

FORMULASI PROPELAN MANDIRI BERBASIS AMONIUM NITRAT UNTUK ROKET MODIFIKASI CUACA

(*FORMULATION OF LOCAL PROPELLANT ROCKET BASED AMMONIUM NITRATE FOR WEATHER MODIFICATION ROCKET*)

Heri Budi Wibowo

Pustekroket Lapan

Pos El : heribw@gmail.com, heri.budi@lapan.go.id

Abstrak

Salah satu cara penyalaan inti hujan buatan untuk modifikasi cuaca adalah roket. Roket yang diinginkan adalah murah, aman, kandungan lokal semua, dan mudah dihancurkan. Roket diharapkan dapat membawa flare ada ketinggian rendah. Untuk itu dikembangkan propelan berbasis amonium nitrat. Tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan formulasi propelan amonium nitrat dengan berbagai binder. Penelitian dilakukan dengan menvariasi binder yang ada, kemudian disimulasikan melalui perhitungan reaksi pembakaran dan kesetimbangan gas yang terbentuk, dengan pembakaran adiabatik, diperoleh suhu pembakaran, energi yang dihasilkan, dan impuls jenis propelan. Binder yang digunakan adalah dekstrosa, polivinilklorida, gula fruktosa, dan poliepoksi. Hasil analisis dan simulasi menunjukkan bahwa propelan amonium nitrat memiliki kapabilitas untuk digunakan pada propelan modifikasi cuaca. Berdasarkan energi yang dihasilkan, maka propelan dengan binder dekstrosa memberikan energi pembakaran dan impuls jenis yang cukup tinggi, yaitu di atas 170 detik. Propelan amonium nitrat dengan binder poliepoksi dan polivinilklorida menghasilkan energi pembakaran lebih rendah dan mengeluarkan asap lebih banyak. Walaupun propelan amonium nitrat memiliki energi lebih rendah dari propelan berbasis amonium perklorat, namun propelan ini dapat diproduksi lokal dan lebih murah.

Kata kunci : propelan, amonium nitrat, modifikasi cuaca

Abstract

One way Ignition core artificial rain for weather modification is a rocket. Rocket desirable is cheap, safe, all local content, and easily destroyed. The rocket is expected to bring a flare there is a low altitude. Was developed for ammonium nitrate-based propellant. The research objective is to obtain ammonium nitrate propellant formulation with various binders. The study was conducted with existing menvariasi binder, then simulated through calculation of the combustion reaction and the equilibrium gas formed, the adiabatic combustion, combustion temperature is obtained, the energy produced, and impulse type of propellant. Binder used is dextrose, Polyvinylchloride, table sugar, and polyepoxy. Analysis and simulation results show that ammonium nitrate propellant has the capability to be used in weather modification propellant. Based on the energy generated, the propellant with the binder dextrose provide combustion energy and impulse type that is high enough, ie 180 seconds. Propellant ammonium nitrate with binder poliepoksi and Polyvinylchloride menghasilkna lower energy combustion and smoke more. Although ammonium nitrate propellant has a lower energy than the propellant-based ammonium perchlorate, but the propellant can be produced locally and cheaper.

Keywords: propellant, ammonium nitrate, weather modification

1. PENDAHULUAN

Pengembangan roket untuk wahana memasukkan dan membakar *flare* hujan buatan ke awan sudah lama dikembangkan oleh negara-negara Eropa Timur untuk modifikasi cuaca pada awan dingin pada ketinggian 5.000-10.000 m [1]. Pengembangan roket untuk membakar flare pada awan panas dengan ketinggian 1.500 m sampai 2.500 m telah berhasil dikembangkan oleh China untuk modifikasi cuaca [2]. Lapan dengan BPPT telah mengembangkan bersama pembakaran flare dengan menggunakan roket pada tahun 2009 dengan menggunakan roket RUM dalam bentuk demo. Setelah lama tidak kerjasama penelitian, mulai tahun 2015 dijajagi kerjasama penelitian penggunaan roket untuk pembakaran flare di awan rendah pada ketinggian 1.500 – 2.500 m menggunakan roket diameter 70mm [3].

Pengembangan roket modifikasi cuaca atau disebut roket TMC diinginkan dapat membawa beban 1 kg pada ketinggian sampai minimal 1.500 mm [4]. Syarat lain roket terbuat dari material yang aman dan tidak membahayakan lingkungan, murah, dan sebisa mungkin dapat dibuat dengan komponen lokal. Propelan yang dikembangkan sampai saat ini adalah propelan komposit, namun demikian semua bahan bakunya masih impor. Oleh karena itu, perlu dikembangkan propelan dengan bahan baku lokal seperti amonium nitrat. Propelan berbasis amonium nitrat umum digunakan untuk roket-roket amatir di luar negeri karena bahan baku mudah diperoleh. Propelan berbasis amonium nitrat juga pernah digunakan untuk prototip awal roket untuk kompetisi muatan roket antar mahasiswa [5,6]. Oleh karena itu, pengembangan propelan berbasis amonium nitrat perlu dikembangkan kembali dalam rangka memenuhi propelan untuk roket hujan buatan (TMC). Propelan untuk jenis ini memiliki impuls jenis minimal 170 detik [6].

Propelan berbasis amonium nitrat dapat menggunakan beberapa binder, seperti gula dan turunannya, polimer plastik, dan elastomer. Tiap-tiap binder memiliki kelebihan dan kelemahan masing-masing, untuk keperluan formulasi propelan maka diperlukan suatu pemilihan jenis binder yang memiliki energi pembakaran dan impuls jenis tinggi. Karena menyangkut proses formulasi yang banyak, maka tidak dimungkinkan untuk mencoba formulasi random karena akan menguras energi dan membutuhkan waktu yang lama. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu simulasi untuk mendapatkan formulasi terbaik tiap jenis binder, baru kemudian dilakukan analisis. Untuk mendapatkan gas-gas hasil pembakaran dan energi pembakaran, maka dapat digunakan teori termodinamika pembakaran bahan hidrokarbon, kemudian gas-gas hasil pembakaran dianggap terjadi kesetimbangan, seperti yang sering digunakan oleh peneliti dalam simulasi propelan [7,8]. Beberapa software telah dikembangkan untuk simulasi tersebut.

1.1. Propelan Berbasis Amonium Nitrat

Propelan adalah bahan bakar roket. Propelan pada dasarnya merupakan bahan bakar yang terdiri dari bahan bakar hidrokarbon dengan pembawa oksidator sebagai sumber oksigen pada waktu pembakaran. Propelan dengan menggunakan bahan oksidator amonium nitrat umumnya akan menggunakan bahan bakar hidrokarbon seperti senyawa gula dan turunannya atau senyawa polimer hidrokarbon seperti karet sintesis, karet alam, karet sintesis, maupun bahan plastik [9]. Bahan bakar hidrokarbon biasanya berfungsi pula sebagai binder atau pengikat senyawa oksidator sehingga menjadi satu kesatuan.

Amonium nitrat merupakan senyawa oksidator dengan rumus kimia NH_4NO_3 . Senyawa amonium nitrat (AN) merupakan senyawa oksidator yang cukup kuat, memiliki sifat mudah terdekomposisi menjadi gas amonia, nitrogen, dan oksigen. Memiliki suhu kritis $125\text{ }^\circ\text{C}$ dengan daya serap air yang cukup tinggi, daya serap air AN pada suhu $25\text{ }^\circ\text{C}$ adalah 50% dan pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ mencapai 67%. AN merupakan bahan padatan putih yang memiliki kecepatan eksplosif /ledakan 5.270 m/s , titik lebur $169.6\text{ }^\circ\text{C}$, berat jenis 1.725 g/cm^3 ($20\text{ }^\circ\text{C}$), dan berat molekul 80.043 g/mol . AN terdekomposisi normal pada suhu $200\text{ }^\circ\text{C}$, namun apabila terdapat bahan lain dapat menurunkan suhu dekomposisi tersebut. Kristal AN berubah mengikuti suhu dan tekanan ruangan. Semakin tinggi suhunya, maka perubahan volume ruang semakin besar sehingga daya serap terhadap senyawa lain seperti air semakin besar [10].

Binder gula atau turunannya dapat membentuk gel dengan adanya pemanasan dimana senyawa kristal gula menjadi gel pada suhu tertentu. Bahan karet maupun karet sintesis (elastomer) akan membentuk elastomer yang elastis dimana amonium nitrat dapat terdistribusi didalamnya. Bahan elastomer yang dapat digunakan adalah karet alam, polibutadien, poliepoksi. Bahan plastik adalah bahan polimer hidrokarbon yang bersifat plastis, dimana pada perlakuan panas tertentu akan menjadi lunak. Bahan polimer plastik yang dapat digunakan adalah polietilen.

1.2. Pembakaran Propelan AN

Propelan merupakan bahan bakar roket yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi gerak (kinetik) pada saat terbakar. Pembakaran propelan terjadi dengan reaksi pembakaran bahan bakar dengan sumber oksigen adalah oksidator yang dibawanya. Reaksi dekomposisi oksidator menghasilkan

oksigen dan mengeluarkan energi yang besar yang cukup untuk menginisiasi pembakaran bahan bakar senyawa hidrokarbon [11]. Reaksi dekomposisi amonium nitrat akan menghasilkan gas oksigen dan gas nitrogen mengikuti persamaan (1).



Energi yang diperoleh ($h\nu$) dapat digunakan untuk menginisiasi pembakaran bahan bakar propelan yang biasanya berupa senyawa hidrokarbon. Energi yang dihasilkan akan semakin besar jika jumlah gas yang dihasilkan berupa senyawa-senyawa dengan ukuran molekul rendah (gas-gas monovalen seperti O_2 , N_2 , Cl_2) dan CO_2 serta H_2O . Reaksi pembakaran hidrokarbon ($\text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$) mengikuti persamaan reaksi (2). Jumlah energi pembakaran yang terjadi berpengaruh besar terhadap kinerja propelan.



Selama pembakaran, maka terjadi kesetimbangan gas-gas yang terbentuk karena pada suhu tinggi. Gas CO_2 berada dalam kesetimbangan dengan gas CO dan O_2 , gas N_2 berada dalam keseimbangan dengan gas NO dan NO_2 seperti ditunjukkan pada persamaan (3) dan (4). Nilai tetapan keseimbangan K_{CO_2} dan K_{NO_2} besarnya tergantung suhu dan tekanan [11]. Dengan demikian, dalam pembakaran propelan akan dihasilkan gas-gas yang cukup banyak. Setiap gas memiliki energi pembakaran dan pembentukan yang berbeda. Untuk mengukur energi pembakaran maka dapat dihasilkan dari entalpi gas-gas hasil pembakaran dikurangi dengan entalpi dari senyawa propelan, seperti ditunjukkan pada persamaan (5).



$$\Delta H_c = \Delta H_f(\text{gas pembakaran}) - \Delta H_f(\text{reaktan}) \quad (5)$$

Kinerja propelan biasanya diukur dengan besar impuls jenis (I_{sp}) dan energi pembakaran. Impuls jenis menunjukkan jumlah gaya dorong per momentum gerak roket, biasanya dalam satuan detik. Impuls jenis menyatakan kekuatan mengangkat atau mendorong muatan yang bergerak. Impuls jenis dapat ditentukan dengan menggunakan rumus yang digunakan oleh JANAF India seperti ditunjukkan pada persamaan (6), dengan J adalah tetapan JANAF [12].

$$I_{sp} = J(\Delta H_f(\text{gas pembakaran}) - \Delta H_f(\text{reaktan})) \quad (6)$$

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan menggunakan simulasi, berbasis 1 kg propelan. Dalam perhitungan, amonium nitrat yang digunakan adalah 60-70%, sisanya adalah binder. Binder yang digunakan adalah polietilen, poliepoksi, polibutadien, polivinil klorida, dekstrosa, dan fruktosa. Hasil simulasi diperoleh gas-gas hasil pembakaran, energi pembakaran, dan impuls jenis. Dengan menggunakan algoritma optimasi, maka dapat diperoleh formulasi dari masing-masing jenis binder yang optimum (energi pembakaran dan impuls jenis). Berdasarkan hasil yang diperoleh, kemudian dibuat prototip propelan yang optimum dan diuji bakar. Pembuatan propelan mengikuti pembuatan propelan dekstrosa dan fruktosa menurut standar propelan amatir dan Wibowo [13,14]. Pembuatan propelan dengan bahan plastik dan elastomer mengikuti prosedur pembuatan propelan dengan bahan elastomer dan plastik dari Wibowo [14]. Hasil yang diperoleh kemudian dapat dibandingkan dengan propelan komposit berbasis amonium perklorat dan amonium nitrat [14].

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis gas-gas hasil pembakaran.

Langkah pertama dalam analisis pembakaran adalah mengetahui gas-gas hasil pembakaran. Untuk mendapatkan gas-gas hasil pembakaran dapat digunakan asumsi bahwa gas terbakar sempurna. Dengan menggunakan prinsip tersebut, maka pembakaran akan terjadi dengan mekanisme pembakaran dari masing-masing jenis formulasi yang berbeda. Struktur dekstrose atau alfa glukosa atau fruktosa yang digunakan adalah $C_6H_{12}O_6$, gula meja adalah $C_{12}H_{22}O_{11}$. Bahan polimer yang digunakan adalah poliepoksi dengan rumus kimia $C_{40}H_{100}O_{10}N_7Cl_2$, sedangkan bahan polivinil klorida yang digunakan adalah $C_{52}H_{120}O_{15}N_7Cl_{12}$, serta bahan plastik polietilen dengan rumus kimia $C_{20}H_{40}O_2N_2$. Bahan-bahan itu semua adalah bahan yang beredar di pasaran di Indonesia. Untuk mengetahui jumlah gas yang dihasilkan, maka diambil nilai tetapan kecepatan reaksi dekomposisi amonium nitrat (k_{AN}), tetapan pembakaran binder masing-masing (k_b), tetapan disosiasi gas CO_2 (k_{CO_2}), dan tetapan disosiasi gas NO_2 (k_{NO_2}) merupakan fungsi dari suhu (T) mengikuti nilai hasil penelitian Wibowo [14]. Untuk mendapatkan suhu reaksi, maka dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa pada kondisi adiabatik, tidak ada panas yang masuk dan keluar, sehingga entalpi pembakaran akan sama dengan panas yang dihasilkan dari jumlah mol gas-gas hasil pembakaran. dengan menggunakan persamaan (5) dan persamaan (7)-(10), maka akan diperoleh suhu pembakaran (T). Untuk mendapatkan suhu pembakaran, maka dilakukan dengan perhitungan nilai minimum dari panas pembakaran. Sesuai dengan persamaan (1) sampai (5), maka jumlah gas yang dihasilkan adalah H_2 , H_2O , CO , CO_2 , N_2 , NO , NO_2 , dan Cl_2 . Gas-gas hasil pembakaran dianggap mengikuti persamaan pembakaran gas sempurna.

$$k_{AN} = 4,21 \exp (-4334/RT) \tag{7}$$

$$k_{b1} = 2,23 \exp (-2273/RT) \tag{8}$$

$$k_{NO_2} = 16,21 \exp (-2884/RT) \tag{9}$$

$$k_{CO_2} = 6,17 \exp (-1564/RT) \tag{10}$$

Hasil perhitungan diperoleh jumlah gas-gas hasil pembakaran untuk tiap formulasi binder, diambil yang terbaik dan ditampilkan dalam tabel 3-1. Untuk mendapatkan hasil seperti ditunjukkan pada tabel 1, maka dilakukan optimasi dengan menggunakan daerah komposisi amonium nitrat dan binder adalah 60/40 sampai dengan 70/30. Daerah tersebut ditentukan karena berdasarkan hasil percobaan, komposisi di atas 70/30 akan memberikan propelan yang tidak dapat menyatu atau homogen sehingga banyak butiran amonium nitrat tidak terbungkus oleh binder. Formulasi pada komposisi di bawah 60/40 akan memberikan hasil terlalu banyak binder sehingga energi pembakaran rendah dan menghasilkan banyak jelaga karena pembakarannya tidak sempurna [14]. Dalam tulisan ini ditampilkan hasil maksimum dari komposisi saja.

Tabel 3-1 Gas-gas hasil pembakaran di ruang bakar

Jenis gas	Jumlah mol dengan binder berbeda				
	Dekstrosa	Gula meja	Poliepoksi	Polivinil klorida	polietilen
H_2	19,87339	15,84229	12,23419	12,23887	17,43213
CO	12,82584	12,82344	11,83211	12,32322	10,12112
CO_2	0,95697	4,23561	4,22353	4,12332	3,00021
N_2	8,96954	8,23951	7,43561	3,34662	5,43455
NO	0,91223	0,90121	2,34522	3,34454	0,01231
NO_2	0,01221	0,11191	4,32455	5,12311	0,41232
H_2O	6,55395	6,55232	4,32395	6,33295	6,43356
Cl_2	0	0	2,08911	4,09087	0

Berdasarkan hasil tabel 3-1, maka dapat dianalisis bahwa pembakaran yang lebih baik terjadi pada hasil yang gas-gas dengan berat molekul lebih rendah. Untuk pembakaran dekstrosa memberikan pembakaran yang paling baik karena memberikan jumlah gas NO dan CO yang relatif lebih sedikit dibandingkan yang lainnya. Banyaknya gas NO dan CO pada pembakaran binder poliepoksi dan polivinil klorida menunjukkan bahwa pembakaran poliepoksi dan polivinil klorida menghasilkan pembakaran yang tidak sempurna. Dapat diamati pula bahwa semakin besar berat molekul polimer, maka gas hasil pembakaran semakin tidak sempurna. Adanya banyak NO dan CO menunjukkan bahwa disosiasi gas terjadi pada suhu yang lebih rendah, sehingga akan banyak gas NO pada disosiasi seperti ditunjukkan pada persamaan (4), dan akan banyak gas CO seperti ditunjukkan pada persamaan (5). Diantara beberapa polimer, maka polietilen dengan berat molekul yang lebih rendah memberikan pembakaran yang lebih baik, dibuktikan dengan komposisi gas-gas CO₂ dan N₂ yang lebih banyak. Jumlah gas-gas hasil pembakaran akan berpengaruh terhadap energi yang dihasilkan, suhu pembakaran dan impuls jenis yang dihasilkan.

3.2. Karakteristik termodinamika pembakaran

Karakteristik termodinamik dan impuls jenis propelan yang dihasilkan dengan beberapa binder hasil perhitungan dengan persamaan (6) ditunjukkan pada tabel 3-2. Berdasarkan hasil perhitungan, ternyata untuk binder gula diperoleh hasil terbaik adalah dekstrosa yang menghasilkan panas pembakaran 1.961K dan impuls jenis 195,12 detik dibandingkan dengan gula meja. Hasil ini memiliki korelasi dengan gas-gas hasil pembakaran, pembakaran dekstrose menghasilkan gas-gas dengan berat molekul lebih kecil daripada pembakaran gula meja. Dengan menggunakan persamaan (6) dimana energi pembentukan gas dengan berat molekul kecil menjadikan entalpi pembakaran lebih besar. Hasil tersebut menghasilkan suhu pembakaran lebih tinggi, dan impuls jenis lebih tinggi, seperti diutarakan oleh Sarner [10].

Tabel 3-2 Karakteristik termodinamik gas-gas hasil pembakaran

Parameter	binder digunakan				
	Dekstrosa	Gula meja	Poliepoksi	Polivinil klorida	polietilen
T (K)	1.961	1.922			
P(atm)	68,02	68,02	68,02	68,02	68,02
ΔH (kJ/mol)	-792	-1.022	-1.433	-1.543	-1.043
ΔS (kJ/mol)	2.547	2.643	2.985	2.999	2.712
Isp (det)	195,12	187,01	180,12	180,00	187,00

Sumber : data diolah

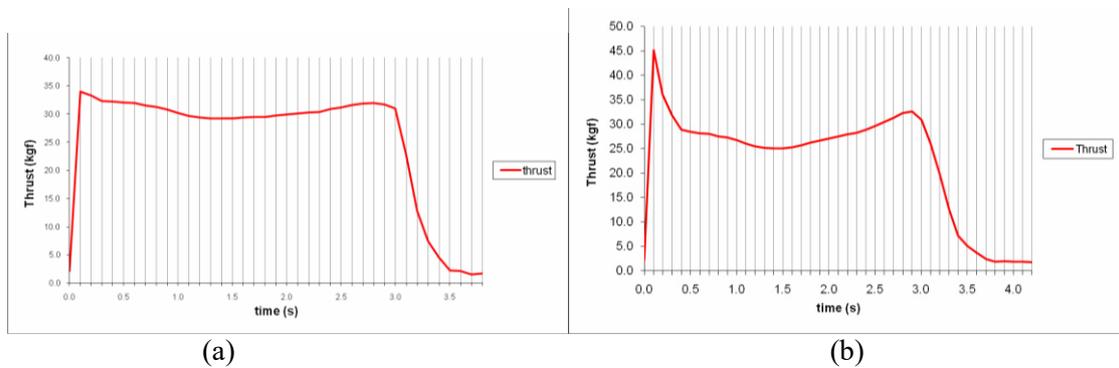
Untuk binder polimer yang digunakan, polietilen memberikan suhu pembakaran dan impuls jenis yang lebih tinggi daripada poliepoksi dan polivinil klorida. Polietilen memiliki unsur C, dan H saja sehingga menghasilkan gas-gas CO, CO₂, H₂, H₂O, sedangkan gas N₂ dan NO berasal dari dekomposisi amonium nitrat. Dengan melihat komposisi gugus yang ada pada tabel 3-1, maka terlihat bahwa jumlah gas H₂ dan CO₂ lebih banyak daripada polimer lain, sehingga akan menghasilkan energi pembakaran yang lebih tinggi dan suhu pembakaran yang lebih tinggi. Terlepas dari struktur polimer yang terbentuk, dengan komponen penyusun yang terdiri dari C, H, dan O akan memberikan pembakaran yang lebih sempurna. Untuk pembakaran poliepoksi yang memiliki banyak unsur O, N, dan Cl akan menghasilkan gas lain seperti NO, NO₂, dan Cl₂ yang memiliki energi pembentukan lebih tinggi sehingga jika diaplikasikan pada persamaan (6) akan mengurangi jumlah energi pembakaran yang diperoleh. Dengan demikian adanya gas-gas tersebut akan menurunkan suhu pembakaran dan impuls jenis. Hal yang sama ditunjukkan pada pembakaran poliepoksi yang memiliki rumus molekul mirip dengan polivinilklorida.

Analisis secara umum, dengan kenaikan berat molekul binder, akan menghasilkan suhu pembakaran yang lebih tinggi dan impuls jenis lebih tinggi jika unsur penyusunnya sama seperti dekstrosa dengan gula meja, poliepoksi dengan polivinil klorida. Dengan kenaikan berat molekul, ternyata energi pembentukan senyawa tersebut menjadi lebih rendah, sehingga dengan mengaplikasikan

persamaan (6), akan dihasilkan energi pembakaran yang lebih rendah. Hasil tersebut berlaku untuk senyawa yang memiliki unsur oksigen, sedangkan senyawa yang tidak memiliki unsur oksigen akan memberikan energi pembentukan yang lebih tinggi. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa senyawa binder yang baik adalah yang memiliki unsur utama C dan H (hidrokarbon), sedangkan unsur O dan N diupayakan seminimal mungkin.

3.3. Pengujian propelan

Untuk membuktikan hasil simulasi, maka dilakukan pengujian propelan dengan menggunakan formulasi hasil simulasi. Propelan dibuat dengan menggunakan komposisi 70/30 untuk perbandingan amonium nitrat/binder. Hasilnya ditampilkan dalam gambar 1, dimana diperoleh profil gaya dorong terhadap waktu. Dengan menggunakan perhitungan impuls jenis adalah rata-rata gaya dorong dibagi berat propelan, maka diperoleh hasil impuls jenisnya. Hasilnya untuk propelan dengan menggunakan dekstrosa dan gula meja diperoleh impuls jenis sebesar 192 detik dan 185 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil simulasi tidak berbeda jauh dengan hasil pengujian propelan yang sesungguhnya. Untuk propelan dengan binder poliepoкси dan polietilen tidak dicoba karena hasil simulasi menunjukkan hasil yang kurang baik.



Sumber : data hasil pengujian
Gambar 3-1 Profil uji statik propelan dengan binder (a) dekstrosa dan (b) gula meja

Apabila dibandingkan dengan propelan komposit dengan oksidator amonium perklorat yang biasa digunakan untuk propelan roket misil atau balistik yang memiliki impuls spesifik 210-240 detik, memang cukup jauh. Namun demikian, untuk penggunaan roket dengan ketinggian rendah dan tidak membutuhkan persyaratan khusus seperti untuk misil, maka propelan dengan amonium nitrat pantas atau layak digunakan karena memiliki impuls jenis melebihi minimum impuls jenis untuk roket, yaitu 170 detik [14]. Propelan dengan amonium nitrat memiliki kelebihan yang murah dan mudah didapat dipasaran lokal di Indonesia, dan mampu dibuat sendiri dengan komponen lokal 100%. Menurut wibowo, propelan untuk membawa flare sampai ketinggian 1500 m dapat digunakan dengan menggunakan propelan yang memiliki impuls jenis minimal 170 detik [6]. Hasil analisis dan pengujian menunjukkan bahwa propelan amonium nitrat dengan binder gula dapat memenuhi syarat digunakan sebagai propelan untuk roket modifikasi cuaca.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelaahan, maka dapat disimpulkan bahwa propelan dengan oksidator amonium nitrat memenuhi syarat digunakan untuk propelan roket modifikasi cuaca. Dengan menggunakan beberapa binder, semakin rendah berat molekul binder dan semakin sedikit jumlah unsur oksigen dan nitrogen yang menyusun senyawa binder tersebut akan menghasilkan propelan dengan impuls jenis dan suhu pembakaran semakin tinggi. Untuk binder gula, maka binder dekstrosa memberikan impuls jenis tertinggi (195 detik). Hasil simulasi propelan tidak berbeda jauh dengan hasil pengujian propelan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Pusat Teknologi Roket Lapan yang telah memberikan fasilitas untuk penelitian ini.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 10th ed., John Wiley & Son, New York. 2011.
- 2) Barrore, M., Jauniotte, A, Veubeke, B.F., and Vandekerckhove, J., *Rocket Propulsion*, Elsevier Publ. Co., Amsterdam. 2010.
- 3) Pradyot, P., *Handbook of Inorganic Chemicals*. McGraw-Hill, New York. 2012.
- 4) Martel, B. and Cassidy, K., *Chemical Risk Analysis: A Practical Handbook*. Butterworth–Heinemann. 2004. pp. 362. [ISBN 1903996651](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051903-1).
- 5) Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, 7th ed., John Wiley & Son, New York. 2001.
- 6) Oates, G.C., *Aerothermodynamicx of Gas Turbines and Rocket Propulsion*, *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Washington, DC. 2010.
- 7) Shapiro, A.H., *The Dynamic and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow*, Vol 1, The Ronald Press Company, New York. 2010.
- 8) Barrore, M., Jauniotte, A, Veubeke, B.F., and Vandekerckhove, J., *Rocket Propulsion*, Elsevier Publ. Co., Amsterdam. 2012.
- 9) Handoko, S.R., *Unjuk Kerja Roket Uji Muatan (RUM) Dengan Menggunakan Bahan Bakar Propelan Komposit*, Prosiding JASAKIAI 2010, Yogyakarta. 2010.
- 10) Wibowo, H.B., *Pengembangan Propelan Roket Berbasis Amonium Nitrat Yang Aman Untuk Mempelajari Karakteristik Propelan*, Prosiding JASAKIAI 2010, Yogyakarta. 2010.
- 11) Handoko, S.R., *Komparasi Kinerja Propelan Berbasis Amonium Perkowo, H.B., Lorat Dengan Amonium Nitrat*, Prosiding JASAKIAI 2010, Yogyakarta. 2010.
- 12) Handoko, S.R., *Roket Uji Muatan Sebagai Sarana Pembelajaran Roket Peluncur Satelit Ke Orbit*, Prosiding JASAKIAI 2010, Yogyakarta. 2010.
- 13) Timnat, H., 2009
- 14) Wibowo, H.B., *Perhitungan Impuls Jenis Dan Energi Pembakaran Propelan Dengan Pendekatan Termodinamika Pembakaran*, Prosiding Nasional Kejuangan 2011, Yogyakarta. 2011.