

# Aplikasi Penggunaan Metode *Moiré Pattern* untuk Mengetahui Karakteristik Sebaran Nilai *Stress-Displacement* pada Material Baja AISI 304 Berbasis *Image Processing*

Mohammad Khoirul Effendi<sup>1\*</sup>, Agus Sigit Pramono<sup>1</sup>, Ari Surya Yulianto<sup>1</sup>, Hanif Pribadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya, Indonesia

\*Penulis korespondensi; E-mail: khoiruleffendi@yahoo.com

## ABSTRAK

Medan tegangan adalah parameter penting untuk menentukan kekuatan suatu plat akibat pembebanan. Pengukuran medan tegangan tidak bisa dilakukan secara langsung. Dari penjabaran matematika diketahui bahwa medan tegangan mempunyai hubungan dengan medan perpindahan/*displacement*. Di dalam teori plat, *displacement* kearah *outplane* tidak lain adalah defleksi. Salah satu metode untuk mendapatkan nilai defleksi pada plat adalah metode Moiré. Metode Moiré ini menggunakan prinsip superposisi antara garis yang terletak pada plat dengan garis referensi. Ketika sebuah plat uji dikenai sebuah beban, maka defleksi yang terjadi pada material uji akan membentuk pola superposisi yang berupa pola gelap terang (*frinji*) yang menggambarkan distribusi nilai *stress-displacement* pada sebuah material uji. Material uji yang digunakan adalah plat baja AISI 304 yang sebelumnya sudah diberi pola kisi dengan variasi jarak sebesar 1mm. Keempat sisi plat uji tersebut dijepit sempurna, kemudian diberi tekanan dengan variasi displacement (0.5, 1, 1.5, dan 2 mm) tepat di tengah-tengah plat tersebut. Pola moiré yang terjadi ditangkap oleh kamera yang merubahnya menjadi sebuah citra digital. Citra digital tersebut kemudian diproses melalui serangkaian proses pengolahan gambar yang terdiri atas proses filter (*Gaussian filter* dan *Butterworthlow pass filter*), serta pendeteksi tepi Sobel, Prewitt, Canny, dan Roberts). Hasil pengukuran *stress-strain* dengan metode Moiré ini kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitis dan perhitungan numerik. Rata-rata perbedaan nilai displacement metode moiré dengan metode analitis sebesar 6,75%, sedangkan perbedaan dengan metode numerik sebesar 7,55%. Kemudian nilai rata-rata perbedaan nilai stress antara penghitungan metode Moiré dengan analitis sebesar 9.08%, sedangkan perbedaan dengan metode numerik sebesar 9,5%.

**Kata kunci:** *Moiré pattern*, *frinji*, deteksi tepi, sebaran nilai *stress-displacement*

## ABSTRACT

*Stress field is an important parameter for determining the strength of a plate due the loading. Measurement of the stress field in it cannot be done directly. The mathematic explanation shows that the stress field has a relationship with the terrain displacement/displacement. In the plate theory, deflection is defined as displacement towards out plane direction. One method to get the value of deflection on the plate is a Moiré method. This Moiré method uses the principle of line superposition between plate and its reference. When a test plate subjected to a load, the deflection that occurs in the test material a pattern will be produced in the form of a superposition of light and dark pattern (fringe) which describes the distribution of the stress-displacement on a surface of tested material. Tested material is AISI 304. The surface of tested material was given a lattice pattern with variations in distance of 1 mm. The fourth side of the tested plate is clamped perfectly, then the center of it will be pressurized with variations in displacement (0.5, 1, 1.5, and 2 mm). The occurred Moiré patterns will be captured by the camera to turn it into a digital image. Furthermore, it will be processed through a series of image processing which consists of the four different filter algorithms (Gaussian filter and Butterworth Low Pass Filter), and also four edge detection algorithms (Sobel, Prewitt, Canny, and Roberts). The results of the stress-strain measurements will be compared with the results of analytical calculations and numerical calculations. The difference of displacement average using moiré method compared with analytical method is 6.75%, while using numerical method is 7.55%. Furthermore the difference of stress average using moiré method compared with analytical calculation is 9.08%, while using numerical methods by 9.5%.*

**Keywords:** *Moiré pattern*, *fringe*, *edge detection*, *stress-displacement distribution*

## PENDAHULUAN

Dalam ilmu material, deformasi adalah perubahan bentuk atau ukuran dari suatu obyek karena adanya gaya yang diberikan pada obyek tersebut. Gaya yang bekerja pada material tersebut bisa berupa energi yang ditransfer melalui kerja atau perubahan suhu yang ditransfer melalui panas. Untuk jenis yang pertama gaya yang bekerja pada material bisa berupa gaya tarik, tekan, geser (*shear*), *bending* atau torsi. Sedangkan untuk jenis yang kedua, faktor yang paling signifikan adalah cacat mobilitas struktural seperti batas butir, kekosongan titik, dislokasi garis, kesalahan susunan dalam kristal dan non-kristal. Pergerakan atau perpindahan cacat mobile diaktifkan oleh perubahan temperatur dan dibatasi oleh laju difusi atom.

Medan tegangan adalah parameter penting untuk menentukan kekuatan suatu plat akibat pembebanan. Pengukuran medan tegangan tidak bisa dilakukan secara langsung. Dari penjabaran matematika diketahui bahwa medan tegangan mempunyai hubungan dengan medan perpindahan/*displacement*. Di dalam teori plat, *displacement* ke arah *outplane* tidak lain adalah defleksi. Defleksi yang terjadi pada plat sering digambarkan sebagai *strain* [1,2]. Salah satu metode untuk mendapatkan nilai defleksi pada plat adalah metode *Moiré*. Pengukuran optik menggunakan metode ini secara umum dibagi menjadi dua kelompok yaitu *in-plane measurement* dan *out-of-plane measurement*. *In-plane measurement* didapatkan berdasarkan superposisi dari kisi referensi dan kisi objek. *Out-of-plane measurement* biasanya digunakan untuk pengukuran perpindahan tegak lurus bidang misalnya ketinggian permukaan [3].

Salah satu keuntungan menggunakan metode *Moiré* ini adalah sifat sensitifitasnya terhadap pergeseran (*displacement*), oleh karena aplikasi metode ini untuk pengukuran sangatlah tepat karena akan menghasilkan nilai pengukuran dengan nilai akurasi yang tinggi. Pengukuran secara *out of plane displacement* dibagi menjadi dua macam pengukuran yaitu *shadow* dan *projection*. Metode proyeksi banyak dipilih karena biaya pengukurannya yang murah, tidak bersifat merusak dan dapat diterapkan secara menyeluruh pada benda kerja yang akan diukur [4].

Pada metode proyeksi, kisi maya (*virtual grating*) dipakai sebagai kisi proyeksi dimana kisi tersebut dihasilkan dari susunan interferometer Michelson. Kisi maya diproyeksikan pada permukaan

an obyek pada sudut tertentu sehingga pola kisi terpetakan pada permukaan obyek. Kamera CCD yang ditempatkan tegak lurus permukaan obyek, akan merekam pola kisi tersebut dan menyimpannya dalam memori komputer dalam bentuk digital berupa skala *grey* yang bernilai 0 sampai 255. Pola *frinji* terbentuk bila dua kisi dengan kerapatan yang hampir sama saling bersuperposisi. Untuk mendapatkan dua kisi dengan kerapatan yang hampir sama ini, dilakukan dua kali perekaman, yaitu yang pertama sebelum obyek dikenai simpangan dan yang kedua setelah obyek mendapat simpangan. Selanjutnya kedua citra hasil rekaman di atas dikurangkan secara piksel per piksel [5,6].

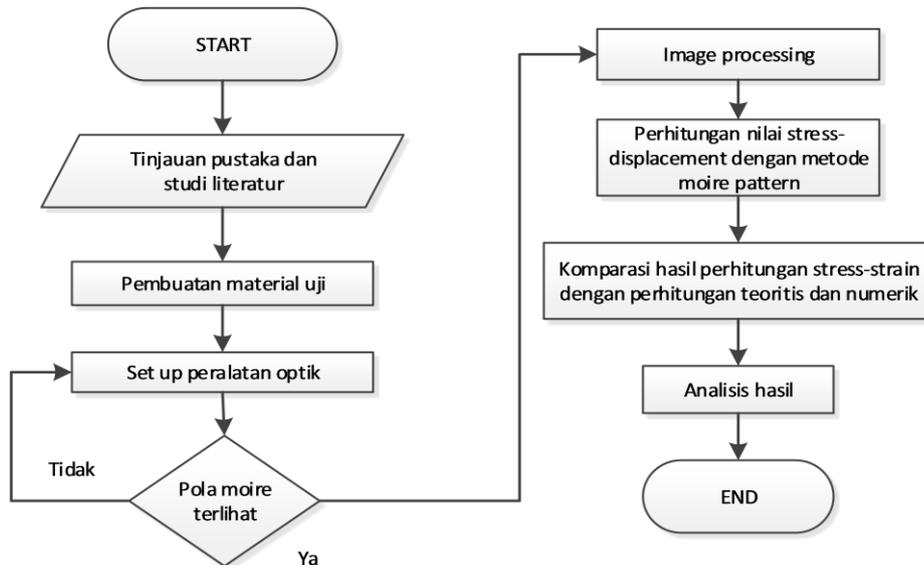
Pengolahan citra (*image processing*) telah banyak digunakan untuk menganalisa kekuatan geser material skala laboratorium. Kelebihan metoda ini terletak pada sifat *non-contact* terhadap sampel yang diukur dan dapat mendeteksi deformasi yang terjadi dengan lebih presisi dan lebih aman [7,8]. Selain itu pengolahan citra juga dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas citra sehingga didapatkan sebuah citra yang sudah terbebas dari pengaruh derau (*noise*). Hasil citra yang didapatkan dari hasil pengolahan citra ini diharapkan mendekati citra sesungguhnya [9].

Terdapat lima proses dalam pengolahan citra digital, yaitu *image restoration*, *image enhancement*, *image data compaction*, *image analysis* dan *image reconstruction* [10]. *Image restoration* atau perbaikan citra berhubungan dengan minimalisasi atau penghilangan degradasi tertentu yang terdapat dalam citra sehingga didapatkan kembali citra aslinya. Degradasi ini dapat diakibatkan oleh lingkungan penginderaan citra, misalnya derau yang diakibatkan sensor citra, buram (*blur*) akibat kamera yang tidak fokus, keadaan atmosfer atau pencahayaan ketika citra ditangkap, dan sebagainya [11].

Ada beberapa tahapan pengolahan citra yang harus dilakukan agar citra *frinji* dapat menghasilkan citra *stress-strain*. Tahapan-tahapan itu meliputi *image filter* yaitu gambar berupa pola diubah ke bentuk *gray scale* dan dilakukan filter dengan *Fourier transform*. Hasil dari filter kemudian dijadikan citra biner atau *threshold* untuk lebih memperjelas pola dan selanjutnya citra *thinning* untuk membuat pola *frinji* terang yang diperoleh menjadi garis sehingga besaran *strain* bisa dihitung dari perbandingan antara jarak kisi dan spasi [12].

### METODE PENELITIAN

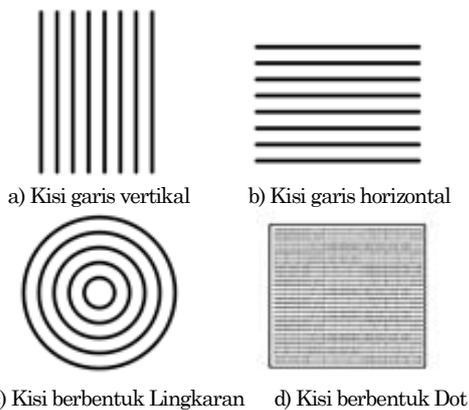
Secara garis besar *flowchart* penelitian ini bisa dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

### *Moire pattern*

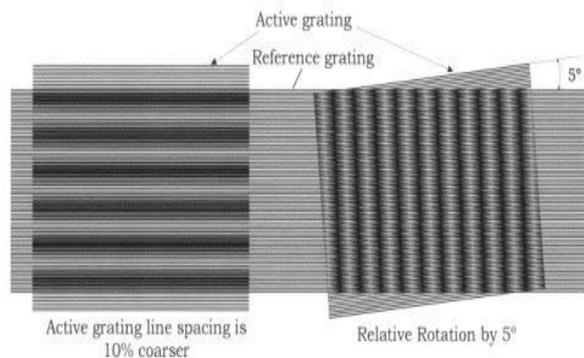
*Moire pattern* adalah pola yang terjadi akibat superposisi dari dua atau lebih pola kisi dengan kandungan intensitas gelap terang dengan intensitas gelap terang yang periodik. Lebar garis gelap dan lebar antar garis atau garis terang biasanya sama, namun dalam beberapa kasus bisa berbeda. Pola kisi ini dapat berbentuk garis, lingkaran dan sebagainya. Namun yang lebih umum di aplikasikan adalah kisi garis karena paling sederhana untuk dianalisa. Cara-cara yang umum dilakukan untuk menciptakan *frinji* (pola gelap terang), yaitu interferometer, pola kisi refleksi, dan lain-lainya, akan tetapi dalam penelitian ini hanya menggunakan pola kisi sebagai penggenarasi *frinji*. Beberapa jenis pola kisi yang sering dipakai dalam penelitian bisa dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Jenis Pola Kisi yang Umum Digunakan

Metode *Moiré* yang dipakai dalam penelitian ini adalah metode *in-plane measurement*, dimana pola *Moiré* didapatkan berdasarkan superposisi dari pola kisi referensi dan objek seperti terlihat pada Gambar 3. Pola kisi referensi mempunyai periode serta jarak *grating* yang konstan, sedangkan untuk pola kisi objek, awal mulanya mempunyai periode dan jarak pola kisi yang sama, akan tetapi ketika ada sebuah gaya yang bekerja pada objek tersebut maka jarak pola kisi tersebut akan berubah. Pola kisi objek dicetak atau ditempelkan pada permukaan objek. Bila dilihat dari jauh, pola kisi referensi dan pola kisi objek tidak lagi dapat dibedakan, dan hanya terlihat pita gelap dan terang.

*Set-up* komponen untuk pengukuran nilai *stress & displacement* dengan metode *Moiré* dapat dilihat pada Gambar 4, dimana komponen pengukuran terdiri dari kamera digital (a), lampu halogen (b) dan plat uji, penjepit dan *indenter* (c).



Gambar 3. Superposisi Antar Kisi Aktif dan Referensi dengan Sudut Rotasi Relatif 0° dan 5°

Plat uji yang digunakan dalam percobaan ini adalah plat baja AISI 304 berbentuk persegi berukuran 15 x 15 cm dengan tebal 1 mm. Di atas plat uji kemudian dicetak kisi-kisi dengan jarak 1 mm, seperti terlihat pada Gambar 5. Plat uji di dalam percobaan ini berfungsi sebagai *grating* aktif, sedangkan sebuah mika transparan dengan jarak kisi-kisi yang sama digunakan sebagai *grating* referensi.

Pada penelitian ini kamera digital yang digunakan adalah merk Sony dengan resolusi sebesar 5 *megapixel* seperti terlihat pada Gambar 6(a). Kamera digital disini berfungsi menangkap pola moiré yang terjadi pada plat uji ketika plat uji tersebut dikenai gaya indentasi yang bervariasi. Pada penelitian ini juga digunakan lampu halogen 200 Watt dan berfungsi sebagai sumber cahaya sehingga pola *Moiré* bisa terlihat jelas pada permukaan plat uji. Gambar lampu halogen tersebut bisa dilihat pada Gambar 6(b).

Pada penelitian ini digunakan *dial indicator* yang berfungsi untuk mengetahui besaran pembebanan yang diwakili dengan perubahan jarak indentasi yang diberikan *indenter* kepada material uji. Pemberian beban terpusat pada plat uji diwakili oleh sebuah *indenter* yang digerakkan oleh sebuah mekanisme ulir. Perubahan jarak indentasi pada percobaan ini divariasikan antara 0.5, 1, 1.5, serta 2 mm. Skema peletakan *dial indicator* pada *indenter* bisa dilihat pada Gambar 7.

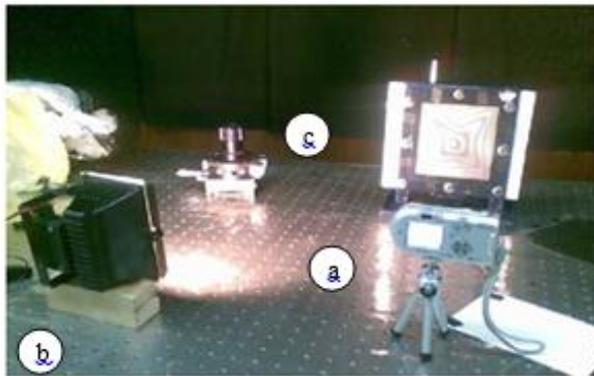


a) Kamera digital      b) Lampu halogen

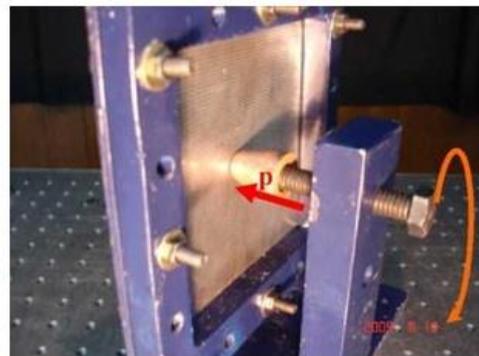


c) Dial indicator

Gambar 6. Perangkat Penelitian



Gambar 4. Set-Up Komponen Pengukuran *Stress-Displacement*

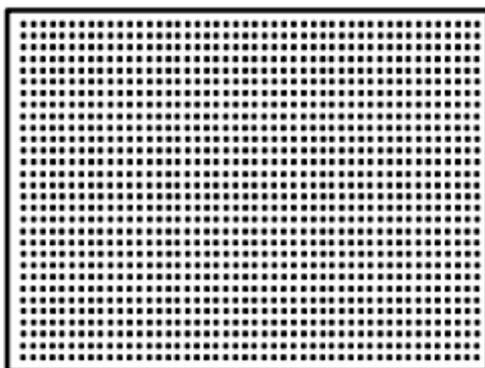


a) Indenter



b) Peletakan *dial indicator* pada *indenter*

Gambar 7. Indenter dan Peletakan *Dial Indicator*



Gambar 5. Cetaknaan Material Uji

### Image Processing

Perekaman data permukaan obyek ukur yang dikenai beban terpusat dilakukan oleh kamera digital. Citra yang dihasilkan kamera tersebut kemudian dirubah ke dalam bentuk data numerik

yang kemudian diolah melalui beberapa tahapan dengan *software* komputasi untuk memperoleh informasi sebaran *displacement*, serta *stress* pada permukaan obyek ukur.

Gambar Berwarna Menjadi Gambar *Gray*

Tahap ini mengubah gambar berwarna (RGB) menjadi gambar *gray scale* dengan menghilangkan informasi warna dan saturasi, akan tetapi tetap mempertahankan informasi pencahayaan dari gambar tersebut. Perubahan ini mangacu pada Persamaan 1, dimana *R*, *G*, *B* adalah warna merah, hijau, dan biru dari suatu gambar berwarna. Contoh hasil proses ini bisa dilihat pada Gambar 8(b).

$$gray\ image = (0.2989 \times R) + (0.5870 \times G) + (0.1140 \times B) \quad (1)$$

*Gaussian Filter* dan *Butterworth Low Pass Filter* (BLPF)

Gambar *gray* yang dihasilkan dari proses sebelumnya masih menyisakan *noise*, yaitu berupa pola kisi-kisi yang akan berefek buruk dalam proses pendeteksian tepi. Oleh karena itu perlu adanya filter yang berfungsi untuk menghilangkan *noise* tersebut. Filter ini bersifat *low-pass filter* yang secara umum membuat sebuah gambar input menjadi *blur*. Pada penelitian ini digunakan 2 filter yang berbeda yaitu *Gaussian filter* dan *Butterworth low pass filter* (BLPF). *Gaussian filter* didefinisikan dengan Persamaan 2.

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Dimana *x* dan *y* adalah jarak dengan arah horisontal dan vertikal dari sumbu *x* dan *y* gambar asli, sedangkan  $\sigma$  adalah standar deviasi dari distribusi *Gaussian*. Sedangkan *Butterworth low pass filter* (BLPF) diformulasikan dengan Persamaan 3 sebagai berikut:

$$G(\omega) = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^{2n}}} \quad (3)$$

Dimana  $\omega$  adalah frekuensi angular dan *n* adalah jumlah *pole* di dalam filter. Hasil penggunaan filter pada sebuah gambar *gray input* bisa dilihat pada Gambar 8(c).

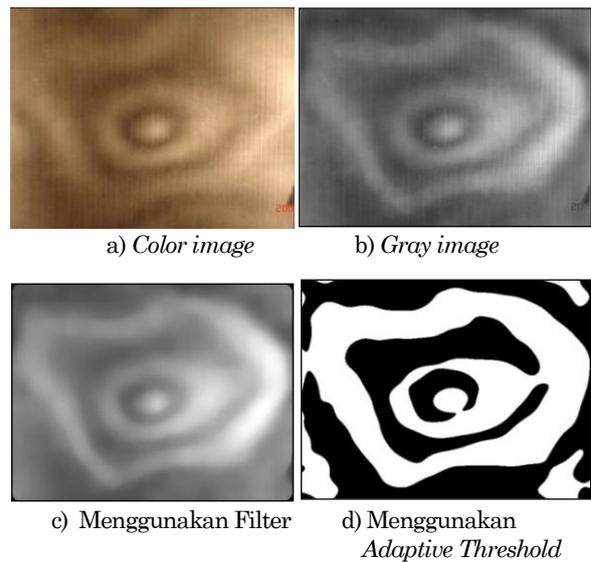
*Adaptive Threshold*

*Threshold* adalah suatu batas yang digunakan dalam proses perubahan citra *grayscale* yang mempunyai rentang nilai 0-255 menjadi citra biner dengan nilai 0 dan 1. Apabila hanya digunakan satu nilai *threshold* saja, maka citra yang dihasilkan

tidak dapat menampilkan garis-garis *frinji* secara sempurna. Hal ini disebabkan karena penggunaan satu nilai *threshold* memiliki keterbatasan dalam mendeteksi citra dengan homogenitas nilai derajat keabuan yang serupa nilainya. Oleh sebab itu, diperlukan nilai *threshold* yang bermacam-macam nilainya untuk satu gambar *gray* tertentu yang disebut sebagai *adaptive threshold*. Secara matematis proses penggunaan *threshold* ini mengacu pada Persamaan 4, sedangkan salah satu hasil proses pemfilteran bisa dilihat pada Gambar 8(d).

$$g(x, y) = 1\ if\ f(x, y) > T, \ else\ g(x, y) = 0 \quad (4)$$

Dimana *f(x,y)* adalah citra *grayscale* yang dijadikan *input*, *g(x,y)* adalah citra keluaran biner, sedangkan *T* adalah nilai *threshold*.



Gambar 8. Hasil Image

*Edge Detection*

Tepi didefinisikan sebagai batas antara dua daerah yang memiliki nilai piksel yang berbeda secara signifikan. Pola yang terbentuk dari deteksi tepi ini adalah pola melingkar berupa garis-garis. Beberapa kriteria hasil pendeteksian tepi dianggap bagus adalah tepi bisa terdeteksi dengan baik, kontribusi *noise* dari *back ground* gambar bisa direduksi seminimal mungkin, dan intensitas dari tepi yang terbentuk sedekat mungkin dengan persepsi mata manusia pada umumnya. Oleh karena itu dalam penelitian ini dipilihlah metode Sobel, Prewitt, Canny dan Roberts sebagai metode pendeteksi tepi. Hasil pendeteksian tepi ini nantinya dipakai sebagai acuan dalam pengukuran *displacement* berdasarkan pada jarak antar garis-garis dari pola melingkar yang terbentuk. Semakin banyak pola garis melingkar yang terbentuk maka semakin mudah dan akurat dalam penghitungan *displace-*

ment. Untuk metode *edge* dengan metode Sobel apa bila diketahui suatu citra  $f(x,y)$  adalah fungsi dua dimensi, maka vektor gradien dari  $x$  dan  $y$  masing-masing merupakan turunan pertama terhadap  $x$  dan  $y$ . Persamaan ini dapat dituliskan seperti pada Persamaan 5.

$$G = \begin{pmatrix} G_x \\ G_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial f(x,y)}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Untuk metode pendeteksi tepi menggunakan metode Prewitt, sebuah operator yang berupa matrik konvolusi 3 x 3 digunakan untuk mendeteksi tepi sebuah gambar input. Operator tersebut bias dituliskan seperti pada Persamaan 6, dimana  $G_x$  adalah operator untuk arah horisontal sedangkan  $G_y$  adalah operator untuk arah vertikal seperti terlihat pada Persamaan 6.

$$G_x = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix} \quad G_y = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Pendeteksi tepi metode Canny ini menggunakan *pre-processing* yaitu *Gaussian filter* untuk menentukan tepi suatu gambar *input*. Selanjutnya intensitas *gradient* untuk menentukan sebuah tepi gambar, diformulasikan dengan Persamaan 7.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (7)$$

Dimana  $G_x$  adalah turunan pertama untuk arah horisontal sedangkan  $G_y$  adalah turunan pertama untuk arah vertikal. Sedangkan sudut orientasi tepi relatif terhadap *grid pixel* diformulasikan dengan Persaman 8.

$$\Theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right) \quad (8)$$

Untuk algoritma Roberts formulasi yang dipakai bisa dilihat pada Persamaan 9.

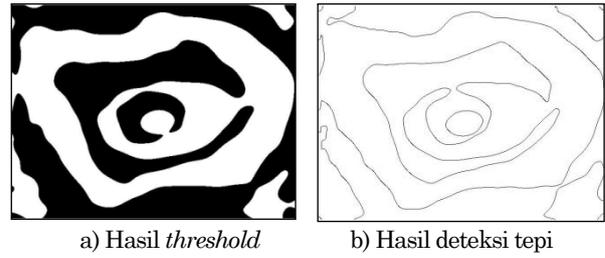
$$y_{i,j} = \sqrt{x_{i,j}}$$

$$z_{i,j} = \sqrt{(y_{i,j} - y_{i+1,j+1})^2 + (y_{i+1,j} - y_{i,j+1})^2} \quad (9)$$

Dimana  $x$  adalah nilai awal dari sebuah gambar,  $z$  adalah turunan perhitungan, dan  $i,j$  menunjukan lokasi dalam sebuah gambar. Tepi dari sebuah gambar terbentuk dari proses konvolusi gambar asli dengan matrik operator seperti terlihat pada Persamaan 10.

$$R_+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_- = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Salah satu contoh hasil pendeteksian tepi bisa dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil *Threshold* dan Deteksi Tepi

### Pengukuran *Displacement*

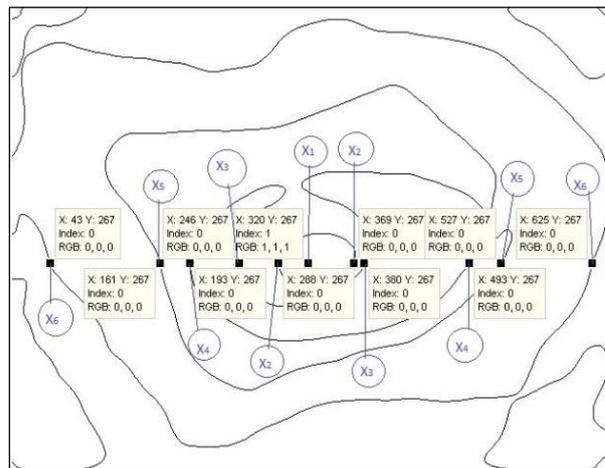
Pola yang terbentuk dari deteksi tepi ini adalah pola melingkar berupa garis-garis yang nantinya dipakai sebagai acuan dalam pengukuran *displacement*. Semakin banyak pola garis melingkar yang terbentuk maka semakin mudah dan akurat dalam penghitungan *displacement*. Perhitungan *displacement* dengan metode deteksi dihitung berdasarkan titik-titik yang dijadikan acuan sebagaimana terlihat pada Gambar 10. Sedangkan perhitungan *displacement* menurut metode *Ritz* (teoritis) mengacu pada Persamaan 11.

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} a_{mn} \left(1 - \cos \frac{2m\pi x}{a}\right) \left(1 - \cos \frac{2n\pi y}{b}\right) \quad (11)$$

Dimana  $w$  adalah adalah besar *displacement* pada plat,  $a$  dan  $b$  adalah dimensi plat,  $x$  dan  $y$  koordinat point pada material uji, sedangkan  $a_{mn}$  adalah amplitudo defleksi.

### Pengukuran *Stress*

Berdasarkan metode *edge detection* penentuan nilai *strain* dilakukan berdasarkan formulasi seperti yang terlihat pada Persamaan 12.



Gambar 10. Proses Penentuan Titik *Displacement*

$$\sigma_x = \frac{E.z}{(1-\nu^2)} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Dimana  $\sigma_x$  adalah tegangan arah x, z sumbu defleksi arah *in-plane*, E adalah modulus elastisitas,  $\nu$  adalah *poisson number*. Sedangkan secara teoritis perhitungan *stress* pada material uji mengikuti Persamaan 13.

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (13)$$

Dimana nilai  $\sigma_x$  dan  $\sigma_y$  didapatkan dari Persamaan 14.

$$\sigma_x = \frac{12M_x z}{t^3}, \sigma_y = \frac{12M_y z}{t^3} \quad (14)$$

Dimana t adalah tebal plat uji, sedangkan nilai  $M_x$  dan  $M_y$  didapatkan dari Persamaan 15.

$$M_x = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right), M_y = -D \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (15)$$

Dimana D adalah nilai flexural rigidity dari sebuah plat.

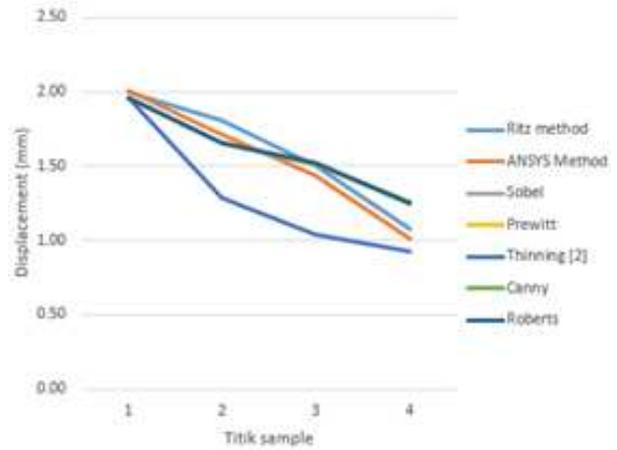
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Grafik perbedaan besar *displacement* antara teoritis, numerik, metode *moiré* menggunakan pendeteksi tepi metode Canny, Roberts, Sobel, Prewitt, serta penelitian sebelumnya dengan metode *thinning* [2] bisa dilihat pada Gambar 11(a). Kelima grafik mempunyai kecenderungan yang menurun ketika titik sampel semakin menjauh dari pusat. Hal ini menunjukkan semakin dekat posisi titik yang ditinjau dengan tepi, maka *displacement* titik tersebut bernilai nol karena plat tersebut dijepit pada kedua ujungnya sehingga titik dengan *displacement* terbesar adalah pada pusat dan terkecil adalah pada titik paling akhir.

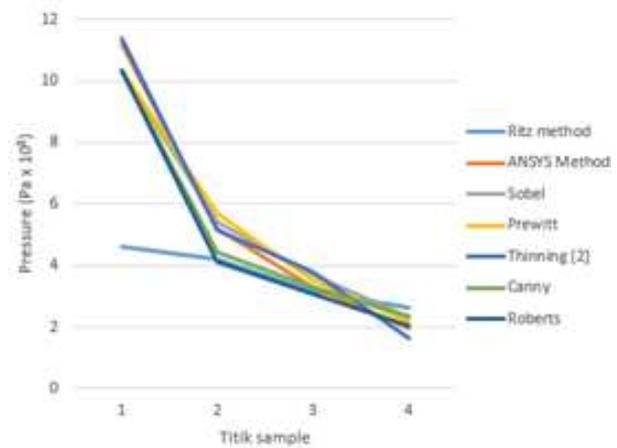
Pada titik sampel 1 dan 4 tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara metode *moiré*, numerik dan teori, sedangkan pada titik 2 dan 3 terdapat perbedaan yang cukup besar antara metode *moiré*, numerik dan teori. Hal ini terjadi dimungkinkan karena saat percobaan metode *Moiré*, spesimen uji mengalami pembebanan yang tidak merata akibat dari penjepitan keempat sisi spesimen yang tidak sempurna.

Perbandingan nilai *stress* dari perhitungan metode teoritis (Ritz), metode *Moiré*, metode *thinning* serta secara numerik pada empat buah titik sampel yang berbeda bisa dilihat pada Gambar 11(b). Besar *stress* yang terjadi pada titik sampel cenderung menurun jika titik tersebut semakin jauh

dari pusat pembebanan. Hal ini disebabkan karena semakin ketepi suatu titik maka efek pembebanan akan semakin berkurang dan akan bernilai 0 (nol) pada jepitan.



(a) Kurva *Displacement*



(b) Kurva *Stress*

Gambar 11. Kurva *Displacement* dan *Stress* Teoritik, Numerik dan dengan Metode *Moiré*

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan tiga metode yaitu metode numerik, metode *Moiré* dan metode analitis teori diperoleh kesimpulan sebagai berikut. Perbedaan *displacement* metode teoritis (Ritz) dengan metode *Moiré* Canny, Roberts, Sobell, Prewits masing masing sebesar 6,51%, 6,31%, 7,34%, dan 6,45 %. Perbedaan *displacement* metode numeric dengan metode Canny, Roberts, Sobell, Prewits masing masing sebesar 7,65%, 7,51%, 7,7% dan 7,6 %. Perbedaan nilai *stress* metode metode teoritis (Ritz) dengan metode Canny, Roberts, Sobell, Prewits masing masing sebesar 9,20%, 9,5%, 9,65%, dan 8,0%. Perbedaan nilai *stress* metode numeric dengan metode Canny, Roberts, Sobell, Prewits masing masing sebesar 9,70%, 9,65%, 9,72%, dan 8,1%.

**DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Andreas, Heri, *Karakteristik Deformasi Strain dan Stress*, Teknik Geodesi dan Geomatika, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2007.
- [2] Marlang, Hidayat, *Analisa Medan Stress dan Strain Dengan Menggunakan Metode Moiré*, Tesis Program S-2, Jurusan Teknik Mesin, FTI-ITS, Surabaya, 2009.
- [3] Adibrata, Donny, *Analisa Deformasi Plat Logam Dengan Metode Proyeksi*, Tugas Akhir Program S-1, Jurusan Teknik Fisika, FTI-ITS, Surabaya 2010.
- [4] Gonzalez, R.C. and Woods, R.E., *Digital Image Processing*, 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall, 2007.
- [5] Ansel C.U., *Stresses in Plates and Shells*, New Jersey Institute of Technology, 2<sup>nd</sup> Edition, Mc Graw Hill, 1999.
- [6] Wahyu, A., *Penghapusan Noise Pada Citra Dengan Filter Adaptive-Hierarchical*, Tugas Akhir Program S-1, Jurusan Teknik Informasi, FTIF-ITS, 2010.
- [7] Edi, C.W. dan Kusworo, A., *Penggunaan Filter Frekuensi Rendah untuk Penghalusan Citra (Image Smoothing)*, Berkala Fisika,6(2), 2003.
- [8] Aeri, R., *Pengolahan Citra Digital Menggunakan Teknik Filtering Adaptive Noise Removal Pada Gambar Bernoise*, Prosiding Seminar Nasional Teknoin, Yogyakarta, 22 November 2008, hal.7-11.
- [9] Srivastava, G.K. and Novel, A., *Wavelet Edge Detection Algorithm for Noisy Images*, Ultra-Modern Telecommunications & Workshops (ICUMT), International Conference, 2009.
- [10] Fitri, A., *Perbandingan Metode Low-Pass Filter dan Median Filter Dalam Penghalusan Citra (Image Smoothing) Untuk Peningkatan Kualitas Citra (Image Enhancement)*, Unikom, Bandung, 2010.
- [11] Banhan, M.R. and Katsaggelos, A.K., *Digital Image Restoration*, IEEE Signal Processing Magazine, 1997.
- [12] Dutta, S. dan Chaudhuri, B.B., *A Color Detection Algorithm in RGB Color Space*, International Conference on Advances in Recent Technologies in Communication and Computing, IEEE, 2009.