

MULTIDISCIPLINARY DESIGN OPTIMIZATION PADA PERANCANGAN SISTEM PERPIPAAN (*PIPELINE DESIGN*)

Yuwono B Pratiknyo

Program Studi Teknik Manufaktur
Universitas Surabaya

Gedung TG Lantai V, Kampus UBAYA, Jl.Raya Kalirungkut, Surabaya
Phone: +62-031-2981397, FAX: +62-031-2981150, E-mail: yuwonobudi@ubaya.ac.id

Abstrack

Sistem perpipaan memiliki fungsi untuk utama mengalirkan fluida dan gas dari suatu tempat ke satu atau beberapa tempat lain. Dalam perancangan sistem perpipaan (Pipeline Design) ada beberapa aspek yang harus diperhatikan antara lain adalah parameter design, wall thickness, buckling, route selection, material selection, spanning, fatigue, dan thermal expansion. Aspek-aspek tersebut perlu diperhatikan untuk menjamin system perpipaan berfungsi baik dengan faktor keamanan yang harus tetap diperhatikan. Pada perancangan sistem perpipaan, seringkali nilai ekonomis juga perlu mendapat perhatian, sehingga perlu dilakukan proses optimasi dalam perancangannya.

Proses optimasi pada sistem perpipaan sangat kompleks, karena banyaknya parameter yang harus tetap dipenuhi. Parameter-parameter yang harus dipenuhi sendiri seringkali bertolak belakang dengan parameter lain, sehingga diperlukan suatu strategi dalam proses optimasi. Pada paper ini, proses optimasi dilakukan dengan metode Multidisciplinary Design Optimization (MDO). Wall thickness dipilih sebagai objective function karena wall thickness pipa akan berpengaruh pada total project budgeting dan keamanan system perpipaan. Sedangkan sebagai constrain adalah stress analysis, buckling, spanning, fatigue dan thermal expansion.

Hasil akhir dari paper ini adalah suatu metode dan panduan dalam melakukan proses optimasi system perpipaan, sehingga desainer akan lebih mudah dalam pemilihan scedule pipa dan proses perancangan dapat dilakukan dengan lebih cepat.

Keywords: MDO, piping, design, optimization, wall thickness

1. Introduction

Sistem perpipaan (*piping system*) sudah kita kenal sejak ribuan tahun yang lalu, sistem perpipaan pada awalnya dipergunakan untuk mengalirkan air minum dan kemudian dalam perkembangannya sistem perpipaan dipakai untuk mengalirkan gas alam. Dengan perkembangan teknologi bahan pipa, maka sistem perpipaan mengalami perkembangan yang pesat dan digunakan dalam hampir semua bidang industri.

Pada sistem perpipaan modern ada beberapa aspek utama yang harus dipenuhi antara lain adalah *routing, design loads, fluid flow analysis, wall thickness calculation, stress analysis, flexibility analysis, support systems, dan material selection*. Semua aspek tersebut harus memenuhi regulasi yang tertuang dalam code dan standard baku; Misalnya; Code atau Standars B31.1 untuk *power piping*, B31.2 untuk *Fuel gas piping*, B31.3 untuk *process piping* dan lain sebagainya. Beberapa code atau standart yang lain misalnya ANSI/ASME code, DNV code, BS code, API (American Petroleum Institute) dan NACE.

Aspek-aspek tersebut perlu diperhatikan untuk menjamin sistem perpipaan berfungsi dengan baik dengan faktor keamanan yang harus tetap diperhatikan dan dilakukan proses optimasi dalam perancangannya. Proses optimasi pada sistem perpipaan sangat kompleks, karena banyaknya parameter yang harus tetap dipenuhi. Parameter-parameter yang harus dipenuhi sendiri seringkali bertolak belakang dengan parameter lain, sehingga diperlukan suatu strategi dalam proses optimasi dengan menggunakan metode *Multidisciplinary Design Optimization (MDO)*.

Multidisciplinary design optimization (MDO) adalah suatu metode yang dapat membantu *engineering designer* dalam proses optimasi. Dengan menggunakan MDO proses pengambilan keputusan dapat dilakukan dengan cepat, meskipun proses optimasi dilakukan dengan memperhatikan banyak sekali parameter dan aspek desain. *Multidisciplinary design optimization strategies* memerlukan suatu formula atau fungsi dari suatu problem; yaitu, *objective function, constraint equations (equality constraint, inequality constraint)*, dan *batasan variable* yang harus didefinisikan dalam bentuk persamaan matematis.



Pemilihan metode dalam proses optimasi sangat berpengaruh pada hasil optimasi, beberapa aspek yang berpengaruh antara lain adalah: *type decision variables*, *number of objectives*, *nature of objective functions and constraints*, *availability of objectives functions and constraint functions*. Sehingga, pengalaman dan *mathematical background* diperlukan oleh *decision maker* dalam memilih prosedur optimasi yang terbaik.

Optimization Problems

Secara umum, problem optimasi dapat diselesaikan dengan persamaan matematis sebagai berikut:

Minimize/maximize:

$$F(\mathbf{X}) \rightarrow \text{objective function} \quad (1)$$

Subject to:

$$g_j(\mathbf{X}) \leq 0, j = 1, m \rightarrow \text{inequality constraint} \quad (2)$$

$$h_k(\mathbf{X}) = 0, k = 1, l \rightarrow \text{equality constraint} \quad (3)$$

$$X_i^l \leq X_i \leq X_i^u, i = 1, n \rightarrow \text{side constraint} \quad (4)$$

Vector $\mathbf{X}$ merupakan vector dari *design variables*.

Optimization algorithms dalam penyelesaian problem optimasi memerlukan *design variables*, $\mathbf{X}^0$, yang secara *iterative* selalu bisa *ter-update*. Secara umum prosedur *iterative* diberikan dalam persamaan 5 berikut:

$$\mathbf{X}^q = \mathbf{X}^{q-1} + \alpha^* \mathbf{S}^q \quad (5)$$

Dimana q jumlah iterasi dan $\mathbf{S}$ adalah *vector search direction*. α^* didefinisikan sebagai jarak yang kita harapkan dari perubahan $\mathbf{S}$.

Augmented Lagrange Multiplier Methods

Augmented lagrange multiplier (ALM) Methods juga sering disebut *multiplier methods* atau *primal-dual methods*. ALM methods secara umum memiliki persamaan sebagai berikut :

$$\text{Minimize} \quad F(\mathbf{X}) \quad (6)$$

$$\text{Subject to} \quad h_k(\mathbf{X}) = 0 \quad k = 1, l \quad (7)$$

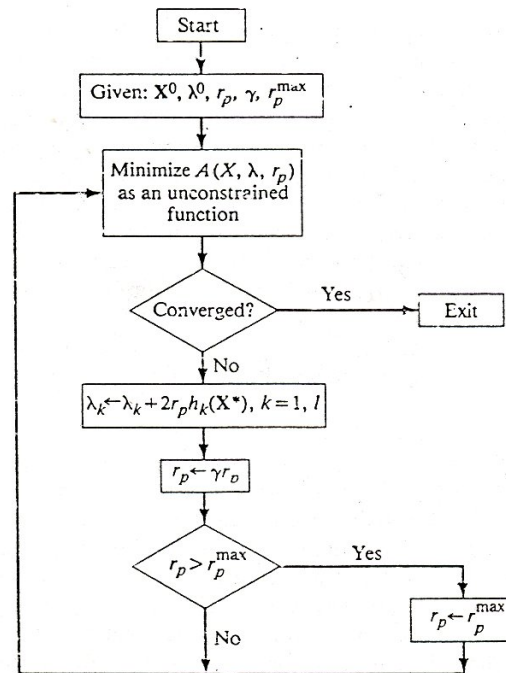
Jumlah konstrain l harus kurang dari jumlah variabel perancangan (n). Jika l sama dengan variabel perancangan (n) maka problem memerlukan penyelesaian sejumlah n *simultaneous nonlinear equation*. jika $l > n$ maka problem tidak dapat diselesaikan karena lebih banyak persamaan yang tidak diketahui.

Khun-Tucker condition didapatkan dengan membuat lagrangian.

$$L(\mathbf{X}, \lambda) = F(\mathbf{X}) + \sum_{k=1}^l \lambda_k h_k(\mathbf{X}) \quad (8)$$

Kemudian kondisi yang tetap dari $L(\mathbf{X}, \lambda)$ bersama dengan *feasibility requirements* perlu dioptimalkan dengan menggunakan *pseudo-objective/augmented lagrangian*.

$$A(\mathbf{X}, \lambda, r_p) = F(\mathbf{X}) + \sum_{k=1}^l \{ \lambda_k h_k(\mathbf{X}) + r_p [h_k(\mathbf{X})]^2 \} \quad (9)$$



Gambar 1 ALM Methods
[Vanderplaats, Garret N, 1984]

2. Methodology

Pada *paper* ini, proses optimasi dilakukan dengan urutan/metodologi yang dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Pengumpulan data terkait dengan aplikasi, routing, dan design loads.

Penggunaan dan aplikasi sistem perpipaan penting untuk diketahui, karena aplikasi yang berbeda akan mempengaruhi *code* dan *standart* yang berlaku. *Routing*, juga harus diketahui untuk mengetahui bagaimana kondisi lingkungan dimana sistem perpipaan akan beroperasi. Dengan mengetahui *routing* maka akan diketahui bagaimana potensi gempa, kecepatan dan arah angin, dan karakteristik lingkungan. Data *design loads* juga sangat penting dalam perancangan sistem perpipaan yang meliputi; *Sustained Load/Beban* yang bekerja terus-menerus selama operasi normal (berat, tekanan), *Occasional Load* Beban yang terjadi “kadang-kadang” selama operasi normal (contoh : angin, gempa)

2. Penentuan functional set dan sub-functional



Functional set dan *sub-functional* digunakan untuk menguraikan beberapa hal yang harus dipenuhi dalam proses perancangan sistem perpipaan. Sebagai *functional set* pada paper ini ini adalah meminimalkan biaya material dengan meminimalkan *wall thiknes* material *sub-functiona-nyal* adalah *fluid flow analysis, flexibility & exp analysis, support systems, Global & local Buckling* dan *installation analysis*

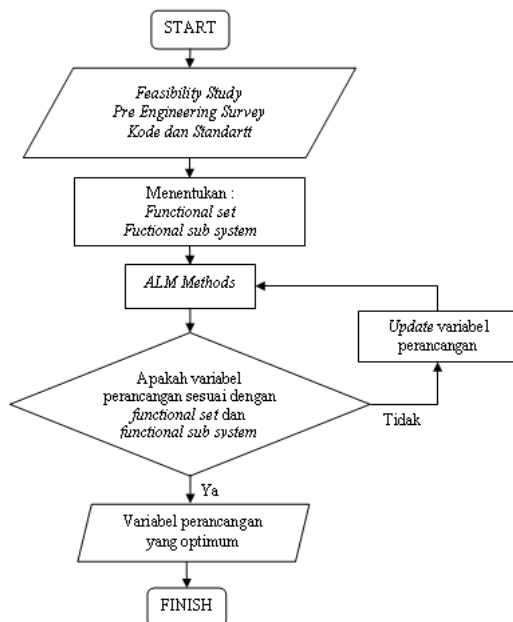
3. Proses optimasi

Proses optimasi yang digunakan pada permasalahan *paper* ini menggunakan salah satu metode penyelesaian optimasi yaitu metode *Augmented Lagrange Multiplier* (ALM). Metode ALM dipilih karena dalam penyelesaian optimasi, metode ini lebih sederhana dengan faktor pengali (λ dan r_p).

4. Penentuan variabel perancangan yang optimum

Variabel perancangan yang optimum ditentukan berdasarkan hasil proses optimasi pada tahap 3. Nilai variabel perancangan yang optimum untuk selanjutnya akan digunakan sebagai dasar dalam poses perancangan

Metode penelitian yang digunakan dalam *paper* ini mengikuti prosedur dan langkah-langkah berikut

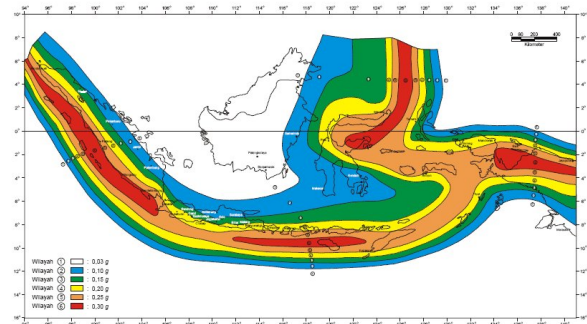


Gambar 2 Metodologi

Perpipaan

3.1 Feasibility Study

Routing dan Desain Loads, Routing jalur pada sistem perpipaan dapat mengacu pada *zone gempa* suatu wilayah, seperti terlihat pada gambar 3. Peta *zone gempa* ini berfungsi untuk menentukan *safety factor* dari sistem perpipaan



Gambar 3: Zone Gempa Indonesia
Sumber: Badan Metrologi dan Geofisika

Piping Loads

Jenis-jenis beban pada sistem perpipaan dapat diklasifikasikan menjadi:

a. Sustained Load:

Beban yang bekerja terus-menerus selama operasi normal (contoh : berat, tekanan)

Semua sistem perpipaan haruslah dirancang mampu menahan beban berat fluida, isolasi, komponen, dan struktur pipa itu sendiri.

b. Occasional Load:

Occasional loads adalah beban yang bekerja pada sistem pipa dalam periode yang sebagian saja dari total periode operasi sistem (1%–10%). Contoh: *snow*, fenomena alam (contoh: angin, gempa), *unusual plant operation* (relief valve discharge), *postulated plant accident* (pipe rupture).

c. Expansion Load:

Beban akibat perpindahan pada struktur pipa (contoh: *thermal expansion*, *diff.anchor displacement*).

Penentuan Kode dan Standart berdasarkan ANSI B31 untuk *piping*, yang meliputi:

- *Power piping* B31.1
- *Fuel gas piping* B31.2
- *Process Piping* B31.3
- *Refrigeration piping* B31.5
- *Nuclear power piping* B31.7
- *Building services piping* B31.9

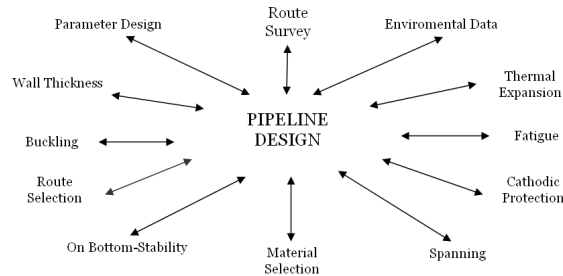
3. Case Study: Proses Optimasi Pada Sistem

3.2 Penentuan *functional set* dan *functional sub*



system

Pada penentuan *functional set* dan *functional sub system*, ada beberapa aspek yang terkait dengan perancangan system perpipaan yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut:

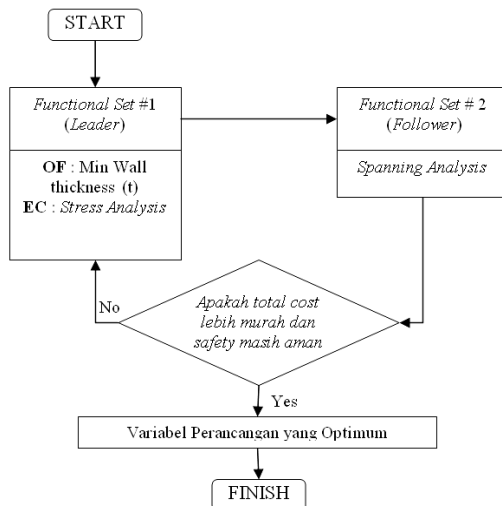


Gambar 4 Aspek-aspek dalam perancangan system perpipaan

Proses optimasi pada perancangan system perpipaan terdiri dari dua *functional set*. *Functional set* pertama adalah meminimumkan *wall thickness* dengan *equality constraint pipe longitudinal stress, pipe hoop stress, pipe radial stress, pipe shear stress* dan *pipe torsional stress*. *Functional set kedua* adalah pengecekan hasil variabel perancangan pada *functional set* pertama terhadap *spanning system*.

Pada proses optimasi system perpipaan *functional set* memiliki hubungan sebagai berikut: *functional set* # 1 ditetapkan sebagai *leader* dan *functional set* # 2 ditetapkan sebagai *follower*. Hasil variabel perancangan pada *functional set* # 1 diberikan ke *functional set* # 2 untuk dilakukan pengecekan.

Hubungan antara kedua *functional set* dinyatakan dalam gambar 5 berikut:



Gambar 5 Hubungan antara kedua *functional set*

3.3 Penentuan design function dan pendefinisian

variabel perancangan.

Tujuan utama yang ingin dicapai pada perancangan sistem perpipaan adalah meminimumkan *wall thickness* sebagai dasar pemilihan *schedule pipe*. Variabel perancangan yang mempengaruhi dalam meminimumkan *wall thickness* adalah:

$$\begin{aligned} d_o &= \text{diameter outer pipa} & (\text{ft atau mm}) \\ d_i &= \text{diameter inner pipa} & (\text{ft atau mm}) \end{aligned}$$

Nilai variabel perancangan (d_o dan d_i) yang berbeda akan menimbulkan *performance* dan *total cost* yang berbeda pula. Beberapa kompromi diatur selama *phase optimasi* dengan tujuan untuk membuat optimasi *design function* dan menentukan penyebab ketidakpastian antara tujuan desain dan kendala dalam *multidisciplinary design environment, route survey, environmental data* dan *parameter design* ditetapkan sebagai data pendukung.

3.4 Penentuan parameter fungsi

Tahap ini dilakukan untuk menentukan diskripsi arsitektur dari sistem dan beberapa kriteria performansi. Optimasi parameter fungsional yang dihasilkan pada tahap awal kemudian menjadi parameter target pada *phase* berikutnya. Beberapa *design parameter* yang terkait dengan perancangan system perpipaan antara lain adalah, *buckling, on bottom-stability, fatigue* dan *thermal expansion*.

3.5 Functional Set # 1

Pada *functional set* # 1 akan dilakukan proses optimasi dengan tujuan meminimumkan *wall thickness* *truck* yang sesuai dengan *equality constraint*.

Proses optimasi disusun berdasarkan langkah-langkah berikut:

1. Penentuan objective function.

Sebagai *objective function* pada optimasi sistem perpipaan adalah bagaimana menghasilkan *wall thickness* yang minimum. Sehingga kita mendapatkan variabel perancangan (d_o dan d_i) yang optimum.

Wall Thickness (t) dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$t = d_o - d_i \quad (9)$$

dengan :

$$\begin{aligned} t &= \text{wall thickness} \\ d_o &= \text{diameter outer pipa} \\ d_i &= \text{diameter inner pipa} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh *objective function*:

$$\text{Max. : } t = d_o - d_i \quad (\text{mm atau ft}) \quad (10)$$

2. Penentuan equality constraint.

Equality constraint ditentukan pada beberapa hal

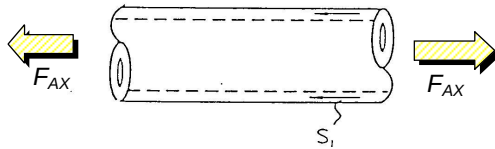


antara lain adalah:

- *Longitudinal stress* akibat beban aksial.

Tegangan yang bekerja dalam arah *axial* yang sejajar dengan sumbu pipa

Akibat gaya dalam F_{AX}



Gambar 6: *Longitudinal stress* akibat beban aksial

$$\sigma_L = \frac{F_{AX}}{A_m} \quad (11)$$

dengan

σ_L = *longitudinal stress*
 A_m = luas penampang pipa
 $= \pi(d_o^2 - d_i^2)/4$
 $= \pi d_m t$
 d_o = diameter luar
 d_i = diameter dalam
 d_m = diameter rata-rata

- *Longitudinal stress* akibat momen *bending*

Tegangan bervariasi linier pada penampang, proporsional terhadap jarak ke *neutral axis*
 Tegangan maksimum → dinding luar

$$\sigma_{LB \max} = \frac{M_B R_o}{I} = \frac{M_B}{Z} \quad (12)$$

dengan

M_B = momen *bending*
 c = jarak p.o.i ke sumbu netral
 I = momen inersia penampang
 $= \pi(d_o^4 - d_i^4)/64$
 Z = *section modulus*

- *Longitudinal stress* akibat beban gabungan (akibat *bending*, akibat tekanan internal, dan akibat gaya aksial).

$$\sigma_L = \frac{F_{AX}}{A_m} + \frac{Pd_o}{4t} + \frac{M_B}{Z} \quad (13)$$

- *Hope stress* akibat beban aksial

Hope stress merupakan suatu tegangan yang bekerja dalam arah tangensial. *Hope stress* memiliki besaran yang bervariasi terhadap *wall thickness*/tebal dinding pipa.

Hope stress didasarkan pada *Lame's equation* sebagai berikut:

$$\sigma_{SH} = \frac{P \left(r_i^2 + \frac{r_o^2 r_i^2}{r^2} \right)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (14)$$

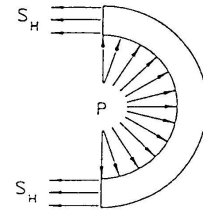
Dengan

- r_i dan r_o = jari-jari inner pipe dan jari-jari outer pipe

$$\sigma_H = \frac{Pd_i L}{2tL} = \frac{Pd_i}{2t} \quad (15)$$

Sehingga didapatkan:

$$\sigma_H = \frac{Pd_o}{2t} \quad (16)$$



Gambar 7: *Hope stress*

- *Radial stress* akibat beban aksial

Radial stress merupakan tegangan yang bekerja dalam arah *radial* pipa dimana Besarnya bervariasi dari permukaan dalam ke permukaan luar.

$$\sigma_R = \frac{P \left(r_i^2 - \frac{r_o^2 r_i^2}{r^2} \right)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (17)$$

- *Shear stress* akibat beban aksial

Bekerja dalam arah sejajar penampang pipa dan terjadi akibat gaya geser :

$$\tau_{\max} = \frac{VQ}{A_m} \quad (18)$$

dengan:

V = gaya geser
 A_m = luas penampang
 Q = *shear form factor*

- *Shear stress* akibat momen puntir

$$\tau = \frac{M_T c}{R} \quad (19)$$

dengan

M_T = momen puntir
 c = jarak dari titik pusat
 R = *Torsional resistance*
 $= \pi(d_o^4 - d_i^4)/32$

3. Penentuan *inequality constraint*.

Inequality constraint ditentukan pada beberapa hal antara lain adalah

- *Stress due to Sustained loadings*

Tegangan yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut:



$$S_L = \frac{PD_0}{4t} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (\text{USCS units}) \quad (20)$$

$$S_L = \frac{PD_0}{4t} + \frac{1000(0.75i)M_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (\text{SI units}) \quad (21)$$

dengan:

P = internal design pressure, psi (kPa)

D_0 = outside diameter of pipe, in (mm)

t = nominal wall thickness, in (mm)

M_A = resultant moment pada penampang, in.lb

Z = section modulus, in³ (mm³)

i = stress intensification factors

S_h = Basic material allowable stress

S_L = Tegangan total

- Stress due to occasional loadings

Tegangan yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{PD_0}{4t} + \frac{0.75i(M_A + M_B)}{Z} \leq kS_h \quad (\text{USCS units}) \quad (22)$$

$$\frac{PD_0}{4t} + \frac{1000(0.75i)(M_A + M_B)}{Z} \leq kS_h \quad (\text{SI units}) \quad (23)$$

dengan:

k = 1.15, beban occasional < 10% perioda operasi

= 1.2, beban occasional < 1% perioda operasi

M_B = resultan momen akibat beban occasional

- Stress due to expansion loadings

Tegangan yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{iM_c}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L) \quad (\text{USCS units}) \quad (24)$$

$$\frac{1000iM_c}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L) \quad (\text{SI units}) \quad (25)$$

dengan:

M_C = resultant moment at cross section due to thermal expansion, in.lb (mm.N).

S_A = allowable stress for thermal expansion

= $f(1.25S_c + 0.25S_h)$, psi (kPa).

S_c = basic allowable stress (cold), psi (kPa).

S_h = basic allowable stress (hot), psi (kPa).

f = stress range reduction factor (table).

Perhitungan basic allowable stress S_C dan S_h menurut kode B31.1, ditentukan sebagai nilai minimum dari besaran-besaran sebagai berikut:

- 0.25 $\sigma_{ultimate}$ pada temperatur operasi yang didesign
- 0.25 $\sigma_{ultimate}$ pada temperatur instalasi
- 0.625 σ_{yield} pada temperatur operasi yang didesign
- 0.625 σ_{yield} pada temperatur instalasi

Sehingga untuk functional set # 1, problem optimasi dinyatakan dengan:

Given :

F_{AX} = gaya longitudinal

M_B = momen bending

P = internal design pressure

Z = section modulus

i = stress intensification factors

Objective Function :

Minimize :

Wall thickness (t) → Pemilihan scedule pipa

Wall thickness (t) = $d_o - d_i$

dengan variabel perancangan adalah ;

d_o = diameter luar

d_i = diameter dalam

Subject to :

Equality constraints:

- Longitudinal stress akibat beban aksial.
- Longitudinal stress akibat momen bending.
- Longitudinal stress akibat beban gabungan.
- Hoop stress akibat beban aksial.
- Radial stress akibat beban aksial.
- Shear stress akibat beban aksial.

Inequality constraint:

- Stress due to Sustained loadings.
- Stress due to occasional loadings
- Stress due to expansion loadings

3.5 Functional Set # 2

Pada functional set # 2 (spanning calculation) akan dilakukan proses pengecekan terhadap variable yang dihasilkan pada proses optimasi functional set # 1.

Span Limitations, SL

Formula dan persamaan yang digunakan untuk menghitung SL bergantung pada asumsi kondisi tumpuan ujung-pipa yang diambil. Untuk suatu kasus pipa lurus dianggap beam dengan asumsi tumpuan sederhana (simply supported) pada kedua ujung-pipa, maka persamaan menghitung L adalah :

$$L = \sqrt{\frac{0.33 Z S_h}{w}} \quad \text{base on limitation of stress} \quad (26)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{\Delta E I}{22.5 w}} \quad \text{base on limitation of deflection} \quad (27)$$



Untuk suatu kasus pipa lurus dianggap beam dengan beban uniform dengan asumsi tumpuan sederhana (*simply supported*) pada kedua ujung-pipa, maka persamaan menghitung SL adalah:

$$L = \sqrt{\frac{0,4ZS_h}{w}} \quad \text{base on limitation of stress} \quad (28)$$

$$L = \sqrt[4]{\frac{\Delta EI}{13,5w}} \quad \text{base on limitation of deflection} \quad (29)$$

dengan:

L = allowable pipe span

Z = modulus pipe section

Sh = allowable stress for the pipe material at design temperature

w = Total weight of pipe

I = area moment of inertia

E = modulus elasticity

4. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang diperoleh dalam permasalahan optimasi perancangan sistem perpipaan adalah:

1. Optimasi perancangan awal sistem perpipaan dapat dilakukan dengan metode *multidisciplinary design optimization* (MDO).
2. Strategi optimasi perancangan sistem perpipaan, mengambil diameter iner dan diameter outer pipa sebagai variabel perancangan, *wall thickness* sebagai *objective function*. *Stress analysis* sebagai *equality constraint* dan *inequality constraint*, dan menyelesaikan permasalahan optimasi dengan menggunakan bantuan *ALM Methods*.

References

- [1] Gillespie, TD, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc, 1992
- [2] Vanderplaats, Garret N, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, 1984.
- [3] Pike, Ralph W, *Optimization for Engineering System*, rand Reinhold Company Inc, 1986
- [4] Hans Eschnauer, Juhani Koski, Andrzej Osyczka, *Multicriteria Design Optimization: procedures and application*, Springer-Verlag Berlin, 1990
- [5] MM.Chatillon, L.Jezequel, *Hierarchical Optimization of The Design Parameters of a Vehicle Suspension System*, Vehicle System Dynamics Vol.00, No.00, , 1-23. 2005.

- [6] Monu Kalsi, Kurt Hacker, and Kemper Lewis, *A Comprehensive Robust Design Approach for Decision Trade-Offs in Complex Systems Design*, University of Buffalo
- [7] Kodiyalam, S. and Sobieszcanski-Sobieski, *Multidisciplinary Design Optimization – Some Formal Methods, Framework Requirements, and Application to Vehicle Design*, International Journal Vehicle Design 2001, pp. 3-22, 2001



