

Menentukan Hubungan Matematis Tebal Pelat Rupture Disk Terhadap Kekuatan Bahan Yang Digunakan

Bagus H. Jihad, Lockman Satibi

Bidang Propulsi, Pusat Teknologi Wahana Dirgantara, LAPAN

ABSTRACT

This paper describes the mathematics relationship between rupture disc plat thickness to its material properties used such as tensile strength. Rupture disc is an auxiliary component of rocket that bonded on nozzle exhaust, usually a thin plate that rupture or remove caused by thrust of propellant combustion. The disc function is to decrease thrust energy losses before reaches its flight thrust. Result shows rupture disc plat thickness influenced by radius of the disc and pressure working on.

ABSTRAK

Paper ini menjelaskan tentang hubungan matematis antara tebal pelat rupture disk yang digunakan terhadap kekuatan bahan yang digunakan, misalnya kuat tarik. Rupture disk adalah komponen tambahan dari roket yang dipasang pada bagian luar nosel, biasanya terbuat dari pelat tipis yang kemudian robek atau terlepas dari nosel karena gaya dorong yang terjadi. Disk ini berguna untuk mengurangi kerugian gaya sebelum roket mendapatkan kemampuan terbang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tebal pelat rupture disk dipengaruhi oleh jari-jari disk dan tekanan yang bekerja.

1. PENDAHULUAN

Pada dasarnya sebuah roket merupakan suatu wahana, yang terdiri dari sistem struktur, sistem propulsi serta sistem kendali dan kontrol (Guidance System and Control). Sistem struktur terdiri dari hidung roket (nose cone), tabung pilot, adaptor, badan roket, nosel (nozzle) dan sirip (fin).

Badan roket berbentuk silinder dengan dimensi tergantung besar kecilnya roket dan sesuai rekayasa serta rancang bangun yang sudah ditentukan. Dalam struktur roket, badan roket merupakan wadah bahan pendorong (propelan) yang akan menerima tekanan tinggi dan panas sebagai akibat pembakaran propelan pada saat roket diluncurkan. Dalam proses pembakaran bahan bakar di ruang bakar roket, gas pembakaran akan mengalir melalui nosel. Diharapkan mengalirnya gas pembakaran tersebut secara bersama sehingga menimbulkan gaya dorong

pada roket tersebut. Hal ini sulit dicapai karena sering terjadi pembakaran awal yang besar gaya dorongnya relatif kecil. Maka untuk mengoptimalkan gaya dorong, perlu dikonstruksi sebuah peralatan tambahan yang dapat mengurangi kerugian gaya dorong tersebut.

Peralatan tambahan tersebut diletakan pada bagian nosel dan disebut sebagai rupture disk. Rupture disk merupakan salah satu elemen penting roket. Komponen rupture disk terdapat pada roket padat dan juga pada roket cair. Memperhatikan fungsi dan peranan rupture disk pada roket tersebut, maka perlu dilakukan penelitian. Permasalahan pada rupture disk adalah bagaimana untuk mendapatkan material yang memenuhi spesifikasi teknis sehingga dapat dipakai sebagai material komponen rupture disk. Selain itu di bagian mana dari nosel rupture disk tersebut akan diletakkan juga perlu

dilakukan penelitian sehingga diperoleh hasil yang optimal.

Ada dua cara yang dapat dilakukan guna mendisain rupture disk. Pertama, akibat gaya dorong dan panas pembakaran yang timbul, rupture disk akan terlepas dari nosel secara keseluruhan. Dalam hal ini disain dititikberatkan pada gaya adhesive antara rupture disk dan noselnya. Jadi yang berperan dalam menahan rupture disk terhadap gaya dorong untuk sementara waktu adalah kekuatan rakatan antara nosel dan rupture disk itu sendiri. Gaya yang bekerja antara rupture disk dan nosel adalah gaya geser. Kedua, rupture disk akan robek terlebih dahulu akibat adanya gaya dorong dan panas yang ditimbulkan pada nosel. Pada cara ini gaya rakatan antara rupture disk dan nosel sedikit lebih besar dari kekuatan rupture disknya. Hanya saja, pada cara ini perlu diperhatikan adalah, robekan yang terjadi pada rupture disk nanti tidak akan mengganggu kinerja dari pancaran gas propelan, sehingga, gaya dorong yang dihasilkan dapat sempurna.

Pada penelitian ini, dilakukan cara yang kedua, dengan anggapan bahwa rupture disk akan robek karena tekanan dan panas yang ditimbulkan sebagai hasil pembakaran dari propelan. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan hubungan antara tebal pelat rupture disk dan kekuatan dari material pembentuknya.

2. METODE

Proses penelitian yang akan dilakukan terbagi dalam tujuh tahapan yaitu :

- a. *Analisis Matematis Hubungan antara Kekuatan Bahan dan Ketebalan Pelat.*
Pada tahap ini, dijabarkan hubungan matematis, serta asumsi-asumsi yang digunakan, untuk mendapatkan

hubungan antara kekuatan bahan yang digunakan (pelat aluminium), dengan ketebalannya. Asumsi awal yang dikembangkan adalah, tekanan maksimum yang dibutuhkan untuk memecahkan rupture disk adalah 70 atm.

- b. *Disain Mekanisme Uji Hydraulic Pressure.*

Pada disain ini, dilakukan perhitungan kekuatan mekanisme uji, yang pada dasarnya terletak pada kekuatan tabung. Tabung uji harus mempunyai kekuatan diatas tekanan uji, sehingga tekanan yang dibutuhkan untuk memecahkan rupture disk dapat dipenuhi. Mekanisme uji itu sendiri terdiri atas beberapa bagian, yaitu; tabung roket diameter 150 mm, nosel, cap dan saluran hydraulic, serta peralatan hydraulic Pressure Test.

- c. *Pabrikasi Disain yang dihasilkan.*

Melakukan pembuatan sesuai disain yang dihasilkan pada tahap kedua.

- d. *Pengujian Tensile Strength.*

Pengujian tensile strength dilakukan untuk mendapatkan karakteristik bahan pelat yang digunakan. Hasil pengujian yang diperoleh, dipergunakan untuk menghitung ketebalan pelat yang diperlukan sebagai rupture disk.

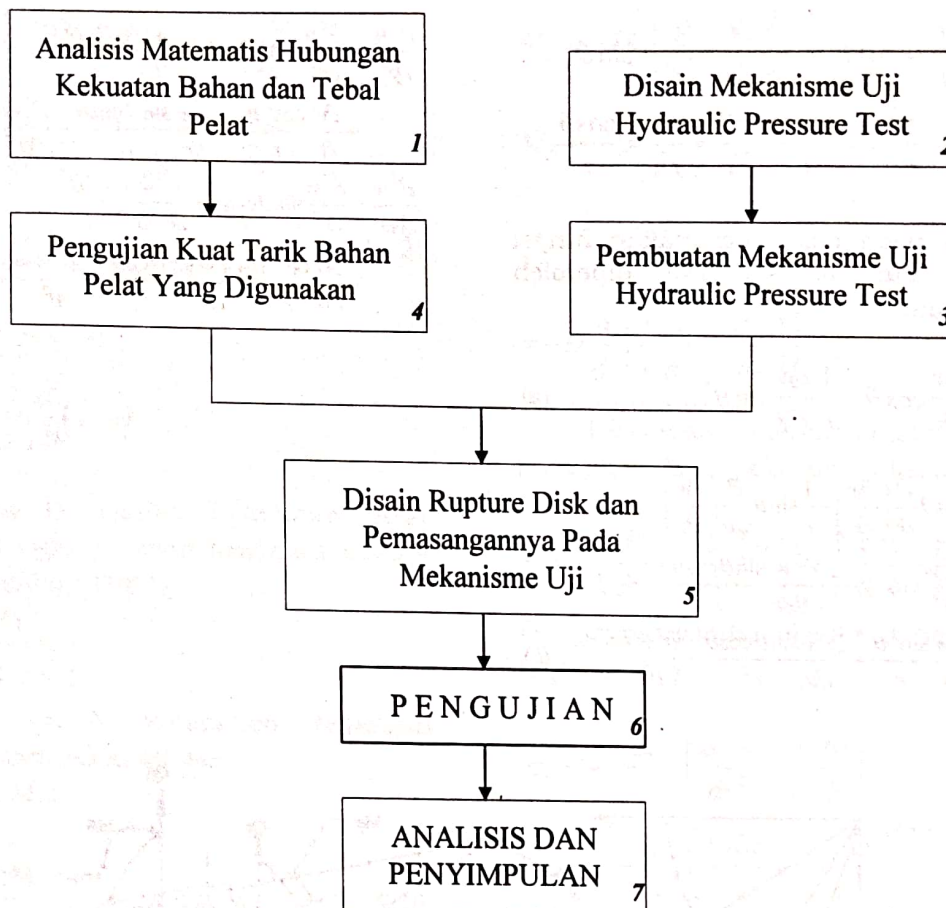
- e. *Disain Rupture Disk dan Pemasangannya Pada mekanisme Uji.*

Pada tahap ini, direncanakan bahwa rupture disk, akan dipasang pada bagian nosel roket. Perakatan dilakukan dengan menggunakan sistem *adhesive bonding*.

- f. *Pengujian Pecah.*

- g. *Analisis dan Kesimpulan.*

Tahapan-tahapan tersebut dapat digambarkan dalam diagram alir berikut :



Gambar 2-1: Diagram alir penelitian rupture disk.

3. LANDASAN TEORI

Dalam penelitian ini didasarkan pada penelitian rupture disk terdahulu. Bahwa telah diperoleh data empiris besar tekanan di dalam ruang bakar yang mencapai 70 atm. Sedangkan tekanan yang ditimbulkan oleh tekanan igniter sekitar 20 atm.

3.1 Asumsi-asumsi

Rupture disk yang akan didisain, mempunyai kemiripan fungsi dengan bagian ujung dari sebuah bejana tekan (closure of pressure vessel), diafragma sebuah pompa (pump diaphragms), kampas (clutch), cakram turbin, dan lain-lain, yang umumnya mempunyai bentuk lingkaran. Lingkup penjabaran persamaan-persamaannya dihitung sebagai pelat lingkaran.

Pemecahan persoalan tegangan yang terjadi menggunakan asumsi

bahwa beban terdistribusi secara merata pada lingkaran. Asumsi-asumsi dasar yang digunakan dalam menghitung adalah:

- Pelat adalah tipis;
- Beban terbagi secara merata; dan
- Pelat terjepit secara kaku pada nosel.

3.2 Gaya-gaya Yang Bekerja Pada Pelat

Koordinat polar dinyatakan sebagai (r, θ) , sedangkan sumbu kartesius adalah (x, y) . Hubungan antara keduanya (Durelli, 1970; Ugural, 1981; Timoshenko, 1987) adalah

$$x = r \cos \theta \quad r^2 = x^2 + y^2$$

$$y = r \sin \theta \quad \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x}$$

Berdasarkan hubungan tersebut, maka

$$\frac{\partial x}{\partial r} = \frac{x}{r} = \cos \theta \quad \frac{\partial x}{\partial \theta} = \frac{y}{r} = \sin \theta$$

$$\frac{\partial y}{\partial r} = \frac{y}{r} = \sin \theta \quad \frac{\partial y}{\partial \theta} = -\frac{x}{r} = -\cos \theta$$

Defleksi pada pelat merupakan fungsi dari r dan θ, sehingga diperoleh hubungan,

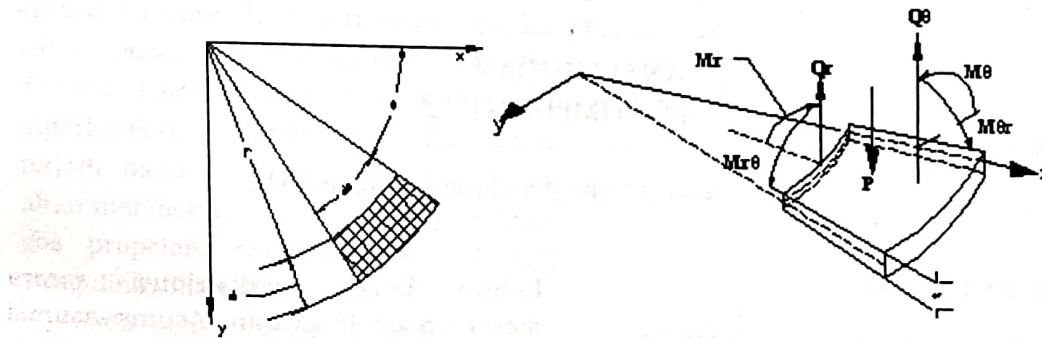
$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial r} \cos \theta - \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \sin \theta \dots\dots\dots(a)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \cos \theta \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) - \frac{1}{r} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

$$= \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \cos^2 \theta - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial r} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r} + \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\sin^2 \theta}{r} + 2 \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \dots\dots(b)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \sin^2 \theta + 2 \frac{\partial^2 w}{\partial \theta \partial r} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r} + \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\cos^2 \theta}{r} - 2 \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \frac{\cos^2 \theta}{r^2} \dots\dots(c)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial y \partial y} = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \sin \theta \cos \theta + \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} \frac{\cos 2\theta}{r} - \frac{\partial w}{\partial \theta} \frac{\cos 2\theta}{r^2} - \frac{\partial w}{\partial r} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r} - \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \frac{\sin \theta \cos \theta}{r^2} \dots\dots(d)$$



Gambar 3-1: Hubungan kordinat polar dan kordinat kartesius.

- a) Hubungan kordinat polar dan kartesius.
- b) Bentuk momen dan gaya geser elemen kecil dengan ketebalan t, dinyatakan dalam kordinat polar.

Dengan mensubstitusikan persamaan (b) dan (c) ke dalam persamaan (d), diperoleh persamaan operator Laplace, sebagai berikut (Ugural, 1981):

$$\nabla^2 w = \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \dots\dots(3-1)$$

Bentuk momen dan gaya geser yang terjadi pada elemen ketebalan pelat, dinyatakan dalam bentuk

koordinat polar. Penurunan sederhana, sumbu x diambil pada arah jari-jari r, θ = 0. Momen radial, tangensial dan puntir M_θ, M_r, M_{rθ} = M_{θr}, dan gaya-gaya geser vertikal Q_r dan Q_θ mempunyai nilai yang sama dengan momen M_x, M_y dan M_{xy} dan gaya geser Q_x dan Q_y pada titik yang sama pada pelat. Dengan mengambil θ = 0, diperoleh persamaan,

$$M_r = -D \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \nu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right]$$

$$M_\theta = -D \left[\frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} \right]$$

$$M_{r\theta} = (1-\nu) D \left(\frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) \dots (3-2)$$

$$Q_r = -D \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 w)$$

$$Q_\theta = -D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\nabla^2 w)$$

di mana D, adalah kekakuan pelat (flexural rigidity) yang besarnya adalah (Timoshenko, 1987),

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$$

Rumus untuk komponen tegangan bidang dari pelat, adalah:

$$\sigma_r = \frac{12M_{r,z}}{t^3}$$

$$\sigma_\theta = \frac{12M_{\theta,z}}{t^3} \dots (3-3)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{12M_{r\theta,z}}{t^3}$$

4. ANALISIS MATEMATIS

Setelah diperoleh hubungan tegangan di atas, berikutnya adalah meninjau beban yang terjadi pada pelat. Telah dikemukakan di depan bahwa rupture disk yang didisain mempunyai bentuk melingkar terbuat dari pelat tipis.

Defleksi, w, yang terjadi pada pelat, tergantung pada posisi radial, r, hanya jika beban yang diaplikasikan dan batas akhir tidak dipengaruhi oleh sudut θ. Situasi ini dinamakan bending simetri terhadap sumbu dari pelat. Untuk kasus ini, hanya Mr, Mθ dan Qr yang bekerja pada elemen pelat melingkar. Momen dan gaya geser, pada pelat melingkar yang mendapatkan beban simetri sumbu, ditentukan dari persamaan di atas, yaitu:

$$M_r = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right)$$

$$M_\theta = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \dots (4-1)$$

$$Q_r = -D \frac{d}{dr} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right)$$

$$= -D \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right]$$

Persamaan diferensial dari defleksi pada permukaan pelat, direduksi menjadi,

$$\nabla^4 w = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{p}{D} \dots (4-2)$$

Dengan mengambil nilai θ = 0, persamaan tegangannya :

$$\sigma_r = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\nu}{r} \frac{dw}{dr} \right)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \nu \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \dots (4-3)$$

Hukum Hooke dalam koordinat polar dapat dituliskan dengan menggantikan x oleh r dan y oleh θ, diperoleh hubungan :

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) \dots (4-4)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta}}{G}$$

Dengan menetapkan harga ,

$$\nabla^2 w = \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \dots (4-5)$$

Persamaan diferensial untuk defleksi pada permukaan pelat menjadi,

$$\frac{p}{D} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left\{ r \frac{d}{dr} \left[\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw}{dr} \right) \right] \right\} \dots (4-6)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan tersebut, dan memberikan harga $p(r)$,

$$w = \int_r^1 \int_r^1 \int_r^1 \frac{r'p}{D} dr'.dr'.dr'.dr' \dots\dots\dots(4-7)$$

Karena pelat dibawah beban yang terdistribusi merata, $p = p_0$, maka penyelesaian umum dari persamaan tersebut,

$$w = w_h + w_p = c_1 \ln r + c_2 r^2 \ln r + c_3 r^2 + c_4 + \frac{p_0 r^4}{64D} \dots\dots\dots(4-8)$$

4.1 Tinjauan Pelat yang Terpasang Mati Pada Nosel

Rupture disk akan dipasangkan pada nosel secara mati, dijepit atau direkatkan, sehingga dapat dikatakan terpasang mati pada nosel. Setelah terpasang pada nosel, pelat melingkar yang berjari-jari a akan mendapatkan tekanan yang merata sebesar tekanan dalam, p_0 . Persamaan defleksi yang terjadi dinyatakan oleh persamaan di atas. Konstanta integrasi dari persamaan tersebut dapat ditentukan dengan

menganggap bahwa pelat terikat secara kuat dan kaku pada nosel.

Dengan demikian diperoleh kondisi batas,

$$w = 0 \quad \frac{dw}{dr} = 0 \quad (r = a)$$

Bentuk logaritma pada persamaan tersebut kecil sekali pada $r = 0$, untuk semua nilai c_1 dan c_2 kecuali nol; sehingga $c_1 = c_2 = 0$. Didapatkan harga

$$c_3 = -\frac{p_0 a^3}{32D} \dots\dots\dots(4-9)$$

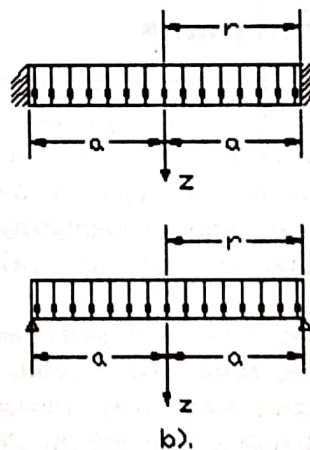
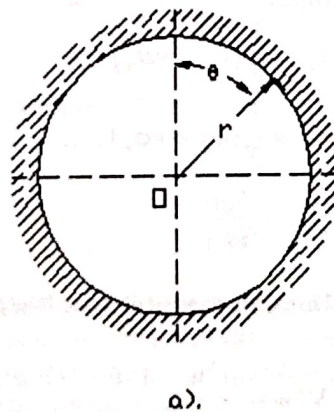
$$c_4 = \frac{p_0 a^4}{64D}$$

Besarnya defleksi adalah,

$$w = \frac{p_0}{64D} (a^2 - r^2)^2 \dots\dots\dots(4-10)$$

Perpindahan maksimum yang terjadi pada pusat pelat adalah;

$$w_{max} = \frac{p_0 a^4}{64D} \dots\dots\dots(4-11)$$



Gambar 4-1: Pelat lingkaran rupture disk yang dibebani merata
 a) Pelat rupture terpasang mati pada nosel
 b) Diagram benda bebas dengan tumpuan sederhana

Pernyataan tentang momen bending dihitung dengan rumus:

$$M_r = \frac{p_0}{16} [(1 + \nu)a^2 - (3 + \nu)r^2] \dots\dots\dots(4-12)$$

$$M_\theta = \frac{p_0}{16} [(1 + \nu)a^2 - (1 + 3\nu)r^2]$$

Pernyataan untuk tegangan-tegangan yang terjadi adalah

$$\sigma_r = \frac{3p_o z}{4t^3} [(1 + \nu)a^2 - (3 + \nu)r^2]$$

$$\sigma_\theta = \frac{3p_o z}{4t^3} [(1 + \nu)a^2 - (1 + 3\nu)r^2] \quad \dots\dots(4-13)$$

Nilai ekstrim untuk momen terjadi pada pusat pelat dan pada ujung. Pada sisi-sisi pelat ($r = a$), pernyataan momennya menjadi,

$$M_r = -\frac{p_o a^2}{8} \quad M_\theta = -\frac{\nu p_o a^2}{8}$$

Sedangkan pada $r = 0$, $M_r = M_\theta = (1 + \nu)p_o a^2 / 16$. Momen maksimum terjadi pada sisi pelat. Hubungan antara kekuatan pelat dengan ketebalan yang dibutuhkan, diperoleh:

$$\sigma_{r,max} = \frac{6M_r}{t^2} = -\frac{3p_o}{4} \left(\frac{a}{t}\right)^2 \quad \dots\dots\dots(4-14)$$

5. KESIMPULAN

Dari penjabaran matematis diperoleh kesimpulan bahwa tebal pelat rupture disk yang akan berbanding lurus dengan kekuatan material yang digunakan dan berbanding terbalik

dengan tekanan yang bekerja serta berbanding terbalik dengan jari-jari pelat rupture disk itu sendiri. Hal ini dapat berlaku bila semua asumsi yang digunakan akan berlaku sesuai dengan kenyataan yang ada.

Rumus tersebut di atas masih belum dapat digunakan untuk memprediksikan pada tipe beban yang bagaimana kegagalan akan terjadi pada pelat. Kekuatan material serta aplikasi dari teori kegagalan yang sesuai dengan jenis material, *brittle* atau *ductile* harus sangat diperhatikan.

DAFTAR RUJUKAN

Durelli, A. J., 1970, *Applied Stress Analysis*, Prentice-Hall Inc., New Delhi.
 Popov, E.P., 1983, *Mechanics of Materials*, 2nd edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
 Surdia, Tata; Saito, Shinroku, 1985, *Pengetahuan Bahan Teknik*, PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
 Sutton, George P., 1980, *Rockets Propulsion Elements*, 5th edition, John Wiley & Sons, New York.
 Timoshenko, S., 1987, *Theory of Plates and Shells*, 2nd edition, McGraw Hill Book Co, New York.
 Ugural, A. C., 1981, *Stresses in Plates and Shells*, McGraw-Hill Book Co., New York.