

# **EVALUASI TEKNIK PENIMBANGAN HIDROSTATIK PADA PENGUKURAN DENSITAS PROPELAN PADAT KOMPOSIT (EVALUATION OF HYDROSTATIC WEIGHING TECHNIQUE IN COMPOSITE SOLID PROPELLANT DENSITY MEASUREMENT)**

**Luthfia Hajar Abdillah<sup>1</sup>, Afni Restasari, Kendra Hartaya, Ratna Rizky Puspitasari**

**Pusat Teknologi Roket**

**Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)**

**Jl. Raya Lapan No.2 Mekar Sari, Rumpin, Bogor 16350, Jawa Barat**

**<sup>1</sup>e-mail: lu\_haab@yahoo.com**

**Diterima: 28 Desember 2017; Direvisi: 6 Februari 2018; Disetujui: 30 Mei 2018**

## **ABSTRACT**

Density is one of important characteristics of solid composite propellant. It is used in simulation and process design of rocket motor to get desired performance of the rocket. Density measurement performed so far using hydrostatic weighing techniques that involve sample weighing in water, it possible to occur deviation of the measurement. The objective of this study was to find out propellant density deviation by hydrostatic weighing techniques and found the suitable way to measure propellant density by hydrostatic weighing techniques that could obtain the appropriate value of propellant density. Propellant samples were measured by two instruments called densitometer to find the deviation. From the research, it found that propellant density deviation was 2.08% to 5.58% with any time delay on water weighing reading of the sample.

Keywords: *propellant density, deviation, hydrostatic weighing techniques*

## **ABSTRAK**

Densitas menjadi salah satu data karakteristik propelan padat komposit yang penting. Data nilai densitas propelan ini digunakan dalam proses simulasi dan perancangan motor roket untuk mendapatkan performa roket yang diinginkan. Pengukuran densitas yang dilakukan selama ini menggunakan teknik penimbangan hidrostatik yang melibatkan pengukuran berat sampel di dalam air, sehingga dimungkinkan terjadi penyimpangan hasil pengukuran. Untuk itu tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya penyimpangan nilai densitas propelan yang terjadi dan mengetahui cara pengukuran yang tepat melalui teknik penimbangan hidrostatik sehingga menghasilkan nilai densitas yang lebih sesuai. Beberapa sampel propelan diukur densitasnya menggunakan dua instrumen densitometer untuk melihat adanya penyimpangan hasil pengukuran. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa penyimpangan nilai densitas propelan yang terjadi berkisar antara 2,08% hingga 5,58% dengan adanya *delay* pembacaan berat sampel di air.

Kata kunci: *densitas propelan, penyimpangan, teknik penimbangan hidrostatik*

## 1 PENDAHULUAN

Bahan bakar roket padat biasanya menggunakan propelan padat komposit, disamping ada juga yang menggunakan propelan *double base*. Propelan yang dibahas di dalam makalah ini terbatas pada propelan padat komposit skala *K-Round*. Propelan skala *K-Round* merupakan propelan dengan dimensi diameter dalam, diameter luar dan panjang berturut-turut sebesar 26 mm, 59 mm dan 200 mm (Abdillah et al, 2014). Penelitian propelan skala *K-Round* ini sebagai referensi untuk pembuatan propelan dengan ukuran diameter yang lebih besar berdasarkan hasil pengujian karakteristiknya.

Data properti atau karakteristik propelan merupakan data yang penting di dalam proses simulasi dan perancangan motor roket, untuk mendapatkan performa roket yang diinginkan. Salah satunya adalah data densitas propelan (Platzek, 1975). Propelan padat dengan *solid loading* yang tinggi (86-89%) memiliki *range* densitas antara 1,75 – 1,8 g/ml. Performa *overall* dari motor roket ditentukan oleh *density impulse* ( $I_{sp} \times \text{densitas}$ ) daripada  $I_{sp}$  (Varghese et al, 2017). Dengan adanya kesalahan pengukuran densitas propelan akan menyebabkan kesalahan perhitungan performa *overall* dari motor roket yang dapat dicapai. Densitas juga dapat digunakan sebagai indikasi porositas propelan atau teknik pemrosesan yang kurang bagus (Ramnarace, 2015).

Teknik pengukuran densitas yang tradisional adalah menggunakan teknik penimbangan hidrostatis, yaitu teknik yang menggunakan penimbangan berat sampel di udara maupun di air (air sebagai media *liquidnya*). Bagaimanapun, tidak semua material sesuai untuk penentuan densitas dengan metode ini. Banyak material yang tidak

cocok jika penentuan densitasnya dengan cara dicelupkan ke air. Banyak logam dan alloy dapat bereaksi dengan air. Demikian pula sampel material *porous* (berpori), sampel *solid* kecil, bubuk dan partikulat tidak cocok dengan teknik pencelupan ke dalam media *liquid*. Sampel-sampel tersebut membutuhkan teknik pengukuran yang berbeda untuk menentukan densitasnya (Davidson et al, 2010).

Material *porous* (berpori), dapat didefinisikan dua macam densitas yang berbeda yaitu *apparent density* dan *true density*. *Apparent density* didefinisikan sebagai massa material per unit volume eksternal, yang mana semua pori yang terdapat di dalam massa material termasuk di dalamnya. *True density* didefinisikan sebagai massa material per unit volume *real*, yang secara prinsip merupakan volume material tanpa adanya pori sama sekali, walaupun dalam prakteknya sebagian besar metode tidak memperhitungkan pori-pori tertutup maupun pori yang sangat sempit (Keulen, 1973).

Propelan dapat dikategorikan ke dalam material padat berpori, komponen utamanya adalah AP yang merupakan senyawa oksidator kuat berupa partikel (kristal) padat berwarna putih. AP memiliki sifat larut di dalam air dan metanol, larut sebagian di dalam aseton, etanol, propanol, dan tidak larut di dalam kloroform, diklorometan, dietil eter, etil asetat, hexan, toluen, xylen ([http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium\\_perchlorate](http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium_perchlorate)).

AP termasuk dalam senyawa yang bersifat polar. Senyawa polar dapat melarut di dalam senyawa polar pula, misal air dan etanol (Kurtus, 2016). Kelarutan AP di dalam air adalah 17,9 g / 100 g larutan pada 20 °C dan semakin bertambah seiring dengan adanya kenaikan suhu (Ayerst et al, 1966).

Perhitungan nilai densitas bahan *liquid* maupun bahan *solid* mengikuti persamaan (1-1) dan (1-2) berturut-turut: (Instruction Manual AD-1653).

$$\rho_0 = \frac{-C}{V} + d \quad (1-1)$$

$\rho_0$  merupakan densitas *liquid* ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $V$  sebagai volume *float* yang besarnya adalah  $10,01 \text{ cm}^3$ , sementara  $d$  adalah densitas udara dengan nilai sebesar  $0,001 \text{ g}/\text{cm}^3$  ( $25^\circ\text{C}$ ), dan  $C$  adalah berat *float* di dalam *liquid* (g).

Untuk perhitungan densitas *solid* menggunakan persamaan (1-2) :

$$\rho = \frac{A}{A-B} \times \rho_0 \quad (1-2)$$

Dimana  $\rho$  merupakan densitas *solid* ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ),  $A$  adalah berat sampel di udara (g) dan  $B$  adalah berat sampel di air (g)

Cara pengukuran densitas propelan di Lapan sering diasumsikan sama dengan cara pengukuran densitas bahan *solid* standar (tak berpori), yaitu dengan teknik penimbangan hidrostatik yang menggunakan media *liquid* berupa air, sedangkan propelan merupakan bahan *solid* berpori yang salah satu komponennya yaitu ammonium perklorat (AP) bersifat larut dalam air. Hal tersebut dapat mengakibatkan penyimpangan pengukuran nilai densitas propelan. Dengan demikian tujuan dari makalah ini adalah untuk mengetahui besarnya penyimpangan nilai densitas propelan yang terjadi dan mengetahui cara pengukuran yang tepat melalui teknik penimbangan hidrostatik sehingga menghasilkan nilai densitas yang lebih sesuai.

## 2 METODOLOGI

Instrumen yang digunakan untuk penentuan densitas menggunakan

teknik penimbangan hidrostatik disebut densitometer, yang secara umum dapat digunakan untuk mengukur densitas dari material *solid* maupun *liquid*. Metode pengukuran densitas material *solid* biasanya untuk pengukuran material-material *solid* standar (tak berpori) seperti balok/plat logam. Untuk material *liquid* biasanya digunakan untuk pengukuran *liquid-liquid* standar yang sangat encer. (Instruction Manual AD-1653).

Penelitian dilakukan di Laboratorium Komposisi Dasar, Pusat Teknologi Roket, LAPAN. Propelan yang akan diukur densitasnya berasal dari beberapa macam batch proses. Beberapa sampel diambil dari masing-masing propelan dan diukur nilai densitasnya selanjutnya dirata-rata. Pengukuran densitas menggunakan dua macam densitometer sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2-1 (a) dan 2-1(b). Pada instrumen 1, hasil pengukuran densitas dilakukan otomatis oleh instrumen, sehingga angka yang muncul pada *display* adalah nilai densitas bahan yang diukur. Pada instrumen 1 ini terdapat pilihan menu jenis bahan yang akan diukur antara lain, bahan *solid*, bahan *liquid*, dan bahan *porous solid*. Untuk propelan dipilih menu jenis bahan "*porous solid*". Oleh karena itu instrumen 1 dijadikan sebagai acuan nilai densitas propelan yang diukur. Pada instrumen 2 tidak terdapat pilihan menu jenis bahan, sehingga untuk pengukuran densitas propelan diasumsikan sama dengan cara pengukuran bahan *solid* standar lainnya. Disamping itu hasil pengukuran densitas dari instrumen 2 ini dihitung terlebih dahulu secara manual (tidak langsung muncul pada *display*).

Pengukuran dengan instrumen 2 ini dilakukan dalam dua macam cara yaitu dengan dan tanpa adanya *delay* pembacaan berat sampel di air.



(a)



(b)

Gambar 2-1: Densitometer, (a) Precisa 180-A (Instrumen 1); (b) AND HR-200 (Instrumen 2)

Pengukuran nilai densitas pada kedua instrumen dilakukan pada 30 sampel dari masing-masing jenis propelan yang selanjutnya diambil nilai rata-ratanya.

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran densitas dengan teknik penimbangan hidrostatis sebenarnya tidak cocok untuk objek/material berpori karena akan menyerap air dan membuat penimbangan di air menjadi tidak stabil, serta tidak cocok juga untuk material *solid* yang berukuran sangat kecil dikarenakan keterbatasan akurasi pada penentuan berat di air (Davidson et al, 2010).

Propelan bisa dikategorikan ke dalam material berpori. Penentuan densitas untuk material berpori adalah dengan menggunakan metode penimbangan di dalam gas *inert* karena teknik ini tidak memerlukan penimbangan berat di dalam air. Teknik berdasarkan gas *inert* ini dapat digunakan untuk menentukan densitas dari massa standar tanpa mempengaruhi permukaan timbangan dan kehilangan sejarah nilai kalibrasinya (Davidson et al, 2010). Tetapi karena keterbatasan instrumentasi yang dimiliki, maka pengukuran densitas propelan berusaha didekati dengan teknik penimbangan hidrostatis dengan memperkecil peluang penyimpangan.

Densitas propelan yang diukur pada penelitian ini dapat dikategorikan sebagai *apparent density* yaitu densitas per unit volume eksternal (Keulen, 1973). Untuk menentukan *true density* dari propelan akan lebih rumit karena harus memperhitungkan volume pori di dalamnya untuk mendapatkan *real volume* dari sampel, sementara AP sebagai komponen utama propelan memiliki sifat larut ke dalam air sehingga *real volume* sampel tidak bisa didapatkan karena volume sampel akan selalu berkurang akibat adanya partikel AP yang terlarut dalam air. Oleh karena itu densitas propelan yang bisa diukur/didekati adalah *apparent density* nya.

Pengukuran densitas propelan yang dilakukan menggunakan air sebagai media *liquidnya*. Penggunaan air ini memiliki kelemahan dapat melarutkan AP di dalam propelan yang menyebabkan adanya penyimpangan nilai densitas. Oleh karena itu perlu dicari cara yang tepat untuk mendapatkan nilai densitas yang benar meskipun menggunakan air sebagai media *liquidnya*.

Untuk mendapatkan nilai densitas sampel, pada kedua instrumen dilakukan pengukuran berat sampel di udara dan pengukuran berat sampel di air. Pada instrumen 1 terdapat pilihan menu “*porous solid*” yang mana hal ini dapat dianggap sesuai dengan sampel propelan yang merupakan bahan *porous solid*, sehingga hasil pengukuran dari instrumen 1 ini dijadikan sebagai acuan.

Pada instrumen 1, hasil pengukuran berat sampel di air akan langsung muncul nilainya ketika tombol menu *porous solid* ditekan, sedangkan pada instrumen 2 berat sampel di air yang muncul di dalam *display* berubah-ubah dan cenderung menurun. Jika berat sampel di air yang muncul pada *display* tidak langsung dibaca dan menunggu hingga berat sampel relatif stabil, ini disebut dengan adanya *delay* waktu pembacaan.

Untuk mengetahui apakah *delay* pembacaan tersebut menyebabkan penyimpangan nilai densitas, maka dilakukan penelitian lanjutan sebagai bahan perbandingan. Dilakukan pengukuran kembali menggunakan kedua instrumen tersebut pada beberapa sampel dari *batch* proses propelan yang lain. Langkah pengukuran dengan instrumen 1 dilakukan seperti biasa, sedangkan pengukuran dengan instrumen 2 dilakukan tanpa adanya *delay* waktu pembacaan nilai berat sampel di air, artinya pembacaan nilai berat sampel di air langsung dilakukan sesaat setelah sampel dimasukkan ke dalam *lower pan* pada instrumen 2 tanpa menunggu nilai yang ditampilkan dalam *display* menjadi stabil terlebih dahulu.

Propelan no.1 sampai no.8 menggunakan komposisi bahan dan

*treatment* yang masing-masing berbeda, sedangkan no.9 sampai no.15 menggunakan komposisi bahan yang sama tetapi dengan *treatment* yang berbeda.

Pada persamaan (3-1) ditampilkan nilai densitas teoritis propelan yang dihitung dari massa dan densitas masing-masing bahan penyusunnya atau bisa disebut sebagai nilai *true density* (Toft, 2002)

$$\rho_{teo} = \frac{\sum_N m_i}{\sum_N \rho_i} \quad (3-1)$$

Nilai densitas hasil pengukuran (*actual density*) atau bisa disebut dengan *apparent density* mengikuti persamaan (2-1) dan (2-2) untuk Inst-2, sedangkan nilai *actual density* untuk Inst-1 dapat langsung dilihat pada *display* instrumen.

Hasil perhitungan teoritis dan pengukuran nilai densitas dengan dan tanpa adanya *delay* waktu pembacaan ditampilkan pada Tabel 3-1 dan Tabel 3-2 secara berturut-turut.

Untuk nilai densitas teoritis pada no.1 sampai no.8 memiliki nilai yang berbeda-beda karena diberlakukan komposisi yang berbeda, perbedaan komposisi ini berpengaruh pada nilai densitas berdasarkan persamaan (3-1). Perbedaan nilai densitas berdasarkan perbedaan komposisi bukan menjadi pokok bahasan di dalam makalah ini. Dalam makalah ini hanya akan dibahas perbedaan nilai densitas akibat dari *treatment* pada proses pengukuran densitasnya, bukan *treatment* pada proses pembuatannya.

Tabel 3-1: HASIL PENGUKURAN NILAI DENSITAS PROPELAN DENGAN ADANYA *DELAY* WAKTU PEMBACAAN PADA INST-2

Propelan	Densitas Propelan (g/ml)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Teoritis	1.6939	1.6980	1.6803	1.6717	1.6717	1.6898	1.6939	1.6980
Inst-1	1.6702	1.6603	1.5619	1.675	1.5565	1.6797	1.6915	1.6704
Inst-2	1.6059	1.6148	1.6035	1.6211	1.4679	1.6447	1.6409	1.6313
Selisih (%)	3.85	2.74	-2.66	3.19	5.58	2.08	2.99	2.34

sumber : laporan tahun 2013

Tabel 3-2: HASIL PENGUKURAN NILAI DENSITAS TANPA ADANYA *DELAY* WAKTU PEMBACAAN PADA INST-2

Propelan	Rata-Rata Nilai Densitas (g/ml)						
	9	10	11	12	13	14	15
Teoritis	1.6793	1.6793	1.6793	1.6793	1.6793	1.6793	1.6793
Inst-1	1.3799	1.4121	1.4121	1.4242	1.4440	1.4308	1.4599
Inst-2	1.3656	1.4051	1.4140	1.4216	1.4406	1.4208	1.4541
Selisih (%)	1.03	0.49	-0.13	0.18	0.24	0.70	0.40

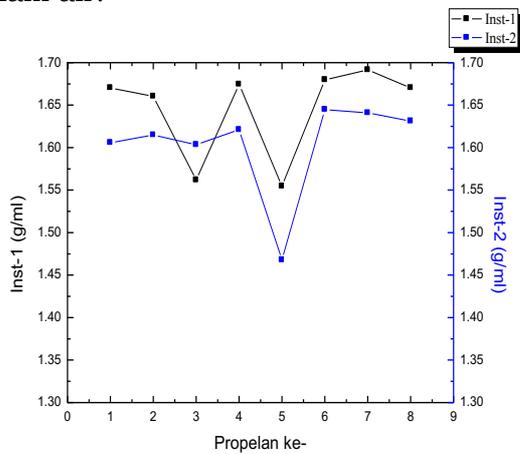
Propelan no.9 sampai no.15 diproses menggunakan komposisi yang sama sehingga nilai densitas teoritisnya memiliki nilai yang sama pula. Nilai densitas teoritis baik pada Tabel 3-1 maupun Tabel 3-2 relatif lebih tinggi daripada *actual density* yang terukur dari Inst-1 maupun Inst-2, hal ini karena sampel yang diukur sangat *porous* (memiliki banyak pori) sehingga *actual density*-nya jauh lebih kecil dari nilai yang seharusnya.

Dari Tabel 3-1 dapat dilihat bahwa hasil pengukuran densitas dari Inst-1 dan Inst-2 memiliki selisih nilai yang relatif besar yaitu antara 2,08% hingga 5,58%. Sementara dari Tabel 3-2 dapat dilihat bahwa tanpa adanya *delay* waktu pembacaan berat sampel di air, nilai densitas propelan yang terukur dari kedua instrumen tersebut relatif sama dan tidak jauh berbeda dengan selisih

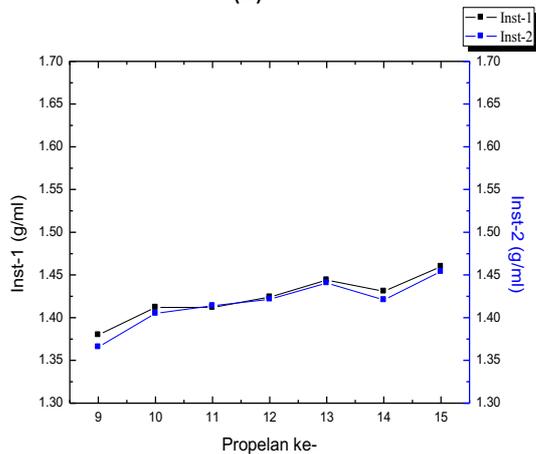
hasil pengukuran antara instrumen 1 dan instrumen 2 sebesar 0,13% hingga 1,03%. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya *delay* waktu pembacaan nilai densitas dapat mempengaruhi hasil pengukuran nilai densitas propelan. Hal ini tentunya akan membuat kesalahan data karakteristik propelan yang akan digunakan dalam proses perancangan maupun simulasi performa motor roket. Penyimpangan densitas propelan hasil pengukuran instrumen 2 terhadap nilai densitas hasil pengukuran dari instrumen 1 dengan maupun tanpa adanya *delay* waktu pembacaan dapat dilihat pada Gambar 3-1 (a) dan (b).

Dengan adanya *delay* waktu pembacaan, nilai densitas dari pengukuran instrumen 2 cenderung lebih kecil dari hasil pengukuran instrumen 1 seperti terlihat pada Gambar 3-1 (a). Hal ini dikarenakan

melarutnya sebagian partikel AP di dalam media *liquid* (air), maka nilai berat sampel di air yang tercatat sudah tidak mewakili berat sampel di air yang sebenarnya sehingga perhitungan nilai densitas berdasarkan persamaan (1-2) pun akan berbeda. Selain itu juga dapat mempengaruhi nilai densitas *liquid* berdasarkan persamaan (1-1), karena media air yang digunakan untuk pengukuran densitas akan mengalami pergeseran nilai densitas *liquid* akibat dari terakumulasinya zat terlarut (AP) di dalam air.



(a)



(b)

Gambar 3-1: Penyimpangan Densitas Inst-2 terhadap Inst-1, (a) dengan adanya *delay*; (b) tanpa adanya *delay*

Seperti yang diketahui bahwa AP bersifat larut dalam air dengan nilai

kelarutan sebesar 17,9 g / 100 g larutan pada suhu 20°C dan nilai kelarutan ini akan semakin besar seiring dengan kenaikan suhu (Ayerst et al, 1966). Sementara pengukuran dilakukan pada suhu kamar (sekitar 30°C) dan media *liquid* yang digunakan dalam pengukuran sebanyak 300 ml, maka kemungkinan partikel AP di dalam propelan untuk ikut terlarut di dalam air akan semakin besar. Selain itu ukuran partikel AP yang terkecil di dalam propelan adalah sekitar 50  $\mu\text{m}$ . Dengan ukuran yang kecil ini partikel AP sangat mudah untuk melarut di dalam air karena semakin kecil ukuran partikel dapat meningkatkan laju kelarutan (Smith, 2015).

Sementara tanpa adanya *delay* waktu pembacaan, nilai densitas dari pengukuran instrumen 2 relatif sama dengan hasil pengukuran instrumen 1 seperti terlihat pada Gambar 3-1(b). Hal ini berarti tanpa adanya *delay* waktu pembacaan, maka volume sampel yang terukur adalah volume eksternal yang benar karena hampir tidak ada kesempatan partikel AP untuk melarut di dalam air (kesempatannya sangat kecil). Dengan demikian untuk mendapatkan nilai densitas propelan yang sesuai menggunakan teknik penimbangan hidrostatik masih dapat dilakukan dengan catatan bahwa tidak diperbolehkan adanya *delay* waktu pembacaan berat sampel di air pada pengukuran menggunakan instrumen 2.

Adanya *delay* waktu pembacaan nilai berat sampel di media *liquid* ini masih dapat ditolerir jika media *liquid* yang digunakan bukan air, misalnya menggunakan benzene (Varghese et al, 2017), zinc klorida (Ramnarace, 2015), ataupun *liquid* lain yang tidak dapat melarutkan komponen-komponen di dalam propelan terutama AP, misal seperti kloroform, diklorometan, dietil

eter, etil asetat, hexan, toluene, xylen ([http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium\\_perchlorate](http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium_perchlorate)), tetapi penggunaan media *liquid* tersebut membutuhkan *cost* yang lebih besar daripada penggunaan air.

#### 4 KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan bahwa terjadi penyimpangan nilai densitas propelan antara 2,08% hingga 5,58% dengan adanya *delay* pembacaan berat sampel di air. Cara pengukuran yang benar untuk mendapatkan nilai densitas propelan yang sesuai melalui teknik penimbangan hidrostatis adalah dengan meniadakan *delay* pembacaan berat sampel di air.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Tim formulasi dan komposisi Pustekroket, LAPAN yang telah membantu jalannya proses penelitian ini, juga kepada segenap Tim Redaksi Jurnal Teknologi Dirgantara atas saran dan masukan untuk dapat terselesaikannya makalah ini.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Abdillah, L.H dan Ardianingsih, R., (2014). *Peninjauan Homogenitas Propelan Skala K-Round Berdasarkan Varians Nilai Kalor*, Jurnal Teknologi Dirgantara Vol. 12 No. 1, 11-18.
- Ayerst, R.P and Phillips, M.I., (1966). *Solubility and Refractive Index of Ammonium Perchlorate in Water*. Journal of Chemical and Engineering Data Vol.11 no.4, 494-496.
- Davidson, S and Perkin, M., (2010). *An Investigation of Density Determination*

*Methods for Porous Materials, Small Samples and Particulates*. IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences Metrology in Modern Context, 69-72.

[http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium\\_perchlorate](http://www.sciencemadness.org/smwiki/index.php/Ammonium_perchlorate). diunduh: 25 oktober 2017.

Instruction Manual AD-1653.

Keulen, J.V., (1973). *Density of Porous Solid*. *Materiaux et Constructions* Vol. 6 N.33, 181-183.

Kurtus, R., (2016). *Polar and Non-Polar Molecules*. [http://www.school-for-champions.com/chemistry/polar\\_molecules.htm#.Wemqf\\_m0Ndg](http://www.school-for-champions.com/chemistry/polar_molecules.htm#.Wemqf_m0Ndg). diunduh: 20 oktober 2017.

Platzek, H. (1975). *Preliminary Solid Rocket Motor Design Techniques*. NWC Technical Memorandum 2953.

Prangili, S. (2013). *Laporan Akhir Kegiatan poklit Komposisi Dasar Tahun 2013*.

Ramnarace, J. (2015). *Rocket Propellant Technology*. 1<sup>st</sup> ed. Page Publishing, Inc.

Smith, Blaine Templar., (2015). *Remington Education: Physical Pharmacy eBook* 1<sup>st</sup> ed. ISBN : 978 0 85711 252 1. <http://www.pharmpress.com/files/docs/remington-education-physical-pharmacy-sample-chapter-3.pdf>. diunduh: 27 oktober 2017.

Toft, H.O., (2002). *Voids in Solid Propellants*. Dansk Amator Raket Klub. [http://dark.dk/documents/technical\\_notes/voids.pdf](http://dark.dk/documents/technical_notes/voids.pdf)

Varghese, T.L and Krishnamurthy, V.N., (2017). *The Chemistry and Technology of Solid Rocket Propellants (A Treatise on Solid Propellants)*. 1<sup>st</sup> ed. Allied Publishers PVT, LTD.

Pustekroket, (2013). *Laporan 2013, Pustekroket, LAPAN, Bogor*.