

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Pada penelitian ini, digunakan beberapa landasan teori yang relevan sebagai landasan dasar yang menjadi acuan untuk memperkuat penelitian, yaitu terkait Roket Pertahanan Negara, Propelan Padat Komposit Roket RHan – 122B, *Binder* Energetik, Simulasi Energetik dan Asap.

2.1.1 Roket Pertahanan Negara

Pertahanan negara adalah bagian penting dari mempertahankan kedaulatannya. Kata pertahanan berasal dari kata dasar tahan yang memiliki arti keadaan tetap dalam berbagai kondisi. Dari kata tersebut pengertian pertahanan merupakan segala kegiatan yang mampu tetap berdiri dengan berbagai kondisi atau menjaga tetap utuh dan stabil. Pengertian pertahanan negara juga tercantum dalam undang – undang nomor 3 tahun 2002, pasal 1 angka 1 yaitu pertahanan negara adalah segala usaha untuk mempertahankan kedaulatan negara, keutuhan wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia, dan keselamatan segenap bangsa dari ancaman dan gangguan terhadap keutuhan bangsa dan negara. Bidang pertahanan sangat penting karena berhubungan dengan kehidupan dan keberlangsungan hidup rakyat. Suatu negara harus dapat mempertahankan kedaulatan, keutuhan wilayah, dan keselamatan dari semua ancaman dan gangguan. Sistem pertahanan negara diperlukan untuk menghadapi ancaman terhadap pertahanan negara. Pada hakikatnya sistem pertahanan Negara Indonesia adalah segala upaya pertahanan bersifat semesta (Muhaimin 2014).

Sistem pertahanan yang memiliki kecanggihan dan kemampuan Alpahankam dalam menghadapi ancaman baru menjadi kekuatan pertahanan negara. Instrumentasi penangkal adalah pilihan penting

untuk mengantisipasi ancaman terhadap pertahanan dan keamanan nasional, dan dalam hal ini industri pertahanan mampu menciptakan teknologi pertahanan. Teknologi pertahanan dimaksudkan untuk selalu mampu menangani ancaman baru (Yogaswara, 2017). Setelah meningkatkan sumber daya manusia, langkah penting berikutnya adalah memperoleh penguasaan teknologi, hal ini tidak dapat dicapai oleh satu institusi maupun lembaga, tetapi memerlukan kerjasama yang erat di antara berbagai lembaga, seperti pendidikan selalu berupaya mencetak prestasi dan mencerdaskan sumber daya manusia terutama mereka yang terlibat langsung dalam upaya pertahanan negara (Anwar, 2015).

Teknologi pertahanan dengan jangkauan pengawasan serta daya tangkal presisi tinggi untuk menghancurkan serangan musuh untuk saat ini sangat dibutuhkan. Salah satu teknologi yaitu roket balistik sebagai pertahanan wilayah Indonesia sebagai fungsi operasi yang digunakan TNI AL. Dalam fungsi operasi TNI AL roket yang sebelumnya digunakan yaitu roket balistik Grad RM-70. Roket Grad RM-70 menjadi rujukan dalam pengembangan roket pertahanan di Indonesia. Pengembangan yang mengacu dari roket Grad RM – 70 adalah roket RHan – 122B. Tujuan utama pengembangan RHan – 122B mendekati spesifikasi Standar Teknik roket Grad RM-70 Cekoslovakia. Dari hasil kerjasama Kemhan dengan industri melalui konsorsium dapat diwujudkan Roket RHan – 122B yang nantinya dapat diproduksi massal serta dapat memenuhi munisi Roket RM-70 Grad Arteleri Korps Marinir TNI AL (Mahendro Cahyono 2021).

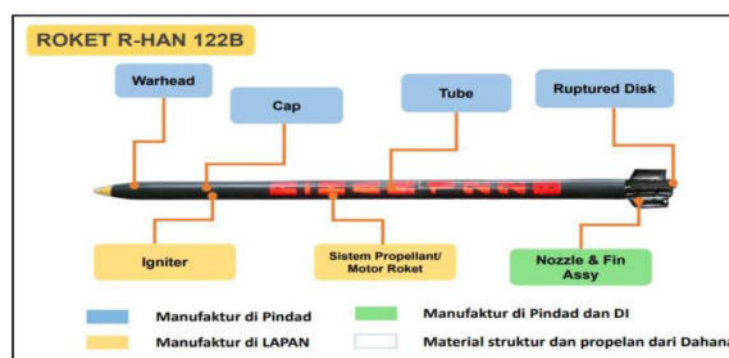
Pada tahun 2020–2024, roket menjadi salah satu dari sepuluh program prioritas nasional dalam bidang alutsista. RHan – 122B merupakan pengembangan melalui konsorsium industri dan instansi dibawah pembinaan kementerian pertahanan. Dalam pelaksanaannya, melibatkan beberapa instansi dan industri yang masing-masing memiliki peran. Adapun produk hasil industri pertahanan dan instansi

dalam pengembangan roket balistik RHan – 122B dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Gambar 2.1:

Tabel 2.1 Produk Hasil Konsorsium RHan – 122B

No	Industri/Instansi	Produk Hasil
1	Lapan	<i>Basic Desain</i>
2	PT Dirgantara Indonesia	<i>Tube, Cap, Nozzle, Graphite, Fin, Spring, Shaft Retainer, Seal, Cover, Nozzle, Bolt Guidance, Safety Ring, Lock Ring, Surface Treatment, Integration</i>
3	PT Pindad	<i>Warhead, Rupture Disk, Launcher</i>
4	PT Krakatau Steel	<i>Nozzle Steel dan Nozzle Manufacture</i>
5	PT LEN	Sistem Kendali dan Sistem Telemetry
6	LAPAN/PT Dahana	<i>Inhibitor, Igniter, Propelan, Liner, X-Ray</i>
7	LPNK + Perguruan Tinggi	Riset Dasar + Terapan untuk desain dan Komponen

Sumber: (LAPAN, 2019)



Gambar 2.1 Roket RHan – 122B

(Sumber: Shofhani, 2022)

2.1.2 Propelan Padat Komposit Roket Rhan – 122B

Roket adalah senjata konvensional yang memiliki pendorong mandiri sebagai wahana militer digunakan tanpa sistem kendali. Roket menjadi wahana militer dalam strategi pertahanan yang memiliki

deterrent effect bagi musuh. Roket sebagaimana digunakan sebagai senjata penghancur yang dilengkapi dengan bahan peledak dorongan berkecepatan tinggi serta daya jelajahnya luas. Teknologi kunci dari roket itu ada pada motor roket, bahan peledak, kerangka/*body* roket. Motor roket didalamnya terdapat bagian berupa tabung motor, nosel dan propelan (Sariak, 2017).

Propelan merupakan pendorong yang digunakan pada roket terdiri dari campuran bahan bakar dan oksidator menghasilkan energi dari pembakaran yang menjadi daya dorong dari roket (Kubota, 2002). Bahan bakar sendiri merupakan bahan kimia yang mudah terbakar saat kondisi segitiga api tercipta akan menghasilkan energi pembakaran untuk mendorong. Sementara oksidasi merupakan zat yang mampu menciptakan gas oksigen dalam pembakaran yang terbentuk dari bahan bakar. Energi pembakaran ini akan menghasilkan gaya dorong (*thrust*) bagi roket, gaya dorong ini dapat diukur dengan satuan newton. Impuls spesifik merupakan besarnya gaya dorong dalam waktu pembakaran dalam satuan detik (s) (Rismanto 2021).

Impuls spesifik yang dihasilkan dari jenis propelan cair lebih tinggi daripada propelan padat. Dari wujud bentuknya jenis propelan roket ada dua yaitu propelan cair dan propelan padat (Rismanto 2021). Propelan cair secara wujud fisiknya berbentuk cair yang tersusun dari zat kimia cair. Sementara propelan padat berwujud fisiknya padat dari zat kimia padat. Propelan padat ada dua yaitu *double base* dan komposit perbedaannya pada *double base* menggunakan nitrogleserin sedangkan komposit tidak (Wibowo, 2015).

Propelan padat komposit umumnya berbasis dari komposisi *ammonium perchlorate* (AP), *aluminum* (Al), *hydroxyl terminated polybutadiene* (HTPB). Bahan bakar dan oksidator propelan padat komposit memiliki karakteristik dan struktur yang berbeda sehingga membuat propelan menjadi heterogen. Bahan bakar dari Al dan oksidator AP, bahan tersebut tidak memiliki ikatan strukturnya atau *non*

uniform structure. Oleh sebab itu, digunakan bahan pengikat berupa *binder* yang memiliki struktur hidrokarbon polimer contohnya HTPB (Kshirsagar 2017).

Propelan padat komposit yang digunakan untuk roket RHan – 122B terdiri dari fuel Al dan oksidator AP. *Ammonium perchlorate* saat proses pembakaran mengalami kondensasi antara gas HCl dan uap air atmosfer yang membentuk asap putih membuat RHan – 122B masih terdapat asap dan jelaga (Susanto 2014). Kondisi tersebut membuat impuls spesifik mengalami penurunan karena masih terdapat gas HCl yang membuat pembakaran tidak sempurna. Sementara untuk terjadi pembakaran sempurna dilakukan dengan cara meningkatkan homogenitas pada proses pencampuran dan pencetakan propelan padat komposit. Kondisi pengaruh dari homogenitas dan porositas yaitu semakin tinggi homogenitas dan semakin rendah porositas maka akan terjadi pembakaran sempurna. Jadi bahan lain dari formulasi propelan padat komposit yang mempengaruhi impuls spesifik yaitu dari bahan *bindernya* (Wibowo, 2018b).

Ammonium perchlorate dan HTPB merupakan formulasi yang banyak digunakan pada propelan padat komposit sebagai pengikat butiran dari AP dan Al. Secara wujud bentuk HTPB itu ada pada *liquid – solid* yaitu diantara cairan yang akan mengeras menjadi padatan. HTPB mempunyai karakteristik viskositas rendah untuk memuat butiran AP dan Al lebih merata dan mudah mengeras menjadi padatan jadi tidak rapuh. Kondisi dari mikrostruktur HTPB yang mampu menampung butiran atau *solid loading capacity* mencapai 95% (Wibowo, 2018b). Selain *binder* dari HTPB yang non energetik ada juga *binder* energetik dari golongan polimer azida seperti GAP dan BAMO dapat digunakan dengan AP.

2.1.3 **Binder Energetik**

Binder dalam propelan padat komposit adalah bahan yang

berfungsi untuk mengikat bersama komponen-komponen utama dalam propelan padat komposit, yaitu bahan bakar dan oksidator. *Binder* energetik adalah suatu komponen atau bahan kimia yang digunakan dalam berbagai aplikasi yang memerlukan penyimpanan atau pelepasan energi (Gaur 2003). *Binder* energetik memiliki kemampuan untuk menyimpan energi kimia dalam bentuk potensial dan melepaskannya pada saat diperlukan. Fungsi utama dari *binder* energetik adalah untuk mengikat bersama komponen-komponen bahan peledak atau propelan yang ada dalam sistem. *Binder* ini berperan penting dalam membentuk struktur padat yang stabil, sehingga bahan peledak atau propelan dapat disimpan dengan aman dan diaktifkan saat dibutuhkan. *Binder* energetik umumnya memiliki sifat seperti stabilitas termal yang tinggi, *binder* harus tahan terhadap suhu tinggi untuk mencegah dekomposisi atau pelepasan energi yang tidak diinginkan. Memiliki ketahanan terhadap guncangan dan gesekan untuk mencegah inisiasi prematur reaksi kimia. Memiliki kompatibilitas dengan komponen lain, *binder* harus dapat berinteraksi dengan bahan-bahan lain dalam sistem tanpa menyebabkan reaksi yang tidak diinginkan. Serta memiliki daya lekat yang kuat, *binder* harus mampu mengikat bersama partikel-partikel dengan baik untuk membentuk struktur yang kokoh (Colclough 1993).

HTPB sendiri merupakan *binder* non-energetik yang hanya digunakan untuk mengganti berat *inert* dari polimer lain. Penggunaan *binder* energetik sudah ada penelitian sebelumnya dengan hasil energi tinggi namun terdapat kekurangan seperti sifat mekanik rendah, *solid loading* lebih rendah dan sulitnya kecocokan dengan bahan lainnya tidak seperti HTPB (Agrawal 2007). Kecocokan *binder* energetik pada dasarnya sesuai antara *binder* dengan *plasticizer* yang digunakan. Seperti pada *binder* energetik nitro – HTPB sangat cocok dan mudah tercampur dengan *plasticizer butyl nitroxy ethyl nitramine (Bu-NENA)*. Selain itu nitro - HTPB ini sudah mampu memiliki sifat mekanik yang

baik untuk digunakan sebagai *binder* energetik propelan padat komposit (Abusaidi 2017). Selain dari nitro – HTPB untuk saat ini sudah banyak perkembangan *binder* energetik yang lain seperti *polyglycidyl nitrate* (PGN) dan polimer azida seperti *glycidyl azide polymer* (GAP) dan 3.3 – *bis*(*azidomethyl*) *oxetane* (BAMO) (Colclough 1993).

PGN pertama kali dikembangkan oleh formulator dari *U.S Naval Ordnance Test Station* di China Lake, California pada tahun 1953. Penelitian tersebut melakukan sintesis *nitrat glycidyl* 800 hingga 3400 berulang kali untuk mendapatkan PGN dengan katalis *stannic chloride*. Padahal pada saat itu mengalami kendala adanya pembatasan dari hasil samping sintesisnya yaitu *acetyl nitrate*. Sintesis *nitrat glycidyl* dilanjutkan oleh badan penelitian pertahanan Inggris pada awal tahun 1990. Sintesis di Inggris sudah lebih aman dengan proses didalam reaktor yang dialiri *dinitrogen pentoxide* dapat hasil kemurnian yang lebih tinggi (Jain, 2002).

BAMO didapat dari sintesis *oxetanes* yang dipolimerisasi menggunakan *trifluoride boron* mirip seperti proses dari PGN. Pengembangan dari sintesis BAMO sendiri sekarang sudah semakin baik. Penambahan polyethers untuk sintesis BAMO, AMMO dan NIMMO yang sekarang dikenal menjadi *poly(BAMO)*, *poly(AMMO)* dan *poly(NIMMO)*. *Poly(BAMO)* memiliki tingkat energetik paling tinggi dari ketiga *binder* tersebut sementara *poly(AMMO)* dan *poly(NIMMO)* tetap bisa digunakan sebagai *copolymer* karena memiliki struktur kristalin lebih tinggi (Mason 2019).

GAP termasuk dari polyether yang lebih sederhana secara kimia didalam golongan polimer azida. GAP mulai dilakukan sintesis pada awal 1970an dan dievaluasi untuk digunakan menjadi *binder* baru ditahun 1976. Pada prosesnya *glycidyl azide* itu sendiri terbukti tahan terhadap polimerisasi, sehingga GAP dihasilkan langsung dari penggantian klorida dalam *polyepichlorohydrin* dengan *sodium azide*

dalam *dimethylsulfoxide*. GAP sudah melalui penilaian oleh Angkatan Udara AS sebagai *binder* propelan ditahun 1981 (Gaur 2003)

2.1.4 Simulasi Energetik dan Asap

Simulasi secara teoritis dari hasil energetik dan asap salah satunya dapat menggunakan perangkat lunak *Gas Dynamics Lab Propellant Evaluation Program (GDL ProPEP)* yang dibuat oleh James E. Lainer. Perangkat lunak tersebut dikembangkan berdasarkan perangkat lunak sebelumnya *Propellant Evaluation Program* dibuat oleh D. R. Cruise dijelaskan pada NWC TP 6037 yang berjudul "*Theoretical Computations of Equilibrium Compositions, Thermodynamic Properties, and Performance Characteristics of Propellant Systems*".

PEP merupakan sebuah perangkat lunak sebagai solusi dari keseimbangan kimia atau *chemical equilibrium solver*, yang dapat digunakan untuk mencari keseimbangan persamaan kimia dari reaktan dan produk propelan. Keseimbangan persamaan kimia menggunakan metode *minimization of Gibbs free Energy* yang banyak diulas oleh Gordon dan McBride 1972. Reaktan penyusun dari propelan terjadi reaksi secara adiabatik dan *irreversible* untuk menghasilkan unsur produk akhir dalam jumlah yang tetap menggunakan hubungan keseimbangan masa, tekanan ruang bakar, dan keseimbangan pada temperatur reaksi. Formula perhitungan keseimbangan persamaan kimia tersebut terdapat pada NASA SP-273, NASA TM 86885, NASA RP-1311.

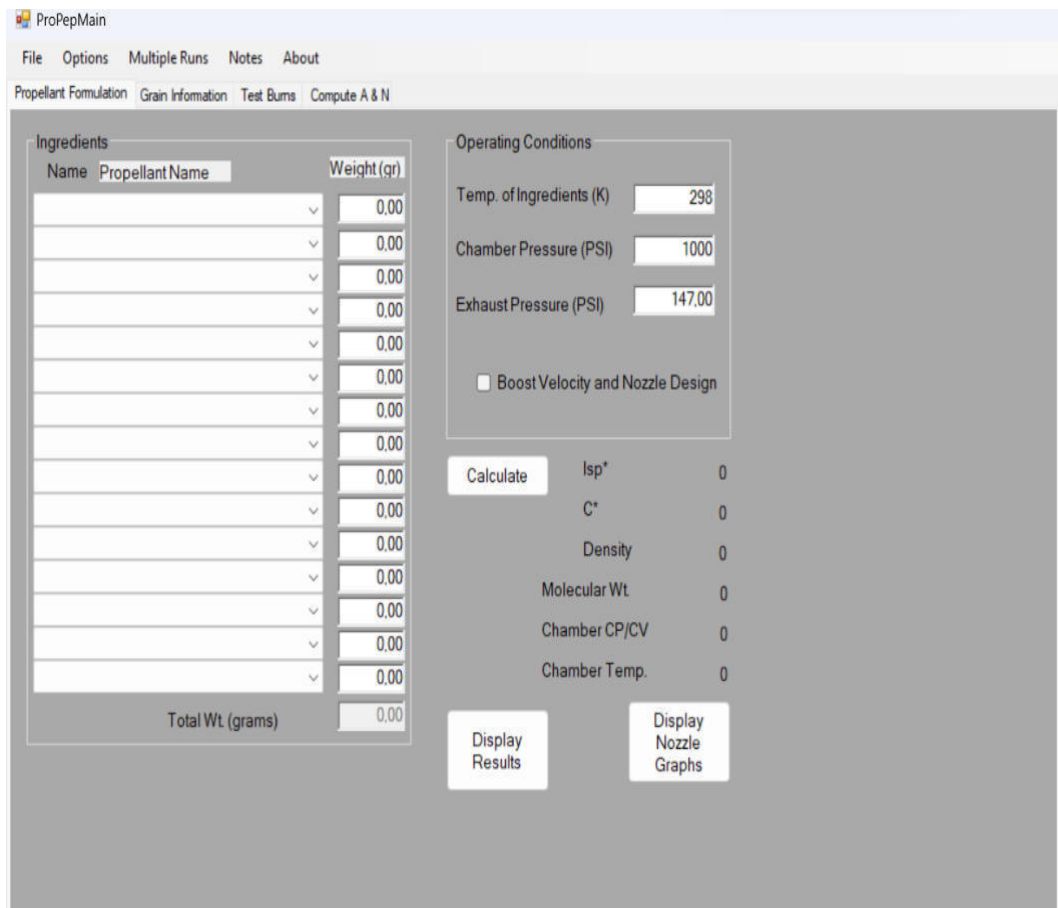
Perhitungan dari kinerja energetik secara teoritis digunakan untuk mengetahui karakteristik performa propelan padat komposit. Perangkat lunak simulasi untuk mengetahui karakteristik performa propelan padat komposit selain *GDL ProPEP* yaitu *GUIPEP*, *RPA* dan *Burnsim*. Perangkat lunak *GDL ProPEP* memiliki beberapa kelebihan yang dapat dijadikan pilihan dalam simulasi pada propelan padat komposit. Setiap analisis dari *GDL ProPEP* dapat menghasilkan nilai

teoritis dari temperatur pembakaran, berat molekul dan rasio kapasitas panas dari hasil pembakaran dan kecepatan karakteristik. Dari hasil simulasi berupa data numeris dapat digunakan sebagai parameter untuk komposisi propelan dan konfigurasi nosel. Data numeris bisa digunakan untuk melakukan evaluasi dan komparasi kinerja dari beberapa jenis roket. Serta digunakan untuk prediksi kinerja roket dan menentukan parameter desain roket yaitu bentuk dan ukuran nosel sesuai kebutuhan. Program *GDL ProPEP* mampu melakukan prediksi dari komposisi propelan sehingga dapat dengan cepat mendapatkan rasio efektif reaktan penyusun propelan dalam mencapai performa sesuai kebutuhan (Jihad 2006). Program *GDL ProPEP* tidak berbayar dapat diakses oleh publik dan dapat dijalankan pada komputer pribadi dengan proses *math coprocessor*. Selain itu, program *GDL ProPEP* disertai dengan sumber database lengkap dan akurasi tinggi dari *JANNAF.DAT* berisikan formasi data reaksi panas spesifik yang digunakan oleh pemilik program. Program *GDL ProPEP* dibandingkan dengan program *GUIPEP*, *RPA* dan *Burnsim* memiliki tingkat kesulitan yang lebih rendah atau mudah dipahami pengoperasiannya program dengan algoritma yang simpel dan jelas. *GDL ProPEP* yang memiliki beberapa kelebihan dari perangkat lunak lainnya digunakan untuk prediksi impuls spesifik dan konsentrasi gas asap dari propelan padat komposit roket RHan – 122B dengan algoritma program *GDL ProPEP*.

2.1.5 Algoritma *ProPEP*

Algoritma dari perangkat lunak *GDL ProPEP* dapat menghasilkan kesetimbangan kimia dari gas pembakaran propelan. *GDL ProPEP* memiliki dua opsi kesetimbangan yaitu *frozen* dan *shifting*. Kesetimbangan *frozen* sendiri dimana kondisi dari hasil reaksi pembakaran berupa komposisi kimia akhir yang tidak berubah saat melalui nosel (komposisi kimia akhir terbatas dalam ruang bakar). Sementara kesetimbangan *shifting* merupakan kesetimbangan kimia

yang hasil komposisi kimia akhir berubah saat melalui nosel (Jihad 2006). Opsi dari kesetimbangan ini tersedia pada menu *options* yang jumlahnya hanya 6 tidak ada opsi *fix chamber temperature* (Brown, 1995). Tampilan antarmuka perangkat lunak untuk memilih menu *options* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.2 Tampilan Antarmuka GDL ProPEP.

Dapat dilihat pada Gambar 2.1 tampilan antarmuka dari perangkat lunak GDL *ProPEP* terdapat input bahan dengan berat dalam gram. Terdapat parameter temperatur, tekanan dalam ruang bakar serta tekanan diluar sesuai dengan kondisi operasi awal. Terdapat pilihan *calculate*, *display results* dan *display nozzle graphs* merupakan menu running data simulasi.

Data yang terisi akan terlihat kembali dengan beberapa tambahan seperti kode pada pepcoded.dat, rumus kimia, presentase berat, nama unsur, densitas unsur (lb/in^3) dan delta enthalpy (kalori/gram) (Brown, 1995). Tampilan dari MS notepad yang dihasilkan setelah simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut:

```

Code                WEIGHT      D-H  DENS  COMPOSITION
0 AMMONIUM PERCHLORATE  77,500  -601  0,00001  1 CL  4 H  1 N  4 O
0 ALUMINUM (PURE CRYSTALLINE)  7,500  0  0,00001  1 AL
0 HTPB (R-45M)  14,000  -367  0,00001  200 C  302 H  2 O
0 TOLUENE DIISOCYANATE  1,000  -855  0,00001  6 H  9 C  2 N  2 O

THE PROPELLANT DENSITY IS  0,00001 LB/CU-IN OR  0,0003 GM/CC
THE TOTAL PROPELLANT WEIGHT IS  100,0000 GRAMS

NUMBER OF GRAM ATOMS OF EACH ELEMENT PRESENT IN INGREDIENTS

4,216661 H
1,074090 C
0,671075 N
2,660073 O
0,277984 AL
0,659591 CL

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW *****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PSI)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
2981  4906  50,00  735,00  -52,57  238,63  1,2018  3,886  12,866

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL =  10,203  11,428
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED =  3,886  0,137

9,926050e-001 H2O  9,120404e-001 CO  7,718259e-001 H2  6,348087e-001 HCl
3,349607e-001 N2  1,619091e-001 CO2  1,372915e-001 Al2O3*  3,648204e-002 H
2,039277e-002 Cl  1,570855e-002 HO  1,051467e-003 NO  8,922959e-004 AlOCl
8,851603e-004 AlCl  7,205243e-004 AlCl2  4,495914e-004 O  4,363288e-004 AlHO2
3,119320e-004 AlCl3  2,316581e-004 O2  1,043167e-004 AlHO  6,260591e-005 Cl2
3,633553e-005 NH3  3,317820e-005 CHO  2,558185e-005 COCl  2,049042e-005 HOCl
1,594898e-005 AlO  1,007987e-005 OCl  8,031076e-006 CNH  5,972898e-006 NH2
5,146240e-006 CH2O  3,188135e-006 Al  2,268042e-006 HO2  1,978350e-006 N
1,64888E-06 CNHO  1,64888E-06 CNHO  1,64888E-06 CNHO

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS  24,854

*****EXHAUST RESULTS FOLLOW *****
T(K)  T(F)  P(ATM)  P(PSI)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV  GAS  RT/V
1623  2461  1,00  14,70  -120,69  238,63  1,2319  3,848  0,260

SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL =  9,403  10,188
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED =  3,848  0,139

9,011413e-001 H2O  8,773528e-001 H2  8,061200e-001 CO  6,594502e-001 HCl
3,355086e-001 N2  2,678981e-001 CO2  1,389723e-001 Al2O3&  1,266327e-004 H
7,47922E-05 Cl  7,47922E-05 Cl  7,47922E-05 Cl

THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS  25,083

*****PERFORMANCE: FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE*****
IMPULSE  IS EX  T*  P*  C*  ISP*  OPT-EX  D-ISP  A*M  EX-T
238,8  1,2126  2694  28,10  4933,3  193,1  6,89  0,1  0,20866  1501
243,5  1,1591  2768  28,63  5056,1  193,1  7,05  0,1  0,21386  1623

```

Gambar 2.3 Tampilan Hasil Simulasi

Pada Gambar 2.2 dapat dilihat data numeris yang dihasilkan dari simulasi perangkat lunak *ProPEP*. Hasil simulasi dibagi *Chamber Results Follow*, *Exhaust Results Follow*, *Performance: Frozen on First*

Line, Shifting on Second Line. Data tersebut dijelaskan pada penjelasan masing – masing data di paragraf selanjutnya.

Densitas ideal propelan dari hasil simulasi sesuai dengan perhitungan dari persamaan densitas ideal propelan sebagai berikut:

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{f_a}{\rho_a} + \frac{f_b}{\rho_b} + \frac{f_c}{\rho_c} + \dots} \quad (i)$$

Dari hasil simulasi terlihat jumlah persen berat dari tiap-tiap komposisi penyusun yang diisi, serta terdapat densitas tiap bahan tersebut untuk mengetahui jumlah atom relatif tiap komposisi dari hasil pembakaran(Sutton, 2017).

Pada bagian tampilan hasil simulasi ada dua kondisi yaitu kondisi ruang bakar (*frozen*) dan kondisi keluar nosel (*shifting*). Kondisi pada ruang bakar terlihat pada tampilan pada baris pertama adalah temperatur pembakaran, tekanan ruang bakar yang diinginkan, enthalpi total campuran, entropi total, rasio panas jenis C_p/C_v (γ), jumlah mol gas dalam campuran dan RT/V (Brown, 1995). Tampilan dari hasil simulasi pada kondisi ruang bakar judulnya *Chamber Results Follow* yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut:

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW *****									
T (K)	T (F)	P (ATM)	P (PSI)	ENTHALPY	ENTROPY	CP/CV	GAS	RT/V	
2981	4906	50,00	735,00	-52,57	238,63	1,2018	3,886	12,866	
SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL =						10,203	11,428		
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED =						3,886	0,137		
9,926050e-001	H2O	9,120404e-001	CO	7,718259e-001	H2	6,348087e-001	HCl		
3,349607e-001	N2	1,619091e-001	CO2	1,372915e-001	Al2O3*	3,648204e-002	H		
2,039277e-002	C1	1,570855e-002	HO	1,051467e-003	NO	8,922959e-004	AlOCl		
8,851603e-004	AlCl	7,205243e-004	AlCl2	4,495914e-004	O	4,363288e-004	AlHO2		
3,119320e-004	AlCl3	2,316581e-004	O2	1,043167e-004	AlHO	6,260591e-005	C12		
3,633553e-005	NH3	3,317820e-005	CHO	2,558185e-005	COCl	2,049042e-005	HOCl		
1,594898e-005	AlO	1,007987e-005	OCl	8,031076e-006	CNH	5,972898e-006	NH2		
5,146240e-006	CH2O	3,188135e-006	Al	2,268042e-006	HO2	1,978350e-006	N		
1,64888E-06	CNHO	1,64888E-06	CNHO	1,64888E-06	CNHO				
THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS						24,854			

Gambar 2.4 Tampilan Hasil Simulasi dalam Kondisi Ruang Bakar

Pada Gambar 2.3 hasil simulasi dalam kondisi ruang bakar terdapat data yang ditampilkan yaitu temperatur pembakaran, tekanan, *enthalpy*, *entropy*, CP/CV , *GAS* dan RT/V . Data selanjutnya berupa panas

spesifik, jumlah mol gas dari hasil pembakaran, jumlah mol dari unsur hasil pembakaran dan berat molekul campuran.

Parameter dari hasil simulasi dari kondisi ruang bakar ada beberapa, yaitu sebagai berikut: pertama ada temperatur pembakaran, dimana temperatur pada simulasi asumsi sebagai temperatur nyala adiabatik. Pada umumnya temperatur pembakaran yang tinggi berpengaruh terhadap kenaikan impuls spesifik menjadi tinggi juga temperatur pada ruang bakar sifatnya stagnasi maka dari desain nosel perlu menyesuaikan. Parameter kedua yaitu C_p/C_v , rasio panas spesifik (γ) digunakan pada kondisi ruang bakar. Rasio panas spesifik untuk menghitung kecepatan karakteristik (C^*) dan tekanan ruang bakar. Nilai C_p/C_v dihitung berdasarkan persamaan rasio panas spesifik sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{C_{p_{mix}}}{C_{p_{mix}} - R'} \quad (ii)$$

Dimana,

$$C_{p_{mix}} = \frac{1}{n} \sum (n_i C_{p_i} + n_s C_s) \quad (iii)$$

Parameter ketiga yaitu gas dimana dari simulasi berupa jumlah mol gas dari hasil pembakaran. Jumlah mol gas digunakan untuk menghitung berat molekul dari hasil pembakaran. Hasil didapat dari membagi jumlah masa dengan jumlah mol gas, seperti $M = 100/3.641 = 27.46$ g/mol. Nilai dari jumlah mol gas dapat digunakan dalam persamaan gas dinamik.

Informasi selanjutnya disajikan beberapa jumlah mol dari unsur hasil pembakaran. Nama unsur dengan tanda * memiliki arti fase liquid dan solid, selain unsur yang tidak ada tanda * dalam fase gas. Informasi dari data dapat digunakan menghitung rasio fraksi masa terhadap fase kondensasinya. Bagian akhir dari data di atas adalah berat molekul campuran, yang diperoleh dengan menjumlahkan fraksi mol tiap unsur

pendukung dikalikan dengan berat molekulnya sesuai persamaan berat molekul campuran:

$$M_{\text{mix}} = \sum_i f_{mi} M_i \quad (\text{iv})$$

Selain hasil dari tampilan pada kondisi ruang bakar selanjutnya tampilan hasil simulasi pada kondisi keluar nosel. Beberapa informasi yang ada pada tampilan hasil simulasi pada judul *Exhaust Results Follow* dapat dilihat pada Gambar 2.4:

*****EXHAUST RESULTS FOLLOW *****								
T (K)	T (F)	P (ATM)	P (PSI)	ENTHALPY	ENTROPY	CP/CV	GAS	RT/V
1623	2461	1,00	14,70	-120,69	238,63	1,2319	3,848	0,260
SPECIFIC HEAT (MOLAR) OF GAS AND TOTAL =						9,403	10,188	
NUMBER MOLS GAS AND CONDENSED =						3,848	0,139	
9,011413e-001 H2O			8,773528e-001 H2		8,061200e-001 CO		6,594502e-001 HCl	
3,355086e-001 N2			2,678981e-001 CO2		1,389723e-001 Al2O3		1,266327e-004 H	
7,47922E-05 Cl			7,47922E-05 Cl		7,47922E-05 Cl			
THE MOLECULAR WEIGHT OF THE MIXTURE IS						25,083		

Gambar 2.5 Tampilan Hasil Simulasi dalam Kondisi Keluar Nosel

Pada gambar 2.4 hasil dalam kondisi keluar nosel yang ditampilkan hampir keseluruhan sama seperti data dari kondisi diruang bakar yaitu temperatur pembakaran, tekanan, *enthalpy*, *entropy*, *CP/CV*, *GAS* dan *RT/V*. Data selanjutnya berupa panas spesifik, jumlah mol gas dari hasil pembakaran, jumlah mol dari unsur hasil pembakaran dan berat molekul campuran.

Pada hasil simulasi dalam kondisi keluar nosel ada beberapa hal yang diperhatikan pertama temperatur hasil pembakaran turun secara signifikan sebagai akibat perubahan energi panas menjadi energi kinetik. Temperatur area *exit* dapat dihitung dengan persamaan:

$$T_e = \frac{T_o}{1 + \frac{k-1}{2} M_e^2} \quad (\text{v})$$

Dimana,

$$M_e = \frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{P_o}{P_e} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (vi)$$

Dengan:

T_o = Temperatur ruang bakar,

P_o/P_e = Rasio tekanan ruang bakar dan tekanan keluar,

M_e = Bilangan Mach, dan

$\gamma = C_p/C_v$ untuk kondisi keluar nosel.

Kedua tekanan ruang bakar turun menjadi satu atmosfer sesuai dengan kondisi desain. Ketiga C_p/C_v maupun jumlah mol gas mengalami sedikit perubahan, hal ini disebabkan oleh perubahan komposisi dan temperatur keluar melalui nosel. Keempat panas spesifik dan jumlah mol kondensasi mengalami perubahan dari kondisi ruang bakar.

Informasi terakhir dari tampilan hasil simulasi yaitu performa hasil pembakaran dari propelan. Data yang dihasilkan ada beberapa yang tertampil pada judul *Performance: Frozen on First Line, Shifting on Second Line* dapat dilihat pada Gambar 2.5:

*****PERFORMANCE: FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE*****										
IMPULSE	IS	EX	T*	P*	C*	ISP*	OPT-EX	D-ISP	A*M	EX-T
238,8	1,2126	2694	28,10	4933,3		6,89	0,1	0,20866	1501	
243,5	1,1591	2768	28,63	5056,1	193,1	7,05	0,1	0,21386	1623	

Gambar 2.6 Tampilan Performa Hasil Pembakaran Propelan

Pada Gambar 2.5 hasil simulasi ditampilkan data berupa *impulse*, *eksponen isentropic*, T^* dan P^* , C^* , ISP^* , $OPT-EX$, $D-ISP$, A^*M dan $EX-T$. Data yang ditampilkan dijelaskan masing – masing pada paragraf selanjutnya.

Pada hasil simulasi performa hasil pembakaran propelan ada beberapa hal yang diperhatikan. Pertama impuls spesifik ideal menjadi nilai yang

utama dari performa propelan, menentukan nilai isp didapat dari persamaan I_{sp} berikut,

$$I_{SP} = \frac{1}{g} \sqrt{2T_0 \left(\frac{R'}{M}\right) \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad (\text{vii})$$

Nilai γ = Rata – rata rasio panas spesifik dari kondisi ruang bakar dan kondisi keluar nosel

Nilai M = Rata – rata massa molekul dari kondisi ruang bakar dan kondisi keluar nosel

Kedua eksponen isentropik = γ untuk gas ideal ($PV^\gamma = \text{konstan}$). Karena gas tidak sempurna, maka nilai $I_{sexp} \neq C_p/C_v$.

Ketiga T^* dan P^* adalah nilai kritis dari tekanan dan temperatur aliran dengan kecepatan aliran = 1 Mach saat berada di throat. Nilai T^* dan P^* didapat dari persamaan dalam satuan Kelvin dan atmosfer sebagai berikut:

$$T^* = \frac{T_0}{1 + \frac{k-1}{2}} \quad (\text{vii})$$

Dan

$$P^* = \frac{P_0}{\left(1 + \frac{k-1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}} \quad (\text{ix})$$

Keempat C^* adalah kecepatan karakteristik dengan satuan ft/s. parameter ini digunakan sebagai gambaran thermokimia untuk propelan tertentu, yang dapat dihitung dengan persamaan kecepatan karakteristik berikut:

$$C^* = \sqrt{\frac{\left(\frac{R'}{M}\right)T_0}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} } \quad (\text{x})$$

Kelima nilai OPT-EX adalah rasio ekspansi optimum (A_e/A_t) yang merupakan parameter penting dalam desain nosel. Nilai ini digunakan

untuk mendapatkan diameter exit, di mana $D_e = D_t \sqrt{\frac{A_e}{A_t}}$. Nilai OPT-EX dapat diperoleh menggunakan persamaan rasio ekspansi optimum berikut:

$$\frac{A_e}{A_t} = \frac{1}{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (\text{xi})$$

γ = nilai C_p/C_v pada kondisi keluar nosel.

Keenam nilai D-ISP = Impuls spesifik densitas, yang didefinisikan sebagai hasil dari impuls spesifik dikali spesifik gravity propelan ($I_D = I_{sp} \cdot \delta_p$), spesifik gravity secara numerik sama dengan densitas, dalam gr/cc. Nilai D-ISP tinggi untuk memprediksi propelan yang lebih padat dan kompaksi tinggi. Ketujuh nilai EX-T = temperatur pada kondisi keluar nosel (Kelvin) dan persamaan yang digunakan sama seperti persamaan kelima (v).

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian terdahulu diperlukan untuk menambah kajian Pustaka dalam tesis ini. Pengkajian dilakukan dengan cara mencari hasil penelitian terdahulu yang masih relevan dengan tesis yang akan dibuat tentang pengaruh formulasi *binder* energetik propelan padat komposit.

1. Toudjine (2023), Metode yang digunakan adalah literatur review dari sintesis kimia dan karakterisasi sifat-sifat fisik dan termal. Jurnal tersebut membahas tentang pengembangan *energetic copolymer binder* untuk aplikasi propulsi dan membahas tentang sintesis dan sifat-sifat material tersebut. Jurnal tersebut memberikan informasi tentang sintesis dan karakterisasi energetik copolymer binders, serta hasil analisis kinetik dan termodinamika dari material tersebut. Dari hasil review yang dilakukan menurut jurnal terkait. Nilai impuls spesifik propelan berbasis HTPB mencapai 245.,7 detik. Nilai impuls

spesifik berbasis GAP mencapai 253,1 detik. Nilai spesifik berbasis GAP/polyBAMO mencapai 252,6 detik.

2. Lysien (2022), Permasalahan dari jurnal ini yaitu pengembangan binder energetik dari polyoxetanes belum banyak informasi yang ada dari penelitian sebelumnya. Metode yang digunakan adalah literatur review dengan melakukan analisis terhadap berbagai penelitian dan literatur yang telah ada sebelumnya. Hasil didapat dari review jurnal sebelumnya yaitu sifat termal glass transition (T_G) dan temperatur dekomposisi (T_{DEC}). BAMO memiliki T_G -23°C dan nilai polimer T_{DEC} 242°C . Kinerja mekanik dan energetik *binder* dalam aplikasi propelan tertentu harus menjadi fokus utama dalam penelitian selanjutnya.
3. Lysien (2021), Membahas khusus pada pengikat energetik dan agen pengoksidasi baru yang ramah lingkungan serta penggunaannya dalam formulasi bahan bakar padat. Metode melalui pencarian dan analisis literatur yang relevan tentang kemajuan terbaru dan komponen yang digunakan dalam formulasi propelan padat. Hasil analisis kemajuan terbaru dan komponen yang digunakan dalam formulasi propelan padat. Hasil analisis kemajuan terbaru dan komponen yang digunakan dalam formulasi propelan padat. Hasil analisis melalui review jurnal sebelumnya didapat sifat termal binder yaitu T_g HTPB -75°C , T_g GAP -45°C , T_g PBAMO -39°C dan T_g PGN -61°C . serta impuls spesifik AP/HTPB 245,9 detik.
4. Cheng (2019), Mengatasi keterbatasan bahan-bahan propelan roket padat yang telah digunakan sejak tahun 1960-an. Mengevaluasi bahan-bahan propelan roket padat baru yang dapat memberikan kinerja yang lebih baik dan lebih stabil. Melakukan eksperimen untuk menguji kinerja bahan-bahan propelan roket padat baru yang telah dikembangkan. Metode digunakan untuk mengevaluasi kinerja dan stabilitas bahan-bahan propelan roket padat baru yang diuji dan membandingkannya dengan bahan-bahan propelan roket padat

yang telah digunakan sebelumnya. Hasil analisis beberapa bahan propelan roket padat baru yang diuji, seperti GAP, poly-phosphazene PZ-23, dan Poly-DAT, menunjukkan kinerja yang lebih baik daripada bahan-bahan propelan roket padat tradisional seperti HTPB. Selain itu, penulis juga menemukan bahwa bahan-bahan propelan roket padat baru yang diuji memiliki stabilitas yang lebih baik dan lebih sedikit masalah reaktivitas polimer dibandingkan dengan bahan-bahan propelan roket padat tradisional.

5. Hajar Abdillah, (2018), untuk mendapatkan performa propelan yang lebih energetik, diperlukan penggunaan material-material yang bersifat lebih energetik, misalnya penggunaan *binder* energetik namun pengawasan ketat pada material energetik cukup menyulitkan untuk mendapatkan material tersebut. Melalui metode literatur review untuk mengetahui *binder* lebih energetik. Metode sintesis HTPB untuk membuatnya lebih berenergi tinggi dapat dilakukan dengan menambahkan gugus yang bersifat energetik seperti gugus nitro, namun tetap aman digunakan (bersifat stabil). Hasil dari review jurnal sebelumnya yaitu Colclough dan Paul melaporkan bahwa *glass transition temperature* (T_g) dari NHTPB adalah -58°C , sedangkan T_g dari 20% HTPB ternitrasasi adalah -22°C . Eksoterm dimulai dari suhu 156°C dan mencapai maksimum pada 209°C . Shekhar, et al memiliki hasil yang sedikit berbeda pada nilai T_g yaitu -61°C , suhu eksoterm dimulai sekitar 160°C dan maksimum terjadi pada 232°C dengan pelepasan energi sebesar 1032 J/g .
6. Heri Budi Wibowo (2018), Strategi kedepan untuk meningkatkan kinerja propelan padat komposit dengan impuls spesifik dari 220 detik menjadi 250 detik. Metode dengan melakukan review terhadap capaian produk propelan yang dihasilkan, analisis faktor yang berpengaruh, dan penyusunan strategi untuk mengatasinya. Hasil dari review dari beberapa jurnal didapatkan Penambahan bahan energetik tinggi sebesar 4 % dapat meningkatkan impuls spesifik

propelan maksimal 12%. Beberapa bahan energetik tinggi yang telah digunakan untuk meningkatkan kinerja propelan padat komposit adalah ADN, RDX, NHTPB, dan GAP. Dapat diasumsikan propelan awalnya memiliki impuls spesifik 220 detik, diharapkan bertambah 25 detik melalui penambahan material berenergi tinggi.

7. Abusaidi (2017), Bahan pengikat energetik, seperti HTPB, berperan penting dalam menentukan kinerja balistik propelan padat komposit. Namun, meskipun HTPB telah digunakan secara luas, terdapat beberapa keterbatasan dalam kinerjanya. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sintesis dan karakterisasi propellant padat komposit berbasis Nitro-HTPB. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa propelan padat komposit berbasis Nitro-HTPB menunjukkan tingkat pembakaran yang lebih tinggi yaitu mencapai $11,89 \text{ r/mms}^{-1}$ dengan tekanan 9 MPa dibandingkan dengan propelan HTPB konvensional tingkat pembakaran hanya mencapai $9,32 \text{ r/mms}^{-1}$ pada tekanan yang sama 9 MPa. Uji sensitivitas didapat *impact sensitivity* HTPB 13,1 N-m *friction sensitivity* 98 N sementara n-HTPB *impact sensitivity* HTPB 11,2 N-m *friction sensitivity* 87 N. Uji mekanik di suhu 25°C untuk n-HTPB didapat σ_{\max} 0,60 MPa ε_{\max} 78% dan E 2,6 MPa. Uji mekanik di suhu 25°C untuk HTPB didapat σ_{\max} 0,69 MPa ε_{\max} 74% dan E 3,0 MPa.
8. Betzler (2016), Masih perlunya menciptakan *binder* energetik lain dari GAP dengan melalui sintesis menjadi GNAP. Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu sintesis GAP menjadi GNAP, karakterisasi GNAP, uji sensitivitas, uji energetik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa propelan padat komposit berbasis GNAP memiliki sifat-sifat energetik yang lebih baik dibandingkan dengan polimer serupa lainnya seperti GAP dan PGN. GNAP menunjukkan nilai impuls spesifik yang lebih tinggi mencapai 209 detik, GAP 207 detik, PGN 205 detik. GNAP memiliki stabilitas termal yang baik, yang dapat menjadi faktor penting dalam aplikasi bahan energetik.

9. Bhowmik (2015), Masalah dari jurnal tersebut adalah meskipun banyak elastomer dan bahan pengikat energetik yang menjanjikan dilaporkan pada literatur untuk aplikasi formulasi propelan, namun aplikasi sistem yang sebenarnya masih terbatas karena banyak keterbatasan inheren. Metode karakterisasi dilakukan dengan mengukur beberapa parameter seperti densitas, C^* dan I_{sp} . Selain itu, sifat mekanik dari pengikat energetik diuji berbagai kondisi suhu dengan mesin uji universal Hounsfield (Model H25KS) UK-Universal kecepatan 50 mm/min, benda uji sesuai dengan ASTM-D638 MII. Selain itu, sifat termal dilakukan analisis termogravimetri (TGA) dan kalorimetri diferensial scanning (DSC). Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem pengikat energetik baru yang terdiri dari polioliol dengan fungsionalitas hidroksil tinggi yang diplastisasi dengan 1,2,4-butanetriol trinitrat (BTTN) dengan HMX 20% didapat impuls spesifik 255 detik, TS 5,4 kg/cm², E pada suhu -40°C 95% dan E-Mod 3,9 kg/cm².
10. Xiao (2014), Masalah yang dibahas dalam jurnal ini adalah penggunaan pengikat polimer energetik dalam propelan padat komposit dan bahan peledak. Metodologi jurnal ini menggunakan literatur review tentang kemajuan saat ini dalam penelitian tentang pengikat energi, khususnya di Cina. Para penulis meninjau sintesis dan aplikasi elastomer termoplastik energik (ETPE) dalam propeller energi tinggi. Membahas penggunaan pengikat polimer energetik dalam propelan padat komposit dan bahan peledak. Jurnal ini menjelajahi manfaat penggunaan pengikat polimer energetik, seperti peningkatan energi dan pengurangan sensitivitas terhadap rangsangan. Jurnal ini juga mengulas kemajuan penelitian saat ini tentang pengikat energetik, terutama di China, dan membahas sintesis dan aplikasi elastomer termoplastik energetik (ETPE) dalam propelan tahan energi tinggi.

Tabel 2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

No	Nama Penulis	Judul	Permasalahan	Metode	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1.	(Touidjine 2023)	Review on energetic copolymer binders for propulsion applications: Synthesis and properties	Masalah yang dibahas adalah pengembangan dan karakterisasi <i>energetic copolymer binders</i> untuk meningkatkan kinerja dan keamanan roket dan misil.	Metode yang digunakan adalah literatur review dari sintesis kimia dan karakterisasi sifat-sifat fisik dan termal.	Jurnal tersebut memberikan informasi tentang sintesis dan karakterisasi <i>energetic copolymer binders</i> , serta hasil analisis kinetik dan termodinamika dari material tersebut. Dari hasil review yang dilakukan menurut jurnal terkait. Nilai impuls spesifik propelan berbasis HTPB mencapai 245.,7 detik. Nilai impuls spesifik berbasis GAP mencapai 253,1 detik. Nilai spesifik berbasis GAP/polyBAMO mencapai 252,6 detik	Pengujian dilakukan dengan mengukur beberapa parameter seperti konsentrasi gas dan Isp.	Tidak membuat dari awal sintesis kimia material copolymer <i>binder</i> untuk meningkatkan energetik.
2	(Lysien 2022)	Energetic Polyoxetanes as High-Performance Binders for Energetic Composites: A Critical Review	Permasalahan dari jurnal ini yaitu pengembangan binder energetik dari polyoxetanes belum banyak informasi yang ada dari penelitian sebelumnya.	Metode yang digunakan adalah literatur review dengan melakukan analisis terhadap berbagai penelitian dan literatur yang telah ada sebelumnya.	Hasil didapat dari review jurnal sebelumnya yaitu sifat termal glass transition (T_G) dan temperatur dekomposisi (T_{DEC}). BAMO memiliki T_G -23°C dan nilai polimer T_{DEC} 242°C. Kinerja mekanik dan energetik <i>binder</i> dalam aplikasi propelan tertentu harus menjadi fokus utama dalam penelitian selanjutnya.	Pengembangan bahan <i>binder</i> energetik selain <i>binder</i> HTPB salah satunya yaitu <i>binder</i> BAMO.	Mencari lebih lanjut kinerja energetik dari <i>binder</i> BAMO simulasi <i>ProPEP</i> sementara jurnal simulasi NASA-CEA

3	(Lysien 2021)	Solid Propellant Formulations: A Review of Recent Progress and Utilized Components	Membahas khusus pada pengikat energetik dan agen pengoksidasi baru yang ramah lingkungan serta penggunaannya dalam formulasi bahan bakar padat.	Metode melalui pencarian dan analisis literatur yang relevan tentang kemajuan terbaru dan komponen yang digunakan dalam formulasi propelan padat.	Hasil analisis kemajuan terbaru dan komponen yang digunakan dalam formulasi propelan padat. Hasil analisis melalui review jurnal sebelumnya didapat sifat termal binder yaitu Tg HTPB -75°C, Tg GAP -45°C, Tg PBAMO -39°C dan Tg PGN -61°C. serta impuls spesifik AP/HTPB 245,9 detik.	Komposisi yang digunakan memiliki rasio formulasi dari base material yang sama AP / HTPB/ Al lebih efektif dan ramah lingkungan.	Tidak menggunakan ester asam nitrat cair pada propelan double-base. Mencari lebih lanjut kinerja energetik dari binder BAMO simulasi ProPEP sementara jurnal simulasi NASA-CEA.
4	(Cheng, 2019)	Review of novel energetic polymers and binders – high energy propellant ingredients for the new space race	Mengatasi keterbatasan bahan-bahan propelan roket padat yang telah digunakan sejak tahun 1960-an. Mengevaluasi bahan-bahan propelan roket padat baru yang dapat memberikan kinerja yang lebih baik dan lebih stabil.	Melakukan literatur review untuk mengevaluasi kinerja energetik dan stabilitas bahan-bahan propelan roket padat baru yang diuji dan membandingkannya dengan bahan-bahan propelan roket padat yang telah digunakan sebelumnya.	Hasil analisis beberapa bahan binder propelan roket padat baru yang diuji, seperti GAP, nitro-HTPB, HTPB menunjukkan kinerja energetik dengan nilai impuls spesifik. Nilai impuls spesifik GAP mencapai 265 detik, nitro – HTPB 260, HTPB 255 detik.	Pengujian dilakukan dengan mengukur beberapa parameter seperti konsentrasi gas dan Isp.	Mencari nilai impuls spesifik dari binder GAP, BAMO, PGN simulasi ProPEP sementara jurnal simulasi CBS-4M.

5	(Hajar Abdillah, 2018)	Penggunaan <i>Binder</i> HTPB Berenergi Tinggi Untuk Meningkatkan Energetik Propelan Komposit (Application Of High Energy HTPB <i>Binder</i> To Enhance The Energetic Of Composite Propellant)	Untuk mendapatkan performa propelan yang lebih energetik, diperlukan penggunaan material-material yang bersifat lebih energetik, misalnya penggunaan <i>binder</i> energetik namun pengawasan ketat pada material energetik cukup menyulitkan untuk mendapatkan material tersebut.	Melalui metode literatur review untuk mengetahui <i>binder</i> lebih energetik. Metode sintesis HTPB untuk membuatnya lebih berenergi tinggi dapat dilakukan dengan menambahkan gugus yang bersifat energetik seperti gugus nitro, namun tetap aman digunakan (bersifat stabil).	Hasil dari review jurnal sebelumnya yaitu Colclough dan Paul melaporkan bahwa <i>glass transition temperature</i> (Tg) dari NHTPB adalah -58°C, sedangkan Tg dari 20% HTPB ternitrasi adalah -22°C. Eksoterm dimulai dari suhu 156°C dan mencapai maksimum pada 209°C. Shekhar, et al memiliki hasil yang sedikit berbeda pada nilai Tg yaitu - 61°C, suhu eksoterm dimulai sekitar 160°C dan maksimum terjadi pada 232°C dengan pelepasan energi sebesar 1032 J/g	Penggunaan <i>binder</i> energetik untuk meningkatkan impuls spesifik.	Penggunaan <i>binder</i> energetik selain HTPB yang merupakan <i>binder</i> non-energetik.
6	Heri Budi Wibowo (2018)	Kajian Program Peningkatan	Strategi kedepan untuk meningkatkan kinerja propelan komposit dengan impuls spesifik dari	Metode dengan melakukan literatur review terhadap capaian produk propelan	Hasil dari review dari beberapa jurnal didapatkan Penambahan bahan energetik tinggi sebesar 4 % dapat meningkatkan impuls spesifik propelan maksimal 12%. Beberapa bahan energetik tinggi yang telah	Peningkatan energetik dari nilai impuls spesifik salah	Penggunaan <i>binder</i> energetik selain HTPB yang merupakan

		Kinerja Propelan Komposit Berbasis AP/HTPB/AL	220 detik menjadi 250 detik	yang dihasilkan, analisis faktor yang berpengaruh, dan penyusunan strategi untuk mengatasinya	digunakan untuk meningkatkan kinerja propelan komposit adalah ADN, RDX, nHTPB, dan GAP. Dapat diasumsikan propelan awalnya memiliki impuls spesifik 220 detik, diharapkan bertambah 25 detik melalui penambahan material berenergi tinggi.	satunya melalui <i>binder</i> energetik yang dapat meningkatkan homogenitas dan menurunkan porositas	<i>binder</i> non-energetik.
7	(Abusaidi 2017)	Development of Composite Solid Propellant Based on Nitro Functionalized Hydroxyl-Terminated Polybutadiene	Bahan pengikat energetik, seperti HTPB, berperan penting dalam menentukan kinerja balistik propelan komposit. Namun, meskipun HTPB telah digunakan secara luas, terdapat beberapa keterbatasan dalam kinerjanya.	Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sintesis dan karakterisasi propellant padat komposit berbasis Nitro-HTPB.	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa propelan komposit berbasis Nitro-HTPB menunjukkan tingkat pembakaran yang lebih tinggi yaitu mencapai $11,89 \text{ r/mms}^{-1}$ dengan tekanan 9 MPa dibandingkan dengan propelan HTPB konvensional tingkat pembakaran hanya mencapai $9,32 \text{ r/mms}^{-1}$ pada tekanan yang sama 9 MPa. Uji sensitivitas didapat <i>impact sensitivity</i> HTPB 13,1 N-m <i>friction sensitivity</i> 98 N sementara n-HTPB <i>impact sensitivity</i> HTPB 11,2 N-m <i>friction sensitivity</i> 87 N. uji mekanik di suhu 25°C untuk n-HTPB didapat σ_{\max} 0,60 MPa ε_{\max} 78% dan E 2,6 MPa.	Penggunaan <i>binder</i> energetik selain HTPB yaitu nitro-HTPB	Tidak melakukan sintesis nitro-HTPB dan tidak melakukan uji sensitivitas dan uji mekanik propelan padat.

					uji mekanik di suhu 25°C untuk HTPB didapat σ_{max} 0,69 MPa ϵ_{max} 74% dan E 3,0 MPa.		
8	(Betzler et al., 2016)	A New Energetic Binder: Glycidyl Nitramine Polymer	Masih perlunya menciptakan <i>binder</i> energetik lain dari GAP dengan melalui sintesis menjadi GNAP	Metode yang digunakan pada penelitian ini yaitu sintesis GAP menjadi GNAP, karakterisasi GNAP, uji sensitifitas, uji energetik.	Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa propelan komposit berbasis GNAP memiliki sifat-sifat energetik yang lebih baik dibandingkan dengan polimer serupa lainnya seperti GAP dan PGN. GNAP menunjukkan nilai impuls spesifik yang lebih tinggi mencapai 209 detik, GAP 207 detik, PGN 205 detik. GNAP memiliki stabilitas termal yang baik, yang dapat menjadi faktor penting dalam aplikasi bahan energetik.	Penggunaan <i>binder</i> energetik selain HTPB non-energetik. Melakukan uji energetik untuk mengetahui nilai impuls spesifik.	Mencari nilai impuls spesifik dari <i>binder</i> GAP, BAMO, PGN menggunakan simulasi <i>ProPEP</i> sementara jurnal menggunakan EXPLO5 V6.02
9	(Bhowmik et al., 2015)	An Energetic Binder for the Formulation of Advanced Solid Rocket Propellants	Masalah dari jurnal tersebut adalah meskipun banyak elastomer dan bahan pengikat energetik yang menjanjikan dilaporkan pada literatur untuk aplikasi formulasi	Metode karakterisasi dilakukan dengan mengukur beberapa parameter seperti densitas, C* dan Isp. Selain itu, sifat mekanik dari pengikat energetik diuji berbagai kondisi suhu dengan mesin uji	Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem pengikat energetik baru yang terdiri dari polioliol dengan fungsionalitas hidroksil tinggi yang diplastisasi dengan 1,2,4-butanetriol trinitrat (BTTN) dengan HMX 20% didapat impuls spesifik 255 detik, TS 5,4 kg/cm ² , E pada suhu -40°C 95% dan E-Mod 3,9 kg/cm ² .	Pengujian dilakukan dengan mengukur beberapa parameter seperti konsentrasi gas dan Isp.	Tidak menggunakan HTPB sebagai <i>binder</i> , pengganti <i>binder</i> material yang digunakan BTTN/Polyol <i>binder</i> mix 25%

			propelan, namun aplikasi sistem yang sebenarnya masih terbatas karena banyak keterbatasan inheren.	universal Hounsfield (Model H25KS) UK-Universal kecepatan 50 mm/min, benda uji sesuai dengan ASTM-D638 MII. Selain itu, sifat termal dilakukan analisis termogravimetri (TGA) dan kalorimetri diferensial scanning (DSC).			
10	(Xiao 2014)	Current trends in energetic thermoplastics elastomers as binders in high energy insensitive propellants in China	Masalah yang dibahas dalam jurnal ini adalah penggunaan pengikat polimer energetik dalam propelan komposit dan bahan peledak.	Metode jurnal ini menggunakan literatur review tentang kemajuan saat ini dalam penelitian tentang pengikat energi, khususnya di Cina. Para penulis meninjau sintesis dan aplikasi elastomer termoplastik energetik (ETPE) dalam propeller energi tinggi.	Membahas penggunaan pengikat polimer energetik dalam propelan komposit dan bahan peledak. Jurnal ini menjelajahi manfaat penggunaan pengikat polimer energetik, seperti peningkatan energi dan pengurangan sensitivitas terhadap rangsangan. Jurnal ini juga mengulas kemajuan penelitian saat ini tentang pengikat energetik, terutama di China, dan membahas sintesis dan aplikasi elastomer termoplastik energetik (ETPE) dalam propelan tahan energi tinggi.	Penggunaan <i>binder</i> energetik untuk meningkatkan energi pada propelan	Tidak menggunakan thermoplastic elastomer.

Sumber: (Olahan Peneliti 2023)

2.3 Kerangka Pemikiran

Adapun kerangka berpikir yang bertujuan untuk menjelaskan mengenai alur berpikir dari Penelitian ini ditunjukkan pada gambar.

Input

Latar Belakang:
Pada pengembangan propelan padat komposit saat ini di ORPA – BRIN menggunakan propelan dengan Isp 220 detik. Propelan yang digunakan masih memiliki asap dan jelaga yang cukup banyak. Target formulasi propelan diharapkan mendekati standar internasional mencapai impuls spesifik 250 detik. Peningkatan impuls spesifik dan penurunan asap salah satunya dengan melakukan pengembangan pada material *binder* yang lebih energetik dan dapat mengurangi asap. Ada beberapa material *binder* selain HTPB yang dapat digunakan yaitu glycidyl azide polymer (GAP), azidomethyl oxetane (BAMMO) dan polyglycidyl nitrate (PGN).

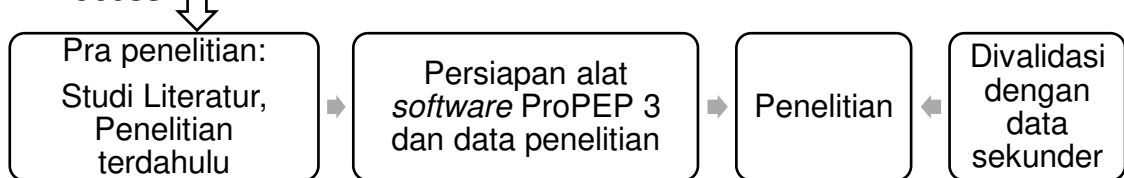


Permasalahan:
Pengembangan propelan di Indonesia untuk saat ini masih penguasaan propelan padat dengan tujuan kedepannya mampu menghasilkan propelan padat komposit dengan karakteristik higroskopis, ramah lingkungan, impuls spesifik tinggi dan potlife panjang. Hal ini pastinya memiliki kendala dalam proses pengembangan yang perlu dihadapi seperti tidak adanya penyedia bahan baku lokal dan terbatasnya pengetahuan karena transfer teknologi hanya dilakukan ke negara sekutu.



Rumusan Masalah:
Bagaimana pengaruh *binder* energetik terhadap sifat energetik dan asap dari propelan padat komposit dengan *ProPEP*?

Process



Output

Analisis

Hasil analisis berupa data hasil uji karakteristik energetik dan asap (Isp, komposisi gas hasil pembakaran HCl dan Al_2O_3)

Bagan 2.1 Kerangka Pemikiran