jika memang ada teori yang menghubungkan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Tanpa adanya teori tersebut, korelasi tidak punya makna apapun meskipun nilainya besar, karena memang dua kelompok data pun bisa dibuat korelasi dan hasilnya bahkan sangat kuat.

Hubungan memiliki beberapa jenis, yaitu hubungan lurus (atau sejajar, linier, positif) dan hubungan terbalik (atau timbal balik, *reciprocal*, negatif). Hubungan lurus adalah suatu hubungan yang jika variabel bebas naik, variabel terikat juga naik. Hubungan terbalik adalah jika variabel bebas naik, variabel terikat justru menurun. Kekuatan hubungan bisa dilihat dari nilai korelasinya, sebagaimana tersedia dalam Tabel 9.3.

Regresi (linier) bisa dibuat jika jelas-jelas ada hubungan yang signifikan antara variabel bebas dengan variabel terikat. Makna signi-

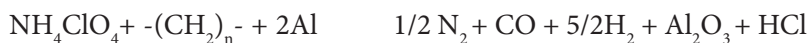
Tabel 9.3 Kekuatan Korelasi

Rentang Korelasi	Makna
Kurang dari 0,2	Sangat lemah
0,2 – 0,4	Lemah
0,4 – 0,6	Sedang
0,6 – 0,8	kuat
Lebih dari 0,8	Sangat kuat

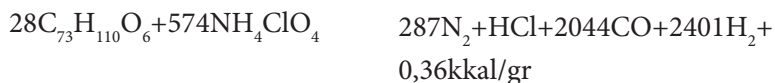
fikan adalah bahwa hubungan tersebut memang karena hasil penelitian (*treatment*) bukan karena kesalahan *sampling* atau kesalahan yang lain. Persamaan linier biasanya dinyatakan secara matematis dengan rumus $Y=aX+b$; a merupakan *slope* atau kemiringan garis (*gradient*) sedangkan b adalah nilai Y jika $a=0$, nilai dasar yang dimiliki, bukan akibat *treatment* (Sudjana, 1995).

Ketika tingkat homogenitas sudah bisa ditentukan, periode pengadukan komponen propelan sudah ada ketentuannya, serta proses yang baku sudah dihasilkan, maka tabulasi antara komposisi propelan dengan kinerjanya (impuls spesifik) bisa diwujudkan. Di antara komponen penyusun propelan yang terbakar, aluminium adalah komponen yang menghasilkan energi yang besar, sedangkan energi yang dihasilkan dari pembakaran komponen penyusun lainnya hanya sepertujuhnya. Hal ini bisa dilihat pada reaksi kimia di bawah ini,

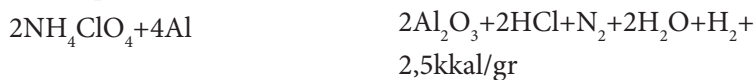
Reaksi pembakaran propelan [Muray, 2009]



Reaksi pembakaran binder [Martin et al, 2003]



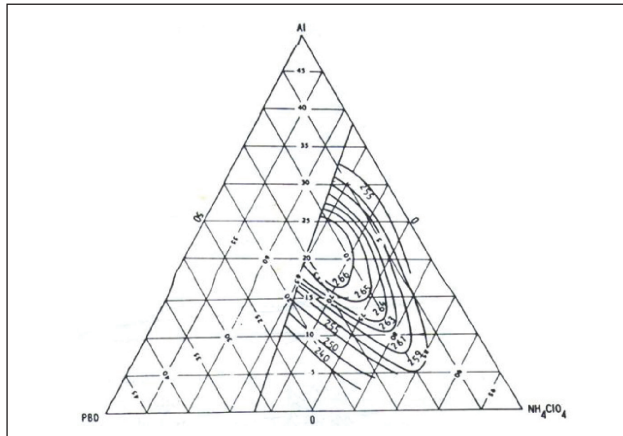
Reaksi pembakaran Al



Dari reaksi pembakaran Al Nampak bahwa energi yang dihasilkan relatif besar sekali, sehingga bisa dikatakan bahwa sumbangan energi terhadap kinerja propelan sangat tergantung pada kandungan Al. Variasi kandungan Al dalam propelan dengan kinerja propelan (Impuls spesifik) bisa ditabulasikan mulai dari kandungan Al yang kecil, misalnya 6%Al hingga 18%Al. Bahkan, lebih lanjut bisa ditabulasikan antara Isp propelan dengan jarak jangkauan tembak pada sudut tertentu, atau berbagai sudut, untuk roket militer. Pengembangan dan penelitian berikutnya setelah propelan andal terwujud bisa mengarah pada optimasi dalam bidang-bidang lainnya, seperti struktur atau propulsi.

Jika berhasil mentabulasikan variasi kandungan Al terhadap impuls spesifik, dengan regresi linier bisa membuat persamaan matematis $Y=aX+b$ antara kandungan Al (X) dengan impuls spesifik (Y), dengan spesifikasi komponen penyusun propelan yang diketahui. Dengan persamaan matematis variasi kandungan Al terhadap impuls spesifik, bisa diperkirakan nilai impuls spesifik. Nilai ini akan menjadi bahan untuk mengevaluasi hasil uji *static* motor roket. Jika perkiraan ini benar, bisa mengurangi biaya uji *static*. Sekiranya berhasil dibuat persamaan matematis ini, kita tidak tahu sejauh mana linieritas dari hubungan Isp sebagai fungsi kandungan Al tersebut. Karena memang ada diagram lain, yang berbentuk segitiga, yang menghubungkan antara kandungan Al terkait dengan kandungan AP, HTPB terhadap Isp, sebagaimana disajikan dalam Gambar 9.6.

Regresi untuk membuat persamaan linier matematis perlu dicoba untuk hubungan antara gelap-terang dengan Isp propelan. Nilai gelap-terang memiliki hubungan negatif dengan Isp. Makin tinggi nilai gelap-terang, makin rendah nilai Isp. Propelan dengan kandungan padatan (Al, AP) tinggi memiliki nilai gelap-terang rendah. Jika persamaan matematis gelap-terang bisa diwujudkan, prediksi Isp melalui nilai gelap-terang propelan bisa dilakukan. Lebih lanjut, persamaan ini bisa digunakan untuk memperkirakan Isp propelan dari roket yang diluncurkan. Selama ini nilai impuls spesifik propelan yang digunakan dalam roket diasumsikan sama dengan nilai impuls spesifik saat uji statik.



Sumber: Timnat (1987) & William (1989)

Gambar 9.6 Impuls spesifik (Isp) sebagai fungsi %AP, %PB, %Al

E. Penutup

Roket adalah kendaraan antariksa yang bisa digunakan untuk keperluan penelitian atau untuk keperluan militer. Roket padat adalah roket berbahan bakar padat dan roket ini banyak dikembangkan di Indonesia melalui beberapa lembaga pemerintah atau perguruan tinggi. Bahan bakar roket disebut propelan yang tersusun atas komponen pokok HTPB, TDI, Aluminium, dan Amonium Perklorat. Propelan dibuat dengan mencampur (proses *mixing*) komponen penyusun, mencetak adonan yang berbentuk bubuk / *slurry* (proses *casting*) ke dalam cetakan berbentuk silinder, kemudian menusukkan mandrel untuk membuat bentuk permukaan dalam propelan (proses *coring*), pematangan dalam oven agar padat pada suhu dan periode tertentu (proses *curing*), dan diakhiri dengan pelepasan produk propelan dari cetakan dan *mandrel* (proses *decoring*). Setelah propelan padat dilepas dari cetakan, bisa dilanjutkan untuk pengujian-pengujian, misalnya uji kekerasan, uji densitas, uji homogenitas, uji kekeroposan, uji kekuatan (kuat tarik), serta uji kinerja. Untuk uji kinerja, propelan dimasukkan ke dalam tabung motor roket yang dilengkapi alat pengukur parameter saat pembakaran berlangsung dan lalu dibakar. Hasil

pembakaran motor roket berupa grafik lawan waktu pembakaran yang memperlihatkan tekanan ruang bakar, gaya dorong, impuls spesifik (Isp), dan periode bakar. Impuls spesifik (Isp) merupakan ukuran kinerja yang diutamakan. Impuls spesifik berbeda-beda sesuai banyaknya kandungan aluminium dalam propelan. Aluminium adalah sumber utama energi roket padat. Makin banyak kandungan aluminium, makin tinggi Isp; makin rendah aluminium, makin rendah Isp. Persoalan yang muncul terkadang pada komposisi Al yang sama tetapi memperlihatkan hasil Isp yang berbeda, atau pada kandungan Al yang berbeda menghasilkan Isp yang sama. Dengan kata lain tren Isp tidak mengikuti *tren* kandungan aluminium. Dari persoalan ini perlu diketahui homogenitas (sebaran merata komponen penyusun) adonan melalui produk propelan tercetak.

Uji homogenitas dilakukan dengan statistik uji beda atau analisis variansi satu jalur. Uji ini bisa dilakukan dengan data densitas (uji merusak sampel) atau melalui film sinar-x (uji tidak merusak sampel). Propelan dibagi menjadi beberapa bagian, tiap bagian diambil beberapa data densitas. Rata-rata nilai densitas suatu bagian dibandingkan dengan rata-rata bagian lainnya. Pembandingan ini dilakukan dengan statistik uji beda atau statistik anova satu jalur. Jika hanya ada dua bagian, dilakukan dengan uji beda, tetapi jika lebih dari 3 bagian, dilakukan dengan anova satu jalur dilanjutkan dengan *statistic* uji *tuckey* untuk mengetahui letak perbedaan di antara bagian-bagian yang berbeda. Jika perlu mengetahui *tren* kinerja propelan (Isp) dengan kandungan Al, bisa dilakukan dengan korelasi asalkan *tren* tersebut linier. Korelasi bisa digunakan untuk bahan evaluasi pengembangan berikutnya. Bahkan korelasi penting dalam mentabulasikan tabel tembak untuk roket militer untuk berbagai sudut tembak.

Daftar pustaka

- Martin, et al. (2003). *Variable burn rate propellant*. US paten No.6, 503, 350 B2.
- Muray S., Cohen. (2009). *Advanced Binders for Solid Propellant-Review*
- Hunley J. D. History of Solid Propellant Rocketry.

- Sudjana. (1995). *Statistik Pendidikan*.
- Timnat, Y. M. (1987). *Advanced Chemical Rocket Propulsion*. Academic press Ltd, London.
- Paten 1. (IDP000064239,2019). *Metode uji homogenitas adonan propelan berdasar kesamaan secara simultan dari dua sifat beberapa propelan padat hasil*.
- Paten 2. (IDS000002503,2019). *Metode pengujian homogenitas tak-merusak untuk produk propelan komposit*
- Paten 3. (IDS000002980,2020). *Metode pembuatan propelan padat komposit dengan mixer balde horisontal RPM 60*.
- Paten 4. (IDP000075279,2021). *Metode pelapisan mandrel menggunakan pelumas dua jenis*.
- Paten 5. (IDP000080162,2021). *Penerapan filamen paralel pada squib untuk memperbesar probabilitas keberhasilan penyalaan igniter*.
- Paten 6. (IDS000004276,2021). *Metode uji kesamaan gaya dorong motor roket padat komposit untuk diaplikasikan pada motor roket keron, motor roket 100, motor roket 1220, motor roket 320, motor roket 450, motor roket 550*.
- Paten 7. (IDS000003686,2021). *Metode penyiapan propelan padat komposit 1220 dari propelan hasil cetakan berdasar data gelap terang film x-ray*.
- Paten 8. (S00201905226,2019). *Metode uji homogenitas propelan padat komposit menggunakan data digital hasil pemindaian sinar-x dengan media Direct Radiography (DR) atau Computed Radiography (CR). Metode ini diaplikasikan pada propelan dengan ukuran Keron, propelan ukuran 100, propelan ukuran 1220, propelan ukuran 320, propelan ukuran 550*.