

Perancangan Mutakhir Material Propelan Padat dengan Metode Pembuatan Prototipe Cepat

Rando Tungga Dewa*, Aditia Aulia, Eka Irianto Bhiftime, Ariyo Nurachman Satiya Permata,
Ida Farida, Rashif Shiraj

Departemen Teknik Mesin, Universitas Pertahanan RI,
Komplek IPSC Area, Sentul, Bogor, Jawa barat 16810, Indonesia
*E-mail: rando.td@gmail.com

Diajukan: 22-09-2022; Diterima: 14-04-2023; Diterbitkan: 20-04-2023

Abstrak

Teknologi amunisi dan persenjataan sangat berkembang pesat. Kemajuan teknologi dalam pengembangan material propelan sangat berpotensi besar. Kepadatan material yang tinggi dari propelan padat menyebabkan kepadatan energi yang tinggi (Energi yang dihasilkan oleh satu unit massa propelan disebut dengan kepadatan energi) yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya propulsi yang diperlukan. Propelan pada roket dibakar secara terkendali (deflagrasi) untuk menghasilkan daya dorong yang diinginkan. Propelan padat terdiri dari beberapa bahan kimia seperti oksidator, bahan bakar, pengikat, *plasticizer*, *curing agent*, *stabilizer*, dan *cross-linking agent*. 3D printing telah muncul sebagai platform teknologi serbaguna untuk desain berbantuan komputer (CAD) dan manufaktur aditif (AM). AM memungkinkan produksi suku cadang yang disesuaikan dari logam, keramik, dan polimer tanpa memerlukan cetakan atau permesinan yang kompleks untuk fabrikasi formatif dan subtraktif konvensional. Jelas bahwa propelan padat komposit akan secara signifikan mendapat manfaat dari kendala geometris yang teratasi dan kemudahan pembuatan yang ditawarkan oleh teknologi 3D printing. Sampai saat ini, studi mengenai kelayakan material propelan padat dengan menggunakan metode pembuatan cepat belum pernah dilakukan di Indonesia. Pada penelitian ini, propelan komposit berbasis Potassium dipilih dengan matriks photocurable resin sebagai pengikat. Serbuk iron oxide halus ditambahkan pada komposisi propelan dipenelitian ini. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performa dari material propelan padat yang dibuat dengan menggunakan teknologi pembuatan cepat atau 3D printer. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah propelan padat tanpa residu bahaya yang diproduksi selama 2 hr, dengan geometri yang diinginkan dan bobot yang ringan. Hasil uji bakar menunjukkan ~2.0 mm/s dalam kondisi udara terbuka.

Kata kunci: Propelan padat; Material energetik, 3D Printer

Abstract

Ammunition and weapons technology is developing rapidly. Technological advances in the development of propellant materials have great potential. The high material density of solid propellants results in a high energy density (the energy produced by one unit mass of the propellant is called energy density) required to produce the propulsion force. Rocket propellant is burned in a controlled manner (deflagration) to produce the desired thrust. Solid propellants consist of several chemicals such as oxidizing agents, fuels, binders, plasticizers, curing agents, stabilizers, and cross-linking agents. 3D printing has emerged as a versatile technology platform for computer-aided design (CAD) and Additive Manufacturing (AM). AM enables the production of customized parts from metals, ceramics and polymers without the need for complex moldings or machining for conventional formative and subtractive fabrication. It is clear that composite solid propellants will significantly benefit from the geometric constraints that are overcome and the ease of manufacture offered by 3D printing technology. As of now, studies on the feasibility of solid propellant materials using rapid manufacturing methods have not been carried out in Indonesia. In this study, a Potassium-based composite propellant was chosen with a photocurable resin matrix as a binder. Fine iron oxide powder was added to the propellant composition in this study. The purpose of this study was to determine the performance of solid propellant materials made using rapid manufacturing technology called 3D printer. The results obtained from this study are solid propellant without hazardous residues produced within 2 hours, with the desired geometry and light weight. The combustion test results show ~2.0 mm/s in open air conditions.

Keywords: Solid propellants; energetic materials; 3D Printer

1. Pendahuluan

Dalam bidang kemiliteran, teknologi amunisi dan persenjataan sangat berkembang pesat. Oleh karena itu, kemajuan teknologi dalam pengembangan material propelan sangat berpotensi besar. Propelan sangat energik dan menghasilkan produk gas suhu tinggi pada pembakaran. Kepadatan material yang tinggi dari propelan padat menyebabkan kepadatan energi yang tinggi (Energi yang dihasilkan oleh satu unit massa propelan disebut dengan kepadatan energi) yang

dibutuhkan untuk menghasilkan gaya propulsi yang diperlukan. Propelan pada roket dibakar secara terkendali (deflagrasi) untuk menghasilkan daya dorong yang diinginkan. Propelan padat terdiri dari beberapa bahan kimia seperti oksidator, bahan bakar, pengikat, *plasticizer*, *curing agent*, *stabilizer*, dan *cross-linking agent*. Komposisi kimia spesifik tergantung pada karakteristik pembakaran yang diinginkan untuk misi tertentu. Propelan padat sering disesuaikan dan diklasifikasikan berdasarkan aplikasi spesifik seperti peluncuran luar angkasa, rudal, dan senjata. Bahan kimia yang berbeda dan proporsinya menghasilkan sifat fisik dan kimia yang berbeda, karakteristik pembakaran, dan kinerja [1-3].

3D printing telah muncul sebagai platform teknologi serbaguna untuk desain berbantuan komputer (CAD) dan manufaktur aditif (AM). AM memungkinkan produksi suku cadang yang disesuaikan dari logam, keramik, dan polimer tanpa memerlukan cetakan atau permesinan yang kompleks untuk fabrikasi formatif dan subtraktif konvensional. Keuntungan teknologi 3D printing di area propelan antara lain meminimalkan pemborosan tanpa berurusan dengan residu bahaya; fabrikasi propelan dengan bentuk tertentu yang tidak dapat dibuat dengan cara tradisional; mudah memproduksi sejumlah kecil propelan dengan harga murah; mengurangi waktu dari fabrikasi ke penembakan senjata, yang mengubah mode penelitian dan pengembangan; miniaturisasi, pengurangan berat dan integrasi propelan dan komponen menjadi mungkin [4-6]. Jelas bahwa propelan padat komposit akan secara signifikan mendapat manfaat dari kendala geometris yang teratasi dan kemudahan pembuatan yang ditawarkan oleh teknologi 3D printing, namun belum ada laporan yang berhasil sejauh pengetahuan kami [7-14].

Di Indonesia teknologi fabrikasi propelan masih menggunakan metode konvensional. Karakteristik yang diinginkan untuk propelan padat adalah impuls spesifik yang tinggi, laju pembakaran dan karakteristik pengapian yang dapat diprediksi dan direproduksi, kepadatan tinggi, kemudahan pembuatan, biaya rendah, dan karakteristik penuaan yang baik. Dari sudut pandang keselamatan, propelan harus menghasilkan asap buang yang rendah dan tidak rentan terhadap ketidakstabilan pembakaran. Selain itu, propelan juga harus memiliki sifat termofisika dan mekanik yang memadai pada kisaran kondisi operasi dan penyimpanan yang diinginkan. Pada penelitian ini, propelan komposit berbasis Potassium dipilih dengan matriks *photocurable* resin sebagai pengikat [14]. Serbuk iron oxide halus ditambahkan pada komposisi propelan dipenelitian ini [15]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui performa dari material propelan padat yang dibuat dengan menggunakan teknologi pembuatan cepat atau 3D printer yang mutakhir. Dari hasil penelitian ini diharapkan untuk memperoleh propelan padat tanpa residu bahaya, dengan geometri tertentu yang tidak dapat dibuat dengan cara tradisional, mudah memproduksi sejumlah kecil propelan dengan harga murah, dan pengurangan berat dari propelan dan komponen.

2. Material dan metodologi

Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah metode eksperimen dengan melakukan uji pada sampel yang dipersiapkan. Mengaduk KNO_3 dan Fe_2O_3 sesuai formula sampai merata. Mencampur bahan diatas dengan resin sesuai formula. Bahan siap produksi menggunakan 3D printer. Komposisi kimia propelan seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Persiapan Bahan:

- a) Memanaskan KNO_3 pada suhu 50 derajat Celcius selama 30 menit. Menggunakan oven.
- b) Menghaluskan KNO_3 dengan ball mill / coffee grinder.

Prosedur Pembuatan Campuran Resin:

- a) Mengaduk KNO_3 dan Fe_2O_3 sesuai formula sampai merata.
- b) Mencampur bahan diatas dengan resin sesuai formula.
- c) Bahan siap produksi menggunakan 3D printer.

Tabel 1. Komposisi masa paduan propelan padat (wt%).

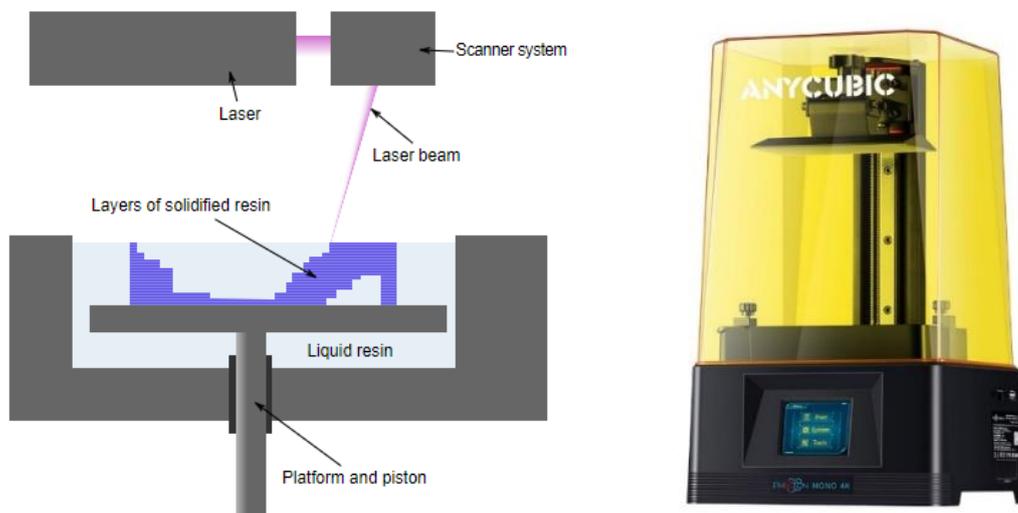
No.	KNO ₃	Photocurable resin	Fe ₂ O ₃	TEG/DEG
1.	49	30	1	20
2.	47	30	3	20
3.	50	25	5	20
4.	50	30	-	20

SLA 3D printing (Gambar 1) dipilih sebagai metode pembuatan jenis prototipe cepat pada penelitian ini karena pertimbangan keamanan jika dilakukan pada tipe material energetik. Komposisi setiap layer dihasilkan dari curing dengan menggunakan sinar UV pada mesin, yang pada akhirnya membentuk geometri yang diinginkan. Dalam penelitian kali ini model 3D printer yang digunakan adalah ANYCUBIC photon mono 4K. Dimana spesifikasi Printer ini ditunjukkan pada Tabel 2.

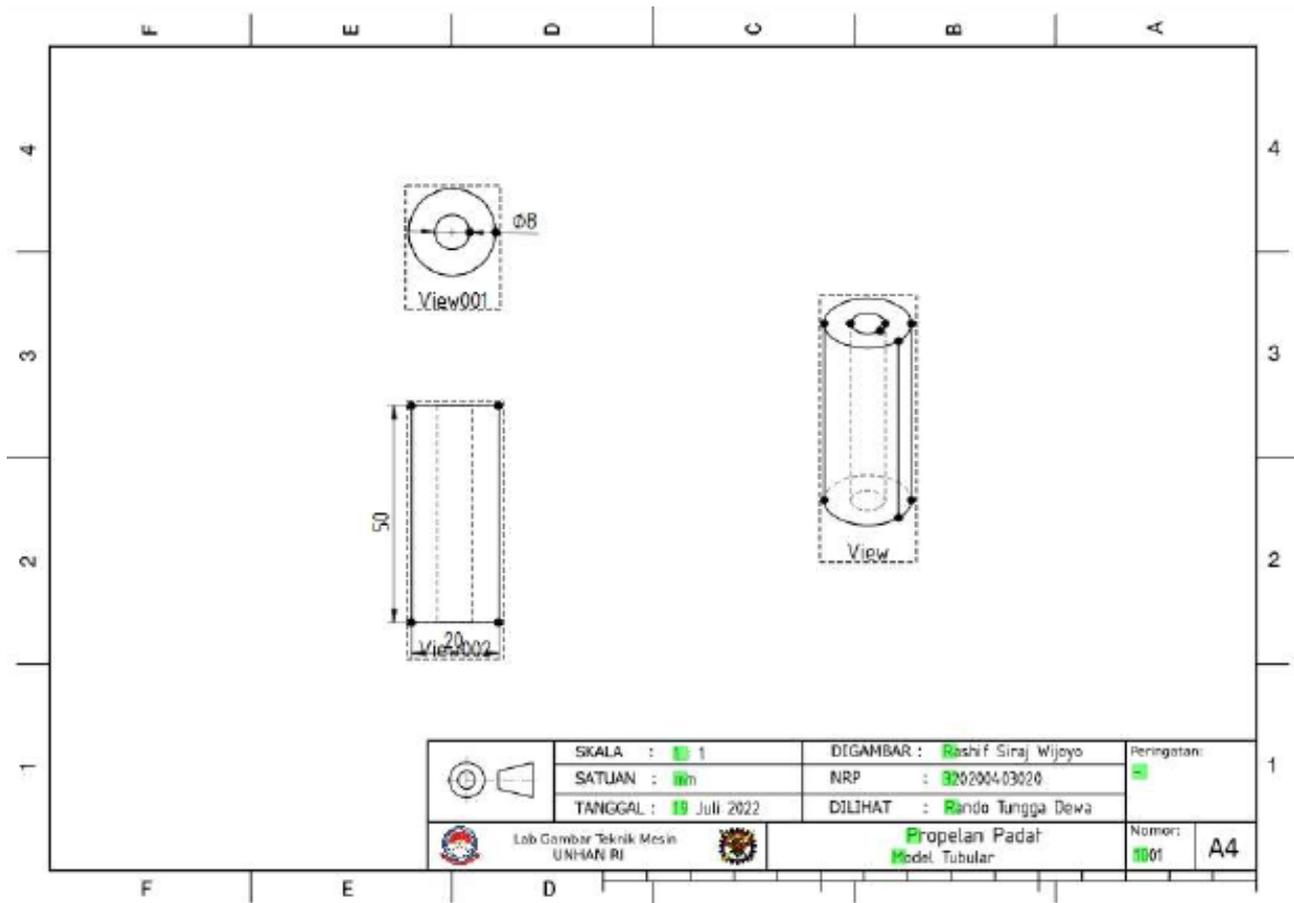
Tabel 2. Spesifikasi parameter *printing*.

Spesifikasi	Parameter
Dimensi alat	15.1 x 8.9 x 8.7 in./38.3 x 22.7 x 22.2 cm
Berat alat	9.4 lb./4.3 kg
Eksposur layar	6.23'' monokrom
Dimensi hasil prin	16.5 x 13.2 x 8 cm
Transmisi cahaya	7%
Rasio kontras	400:1
Sumber cahaya	Parallel matrix (LED x 15)
Kepadatan kekuatan	3,500 - 4,000 $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ /23,905 - 27,320 lux
Akurasi hasil prin	3,840 x 2,400 px
Kecepatan prin	≤ 5 cm/hr

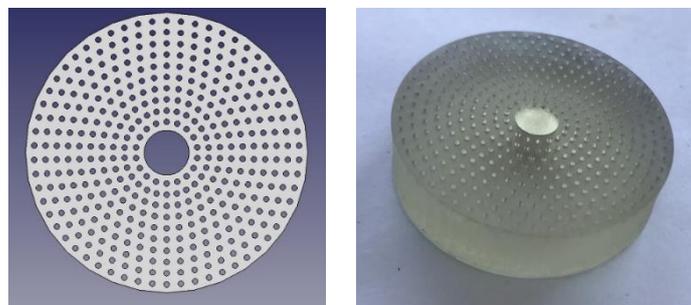
Berikut adalah spesifikasi propelan dengan Diameter 20 mm, Tinggi 50 mm, Diameter Rongga 8 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Proses Stereolithography (SLA) 3D printing



(a)

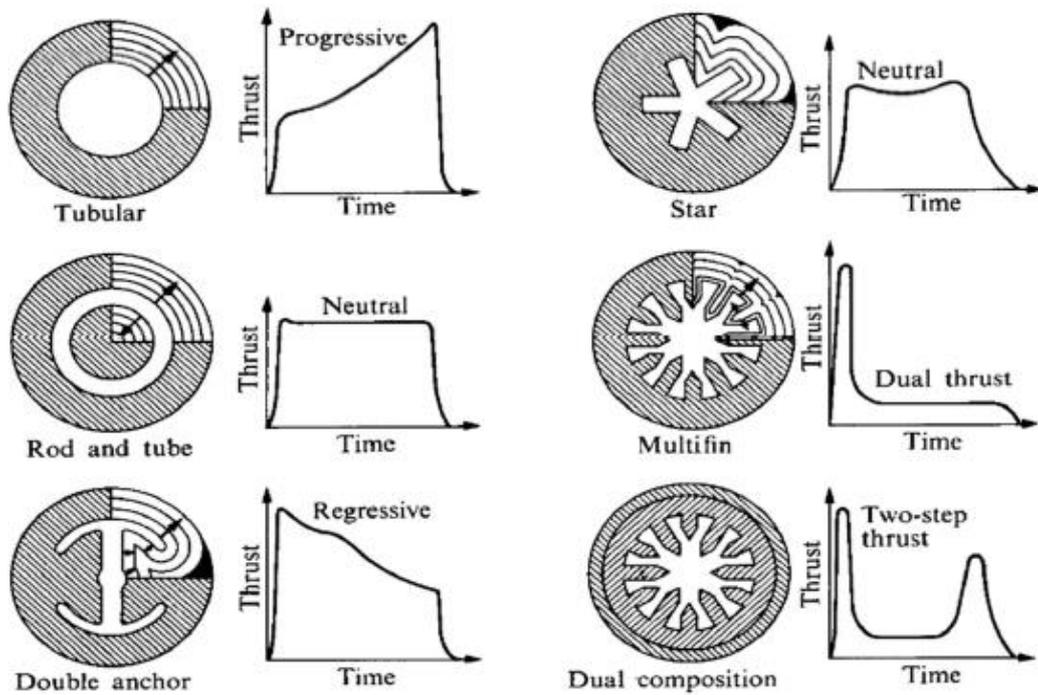


(b)

Gambar 2. Sampel propelan dengan: (a) 2D model dan, (b) 3D model CAD dan hasil *printing*

3. Hasil dan pembahasan

Pada umumnya propelan berbentuk bubuk maupun silinder pejal, dan sekarang ini teknologi pembuatan propelan padat secara konvensional adalah dengan *casting* atau cetak. Pada penelitian ini geometri propelan yang diinginkan berbentuk silinder dengan rongga yang terletak ditengah untuk mendapatkan hasil *thrust* yang cukup baik. Oleh karena itu, hal tersebut sulit dicapai dan terlalu mahal dengan menggunakan metode biasa seperti *casting*. Tipe propelan padat pada penelitian ini desain yang dipakai adalah desain tubular. Pada desain ini, bagian tengah silinder diberi rongga. Desain tubular ini menyebabkan karakteristik pembakaran yang progresif. Artinya, *thrust* yang dihasilkan meningkat seiring bertambahnya waktu, berikut ilustrasi karakteristik geometri dengan perbandingan antara *thrust-time* pada Gambar 3 [2].



Gambar 3. Desain muatan pembakaran internal dengan grafik *Thrust-Time*.

Penelitian ini diawali dengan pembuatan paduan komposit sesuai dengan komposisi campuran 1-4 pada Tabel 1 untuk mendapatkan komposisi paduan yang paling optimal. Mengacu kepada spesifikasi militer, komposisi propelan komposit perlu memenuhi minimal 70-80% *oxidizer*. Gambar 4 menunjukkan hasil cetakan campuran 1-4 dan hasil pembakarannya. Campuran 1 dan 2 dikeringkan dengan mudah, menghasilkan lempengan padat setelah sekitar 10 menit sejak katalis dicampur dengan resin. Campuran 3, membutuhkan waktu lebih lama untuk memadat. Setelah 1 hari, campuran 3 masih lembut saat disentuh. Ini bisa terjadi karena kontrol suhu yang kurang hati-hati, atau jumlah katalis yang sedikit berbeda. Setelah 2 hari, campuran 3 telah memadat. Sifat mekanik cukup berbeda dari campuran 1 dan 2; campuran 3 cukup plastis, dan dapat dengan mudah berubah bentuk sebelum pecah. Dari hasil uji pembakaran, terlihat banyak gelembung yang dihasilkan terutama dikarenakan oleh kelembapan yang tinggi dan proses evakuasi propelan di ruang terbuka (tidak *vacuum*).



Gambar 4. Komposisi campuran 1-4 pada sampel propelan padat dengan hasil pembakaran.

Sesuai dengan rancang bangun propelan padat yang diinginkan seperti di bawah ini:

- Diameter: 20 mm
- Tinggi: 50 mm
- Diameter Rongga: 8 mm
- Tebal dinding: 12 mm
- Volume: 452 mm³
- Berat: 0.753 g

Pada penelitian dilakukan proses printing propelan padat dengan dimensi yang sesuai dengan desain. Hasil printing propelan padat dengan komposisi campuran 2 ditunjukkan pada Gambar 5 menunjukkan propelan yang memiliki ukuran sama dengan desain dan memiliki penampang yang halus. Setelah dikeringkan di oven dengan suhu 60°C selama 6 jam dan dijemur di panas matahari selama 2 hari, propelan menunjukkan adanya indikasi *shrinking* atau penyusutan. Penyusutan terjadi karena adanya proses ekstrak cairan resin yang tersisa dari proses curing menggunakan SLA 3D Printer dengan adanya tanda berupa retakan disekitar badan propelan. Retakan ini terjadi dikarenakan tiap-tiap layer dari propelan mengalami penyusutan dengan tingkat yang berbeda secara tidak merata, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Selain itu, proses pengeringan yang tidak sempurna menyebabkan bagian dalam propelan masih basah. Oleh karena itu, akurasi dimensi adalah permasalahan utama dalam proses manufaktur dengan 3D printing. Penyusutan produk yang disebabkan perubahan fasa material seringkali menyebabkan perubahan bentuk pada hasil akhir produk [13].



Gambar 5. Hasil pembuatan sampel propelan padat.

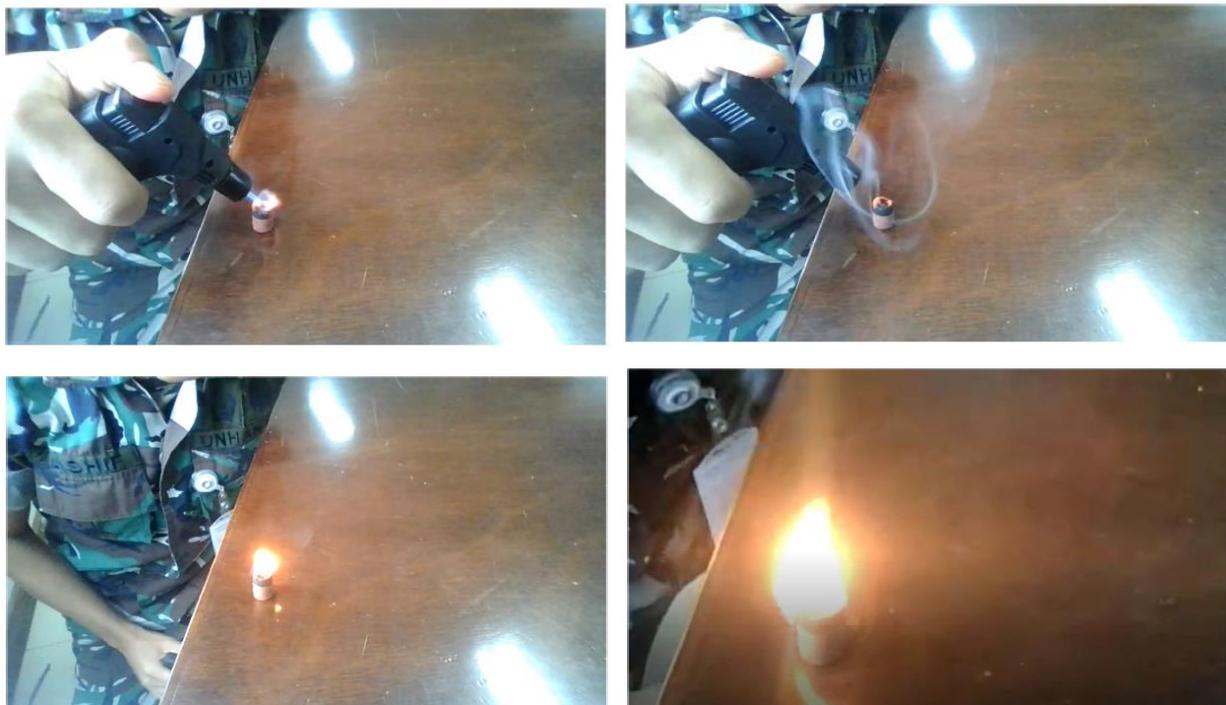


Gambar 6. Fenomena *shrinking* (penyusutan) pada sampel propelan padat.

Setelah dilakukan printing maka propelan akan dilanjutkan uji bakar. Uji bakar yang dilakukan hanya uji bakar sederhana berupa penyulutan propelan dengan api. Tujuan dari uji pembakaran ini adalah untuk mengetahui reaksi propelan yang telah dibuat dengan api. Saat dilakukan pembakaran, terjadi reaksi perambatan bakar antara *photocurable* resin, KNO₃, dan Fe₂O₃. Reaksi yang dihasilkan berupa pembakaran yang menghasilkan asap berwarna putih, akan tetapi burn rate yang masih belum optimal, seperti pada Gambar 7 di bawah. Dengan kata lain hasil pembakaran belum

menunjukkan performa yang diinginkan. Hal tersebut disebabkan oleh beberapa faktor seperti bahan-bahan kimia kurang tercampur sempurna dalam resin, pengadukan dengan kecepatan min. 3500rpm sangat direkomendasikan [8], komposisi persentase campuran bahan masih belum tercapai dengan optimal, KNO_3 , dan Fe_2O_3 mengendap saat proses printing, dan kualitas pemilihan material (*fuel*, *oxidizer*, dan resin/katalis) yang belum maksimal.

Untuk mengatasi masalah tersebut serta menghasilkan produk yang lebih baik pada eksperimen selanjutnya, maka diperlukan bahan dengan kualitas yang lebih baik serta memperbaiki komposisi bahan. Perbaikan juga harus dilakukan pada proses manufaktur dengan memodifikasi parameter *printing*. Partikel KNO_3 harus dibuat lebih kecil agar dapat tercampur dengan resin. Untuk mencapainya, maka KNO_3 harus dihaluskan dengan *smooth grinding* dan diayak dengan ayakan *mesh* tinggi. Pengadukan harus menggunakan *mixer* dengan kapasitas rpm tinggi (min. 3500 rpm).



Gambar 7. Uji bakar propelan padat.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah uji coba pembuatan propelan untuk peluru menggunakan teknologi rapid prototyping (*additive manufacturing*) terlaksana dengan baik dan mendapatkan hasil yang cukup baik. Propelan yang dihasilkan sesuai dengan dimensi akan tetapi terjadi fenomena *shrinking* (penyusutan) sehingga terdapat retakan pada geometri propelan. Hasil uji bakar dalam propelan mendapatkan reaksi pembakaran yang cukup baik walaupun *burn rate* belum optimal secara visual (*target* 2.0 mm/s) pada kondisi udara terbuka. Optimalisasi parameter *printing* yang diperoleh dalam penelitian ini adalah dengan eksposur 6.23'' monokrom, Transmittansi cahaya 7%, Kepadatan kekuatan: 3,500 $\mu w/cm^2/23,905$ lux, dan Kecepatan Print: ≤ 5 cm/hr. Dengan parameter tersebut dibutuhkan waktu kurang lebih 2 hr untuk mendapatkan geometri yang diinginkan. Dibutuhkan penyempurnaan lebih lanjut dengan penyesuaian komposisi bahan seperti penggantian material *fuel* dan *oxidizer* pada Ammonium Perklorat (AP) yang memiliki density lebih ringan yaitu 1.95 g/cm^3 dan Alumunium oxide, AL_2O_3 , dengan density 3.95 g/cm^3 untuk mendapatkan hasil bakar yang maksimal.

Daftar Pustaka

- [1] Adel, W. M., Liang, G., Service life prediction of AP/Al/HTPB solid rocket propellant with consideration of softening aging behavior. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2019 February; 32(2): p. 361. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.003>
- [2] Chandru, R. A., Balasubramanian, N., Oommen, C., Raghunandan, B. N., Additive Manufacturing of Solid Rocket Propellant Grains. *Journal of Propulsion and Power*. 2018; 34(4): p. 1090. <https://doi.org/10.2514/1.B36734>
- [3] Chaturvedi, S., Dave, P. N., Solid propellants: AP/HTPB composite propellants. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019 December; 12(8): p.2061-2068. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.033>
- [4] Yang, W., Hu, R., Zheng, L., Yan, G., & Yan, W., Fabrication and investigation of 3D-printed gun propellants. *Materials & Design*, 2020 July; 192: p.108761. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108761>
- [5] Chen, X., Lai, J., Chang, X.-l., Zhang, Y., Zhang, L., Wang, C., Compressive mechanical properties of HTPB propellant at low temperatures and strain rates. *Results in Physics*. 2017; 7: p. 4079–4084. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2017.10.034>
- [6] Li, M., Yang, W., Xu, M., Hu, R., Zheng, L., Study of photocurable energetic resin based propellants fabricated by 3D printing. *Materials & Design*, 2021 September; 207: p.109891. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109891>
- [7] Nihan, C., Chunlin, H., Siping, P., Additive manufacturing of energetic materials: Tailoring energetic performance via printing. *Journal of Materials Science & Technology*, 2022; 127: p.29-47. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.02.047>
- [8] Konstantin, A.M., Igor, V.F., Alla, N.P., FDM 3D printing of combustible structures: First results. *Mendeleev Communications*. 2022 April; 32 (2): p.228-230. <https://doi.org/10.1016/j.mencom.2022.03.025>
- [9] Allison, K.M., Whitney, A.N., Trevor, J.F., I. Emre, G., Steven, F.S., George, T.-C., Jeffrey, F.R., Selectively-deposited energetic materials: A feasibility study of the piezoelectric inkjet printing of nanothermites. *Additive Manufacturing*. 2018 August; 22: p.69-74. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.003>
- [10] Dylan, J.K., Zaira, A., Miles, C.R., Alexander, I.L., Spencer, G.H., Prithwish, B., Feiyu, X., Michael, R.Z., Experimental observation of the heat transfer mechanisms that drive propagation in additively manufactured energetic materials. *Combustion and Flame*. 2020 May; 215: p.417-424. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.020>
- [11] Manman, L., Yuchen, G., Rui, H., Qionglin Wang., Weitao Yang., Thermal study of APNIMMO/CL-20 based propellants fabricated by 3D printing. *Thermochimica Acta*. 2021 December; 706: p.179072. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.179072>
- [12] McClain, M.S., Gunduz, I.E., Son, S.F., Additive manufacturing of ammonium perchlorate composite propellant with high solids loadings. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2019; 37(3): p.3135-3142. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.05.052>
- [13] Zhang, J., He, K., Zhang, D., Dong, J.D., Li, B., Liu, Y.J., Gao, G.L., Jiang, Z.X., Three-dimensional printing of energetic materials: A review. *Energetic Materials Frontiers*. 2022 June; 3(2): p. 97-108. <https://doi.org/10.1016/j.enmf.2022.04.001>
- [14] Rosita, G., Ability Test of Solid Composite Propellant Burning Rate Based on Composition of Fuel-Binder Ratio Using LAPAN's HTPB. *International Seminar on Aerospace Science and Technology IV*; 2016; Jakarta, Indonesia.
- [15] Sitompul, H. R., Wibowo, H. B., Abdillah, L. H., Ardianingsih, R., Restasari, A., Budi, R. S., . . . Baiquni, M., Integrated Quality Analysis Method of Aluminum for Composite Propellant Production. *Jurnal Teknologi Dirgantara*. 2021; p.177-192.