

VISUALISASI SIMPANGAN VIBRASI DENGAN METODA ESPI

Muchiar¹, Kisman H. Mahmud²

¹Pusat Penelitian Fisika-LIPI Kawasan PUSPIPTEK, Serpong, Tangerang, Banten 15314
Email: muhiar2003@yahoo.com

²Jurusan Teknik Informatika Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta
Jl. Cempaka Putih Tengah 27, Jakarta Pusat 10510
Email: kismanmahmud@yahoo.co.id

ABSTRAK

Simpangan vibrasi dari sebuah objek, yaitu membran bundar yang bervibrasi, telah diteliti untuk divisualkan dengan menggunakan metoda Time-average Electronic Speckel Pattern Interferometry. Objek dikopel dengan corong suara, yang dihubungkan dengan generator bunyi, dimana frekuensi dan tegangan luarannya dapat diatur. Frekuensi vibrasi objek adalah sama dengan frekuensi luaran generator bunyi. Sedangkan simpangan vibrasi objek dikontrol oleh tegangan luaran dari generator bunyi. Perekaman dilakukan dengan kamera CCD dan citra spekel hasil rekaman untuk setiap sequen disimpan di dalam file-file tersendiri di dalam komputer. Dengan metoda ini, disyaratkan waktu perekaman atau shutting-time dari kamera CCD haruslah lebih panjang daripada perioda getaran objek. Substraksi dilakukan antara citra spekel membran pada saat bervibrasi dengan citra spekel membran saat belum bervibrasi. Pada penelitian ini telah diamati visualisasi untuk rentang frekuensi antara 300 Hz sd. 1500 Hz dengan setiap kali perubahan sebesar 50 Hz. Visualisasi hasil substraksi memperlihatkan bahwa tidak setiap tahapan frekuensi menunjukkan pola simpangan. Hanya pada frekuensi-frekuensi tertentu saja diperoleh citra dengan kualitas frinji yang memuaskan.

Kata kunci: ESPI, visualisasi, simpangan vibrasi.

ABSTRACT

Deviation of vibration from an object that is a vibrating circular membrane was studied and visualised using time-averaged Electronic Speckel Pattern Interferometry (ESPI) method. The object was coupled with a sound microphone that was connected to a sound generator, which frequency and outer tension were adjustable. The frequency of object vibration was similar to the output frequency of sound generator. Meanwhile, the deviation of object vibration was controlled by the output frequency of sound generator. Recording process employed a CCD camera and speckel images as recorded every sequence were saved in separate files in computer. This method requires the recording time or shutting-time from CCD camera to be longer than the period of object vibration. Substraction was calculated between the speckel images of membrane during vibration and those before vibration. This study observed visualisation at a frequency range of 300 Hz to 1500 Hz with 50 Hz steps in between. The result of subtraction was visualised, and it shows that there were frequency steps without deviation pattern. Only certain frequencies produced images with satisfactory fringe quality.

Keywords: ESPI, visualisation, deviation of vibration.

PENDAHULUAN

Getaran atau vibrasi, pada satu sisi dapat bermanfaat, apabila itu dikehendaki dan ditujukan untuk suatu kepentingan yang bermanfaat. Akan tetapi di sisi lain, getaran yang terjadi pada suatu objek tidak dikehendaki sama sekali. Hal ini disebabkan karena getaran yang terjadi tersebut bisa mengganggu sistem, atau bahkan dalam jangka waktu yang panjang bisa merusak sistem dimana objek tersebut merupakan bagiannya. terlepas dari manfaat atau tidaknya vibrasi yang dialami sebuah objek, mengetahui besarnya simpangan yang terjadi atau yang dialami merupakan sesuatu yang perlu. Pengukuran secara langsung tidak selalu bisa dilakukan dengan mudah, karena bentuk objeknya, atau karena bisa mengganggu vibrasi itu sendiri. Dalam upaya mendapatkan solusi bagi pengukuran simpangan vibrasi suatu objek, tanpa mengganggu objeknya, akan dicoba menentukan besarnya simpangan secara tidak langsung, tidak kontak, berdasarkan visualisasi pola simpangan yang terjadi. Cara ini diharapkan akan bermanfaat, terutama sekali untuk vibrasi dengan simpangan yang kecil sekali.

Kemajuan di dalam bidang elektronika komponen, yang mana telah menghasilkan kamera-kamera video (kamera CCD) dengan resolusi tinggi, telah berdampak dengan munculnya suatu cabang baru dari metoda interferometri, yaitu metoda *Electronic Speckel Pattern Interferometry* (ESPI). Dengan metoda ini, pola spekel yang dihasilkan oleh suatu permukaan difus yang disinari dengan berkas cahaya monokromatis, yang dikenal sebagai spekel optik, direkam secara elektronik menggunakan kamera CCD menjadi pola spekel elektronik. Data berupa pola spekel elektronik ini dapat disimpan di dalam memori komputer untuk sewaktu-waktu diolah. Pengolahan data dapat dilakukan di dalam komputer dengan menggunakan perangkat lunak untuk proses substraksi ataupun untuk proses penjumlahan data. Data yang sudah diolah selanjutnya dapat ditampilkan melalui layar komputer ataupun layar monitor video.

Untuk visualisasi simpangan vibrasi ada tiga pilihan metoda berbeda yang dapat digunakan, yang merupakan pengembangan dari metoda ESPI. Ketiga buah metoda tersebut adalah metoda *time-average*, metoda *stroboscopic*, dan

metoda *pulsed laser*. Diantara ketiga metoda ini, yang relatif paling murah dan sederhana susunan percobaannya adalah metoda *time-average*. Meskipun begitu, metoda ini juga mempunyai keterbatasan, yaitu perioda dari objek yang bervibrasi haruslah lebih pendek dari waktu perekaman atau *shutting-time* dari kamera CCD yang digunakan.

Berdasarkan teori interferometri, diketahui apabila dua berkas cahaya atau lebih dengan panjang gelombang yang sama, tetapi fasanya mungkin berbeda, apabila bertemu di satu tempat maka akan terjadi peristiwa interferensi. Peristiwa ini akan menghasilkan suatu pola gelap terang yang unik, yang dinamakan pola interferensi atau pola frinji. Bentuk pola dan jumlah frinji yang dihasilkan bergantung pada beda fasa yang terjadi, yang bergantung pada panjang lintasan optik yang ditempuh oleh masing-masing berkas yang berinterferensi.

Apabila berkas-berkas cahaya yang berinterferensi tersebut berasal dari pantulan permukaan suatu objek yang bervibrasi, maka panjang lintasan optiknya akan bergantung pada posisi permukaan pantul objek tersebut. Apabila seluruh pola yang terjadi diintegrasikan, maka hasilnya menggambarkan simpangan dari permukaan objek tersebut. Sebagai objek atau benda-uji dari penelitian ini ialah sebuah membran terbuat dari pelat tipis aluminium (tebal 0,1mm) dengan diameter permukaan uji sekitar 75 mm. Permukaan membran ini dibuat digosok dengan kertas hampelas halus agar difus, atau dapat juga dicat dengan cat yang tidak kilap. Membran ini diklem pada dudukan yang kuat dan kaku, dan kemudian dikopling dengan sebuah corong pengeras suara yang berfungsi sebagai vibrator. Corong ini selanjutnya dihubungkan dengan sebuah generator bunyi yang frekuensi dan tegangan luarannya dapat diatur.

Penelitian bertujuan memvisualkan simpangan vibrasi dari sebuah membran yang tengah bervibrasi dengan memanfaatkan metoda interferometri spekel. Untuk tujuan tersebut, penelitian ini mencakup studi pustaka tentang vibrasi membran dan metoda interferometri spekel, perancangan sistem, perancangan dan pembuatan objek uji serta perlengkapan penunjangnya. Termasuk juga dalam hal ini adalah penyiapan komponen-komponen serta peralatan perekaman video, monitor, dan perangkat lunak komputer.

Penelitian ini diawali dengan studi pustaka untuk mengetahui dan mendalami berbagai metoda interferensi yang mungkin digunakan untuk tujuan ini. Langkah berikutnya adalah merancang sistem visualisasi, membuat/menyiapkan benda uji, menyiapkan dan mempelajari perangkat keras dan perangkat lunak untuk proses substraksi data elektronik.

INTERFERENSI

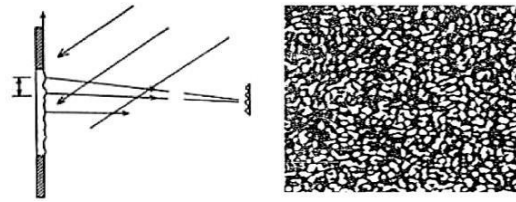
Interferensi gelombang adalah suatu fenomena yang terjadi apabila dua gelombang dengan panjang gelombang atau frekuensi yang sama, di dalam perjalanannya saling bertemu di dalam suatu medium yang sama. Ada dua tipe interferensi yang dapat terjadi, yaitu interferensi konstruktif dan destruktif. Interferensi konstruktif terjadi apabila gelombang yang berinterferensi menghasilkan intensitas yang lebih tinggi dari intensitas masing-masing gelombang, jadi dalam hal ini terjadi penambahan intensitas. Sebaliknya, pada interferensi destruktif yang terjadi adalah pengurangan intensitas, hingga intensitas minimum yang dihasilkan adalah nol. Terjadinya interferensi konstruktif dan destruktif bergantung kepada beda fasa atau beda lintasan tempuh diantara gelombang-gelombang yang berinterferensi tersebut.

Fenomena interferensi bisa terjadi pada gelombang mekanik (seperti gelombang bunyi dan gelombang air), dan juga pada gelombang elektromagnetik (seperti gelombang cahaya dan radio). Apabila yang berinterferensi adalah gelombang cahaya tampak, maka hasil yang diperoleh adalah berupa pola terang-gelap, yang dikenal juga sebagai pola interferensi atau pola frinji. Interferensi konstruktif akan menghasilkan pola terang, sedangkan interferensi destruktif akan menghasilkan pola gelap.

SPEKEL

Spekel adalah titik-titik terang dan gelap yang terbentuk sebagai hasil interferensi dari sinar monokromatis, yang dipantulkan secara acak, atau dihamburkan, oleh permukaan dari objek pemantul yang difus atau tidak kilap. Pola spekel yang terbentuk bergantung kepada sifat dari permukaan difus objek pemantul tersebut. Secara diagramatik pembentukan pola spekel dan

contoh dari suatu pola spekel optik ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kiri, skematik pembentukan spekel; kanan, contoh pola spekel yang dihasilkan dengan metoda ESPI.

ELECTRONIC SPECKLE PATTERN INTERFEROMETRY

Speckle Pattern Interferometry merupakan pengembangan dari metoda interferometri klasik, suatu ilmu yang mempelajari dan memanfaatkan fenomena interferensi optik. Pada *Speckle Pattern Interferometry* yang dipelajari dan dimanfaatkan adalah pola spekel yang terbentuk akibat interferensi dari sinar-sinar yang dihamburkan oleh suatu permukaan difus, yang diterangi dengan berkas cahaya monokromatis. Pola spekel yang terbentuk dinamakan juga pola spekel optik.

Apabila pola spekel optik ini direkam “ditangkap” menggunakan kamera video, atau kamera CCD, maka citra yang terekam dinamakan pola spekel elektronik dan metodanya dinamakan *Electronic Speckle Pattern Interferometry* (ESPI). Sebagaimana telah disebutkan di dalam Bab Pendahuluan, ada tiga pilihan yang dapat dilakukan untuk memvisualkan simpangan vibrasi ini, dan metoda yang digunakan dalam penelitian ini adalah metoda yang set-up peralatannya relatif sederhana, yaitu metoda *Time -Average Speckle Pattern Interferometry*.

Pada metoda *Time-Average ESPI* ini, digunakan dua berkas laser yang berasal dari sumber yang sama. Satu berkas digunakan untuk menerangi objek yang diteliti dan berkas yang lainnya digunakan sebagai berkas referensi (acuan), yang langsung diarahkan pada kamera CCD. Hamburan berkas cahaya dari permukaan objek akan “ditangkap” oleh lensa kamera CCD bersamaan dengan berkas referensi dan keduanya akan berinterferensi.

HUBUNGAN SIMPANGAN VIBRASI DENGAN INTENSITAS POLA FRINJI

Untuk menurunkan hubungan diantara simpangan vibrasi dengan intensitas pola frinji, maka perhatikanlah skema yang ditunjukkan dalam Gambar 2. Membran pada bagian tepinya dijepit pada suatu dudukan yang kaku dan kokoh. Apabila membran bergetar, maka simpangan pada sembarang waktu t dapat dinyatakan sebagai $AA' = D(x,t)$. Jika dimisalkan getarannya harmonik sederhana, maka simpangan darisembarang titik yang terletak pada permukaan membran, pada waktu t dapat dituliskan sebagai

$$D(x,t) = D(x) \cos \omega t, \tag{1}$$

Dimana ω adalah frekuensi sudut dari getaran membran.

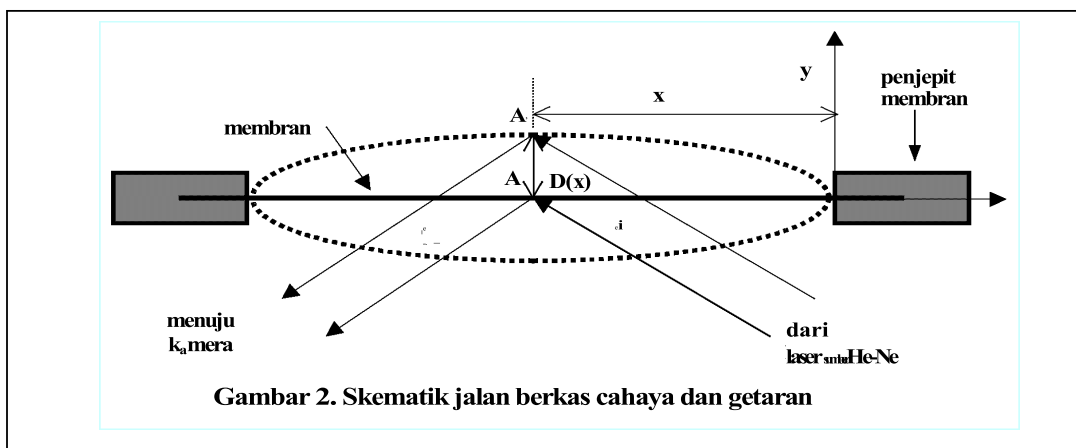
dihamburkan oleh permukaan difus objek, dan juga berkas cahaya referensi. Apabila objek tidak bervibrasi, maka intensitas cahaya yang diterima oleh kamera video dapat dinyatakan sebagai

$$I = I_0^2 + I_R^2 + 2I_0I_R \cos(\phi_0 - \phi_R) \tag{4}$$

dimana I_0 adalah intensitas berkas cahaya yang berasal dari objek (berkas objek), I_R adalah intensitas berkas cahaya referensi, ϕ_0 adalah fasa dari berkas cahaya yang berasal dari objek, dan ϕ_R adalah fasa dari berkas cahaya referensi.

Jika objek bervibrasi, maka fasa dari sinar yang dihamburkan objek yang diterima oleh kamera akan selalu berubah-ubah, dan intensitas cahaya yang diterima berkas dapat dinyatakan sebagai

$$I(x,y,t) = I_0^2 + I_R^2 + 2I_0I_R \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} k\alpha(x,y,t) + \phi_0 - \phi_R \right] \tag{5}$$



Beda fasa δ , dari sinar-sinar yang dihamburkan ke arah pengamat (kamera video) oleh bagian yang sama, tetapi pada posisi (saat) berbeda, yaitu dari titik A dan A', dapat dituliskan sebagai

$$\delta \approx - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (AA') (\sin \theta_i - \sin \theta_s) \tag{2}$$

Dimana θ_i dan θ_{ss} , berturut-turut, adalah sudut yang dibuat oleh sinar datang dan sinar pantul terhadap permukaan membran, λ adalah panjang gelombang cahaya yang digunakan.

Dengan mensubstitusikan $D(x,t)$ ke dalam Pers. [2], diperoleh pergeseran fasa sesaat dari sinar yang dihamburkan sebagai

$$\delta(x,t) = - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) D(x,t) \cos \omega t (\sin \theta_i + \sin \theta_s) \tag{3}$$

Kamera video akan menangkap atau menerima berkas cahaya yang berasal dari cahaya yang

Dimana $k = \cos \theta_i + \cos \theta_s$ (lihat Gb. 2), merupakan faktor geometri yang bergantung pada sudut datang dari sinar yang datang pada objek dan sudut pantul dari sinar yang dihamburkan objek, $\alpha(x,y,t)$ adalah simpangan vibrasi objek pada sebarang titik x,y dan sebarang waktu t .

Di dalam penelitian ini perekaman dilakukan secara rata-rata waktu, dimana waktu perekaman lebih panjang daripada perioda vibrasi membran, sehingga intensitas rata-rata, yang direkam oleh kamera dapat dinyatakan sebagai

$$\langle I(x,y) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I(x,y,t) dt \tag{6}$$

Dimana $\langle I \rangle$ adalah intensitas rata-rata, $T = 2\lambda/\omega$ adalah perioda vibrasi membran, dan ω adalah frekuensi sudutnya.

Dengan mensubstitusikan $I(x,t)$ dari Pers. [5] ke dalam persamaan [6], maka diperoleh

$$\langle I(x,y) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ I_0^2 + I_R^2 + 2I_0I_R \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} k\alpha(x,y,t) + \phi_0 - \phi_R \right] \right\} dt \quad [7]$$

atau

$$\langle I(x,y) \rangle = (I_0^2 + I_R^2 + 2I_0I_R) \frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} k\alpha(x,y,t) + \phi_0 - \phi_R \right] \right\} dt \quad [8]$$

PROSEDUR DAN METODOLOGI

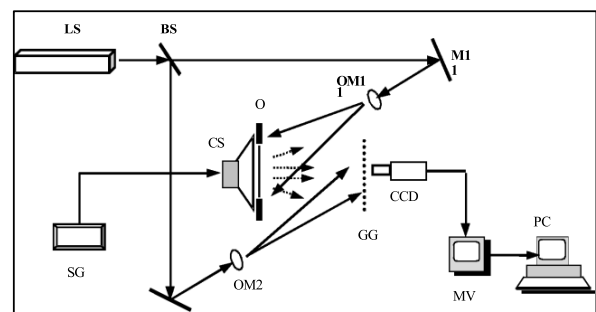
Peralatan

Sebagaimana telah disebutkan, penelitian ini menggunakan metoda *Time-Average ESPI*. Untuk tujuan penelitian tersebut, peralatan yang diperlukan adalah:

1. Objek, O, sebuah membran sirkular dengan diameter 75 mm, terbuat dari pelat tipis aluminium (tebal sekitar 0,1 mm). Permukaan objek dibuat agar dapat memantulsecara difus dengan cara mengcatnya dengan cat putih yang tidak kilap. Objek ini diklem pada suatu dudukan yang kuat dan kaku.
2. Laser Helium-Neon (He-Ne), sebagai sumber berkas cahaya monokromatik ko-heren untuk menerangi objek, hingga menghasilkan pola spekel, dan juga sebagai . berkas referensi. Laser yang digunakan memiliki daya ± 30 mWatt dengan panjang gelombang cahaya yang dipancarkan 632,8 nm.
3. Pembagi Berkas cahaya, PB, suatu komponen optik yang dapat memantulkan se-bagian dari berkas cahaya laser yang tiba dan mentransmisikan sebagian sisanya. Pembagi berkas ini diperlukan untuk membagi berkas laser yang berasal dari sumber menjadi dua berkas dengan intensitas yang hampir sama. (Berkas B1 dan B2.)
4. Dua buah Cermin Datar, C1 dan C2, dari jenis *front surface*. Cermin datar jenis *front surface* adalah cermin dimana lapisan pemantul dilapiskan pada permukaan depan dari cermin, bukannya permukaan belakang, seperti umumnya cermin. Penggunaan cermin jenis *front surface* ini bertujuan untuk mencegah terj adinya pantulansekunder. Kedua cermin ini digunakan untuk mengarahkan masing-masing berkasyang keluar dari Pembagi Berkas Cahaya agar tepat menuju objek penelitian.

5. Dua buah Objektif Mikroskop, OM1 dan OM2, dengan perbesaran 20x. Objektif Mikroskop ini berfungsi mengembangkan kedua berkas cahaya, berkas yang menerangi objek dan berkas referensi.
6. *Ground glass*, GL, untuk membuat berkas cahaya referensi yang tiba pada kamera berupa berkas difus.
7. Kamera video (kamera CCD, *Charge Coupled Device*), CCD. Kamera CCD adalah kamera elektronik yang di dalam penelitian ini berfungsi “menangkap” sinar-sinar yang dihamburkan objek uji dan juga sinar-sinar referensi dan kemudian mengubahnya menjadi sinyal-sinyal elektronik yang menghasilkan pola spekel elektronik.
8. Monitor Video Hitam-Putih, MV. Monitor ini digunakan untuk memonitor Citrayang dihasilkan oleh kamera CCD, agar didapatkan citra dengan kualitas baik.
9. *Personal Computer*, PC, digunakan untuk merekam dan menyimpan citra-citra spekel elektronik dalam bentuk file-file. Masing-masing citra objek disimpan di dalam masing-masing file tersendiri.
10. Generator sinyal bunyi, GS, yang berfungsi sebagai sumber vibrasi dari membran. o Corong suara, CS, yang berfungsi untuk menggetarkan membran sesuai dengan frekuensi yang diset.
11. Selain peralatan mekanik dan optik, dibutuhkan juga perangkat lunak komputer untuk mengolah data-data yang sudah diperoleh (direkam). Untuk penelitian ini digunakan perangkat lunak untuk proses substraksi yang dikeluarkan oleh Hammamatsu.

Selanjutnya, keseluruhan peralatan ini beserta objek penelitian disusun di atas meja optik, yang mampu menyerap getaran yang berasal dari luar.



Gambar 3. Susunan Peralatan yang digunakan

Prosedur Percobaan

- Berkas laser yang berasal dari sumber laser, dengan menggunakan pembagi berkas PB, dibagi menjadi dua berkas dengan intensitas hampir sama.
- Sebuah berkas diarahkan dengan menggunakan cermin C1 ke objek uji. Sebelum tiba di objek uji, sinar ini terlebih dahulu dimekarkan dengan menggunakan objektif mikroskop OM1, sehingga seluruh permukaan objek dapat diterangi. Permukaan objek yang difus akan memantulkan secara difus (dihamburkan) berkas yang tiba padanya, dan sinar-sinar yang dihamburkan ini akan saling berinterferensi membentuk pola spekel optik.
- Berkas lainnya, dengan menggunakan cermin C2 diarahkan langsung ke lensa kamera CCD. Sebelum sampai ke lensa kamera berkas ini juga terlebih dahulu dimekarkan dengan menggunakan objektif mikroskop OM2.
- Berkas yang dihamburkan objek (yang membentuk pola spekel optik) bersama dengan berkas referensi setelah melalui *Ground Glass* CG, akan ditangkap oleh lensa kamera dan diubah menjadi sinyal listrik yang menghasilkan pola spekel elektronik.
- Generator bunyi dinyalakan untuk menggetarkan membran. Frekuensi dinaikkan secara bertahap mulai dari 300 Hz hingga 1500 Hz. Setiap tahapan berselisih frekuensi sebesar 50 Hz.
- Perekaman dan penyimpanan data dilakukan pada setiap tahapan. hasilnya disimpan di dalam memori komputer, masing-masing dalam file yang berbeda.
- Untuk mendapatkan kepastian, percobaan diulangi beberapa kali.
- Data atau hasil rekaman yang diperoleh selanjutnya disubstraksi dengan menggunakan perangkat lunak pemrosesan citra keluaran Hammatsu. Hasil substraksi yang diperoleh ditayangkan pada monitor video MV.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil substraksi terhadap masing-masing rekaman yang diperoleh, maka tidak pada semua tahapan frekuensi hasil substraksi menampilkan pola frinji, atau menghasilkan pola frinji dengan kualitas yang memuaskan. Visualisasi yang diperoleh menghasilkan penampakan frinji dengan

kontras yang tinggi hanya pada vibrasi membran dengan frekuensi-frekuensi sebesar sekitar 400 Hz, 800 Hz, dan 1200 Hz.

Untuk penelitian ini digunakan meja optik yang mampu mereduksi getaran-getaran mekanik yang menjalar melalui lantai. Dan demikian juga, gangguan terhadap lintasan berkas laser yang diakibatkan oleh perubahan aliran udara, atau karena perubahan indeks bias udara, sudah sangat dikurangi dengan melakukan percobaan di dalam ruang tertutup. Juga, vibrasi yang dijalkan oleh membran tersebut terhadap meja kerja juga diminimalkan dengan menggunakan penjepit yang berat dan kaku dan diisolasi terhadap meja.

Penyebab tidak diperolehnya penampakan pola frinji dari simpangan pada setiap tahapan frekuensi yang disubstraksi kemungkinan besar disebabkan oleh: (1) Karakteristik membrannya sendiri, berkaitan dengan frekuensi dasar dan harmoniknya. Sebagaimana diketahui, jika membran tidak bergetar pada frekuensidasar atau pada frekuensi harmoniknya, maka simpangan vibrasinya akan kecil sekali. Dengan demikian simpangan vibrasi yang terjadi tidak teramati. (2) Tegangan yang diberikan pada corong suara tidak cukup memberi energi yang mampu menggetarkan membran uji. Akibatnya simpangan vibrasi dari membran sangat kecil sekali, sehingga tidak terdeteksi.

KESIMPULAN

Dari pengalaman selama melakukan penelitian ini dan dari hasil analisa yang diperoleh, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Untuk memvisualkan simpangan vibrasi dengan metoda *time-average electronic speckle pattern* interferometry pada dasarnya dapat dilakukan.
2. Frekuensi dasar ataupun frekuensi harmonik akan mempengaruhi hasil visualisasi simpangan ini.
3. Analisa kuantitatif secara visual dibatasi oleh kemampuan pengamatan terhadap pembentukan frinji, yang berkaitan dengan besarnya simpangan vibrasi, dan juga ditentukan oleh sudut datang dan sudut pantul.
4. Secara kualitatif, visualisasi ini dapat

digunakan untuk memperlihatkan pola vibrasi dari setiap bagian membran yang bervibrasi. Apakah simpangannya homogen atau tidak.

5. Untuk tujuan kuantitatif, menentukan besarnya simpangan, visualisasi ini dapat dimanfaatkan. Besarnya simpangan sebanding dengan jumlah frinji yang tampak.

DAFTAR PUSTAKA

- O. J. Lokberg, *Speckle Metrology*, ed. R. S. Sirohi, Marcel Dekker Inc. , New York, 1993.
- Muchiar, Penelitian Visualisasi dan Karakteristik Slip-Band pada Pelat Paduan Aluminium Tipe A5052P, *Prosiding ETM*.
- Wei-Chung wang, [et. al.](#), *Vibration measurement by the time-averaged*

electronic speckle pattern interferometry methods, Applied Optics, Vol. 35, No. 22 August 1996.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Pimpinan Puslit Fisika - LIPI atas kesempatan untuk melakukan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan terhadap rekan-rekan di kelompok Interferometri atas bantuan teknik dan pemikiran, serta diskusidiskusi dan saran-sarannya. Ucapan yang sama juga disampaikan kepada saudara Kepala Laboratorium Elektro yang telah memberi pinjaman alat Generator Sinyal yang sangat kami perlukan di dalam penelitian ini. Untuk kawan-kawan di Bengkel Mekanik yang telah ikut membantu mempersiapkan objek uji beserta kelengkapannya juga kami ucapkan terima kasih.