

ANALISIS UNTUK MENENTUKAN FAKTOR KONSENTRASI TEGANGAN DENGAN EKSPERIMENTAL DAN METODE ELEMEN HINGGA

NUSYIRWAN

Lab. Konstruksi Mesin Jurusan Teknik Mesin Universitas Andalas

ABSTRAK

Menentukan faktor konsentrasi tegangan pada suatu material bertakik ada beberapa cara, antara lain eksperimental dan metode elemen hingga. Secara eksperimental yaitu melakukan pengujian tarik setelah sensor regangan strain gage dipasang didekat takikan material. Cara metode elemen hingga yaitu melakukan pendekatan suatu fungsi kontinu dari besaran-besaran fisik suatu elemen untuk memperoleh tegangan material. Elemen yang digunakan berbentuk segitiga sisi lurus dan perhitungan dilakukan dengan program komputer. Hasil yang diperoleh terjadi penyimpangan sebesar 21 persen antara teoritis dan eksperimental.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam bidang konstruksi mesin, perlu dikaji faktor konsentrasi tegangan, karena hal tersebut berhubungan dengan tingkat kegagalan suatu elemen mesin. Untuk mengetahui dan menganalisis besarnya tegangan yang terjadi pada suatu material setelah dipasang sensor regangan pada permukaan material tersebut. Cara lain dapat juga dilakukan dengan metode elemen analitis seperti metode elemen hingga.

Setelah diketahui tegangan-tegangan yang terjadi pada material tersebut, akan dihitung nilai faktor konsentrasi tegangannya, yaitu perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan rata-rata.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa faktor konsentrasi tegangan pada suatu material berbentuk pelat bertakik yang diberi beban aksial. Langkah selanjutnya dilakukan metode analitis dengan metode elemen hingga.

1.3. Manfaat Penelitian

Dapat menentukan besarnya nilai faktor konsentrasi tegangan yang terjadi disekitar takikan akibat diberi beban luar

II TINJAUAN PUSTAKA

Tegangan pada tiga dimensi pada suatu titik didalam kontinum dapat dinyatakan dengan sembilan komponen tensor tegangan dan dapat ditulis sebagai berikut :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Sebuah elemen yang sangat kecil dalam sumbu koordinat kartesius yang panjang sisinya dinyatakan dengan dx, dy dan dz. Tegangan normal diberi notasi σ_x , σ_y dan σ_z sedangkan tegangan geser diberi tanda τ_{xy} , τ_{yz} dan seterusnya.

Momen terhadap sumbu y diberikan dalam persamaan yang disederhanakan menjadi :

$$\tau_{zxdxdydz} - \tau_{yxdxdydz} = 0 \quad (2.2)$$

Jadi hanya ada tiga komponen tegangan geser yang harus diperhitungkan.

2.1. Kesetimbangan dari Persamaan Gaya

Persamaan kesetimbangan gaya untuk arah x yaitu :

$$\frac{\delta\tau_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta z} + F_x = 0 \quad (2.3)$$

Dengan cara yang sama dapat diperoleh kesetimbangan gaya untuk arah y dan z yaitu:

$$\frac{\delta\tau_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta z} + F_y = 0 \quad (2.4)$$

$$\frac{\delta\tau_{yx}}{\delta x} + \frac{\delta\sigma_y}{\delta y} + \frac{\delta\tau_{zx}}{\delta z} + F_z = 0 \quad (2.5)$$

Dimana F_x , F_y dan F_z adalah gaya-gaya badan persatuan isi (N. mm²) dalam arah xyz.

Tegangan-tegangan tersebut akan menimbulkan regangan normal dan regangan geser. Regangan normal ϵ_x , ϵ_y dan ϵ_z didefinisikan sebagai berikut :

$$\epsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_x = \frac{\delta v}{\delta y} \quad (2.7)$$

$$\epsilon_x = \frac{\delta w}{\delta x} \tag{2.8}$$

Dimana u, v, w merupakan translasi dari arah xyz.

Dari persamaan diatas dapat dilihat ada tiga regangan geser yang bebas. Keenam tegangan bebas dan keenam regangannya dapat ditulis dalam matrik kolom seperti berikut

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

$$\epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \\ \epsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yz} \\ \epsilon_{zx} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

2.2. Konsentrasi Tegangan

Suatu diskontinuitas dalam benda misalnya lubang atau takik, akan mengakibatkan distribusi tegangan tidak merata disekitar diskontinuitas tersebut. Pada beberapa daerah didekat diskontinuitas, tegangan akan lebih tinggi daripada tegangan rata-rata yang jauh letaknya dari diskontinuitas. Jadi telah terjadi konsentrasi tegangan pada diskontinuitas.

Konsentrasi tegangan dinyatakan dengan faktor tegangan K. Pada umumnya K adalah sebagai perbandingan antara tegangan maksimum dengan tegangan nominal terhadap dasar penampang sesungguhnya.

$$K = \frac{\sigma_{maks}}{\sigma_{nominal}} \tag{2.11}$$

2.3. Metode Elemen Hingga

Untuk mendapatkan suatu persamaan dengan menggunakan metode elemen hingga dilakukan langkah-langkah sebagai berikut

1. Pendiskritisasian elemen.
2. Menentukan pemakaian model atau fungsi bentuk.
3. Menentukan hubungan perpindahan regangan dan hubungan tegangan regangan.
4. Menurunkan persamaan elemen yaitu
 - Persamaan energi regangan

- Persamaan energi potensial
5. Menyusun persamaan elemen lokal menjadi persamaan elemen global.
 6. Menyelesaikan persamaan simultan.
 7. Menghitung perpindahan, gaya, regangan dan tegangan.

Pendiskritisasian

Dalam pendiskritisasian elemen kita harus mengetahui tipe elemen yang akan kita gunakan. Untuk satu dimensi, elemen yang akan kita gunakan disebut elemen garis. Untuk benda dua dimensi kita dapat menggunakan elemen-elemen segitiga, elemen-elemen segiempat atau gabungan antara elemen segitiga dengan elemen segiempat. Dalam penelitian ini yang dipakai adalah elemen berbentuk segitiga.

Menentukan pembagian model atau fungsi

Dalam langkah ini kita pilih pola bentuk distribusi dari jumlah yang tidak diketahui dapat berpindah dan / atau tegangan untuk masalah-masalah deformasi.

Titik nodal dari elemen pada titik-titik strategis digunakan untuk menuliskan fungsi-fungsi matematika untuk melukiskan untuk distribusi dari jumlah yang tidak diketahui dari elemen. Sejumlah dari fungsi matematika seperti polinomial dan trigonometri dapat digunakan untuk anggapan ini, polinomial digunakan karena kesederhanaannya dalam memformulasikan elemen hingga ini.

Menentukan hubungan perpindahan regangan dan tegangan regangan

Pada langkah ini menggunakan prinsip dari energi potensial minimum. Regangan diasumsikan sangat kecil, hubungannya dengan perpindahan dapat dituliskan dalam persamaan

$$\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{2.12}$$

Dimana v adalah deformasi dalam arah y.

Penurunan persamaan elemen

Persamaan energi regangan dalam benda elastis tiga dimensi adalah

$$A^{(e)} = \frac{1}{2} \iiint_v \{\epsilon\} dv \tag{2.13}$$

Persamaan energi potensial

Energi potensial didefinisikan sebagai potensi jumlah energi regangan dalam (U) dengan potensial dari beban-beban luar (Wp) yaitu :

$$\prod_p = U + W_p \tag{2.14}$$

Kalau kita menggunakan prinsip, potensial minimum, kita akan dapat turunan dari Wp dan menggunakan dengan nol.

$$\partial \prod_p = \partial U + \partial W_p \tag{2.15}$$

Disini kita gunakan hubungan antara potensial beban luar dengan kerja yang dilakukan oleh beban sebagai :

$$\partial W = - \partial W_p$$

Energi potensial (W_p) merupakan fungsi dari perpindahan node.

$$\prod_p = \prod_p (u_1, u_2, \dots, u_n)$$

Dimana $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ adalah perpindahan nomor node, dan n adalah total jumlah node yang diperkirakan, kemudian $dpp = 0$ maka kita dapatkan persamaan :

$$\frac{\partial \prod_p}{\partial u_1} = \frac{\partial \prod_p}{\partial u_2} = \dots = \frac{\partial \prod_p}{\partial u_n} = 0 \quad (2.16)$$

III. KONSENTRASI TEGANGAN METODE ANALIS FAKTOR

Benda uji yang dianalisis adalah pelat segiempat yang diberi takikan pada kedua sisinya dan diberi gaya tarik merata secara aksial. Karena pelat ini adalah simetri maka cukup dianalisis seperempat bagian saja.

Untuk menyelesaikan banyak persamaan metode elemen hingga berorientasi pada program komputer. Untuk mengetahui apakah hasil program komputer dapat dipercaya, program ini dapat dicoba dengan memasukkan data yang sudah ada jawabannya dan hasilnya sama, maka program metode elemen hingga ini dapat dinyatakan benar.

Pertama memasukkan data sifat fisik, dari material seperti dimensi, modulus, elastisitas, poisson ratio dan tebal dari benda uji. Setelah nilai-nilai sifat fisiknya dimasukkan selanjutnya dilakukan diskritisasi elemen, setelah itu masukkan data gaya tarik atau beban dan akhirnya ditentukan syarat batas dimana pada node tersebut tidak terjadi perpindahan.

Pada penelitian ini dibahas sebuah pelat yang dibagi menjadi 88 elemen dan 61 titik node, pemberian gaya tarik dilakukan pada titik node, sedangkan syarat batas digantikan dengan tumpuan roll.

Kasus yang dibahas adalah dengan data material sebagai berikut :

1. Modulus elastisitas (E) = $0,2 \times 10^6$ N/mm²
2. Panjang 11 cm dan lebar 6 cm
3. Poisson ratio
4. Jumlah elemen = 48
5. Jumlah node = 61
6. Tebal = 0,4 cm

Pada analisis tegangan ini gaya tarik yang diberikan sebesar 25000 N dan terdistribusi merata sebagai berikut :

- a. Node 1 dan node 7 masing-masing sebesar -2083
- b. Node 2 sampai node 6 masing masing sebesar -4166
- c. Node 55 dan node 61 masing masing sebesar 2083 N

- d. Node 56 sampai node 60 masing masing sebesar 4166 N

Berikut adalah hasil perhitungan dengan metode elemen hingga pada node-node dimana dipasang strain gage

Tabel 3.1 Pemodelan Elemen

| No. Node | No. Elemen | Nilai Tegangan (x 10 ⁴) N/mm ² |
|----------|------------|---|
| 31 | 48 | 1,3196 |
| 32 | 50 | 1,4397 |
| 33 | 52 | 2,0938 |
| 25 | 40 | 1,2974 |
| 26 | 42 | 1,4445 |
| 27 | 44 | 2,1135 |
| 18 | 30 | 1,2069 |
| 20 | 34 | 1,0102 |
| 21 | 36 | 5,3173 |

Dari hasil metode elemen hingga didapat tegangan maksimum pada node 27 elemen 44 yaitu $2,1135 \times 10^4$ N/mm². Besarnya faktor konsentrasi tegangan (K) diberikan dengan persamaan berikut :

$$K = \frac{2,1135 \times 10^4 \text{ N/mm}^2}{1,1490 \times 10^4 \text{ N/mm}^2}$$

$$K = 1,8394$$

3.2. Analisis faktor konsentrasi tegangan secara eksperimental

3.2.1. Alat-alat yang digunakan

1. Benda uji tarik : baja (tensile high strength plate)
2. Strain gage :
 - Tipe FLA 5-3LA 1
 - Panjang 5 mm
 - Tahanan gage 120+0,5%
 - Faktor gage 2,14
3. Amplifier tegangan
4. Mesin uji tarik
 - Merek : Universal testing machine
 - Tipe rat-30P
 - Cap 20859
 - Date August 1992
 - Buatan Tokyo testing machine MI7G Co.Ltd
 - Digital multimeter
5. Digital multimeter

3.2.2. Prosedur pengujian

1. Pemilihan bahan dan dimensi benda uji.
2. Pemasangan strain gage.
3. Membersihkan permukaan benda uji yang akan dipasang strain gage.
4. Persiapkan lem yang akan dipakai merek Loctite 401
5. Tempelkan strain gage pada benda uji

6. Hubungkan kabel strain gage ke jembatan Wheatstone.
7. Kalibrasi mesin uji tarik.
8. Memasang benda uji pada benda uji tarik.
9. Hidupkan mesin uji tarik sampai batas tertentu.
10. Catat angka tegangan keluaran pada digital multimeter.
11. Konversikan tegangan listrik menjadi regangan.

| No. Stain Gage | ϵ_{str} |
|----------------|------------------|
| 1 | 0,000623 |
| 2 | 0,000747 |
| 3 | 0,001215 |
| 4 | 0,000623 |
| 5 | 0,000747 |
| 6 | 0,001246 |
| 7 | 0,000623 |
| 8 | 0,000747 |
| 9 | 0,000249 |

Setelah didapatkan nilai regangan maka dapat diperoleh nilai tegangan dengan persamaan berikut :

$$\sigma = \epsilon_{str} \cdot E \tag{3.3}$$

Maka nilai tegangan untuk strain gage nomor 1 adalah :

$$\sigma_1 = 0,000623 \cdot 0,2 \times 10^6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_1 = 124,6 \text{ N/mm}^2$$

Dengan cara yang sama nilai tegangan untuk strain gage selanjutnya dapat ditabelkan

Tabel 3.4 Hasil Pengukuran Tegangan

| No. Stain Gage | Tegangan (N/mm2) |
|----------------|------------------|
| 2 | 149,52 |
| 3 | 242 |
| 4 | 124,6 |
| 5 | 149,5 |
| 6 | 250 |
| 7 | 124,6 |
| 8 | 149,5 |
| 9 | 49,8 |

Dari hasil pengujian diatas didapat bahwa tegangan maksimum terjadi pada strain gage nomor 6 yaitu sebesar 260 N/mm2, nilai tegangan rata-rata didapat dengan cara menjumlahkan nilai tegangan pada penampang terkecil yaitu nilai tegangan dari strain gage nomor 1, 2 dan 3 karena pelat simetri maka nilai tegangan dikali 2 lalu dibagi 6, dan didapatkan sebesar 172,04 konsentrasi tegangan yang terjadi pada takikan sebagai berikut :

$$K = \frac{250 \text{ N/mm}^2}{172,04 \text{ N/mm}^2} = 1,4532$$

3.3. Hasil dan Pembahasan

3.3.1. Hasil

Hasil yang didapat dengan pengujian tarik sudah dijelaskan pada bagian 3.2 sedangkan hasil dengan metode elemen hingga dapat dilihat sebagai berikut :

3.2.3. Pengujian gaya tarik yang diberikan

Sifat benda uji :

Modulus elastisitas (E) = 0,2x10⁶ N/mm²

Tegangan maksimum (Tmax) = 370 Mpa

Tegangan luluh = 240 Mpa

Karena pengujian masih dalam batas elastisitas dimana hukum Hooke masih berlaku maka didapatkan tegangan yield dengan persamaan :

$$\sigma_y = \frac{P_{maks}}{A} \tag{3.1}$$

Dimana a = luas penampang terkecil dari benda uji 16 m². Dari persamaan diatas didapatkan

Tabel 3.2 Titik Pengukuran

| No. Strain Gage | E Awal (Volt) | E Akhir (Volt) | ΔE (Volt) |
|-----------------|---------------|----------------|-------------------|
| 1 | 0,5563 | 0,5568 | 0,0005 |
| 2 | 0,6167 | 0,6173 | 0,0006 |
| 3 | 0,5788 | 0,5797 | 0,0009 |
| 4 | 0,5554 | 0,5600 | 0,0005 |
| 5 | 0,5892 | 0,5898 | 0,0006 |
| 6 | 0,5321 | 0,5331 | 0,0010 |
| 7 | 0,5404 | 0,5409 | 0,0005 |
| 8 | 0,0602 | 0,0608 | 0,0006 |
| 9 | 0,5575 | 0,5577 | 0,0002 |

Dengan menggunakan jembatan Wheatstone dimana R1 adalah strain gage sedangkan R2, R3 dan R4 adalah tahanan tetap maka besarnya tegangan keluaran dari jembatan Wheatstone didekati dengan persamaan sebagai berikut :

$$\Delta e_o = \frac{1}{4} K \cdot e_1 \cdot \epsilon_{str} \tag{3.2}$$

Maka regangan yang terjadi pada strain gage adalah

$$\epsilon_{str} = \frac{4\Delta e_o}{e_1 K}$$

$$\epsilon_{str} = \frac{4 \cdot 0,0005}{1,5 \cdot 2,14} = 0,000623$$

Dengan cara yang sama untuk strain gage selanjutnya dapat ditabelkan sebagai berikut

Tabel 3 3 Hasil Pengukuran

Tegangan maksimum 2,113 51E+04 N/mm² pada elemen 44

Tegangan minimum -1,389E+03 N/mm² pada elemen 6

Tegangan rata-rata = 1, 1490E+00

Perbandingan faktor konsentrasi tegangan dari pengujian tarik dengan metode elemen hingga adalah sebagai berikut :

$$\frac{K_{\text{pengujian}}}{K_{\text{metode}}} = \frac{1,4532}{1,8394} = 0,7900$$

Dari perbandingan diatas didapatkan penyimpangan sebesar 21 %

3.3.2. Pembahasan

Dengan metode elemen hingga nilai tegangan maksimum pada titik node 27 elemen 44 sebesar 2,1135x10⁴ N/mm² yaitu pada tempat terjadinya takikan, makin jauh dari takikan nilai tegangan yang didapat semakin kecil, dapat dikatakan pada node 27 elemen 44 telah terjadi suatu konsentrasi tegangan (K).

Begitu jauh dengan pengujian talik dengan menggunakan strain gage sebagai sensor regangan didapat nilai tegangan maksimum pada strain gage nomor 6 sebesar 250 N/mm² sedangkan untuk strain gage selanjutnya yang semakin jauh dari takikan nilai tegangan yang didapat semakin kecil, ini berarti pada strain gage nomor 6 juga telah terjadi suatu konsentrasi tegangan menimbulkan factor konsentrasi tegangan (K). Dengan metode elemen hingga nilai tegangan yang terjadi pada node-node yang berdekatan dapat dilihat perbedaannya karena pembacaan dilakukan dengan komputer sedangkan pada metode pengujian tarik dengan strain gage didapatkan nilai tegangan yang sama yaitu pada node 1, 4 dan 7 serta pada node 2, 5 dan 8, disebabkan oleh pembacaan nilai tegangan keluaran amplifier dengan multimeter memakai penguat 1000 hanya mendapat 4 angka desimal. Karena itu dapat disimpulkan bahwa metode elemen hingga lebih teliti dibandingkan metode pengujian dengan strain gage.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisis perhitungan pada bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai tegangan paling tinggi terjadi pada elemen disekitar takikan dan nilai tegangan ini semakin turun untuk elemen yang semakin jauh dari takikan.
2. Perbandingan factor konsentrasi tegangan (K) metode eksperimental dengan metode elemen hingga adalah :

| No. Elemen | Teg. Maks. (N/mm ²) | Teg. Min (N/mm ²) |
|------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 1,00E+04 | -4,52E+02 |
| 5 | 1,06E+04 | -1,02E+03 |
| 10 | 2,11E+2 | -6,90E+03 |
| 15 | 1,02E+04 | -1,09E+03 |
| 20 | 1,10E+04 | -8,37E+02 |
| 25 | 6,83E+04 | 2,24E-08 |
| 30 | 1,21E+04 | -4,34E+02 |
| 35 | 1,16E+04 | -5,47E+02 |
| 40 | 1,30E+04 | 1,52E+03 |
| 45 | 2,11 E+04 | 2,53E+03 |
| 50 | 1,44E+04 | 2,64E+03 |
| 55 | 1,01E+04 | -9,79E+02 |
| 60 | 1,26E+04 | 1,44E+02 |
| 65 | 8,62E+03 | -4,3 8E+02 |
| 70 | 1,14E+04 | -9,50E+02 |
| 75 | 1,03E+04 | -3,55E+02 |
| 80 | 1,07E+04 | -4,53E+02 |
| 88 | 1,00E+04 | -4,52E+02 |

$$\frac{K_{\text{pengujian}}}{K_{\text{metode}}} = \frac{1,4532}{1,8394}$$

Terjadi penyimpangan sebesar 21% N ilai tegangan dengan metode elemen hingga

a hampir sama dengan hasil perhitungan dengan metode eksperimental ini menunjukkan hasil yang didapat dengan metode elemen hingga dapat dipercaya.

4. Program komputer untuk analisis perhitungan tegangan dengan metode elemen hingga ini sudah dapat mendiskritisasi elemen.
5. Perhitungan dengan metode elemen hingga lebih baik dan teliti dibandingkan dengan metode eksperimental karena metode elemen hingga dapat menentukan nilai tegangan yang terjadi pada tiap node.
6. Metode pengujian tarik dengan sensor regangan strain gage hanya dapat mengetahui besar tegangan ditempat strain gage dipasang.
7. Ketelitian dari hasil pengujian tarik dengan sensor regangan strain gage banyak factor yang mempengaruhinya antara lain
 - Strain gage sensitivitas yang tinggi
 - Cara pemasangan strain gage
 - Kalibrasi alat-alat yang digunakan
 - Pemberian gaya tarik pada waktu pengujian

DAFTAR PUSTAKA

1. Segerlin J Larry, Applied Finite Element Analys, Second edition, Mon Wiley and Sons, 1994
2. Cook Robert D, Konsep dan Aplikasi Metode Elemen Hingga, PT. Eresco, Bandung
3. Johnston Paul R and Weater, Jr. Williarn, Elemen Hingga untuk Analisis Struktur, PT. Eresco, Bandung
4. Dally James W. and Rilley Williarn F, Experimental Stress Analysis, McGraw-Hill, Tokyo, 1991

5. Knight Charles E, Jr, The Finite Element in Mechanical Design, PWS Kent, 1993
6. Popov Egor E, Mekanika Teknik, Edisi Kedua, Erlangga Jakarta, 1989
7. H.M. Jugianto, Teori dan aplikasi Program Komputer Bahasa Pascal, Jilid 1 dan 11, Andi Offset, Jogjakarta, 1993
8. Kadir Abdul, Turbo Pascal versi 5.5
9. Susanto Agus, Tugas Akhir, Universitas Andalas Padang, 1991