

Visualisasi Pola Frinji Berbasis Interferometri Optik pada Pengujian Statis dan Dinamis Pelat Aluminium

Edi Tri Astuti

Puslitbang Fisika Terapan – LIPI

Komplek Puspiptek, Serpong Tangerang, 15310

e-mail : rias12@yahoo.com

Abstrak

Penelitian dan pengembangan teknik interferometri optik telah diterapkan untuk menentukan deformasi objek akibat pembebanan statis dan dinamis. Teknik ini memanfaatkan adanya perubahan fasa dalam gelombang cahaya koheren dengan sistem perekaman citra. Secara umum sistem ini terdiri dari: sistem optik, sistem perekam citra dan sistem pengolah citra. Sistem optik (*set-up optik*) akan menentukan bentuk deformasi yang akan dihitung, sistem perekam citra berfungsi untuk merekam citra sebelum terjadinya deformasi (*kondisi awal*) dan sesudah terjadinya deformasi, dan sistem pengolah citra akan menentukan besarnya deformasi yang terjadi. Dengan melakukan pengujian statis dan dinamis pelat aluminium dapat diperlihatkan bahwa sistem ini dapat digunakan untuk menentukan deformasi suatu objek, dan mempunyai ketelitian dalam orde panjang gelombang cahaya. Dengan menginterpretasikan pola-pola frinji yang didapat, maka secara kuantitatif dapat ditentukan distribusi deformasi yang terjadi.

Kata-kunci: Pola frinji, Interferometri optik, Deformasi, Fasa, Koheren, Citra

Abstract

Research on optical interferometry has been applied to examine object deformations caused by static & dynamic loading. This method makes use of coherent beam phase alteration recorded in image recording system. In general, the system consists of three systems i.e. optical system, image recording system, and image processing system. Optical system (*optical set-up*) will determine the deformation shape, image recording system which function as recording before (*initial condition*) and after deformation. Image processing system will determine the deformation. By means of static & dynamic tests on aluminum plate, it is shown that this system can lend itself to determine object deformation and has light beam order of accuracy. Therefore, deformation distribution can be quantitatively interpreted by analyzing the fringe pattern.

Keywords: Fringe pattern, Optical interferometry, Deformation, Phase, Coherent, Image

1. Pendahuluan

Penemuan laser sebagai cahaya monokromatis, koheren, mempunyai berkas yang terarah, dan *brightness* yang tinggi mempunyai dampak yang besar pada bidang instrumentasi dan pengukuran. Sebagai contoh pada bidang pengukuran adalah interferometri optik. Teknik ini memanfaatkan sifat koheren dari laser agar diperoleh gejala interferensi; yaitu superposisi dua gelombang yang menghasilkan intensitas yang baru. Prinsip dasar dari interferometri optik dapat dilihat pada Gambar 1. Beberapa jenis interferometri optik seperti interferometri: holografi, spekel, dan *moire* melengkapi deretan metoda optik yang sudah ada dan memberikan sumbangan terhadap kemajuan bidang uji tak merusak (NDT).

Pada makalah ini akan diperlihatkan bahwa salah satu dari jenis interferometri optik di atas yaitu interferometri spekel merupakan salah satu teknik yang potensial yang dapat digunakan

sebagai sarana pengujian NDT di industri. Teknik ini didasarkan pada fenomena interferensi acak gelombang cahaya koheren yang dihamburkan dari suatu permukaan objek yang difus yang menimbulkan bintik-bintik terang gelap yang disebut dengan spekel (Gambar 2.a). Prinsip kerja teknik ini adalah dengan memberikan perlakuan terhadap objek uji misalnya: gaya tekan, gaya tarik, pemanasan, vibrasi, dan lain-lain. Apabila objek dibebani maka akan terjadi perubahan fasa dalam gelombang cahaya koheren yang dihamburkannya. Dengan merekam citra spekel dari objek uji sebelum dan sesudah mengalami deformasi dan kemudian menjumlahkan/mengurangkan kedua buah citra tersebut maka akan dihasilkan frinji (Gambar 2.b). Dengan menginterpretasikan frinji tersebut maka beberapa sifat mekanik material dapat dianalisis.

2. Teori

2.1 Interferometri spekel¹⁾

Secara matematis konsep sederhana dari interferometri spekel dapat dibayangkan dari Gambar 1. Misalkan berkas intensitas sebelum deformasi yang diterima oleh kamera CCD adalah

$$I_{\text{sebelum}} = |A_a|^2 + |A_o|^2 + 2|A_a||A_o|\cos\phi \quad (1)$$

dimana A_a , A_o adalah amplitudo gelombang cahaya dan ϕ adalah distribusi fasa cahaya. Objek kemudian dibebani (misal ditarik dengan menggunakan mesin uji dinamis/UTM) maka akan terjadi perubahan dalam fasa gelombang cahaya. Bila perubahan fasa adalah $\Delta\phi$ maka persamaan intensitas sesudah deformasi adalah:

$$I_{\text{sesudah}} = |A_a|^2 + |A_o|^2 + 2|A_a||A_o|\cos(\phi + \Delta\phi) \quad (2)$$

$\Delta\phi$ adalah beda fasa kedua berkas akibat adanya deformasi. Untuk memperoleh informasi akibat adanya pembebanan terhadap objek uji maka perlu dilakukan operasi matematis terhadap persamaan (1) dan (2). Ada dua pilihan operasi yang dilakukan yaitu: penjumlahan dan pengurangan. Dalam melakukan pemilihan ini yang perlu dipertimbangkan adalah media perekam yang akan digunakan. Jika penjumlahan yang dipilih maka media perekam yang perlu disediakan adalah pelat film atau sistem perekam yang dilengkapi dengan pengolah citra. Apabila pengurangan maka sistem perekam yang dilengkapi dengan pengolah citra yang perlu disediakan, dan ini biasa disebut dengan Electronic/Digital Speckle Pattern Interferometry (ESPI). Pada proses penjumlahan maka persamaannya dapat dituliskan sebagai:

$$\Sigma I = 2 \{ |A_a|^2 + |A_o|^2 \} + 4 |A_a||A_o| \cos(\phi + \Delta\phi/2) \cos(\Delta\phi/2) \quad (3)$$

Apabila amplitudo $A_a = A_o = A$, maka intensitas rata-ratanya adalah:

$$\langle \Sigma I \rangle = 4 |A|^2 \{ 1 + \langle \cos(\Delta\phi/2) \rangle \} \quad (4)$$

Dari persamaan (4) dapat dilihat bahwa frinji yang terjadi dimodulasi oleh faktor $\cos(\Delta\phi/2)$. Frinji akan maksimum jika $\cos(\Delta\phi/2) = n\pi$, $n = 0, 1, 2, \dots$ Pada proses pengurangan, persamaan (1) dan (2) akan dikurangkan piksel per piksel dan hasilnya adalah frinji yang mempunyai persamaan:

$$\Delta I = 4 |A|^2 \sin(\delta + \Delta\phi/2) \sin(\Delta\phi/2) \quad (5)$$

Intensitas rata-ratanya adalah:

$$\langle \Delta I \rangle = 4 \langle A^2 \rangle \langle |\sin(\Delta\phi/2)| \rangle \quad (6)$$

Dari persamaan (6) dapat dilihat bahwa frinji yang terjadi dimodulasi oleh faktor $\sin(\Delta\phi/2)$. Frinji akan maksimum jika $\sin(\Delta\phi/2) = (2n+1)\pi/2$, $n = 0, 1, 2, \dots$

2.2 Shearografi ESPI

Pada konfigurasi Shearografi ESPI, deformasi yang terjadi pada objek erat kaitannya dengan pengaruh prisma tipis yang diletakkan di depan lensa (Gambar 3). Misalkan titik A dan B pada objek yang terpisah pada jarak δx akan mengalami deformasi pada bidang citra menjadi $\delta x'$ karena adanya prisma (sudut α) ini. Persamaannya dapat dituliskan sebagai:

$$\delta x' = D_i(n-1)\alpha \quad (7)$$

dengan D_i adalah jarak bidang citra terhadap lensa dan n adalah indeks bias prisma. Besarnya pergeseran pada bidang objek adalah :

$$\delta x = \Delta\delta x'/M \quad (8)$$

dimana M adalah faktor perbesaran citra. Dari persamaan (7) dan (8) dapat dituliskan bahwa pergeseran yang terjadi pada objek adalah

$$\delta x = \delta x' [D_o/D_i] = D_o(n-1)\alpha \quad (9)$$

Untuk deformasi yang bersifat *out-of-plane* (searah dengan arah berkas) maka distribusi fasa ϕ dalam arah (x,y) dan perubahan fasa $\Delta\phi$ dalam arah (x) dalam persamaan (4) dan (6) dapat dituliskan sebagai:

$$\phi(x,y) = (4\pi/\lambda) w(x,y) \quad (10)$$

$$\Delta\phi(x) = 4\pi/\lambda \{ dw/dx \} \delta x' \quad (11)$$

dimana $w(x,y)$ adalah besarnya deformasi yang terjadi.

3. Eksperimen

3.1 Pengujian statis

Pada pengujian statis, eksperimen yang dilakukan adalah: A). Menentukan defleksi *cantilever* dengan teknik spekel fotografi penyinaran ganda, B). Menentukan defleksi pelat aluminium dengan teknik *shearografi* ESPI, dan C). Menentukan rotasi pelat aluminium dengan teknik ESPI.

a. Menentukan defleksi *cantilever* dengan spekel fotografi

Objek uji berupa *cantilever* dari bahan aluminium ukuran 90 mm x 40 mm x 2 mm yang ujung satunya dibiarkan bebas dan satunya lagi diklem statis. Perlakuan terhadap objek uji dilakukan dengan memberikan tekanan mekanik menggunakan mikrometer sekrup sebesar: 5, 10, 15, 20, dan 25 μm pada ujung bebas. Gambar 4 memperlihatkan konfigurasi optik yang digunakan. Berkas laser diarahkan dan dikembangkan menggunakan mikroskop objektif (MO) dan lensa L_1 . Berkas dari L_1 akan menerangi objek dan setelah melewati L_2 langsung diarahkan ke pelat film yang diletakkan pada jarak tertentu di depan objek uji. Berkas

yang bersifat spekel ini kemudian direkam pada pelat film. Teknik perekaman dilakukan pada pelat film yang sama dengan dua kali penyinaran yaitu sebelum dan sesudah objek mengalami deformasi, kemudian pelat film tersebut diproses dan hasilnya disebut spekelgram. Selanjutnya dilakukan rekonstruksi dengan menyinari kembali spekelgram tersebut dengan laser dimana spekel-spekel tersebut akan berlaku sebagai kisi difraksi sehingga pada layar akan nampak garis-garis gelap terang yang disebut dengan frinji Young. Dengan mencacah (*scanning*) seluruh permukaan spekelgram akan diperoleh nilai deformasi pada setiap titik di permukaan objek. Makin jauh jaraknya dari pusat deformasi maka jarak antar frinji makin rapat.

b. Menentukan defleksi pelat aluminium dengan teknik *shearografi* ESPI

Objek uji terbuat dari pelat aluminium dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 2 mm yang semua sisinya di diklem statis. Perlakuan terhadap objek merupakan gabungan dari beban yang disebabkan oleh tekanan mekanik menggunakan *piezo electric transducer* (PZT) yang diletakkan di bagian belakang tengah objek uji dan gerakan translasi dari lensa L_2 . Skema diagram optik ditunjukkan pada Gambar 5. Berkas laser diarahkan ke objek setelah melewati lensa MO, L_1 , dan cermin paroh BS. Dengan berkas hamburan dari objek uji akan dibentuk citranya pada kamera CCD oleh lensa L_2 . Sebuah prisma tipis 1° (*wedge glass*) yang diletakkan di setengah bagian lensa L_2 akan menyebabkan pergeseran (*shear*) citra yang terbentuk karena ebagian berkas melewati prisma dan sebagian tidak. Perekaman citra spekel dilakukan sebelum dan sesudah objek mengalami deformasi. Data yang direkam kemudian disimpan dalam komputer untuk selanjutnya diproses secara elektronik.

c. Menentukan rotasi pelat aluminium dengan teknik ESPI berkas ganda

Objek uji terbuat dari pelat aluminium yang satu sisinya diklem satu sekrup sehingga objek masih dapat berputar bebas. Mikrometer sekrup diletakkan disamping ujung bebas dari objek uji dan apabila mikrometer sekrup ini diputar akan mengakibatkan objek uji bergeser secara mikro. Secara skematik susunan peralatan ditunjukkan pada Gambar 6. Konfigurasinya adalah tipe berkas ganda (*double beam*) yang merupakan salah satu konfigurasi optik yang biasa digunakan dalam menentukan deformasi yang arahnya tegak lurus terhadap arah penyinaran (*in-plane deformation*). Dari konfigurasi ini dapat dilihat bahwa berkas laser

dibagi menjadi dua bagian dengan menggunakan pembagi berkas (BS). Masing-masing berkas kemudian diarahkan dan dikembangkan untuk menerangi objek, berturut-turut menggunakan cermin datar (M_3), (M_4), dan objektif mikroskop (SF). Kamera CCD yang dihubungkan ke komputer yang dilengkapi dengan pengolah citra digunakan untuk merekam citra spekel selama berlangsungnya eksperimen.

3. 2 Pengujian dinamis²⁻⁴⁾

Objek terbuat dari pelat Al yang dipotong menjadi spesimen uji tarik sesuai dengan stardard JIS. Penarikan dilakukan menggunakan mesin uji tarik (*UTM*) dimana bagian bawah objek uji diklem statis dan ujung lainnya ditarik dengan kecepatan 1.6 $\mu\text{m}/\text{detik}$. Skema diagram pengujian dapat dilihat pada Gambar 7. Skema ini mirip dengan Gambar 5 hanya ada sedikit modifikasi. Berkas cahaya monokromatis dan koheren yang berasal dari laser diarahkan dan dikembangkan menggunakan cermin datar M_1 dan lensa mikroskop objektif (MO). Berkas dari MO sebagian langsung menerangi objek dan sebagian lagi diarahkan ke cermin M_2 untuk dipantulkan ke objek, kedua berkas tersebut akan saling bertemu dan berinterferensi menghasilkan pola frinji yang bersifat spekel pada permukaan benda uji. Untuk merekam pola frinji digunakan kamera CCD Sony XC-75CE yang diletakkan pada jarak tertentu di depan objek uji. Selanjutnya data yang bersifat analog dikirim ke komputer 2 melalui *frame-grabber* untuk digitalisasi. Objek kemudian diberi perlakuan dengan menggunakan *UTM*. Data citra spekel selama objek mengalami pembebanan direkam dan disimpan di dalam memori komputer dengan kecepatan 26 frame/menit untuk selanjutnya dilakukan proses substraksi. Secara simultan proses ini juga diamati menggunakan data logger, dan datanya disimpan di dalam memori komputer 1. Secara bersamaan data penarikan ini diamati menggunakan strain gauge dan data logger yang mana datanya disimpan di memori komputer 1.

4. Hasil Dan Diskusi

4.1 Pengujian statis

a. Menentukan defleksi *cantilever* dengan spekel fotografi

Dari perhitungan jarak antar frinji maka deformasi pada setiap titik dari objek dapat dihitung. Kurva yang menggambarkan hubungan antara frekuensi ruang (seper jarak antar frinji) dengan posisi objek uji dari arah ujung statis-bebas dapat dilihat pada Gambar 8. Kontur 2-dimensi dan 3-dimensi untuk masing-masing deformasi diperlihatkan pada Gambar 9.

b. Menentukan defleksi pelat aluminium dengan teknik *shearografi* ESPI

Tekanan mekanik dilakukan dengan menggunakan *piezo electric transducer* (PZT) dengan beban sebesar 10 volt akan memberikan frinji seperti terlihat pada Gambar 10(a). Gambar 10(b) memperlihatkan pola frinji yang terbentuk karena gerakan translasi lensa L_2 sebesar 8 mm. Gabungan efek dari beban PZT dan gerakan translasi lensa L_2 akan memberikan pola frinji seperti diperlihatkan pada Gambar 9(c). Sedangkan distribusi fasa yang terlihat dari Gambar 10(c) dihitung berdasarkan rumus (10) akan memberikan hasil seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

c. Menentukan rotasi pelat aluminium dengan teknik ESPI berkas ganda

Hasil frinji yang diperoleh untuk beberapa beban rotasi diperlihatkan pada Gambar 12. Gambar 13 memperlihatkan kurva hubungan antara deformasi terhadap jumlah frinji yang terjadi.

4.2 Pengujian dinamis

Pengujian dilakukan dengan menarik objek uji menggunakan *UTM* dan menghasilkan kurva seperti ditunjukkan pada Gambar 14. Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa objek uji akan patah statis pada saat 6300 detik dihitung dari saat penarikan. Beberapa hasil substraksi dari seluruh rangkaian data citra spekel ditampilkan pada Gambar 15. Gambar 15 (a) memperlihatkan objek masih berada di daerah elastis dan frinji akan mempunyai bentuk homogen. Gambar 15 (b)-(c) objek mulai memasuki daerah plastis dan terlihat adanya pita tebal yang berwarna putih, yang biasa disebut *white band* (WB). Gambar 15 (d)-(k) objek mengalami deformasi plastis, frinji akan mempunyai bentuk yang kompleks dan WB akan membuat sudut 45° terhadap sumbu tegangan. Lokasi ini selalu berpindah-pindah dan akhirnya menetap pada satu lokasi tertentu hingga terjadinya patah statis. Pengujian dilanjutkan dengan mengganti objek uji yang dengan objek

yang mempunyai cacat di tengah, dengan harapan agar diperoleh informasi di sekitar cacat, seperti ditunjukkan pada Gambar 16.

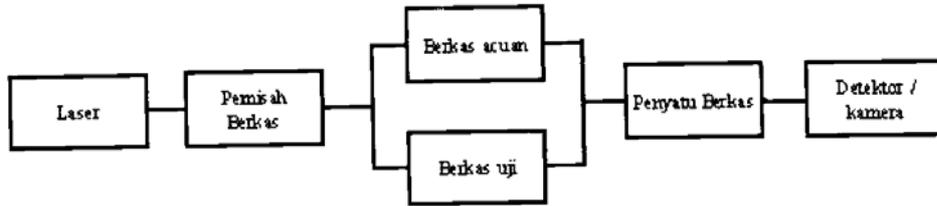
5. Kesimpulan

Dari data-data yang dihasilkan terlihat bahwa:

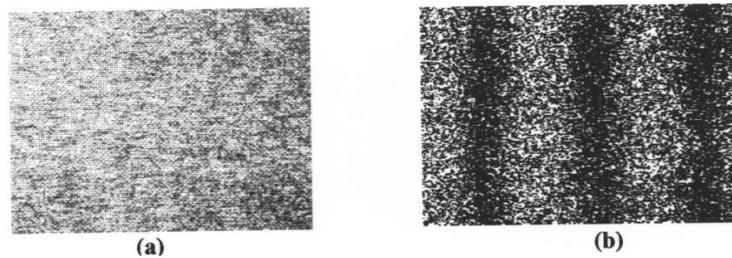
- Bentuk frinji tergantung dari konfigurasi optik dan beban yang diberikan.
- Frinji pada seluruh permukaan objek bersifat homogen pada daerah elastis dan bersifat heterogen pada daerah plastis.
- Pada tahap deformasi plastis akan muncul WB sebagai indikator terjadinya deformasi dan lokasi ini akan berpindah-pindah selama pembebanan berlangsung
- Lokasi WB akan menetap pada satu lokasi tertentu hingga terjadinya patah statis.
- Untuk objek yang mempunyai cacat tengah belum memberikan informasi yang berarti karena frinji yang terbentuk masih sama dengan objek yang tanpa cacat. Oleh karenanya perlu tindak lanjut dengan menganalisis UTM, kecepatan komputer, dan lain-lain.

Daftar Pustaka

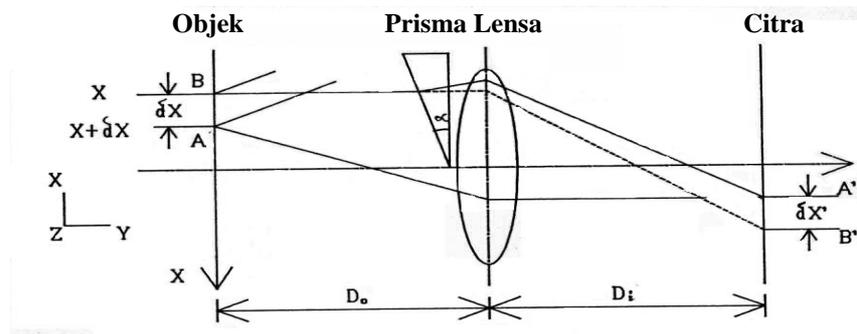
1. Rajpal S. Sirohi, *Speckle Methods in Experimental Mechanics*, Speckle Metrology, ed. Sirohi, Marcel Dekker, New York, 1993.
2. Edi Tri Astuti, *Interferometri Optik Dalam Pengujian Di Industri*, Lokakarya Interaktif Nasional I, JNK-Puspropen LAPAN, Jakarta, 26 Februari 2000.
3. Edi Tri Astuti dan Rini Widiastuti, *Pengaruh Pemakaian Kamera Interlace dan Non-Interlace Dalam Perolehan Citra Interferometri-Spekel*, Simposium Fisika Nasional XVIII, Serpong, 25 - 27 April 2000.
4. Edi Tri Astuti dan Suprapedi, *Pengujian Dinamik Al 2017 Dengan Menggunakan Interferometri Spekel*, Prosiding ECCIS 2000, Malang, 13 - 14 Juni 2000.



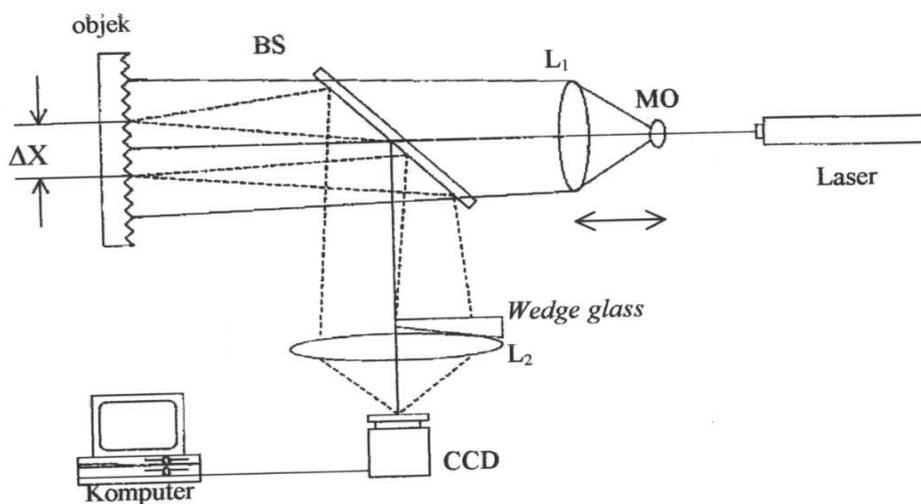
Gambar 1. Prinsip dasar interferometri.



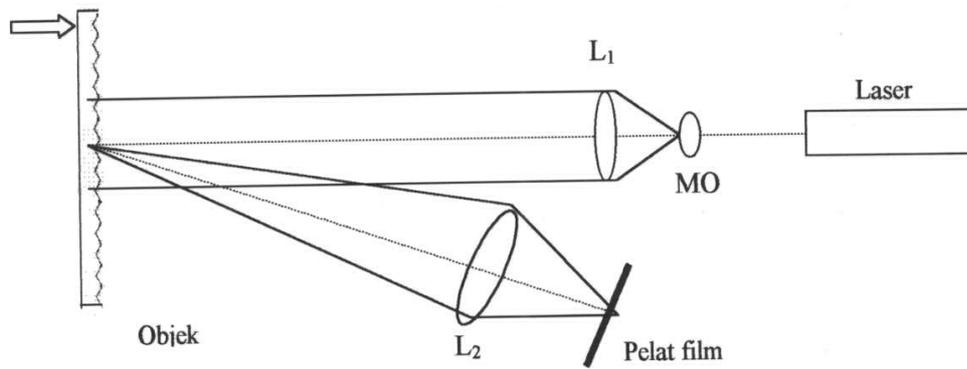
Gambar 2. (a) Pola spekel dan (b) frinji



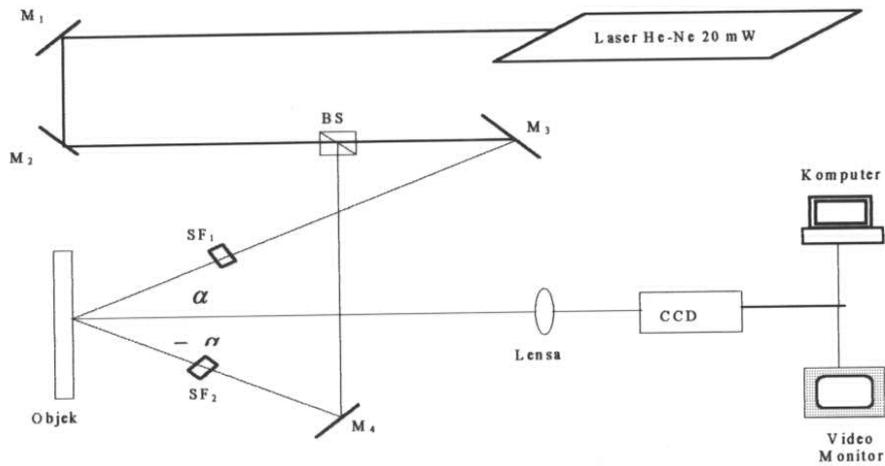
Gambar 3. Pergeseran citra akibat adanya prisma tipis



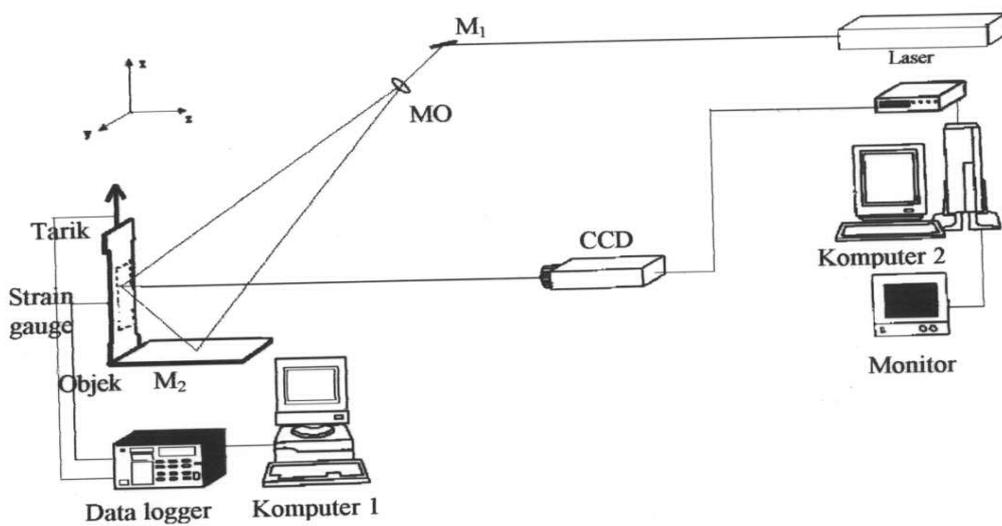
Gambar 4. Diagram skematik *shearografi* spekel



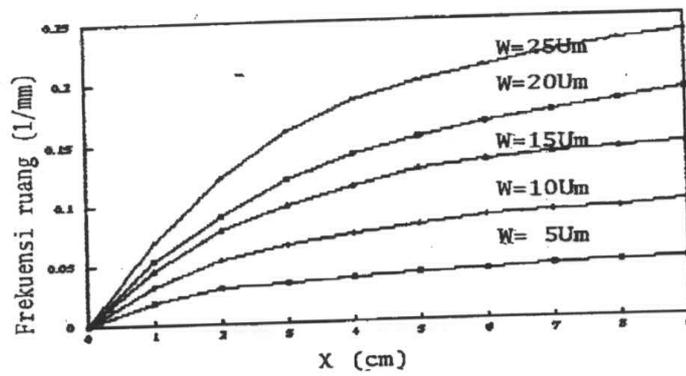
Gambar 5. Diagram skematik spekel fotografi.



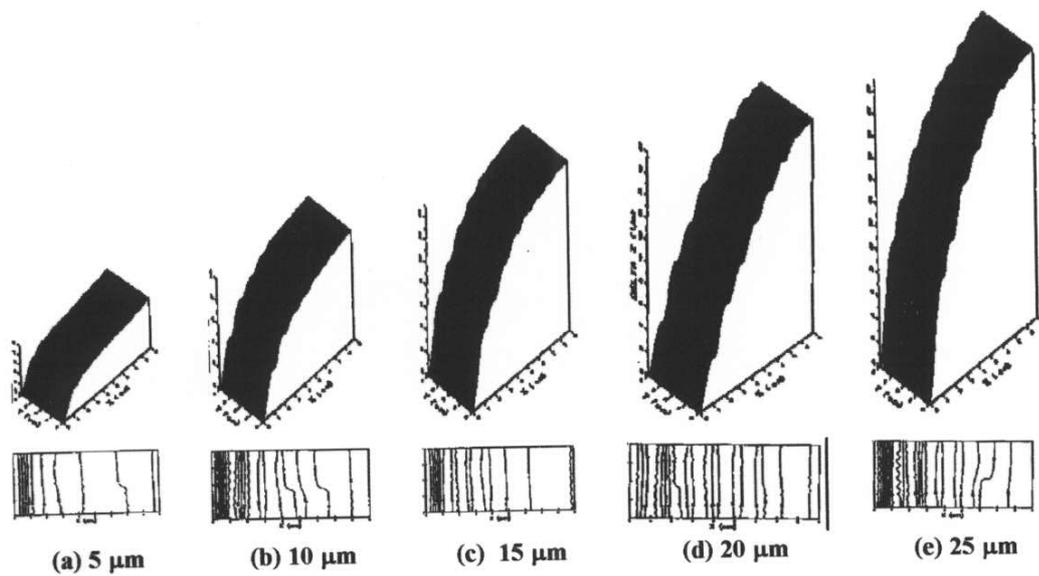
Gambar 6. Diagram skematik ESPI berkas ganda.



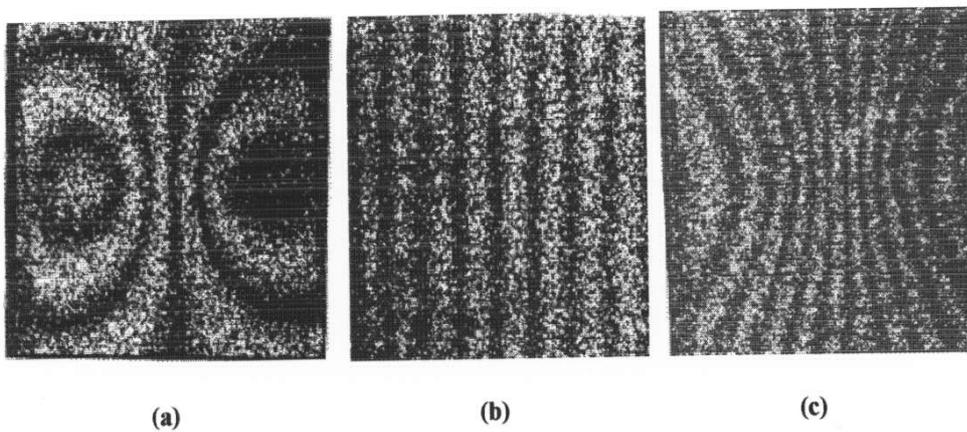
Gambar 7. Diagram skematik pengujian dinamis.



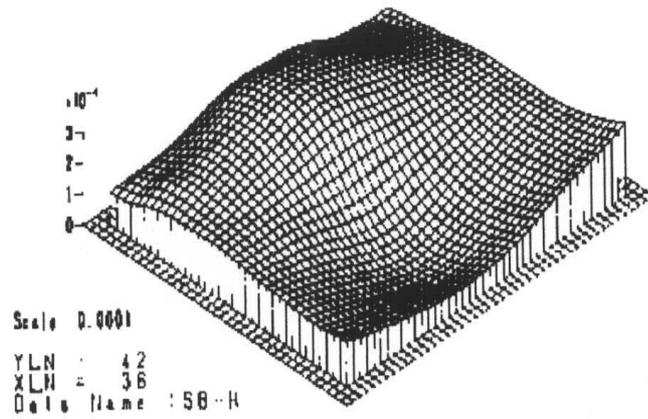
Gambar 8. Kurva hubungan frekuensi ruang dengan posisi objek uji.



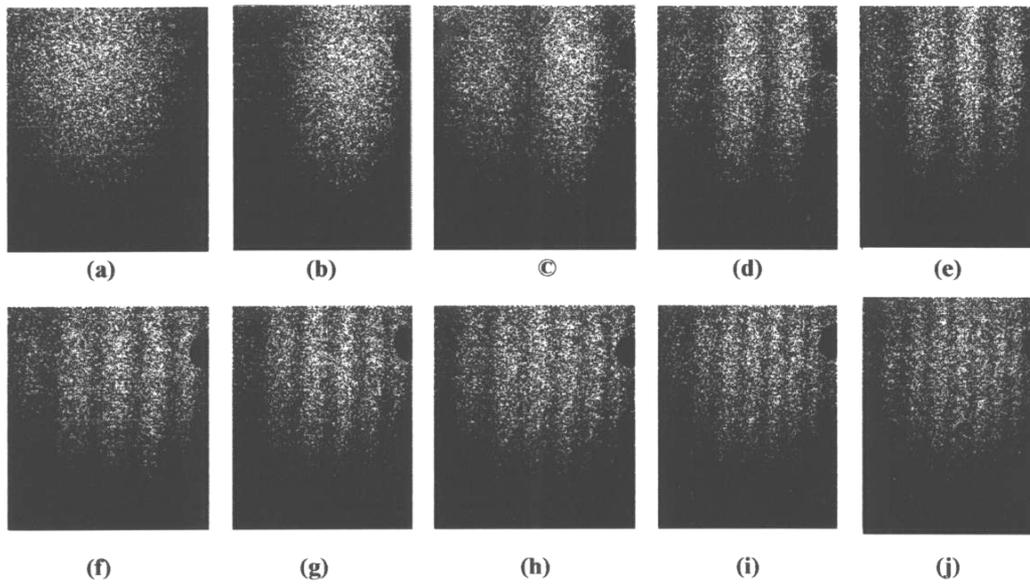
Gambar 9. Kontur 2-D dan 3-D dari *cantilever* dengan teknik spekel fotografi.



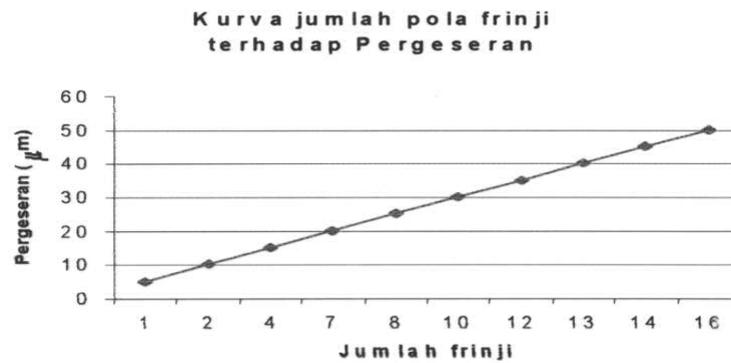
Gambar 10. Pola frinji dari (a) *shearografi*, (b) *carrier*, dan (c) *shearografi* dan *carrier*.



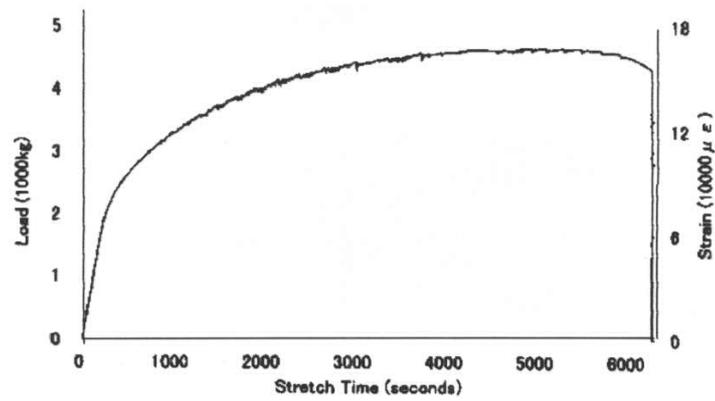
Gambar 11. Distribusi fasa yang dihitung dari Gambar 9 (c).



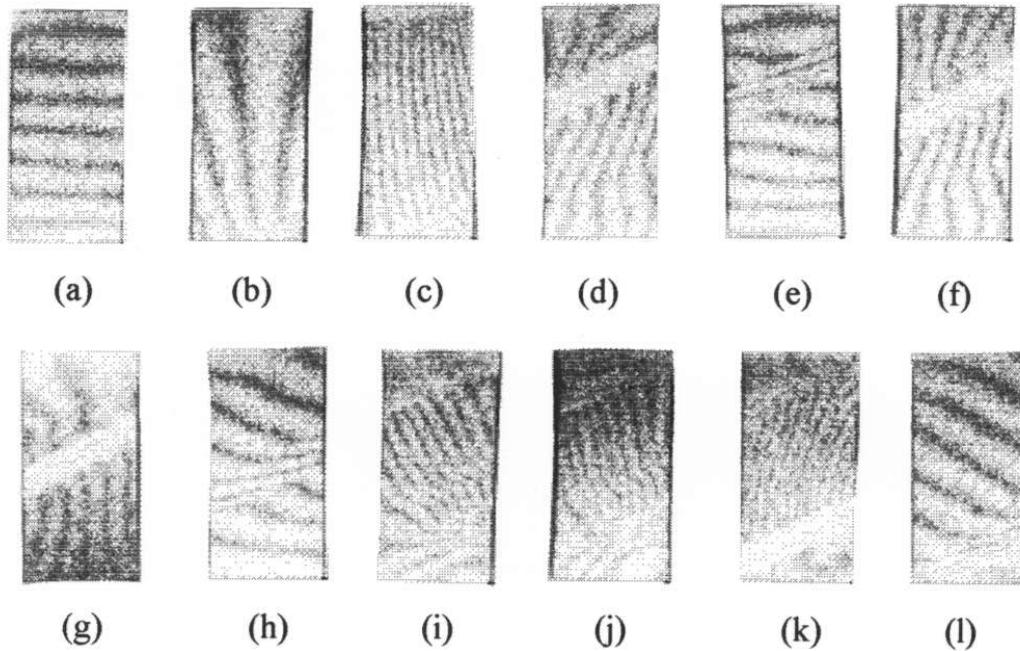
Gambar 12. Pola frinji dengan teknik ESPI untuk beberapa pengujian rotasi.



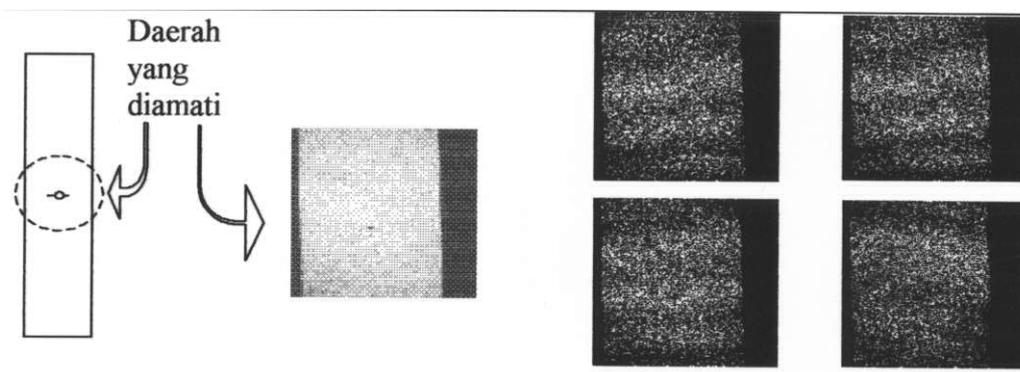
Gambar 13. Kurva jumlah frinji terhadap deformasi pada pengujian rotasi.



Gambar 14. Kurva strain vs waktu penarikan.



Gambar 15. Frinji hasil uji tarik.



Gambar 16. Frinji hasil uji tarik dengan objek ada cacat di tengah.