

Desain dan Analisis Geometri *Propellant Grain Configuration* pada Roket Padat

Muhammad Ihsan Abyan^{1*}, Aang Nuryaman¹, Bagus Hayatul Jihad², Soleh Fajar Junjunan²

¹Jurusan Matematika, Fakultas MIPA, Universitas Lampung
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung

²Pusat Teknologi Roket Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional,
Jl. Raya Lapan No. 2 Mekar Sari, Rumpin Bogor 16350, Jawa Barat

*Email korespondensi: ihsanabyan@gmail.com

Abstrak

Pada artikel ini dikaji mengenai model matematika *propellant grain configuration* untuk mendapatkan luasan pembakaran yang sesuai pada roket sonda. Roket sonda adalah roket percobaan yang dibuat oleh Pustekroket LAPAN untuk menunjang penelitian di bidang antariksa dengan jarak ketinggian sebagai sasaran penilaian. Luasan pembakaran untuk *grain propellant* model *hollow grain*, *wagon wheel grain*, dan *star grain* dikaji secara analitik melalui pemodelan matematika menggunakan konsep geometri agar didapatkan formula yang sesuai untuk tiap model *grain propellant*. Hasil yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan menggunakan perhitungan manual menggunakan bantuan *software SolidWork*. Yang dimaksud manual adalah menambahkan fillet pada *grain* kemudian dihitung satu per satu panjang dari tiap fillet tersebut sehingga ini membutuhkan waktu yang lama. Hasil menunjukkan bahwa luasan pembakaran ketiga model *grain* tersebut tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan pada kedua metode yang artinya formula yang didapatkan dari perhitungan analitik sudah valid.

Kata kunci : hollow, wagon wheel, star, luasan pembakaran.

Abstract

In this article, we examine the *propellant grain configuration* mathematical model to obtain a suitable combustion area for a sonda rocket. The sonda rocket is an experimental rocket made by Pustekroket LAPAN to support research in the field of space with an altitude as the target of the assessment. The area of combustion for the hollow grain model of grain propellant, wagon wheel grain, and star grain was analyzed analytically through mathematical modeling using the concept of geometry in order to obtain an appropriate formula for each grain propellant model. The results obtained are then compared using manual calculations using SolidWork software. What is meant by manual is adding fillets to the grain and then counting one by one the length of each fillet so that this takes a long time. The results show that the burning area of the three grain models does not show a significant difference in the two methods, which means that the formula obtained from the analytical calculation is valid.

Keywords: hollow, wagon wheel, star, area of combustion

1. Pendahuluan

Grain adalah massa berbentuk propelan padat yang diproses di dalam motor roket [1]. Bahan propelan dan konfigurasi geometri dari *grain* menentukan karakteristik kinerja motor dan didesain untuk memenuhi berbagai persyaratan agar sebuah roket dapat beroperasi dengan baik. Sebagian besar motor roket memiliki *grain* tunggal, beberapa motor roket memiliki lebih dari satu *grain* di dalam komponen motor roketnya, dan sangat sedikit *grain* yang memiliki segmen yang terbuat dari komposisi propelan yang berbeda.

Salah satu contoh roket yang menggunakan *grain* tunggal adalah RX-450 di Pusat Teknologi Roket Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (Pustekroket LAPAN). RX-450 memiliki panjang keseluruhan 6200 mm dan panjang *propellant* (L) 3700 mm. RX menandakan bahwa roket ini masih dalam status eksperimen sedangkan 450 menandakan diameter luar dari roket tersebut adalah 450 mm. RX-450 merupakan kelanjutan dari RX-420 dan merupakan roket eksperimen terbaru yang dikembangkan oleh Pustekroket LAPAN untuk menjawab tantangan roket 3-digit yakni roket yang memiliki jangkauan lebih dari 100 km.

Dalam [2] telah diuraikan secara ringkas mengenai *grain propellant configuration* pada berbagai macam model *grain* diantaranya *star grain* dan *wagon wheel grain*. Kemudian penelitian tentang *grain propellant configuration* berkenaan dengan langkah-langkah mendapatkan setiap persamaan pada *star grain* juga telah dilakukan (lihat [3]). Akan tetapi *grain configuration* pada motor roket yang digunakan oleh Pustekroket

LAPAN terdapat perbedaan, yaitu *fillet* tambahan pada bagian sudut yang mengarah pada pusat grain. Hal ini dilakukan untuk menghindari tegangan dan tekanan berlebihan pada *propellant grain* yang dapat menyebabkan kerusakan pada konfigurasi sehingga hasil yang didapatkan tidak optimal dan juga penambahan *fillet* akan berpengaruh pada luasan pembakaran. Jika luasan pembakaran berubah maka akan mengubah gaya dorong yang dihasilkan pula dikarenakan luasan pembakaran berbanding lurus dengan gaya dorong yang dihasilkan. Oleh karena itu, pada artikel ini akan diberikan *grain propellant configuration* pada *hollow grain*, *wagon wheel grain*, dan *star grain* berdasarkan *grain configuration* yang diaplikasikan pada kebanyakan roket di Pustekroket LAPAN.

2. Metode Penelitian

Data fisis roket yang digunakan berdasarkan data Pustekroket LAPAN. Tahapan dalam penelitian ini dimulai dengan mendesain model *propellant grain* yang sesuai dengan versi Pustekroket LAPAN. Kemudian menganalisis luasan pembakaran setiap model secara analitik dengan menggunakan konsep geometri khususnya trigonometri. Teori-teori ini dapat dijumpai pada beberapa buku referensi diantaranya [4-5].

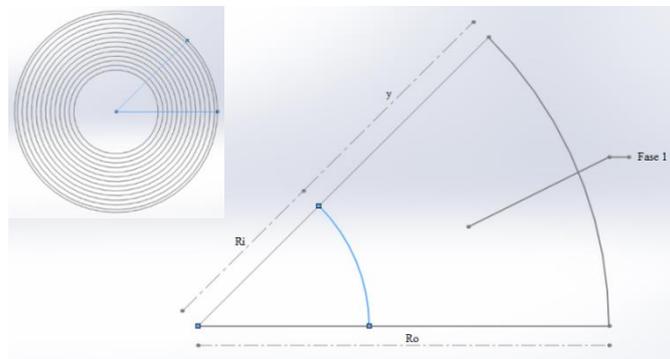
Berdasarkan setiap persamaan model matematika yang diperoleh, luasan pembakaran kemudian dihitung secara numerik. Sebagai validasi, luasan pembakaran yang diperoleh dibandingkan dengan perhitungan manual menggunakan *SolidWork*. Keakuratan hasil yang diperoleh berdasarkan model matematika menggunakan konsep trigonometri dinyatakan dalam bentuk persentase galat relatif antara luasan pembakaran secara numerik (*dML*) dan luasan menggunakan *SolidWork* (*dSW*) sebagai berikut [6]:

$$\% \text{ Galat} = \frac{\sum |dML - dSW|}{\sum dSW} \times 100\% \quad (1)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hollow Grain

Hollow grain configuration adalah model grain yang paling sederhana yakni berbentuk lingkaran sehingga hanya memiliki satu fase seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Persamaan luasan pembakaran dari *hollow grain* adalah keliling dari sebuah lingkaran. *Hollow grain configuration* memiliki dua parameter yaitu jari-jari luar grain (*Ro*) dan jari-jari dalam grain (*Ri*).



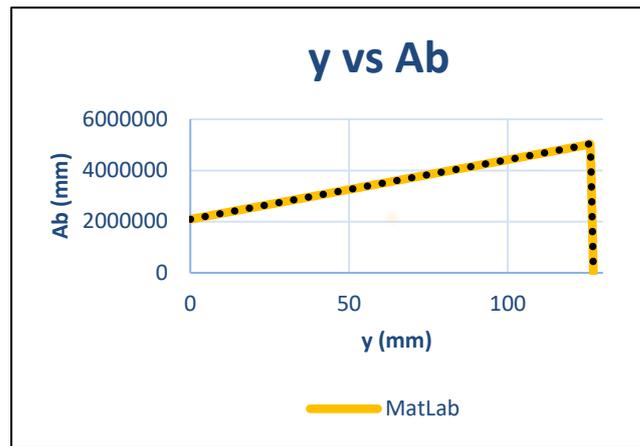
Gambar 1. *Hollow Grain Configuration*

Pada *hollow grain* terdapat batasan yakni perbesaran konfigurasi (y) tidak boleh melewati R_o dikarenakan R_o adalah ketebalan maksimum dari *propellant* berbentuk *hollow* sehingga berlaku syarat

$$y \leq R_o - R_i \quad (2)$$

dengan persamaan luasan pembakaran sebagai berikut.

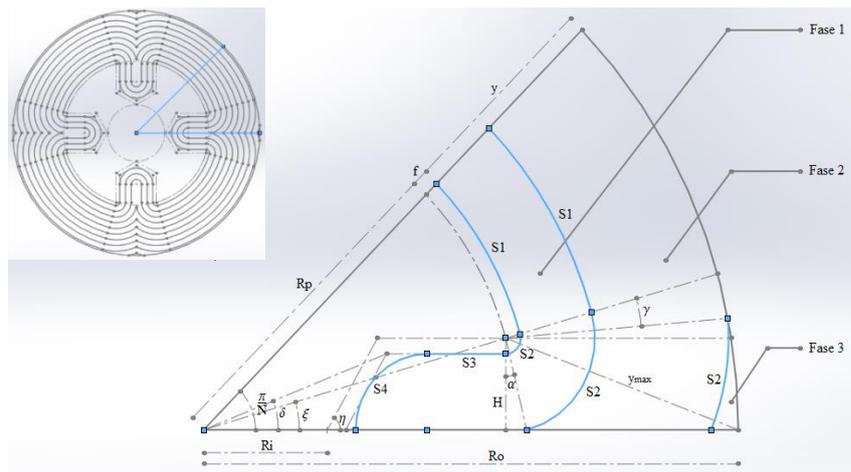
$$Ab = 2\pi(R_i - y) \quad (3)$$



Gambar 2. Validasi *Hollow Grain* untuk $R_o = 216 \text{ mm}$ dan $R_i = 96 \text{ mm}$

Dari hasil validasi yang disajikan pada Gambar 2, didapatkan galat relative antara luasan pembakaran hasil model matematika yang dihitung secara numeric dan luas pembakaran yang dihitung dengan SolidWork sebesar 1.34×10^{-5} . Galat yang kecil menunjukkan bahwa persamaan luasan pembakaran yang didapatkan sudah dapat dikatakan sangat baik yaitu galat yang dihasilkan dari kedua metode mendekati nol.

3.2 Wagon Wheel Grain



Gambar 3. *Wagon Wheel Grain Configuration*

Wagon wheel Grain, lihat Gambar 3, memiliki tujuh parameter yaitu jari-jari luar *grain* (R_o), jari-jari dalam *grain* (R_i), jari-jari *grain configuration* (R_p), *fillet* (f), sudut yang menghadap ke pusat *grain* (η), sudut dari *grain configuration* (ξ), dan banyaknya *spoke* (N). Geometri *wagon wheel* memiliki batasan untuk *spoke* tidak boleh tumpang tindih karena akan menyebabkan berubahnya bentuk konfigurasi *grain*. Tumpang tindihnya *spoke* sangat dipengaruhi oleh nilai δ yang dapat didefinisikan sebagai berikut

$$\delta < \frac{\pi}{N} \tag{4}$$

Berdasarkan Gambar 3 dan aturan trigonometri sederhana maka δ dapat kita peroleh dengan menggunakan persamaan

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{H+y}{R_i + \frac{f}{\sin(\eta)} + \frac{H+y}{\tan(\eta)}} \right) \tag{5}$$

dengan

$$H = R_p \sin(\xi) - y - f \tag{6}$$

Pada *wagon wheel grain* terdapat perubahan sudut pada fase kedua dan ketiga yang dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{Rp \sin(\xi)}{y+f} \right) \quad (7)$$

$$\gamma = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{Ro^2 - Rp^2 - (f+y)^2}{-2Rp(f+y)} \right) \quad (8)$$

Pada fase pertama *wagon wheel grain* terdapat batasan yaitu perbesaran konfigurasi (y) tidak boleh melewati H sehingga berlaku syarat

$$y < H \quad (9)$$

dengan persamaan pada luasan pembakaran sebagai berikut.

$$S_1 = \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) (Rp + f + y) \quad (10)$$

$$S_2 = \left(\frac{\pi}{2} + \xi \right) (f + y) \quad (11)$$

$$S_3 = Rp \cos(\xi) - Ri - \left(\frac{f+y+H}{\sin(\eta)} \right) \quad (12)$$

$$S_4 = \left(\frac{\pi}{2} \right) (H) \quad (13)$$

$$Ab_1 = 2N(S_1 + S_2 + S_3 + S_4)L \quad (14)$$

Pada fase kedua *wagon wheel grain* terdapat batasan yang baru yaitu terjadi ketika $H = 0$ sehingga berlaku syarat

$$y \geq Rp \sin(\xi) - f \quad (15)$$

dengan persamaan pada luasan pembakaran sebagai berikut.

$$S_1 = \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) (Rp + f + y) \quad (16)$$

$$S_2 = \left(\frac{\pi}{2} + \xi - \alpha \right) (f + y) \quad (17)$$

$$Ab_2 = 2N(S_1 + S_2) \quad (18)$$

Pada fase ketiga *wagon wheel grain* dimulai ketika

$$y > R_o - R_p - f \quad (19)$$

dengan persamaan luasan pembakaran

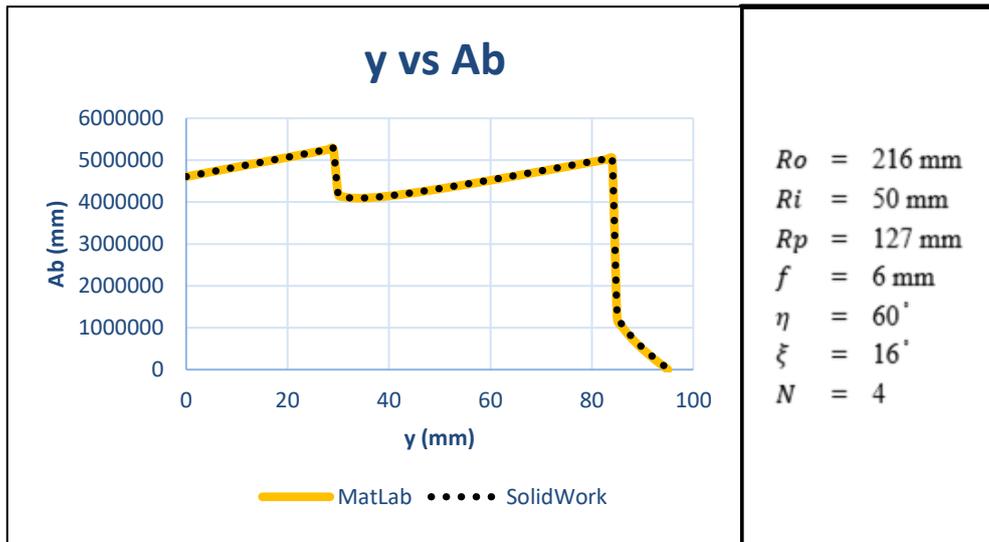
$$S_2 = \left(\frac{\pi}{2} + \xi - \alpha - \gamma \right) (f + y) \quad (20)$$

$$Ab_3 = 2N(S_2) \quad (21)$$

dan fase ketiga berakhir pada saat y mencapai y_{max} yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$y_{max} = \sqrt{(Ro - Rp \cos(\xi))^2 + (Rp \sin(\xi))^2} - f \quad (22)$$

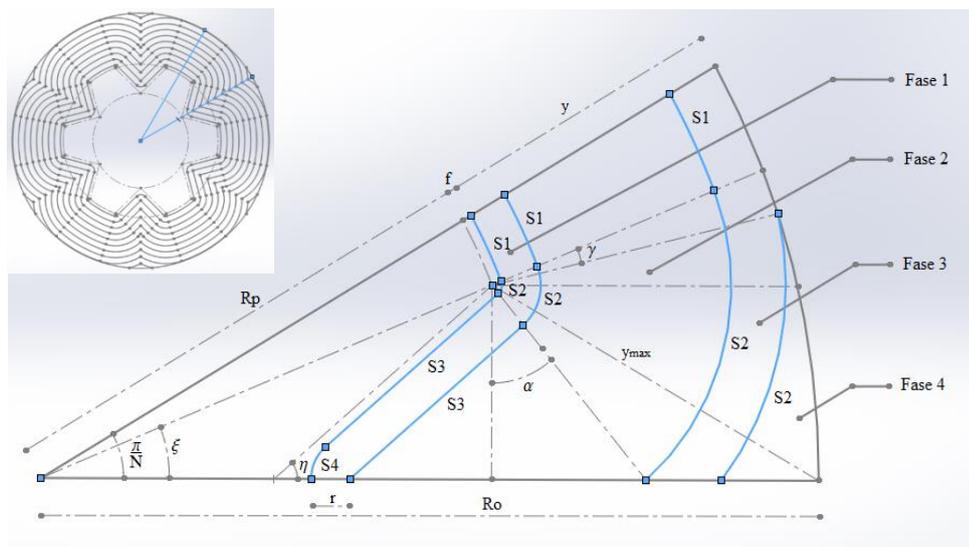
Hasil dari program yang dibuat berdasarkan persamaan *wagon wheel grain* dan dibandingkan menggunakan perhitungan manual menggunakan *SolidWork* di tunjukkan pada Gambar 4. Galat relatif yang muncul sebesar 2.3×10^{-3} . Galat yang mendekati nol menunjukkan bahwa persamaan luasan pembakaran yang didapatkan sudah dapat dikatakan baik.



Gambar 4. Validasi Wagon Wheel Grain

3.3 Star Grain

Star Grain memiliki tujuh parameter yakni jari-jari luar grain (R_o), jari-jari grain configuration (R_p), fillet (f), fillet tambahan (r), sudut yang menghadap ke pusat grain (η), sudut dari grain configuration (ξ), banyaknya star (N) seperti yang disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Star Grain Configuration

Pada star grain configuration terdapat perubahan sudut pada fase kedua dan ketiga yang dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{R_p \sin(\xi)}{y+f} \right) \tag{23}$$

$$\gamma = \pi - \cos^{-1} \left(\frac{R_o^2 - R_p^2 - (f+y)^2}{-2 R_p (f+y)} \right) \tag{24}$$

Pada fase pertama star grain terdapat batasan yakni perbesaran konfigurasi (y) tidak boleh melewati r sehingga berlaku syarat

$$y < r \tag{25}$$

dengan persamaan pada luasan pembakaran sebagai berikut.

$$S1 = (Rp + f + y) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) \quad (26)$$

$$S2 = (f + y) \left(\frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) \quad (27)$$

$$S3 = \left(\frac{Rp \sin(\xi)}{\sin(\eta)} \right) - ((f + y) \cot(\eta)) - \left(\frac{(r-y) \sin\left(\frac{\pi}{2}-\eta\right)}{\sin(\eta)} \right) \quad (28)$$

$$S4 = (r - y) \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) \quad (29)$$

$$Ab_1 = 2N(S1 + S2 + S3 + S4)L \quad (30)$$

Pada fase kedua *star grain configuration* $S_4 = 0$ dan terdapat batasan baru yaitu berjalan ketika

$$y \geq r \quad (31)$$

dengan persamaan pada luasan pembakaran sebagai berikut.

$$S1 = (Rp + f + y) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) \quad (32)$$

$$S2 = (f + y) \left(\frac{\pi}{2} - \eta + \xi \right) \quad (33)$$

$$S3 = \left(\frac{Rp \sin(\xi)}{\sin(\eta)} \right) - (f + y) \cot(\eta) \quad (34)$$

$$Ab_2 = 2N(S1 + S2 + S3)L \quad (35)$$

Pada fase selanjutnya yaitu fase ketiga $S_3 = 0$ dengan syarat

$$y \geq \frac{Rp \sin(\xi)}{\cos(\eta)} - f \quad (36)$$

Dengan luasan pembakaran sebagai berikut.

$$S1 = (Rp + f + y) \left(\frac{\pi}{N} - \xi \right) \quad (37)$$

$$S2 = (f + y) \left(\frac{\pi}{2} - \alpha + \xi \right) \quad (38)$$

$$Ab_3 = 2N(S1 + S2)L \quad (39)$$

Pada fase terakhir yakni fase keempat yang tersisa hanyalah S_2 dengan syarat yang baru yaitu

$$y > R_o - R_p - f \quad (40)$$

dengan luasan pembakaran

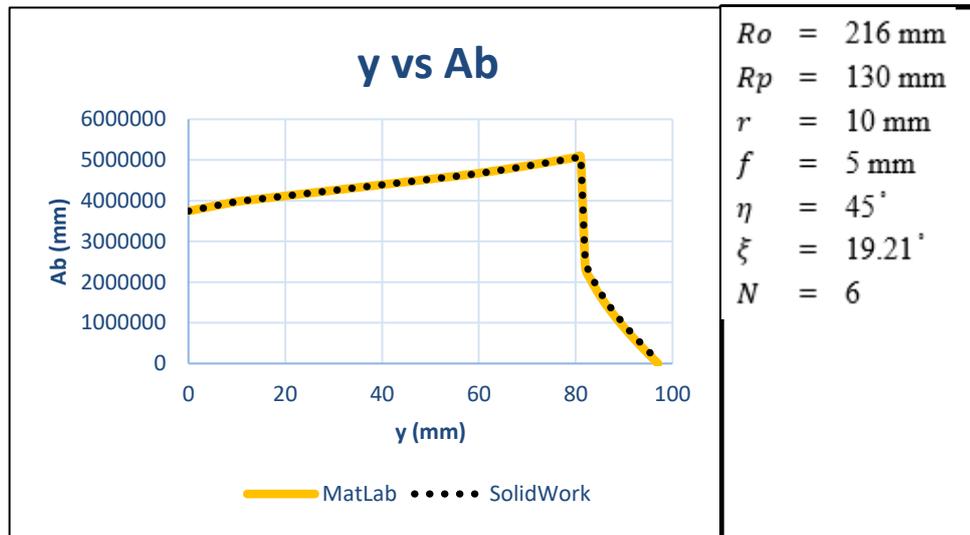
$$S2 = (f + y) \left(\frac{\pi}{2} + \xi - \alpha - \gamma \right) \quad (41)$$

$$Ab_4 = 2N(S2)L \quad (42)$$

dan fase keempat berakhir pada saat y mencapai y_{max} yang dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$y_{max} = \sqrt{(R_o - R_p \cos(\xi))^2 + (R_p \sin(\xi))^2} - f \quad (43)$$

Hasil dari program yang dibuat berdasarkan persamaan *star grain* dan dibandingkan menggunakan perhitungan manual menggunakan *SolidWork* di tunjukkan pada Gambar 6. Dari hasil validasi yang disajikan Gambar 6 didapatkan galat relatif sebesar 2.7×10^{-3} . Galat yang kecil menunjukkan bahwa persamaan luasan pembakaran yang didapatkan sudah dapat dikatakan baik.



Grafik 6. Validasi Star Grain

4. Kesimpulan

Pada artikel ini telah dibahas mengenai uji kinerja alat komputasi dari desain *hollow grain*, *wagon wheel grain*, dan *star grain*. Dari hasil yang didapatkan persamaan luasan pembakaran dari tiap-tiap model *propellant grain configuration* memberikan galat antara program menggunakan *MatLab* dan perhitungan manual menggunakan *SolidWork* yang tidak berbeda jauh.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Teknologi Roket LAPAN yang telah berkolaborasi dan menyediakan data yang dibutuhkan untuk penulisan artikel ini.

Daftar Pustaka:

- [1] Sutton, G.P. & Biblarz, O. 2010. *Rocket Propulsion Elements*. 8th Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.
- [2] Hartfield, R., Jenkins, R., Burkhalter, J. & Foster., W. 2003. A Review of Analytical Methods for Solid Rocket Motor Grain Analysis. *AIAA 2003-4506, 39th Joint Propulsion Conference and Exhibit*. 20-23 Juli 2003, Huntsville, Alabama.
- [3] Stalin, P., Kumar, Y.N.V.S., & Nazumuddin, S.K. 2014. Design and Geometrical Analysis of Propellant Grain Configuration of a Solid Rocket Motor. *International Journal of Engineering Development and Research*. 2(4):3417-3427.
- [4] Ryan, P.J. 1986. *Euclidean and No-Euclidean Geometry an Analytical Approach*. Cambridge University Press. New York.
- [5] Sprague, A.H. 1946. *Essential of Plane Trigonometry and Analytic Geometry*. Prentice Hall Inc. New York.
- [6] Atkinson, K. 1994. *Elementary Numerical Analytis*. John Wiley and Sons. New York.