

Penggunaan Material Piezoceramics (PZT) untuk Pemantauan Integritas Struktur

Wibowo HN.¹

Abstrak

Makalah ini menunjukkan potensi penggunaan material Piezoceramics (PZT) untuk mendeteksi secara dini adanya keretakan dari suatu komponen struktur. Material PZT ini merupakan material cerdas yang akan menghasilkan beda potensial (volt) jika diberi gaya mekanik dan sebaliknya jika diberi beda potensial akan menghasilkan gaya mekanik berupa regangan (strain). Penggunaan pasangan sensor – aktuator PZT untuk melakukan pendeteksian dini dilakukan dengan mengamati perubahan fungsi alih (transfer function) sinyal getaran dari pasangan sensor – aktuator PZT tersebut. Serangkaian hasil numerik dan eksperimen akan diperlihatkan pada makalah ini. Aplikasi dari teknik ini sangat potensial di masa depan karena struktur menjadi aktif untuk mendiagnosa sendiri kerusakan dan memprediksi sisa umur pakainya.

Kata kunci : PZT, Aktuator, Fungsi Alih

Abstract

This paper will address the potential use of Piezoceramics (PZT) for early detection of a crack in a structural component. This PZT (Lead Zirconate Titanate) is a smart material that will generate a voltage when a mechanical force is applied, and will generate a force with an applied voltage. This paper presents a transfer function (TF) method to detect and simultaneously to locate the general area of damage in an structure at an early stage. This TF method works by acquiring the vibration signature in a certain range of broad band frequency from the pairs of PZT sensor – actuator that attached on the surface of the structure. A range of numerical and experimental results will be presented. In the future This potential technique can offer technical and commercial benefits for self crack detection and for determining the remnant fatigue life of such structural elements.

Keywords : PZT, Actuator, Transfer Function

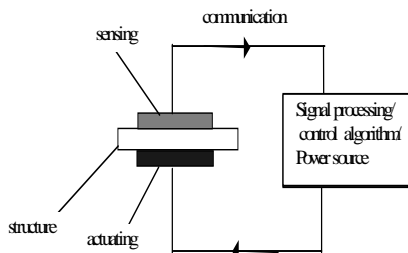
PENDAHULUAN

Sebuah struktur dikategorikan tidak sehat apabila adanya kerusakan pada komponennya yang mana dengan semakin membesarnya kerusakan tersebut struktur dapat menjadi hancur atau gagal beroperasi. Banyak hal yang menyebabkan timbulnya kerusakan pada struktur tetapi penyebab umum pada struktur logam adalah munculnya keretakan akibat kelelahan logam (fatigue crack growth), sedangkan pada struktur – struktur berbasis komposit faktor terlepasnya serat (delaminasi) merupakan penyebab umum. Sehingga

deteksi dini dari munculnya keretakan/delaminasi ini adalah sangat penting. Deteksi dini dari kerusakan tersebut dapat dilakukan dengan terus menerus memonitor kondisi dari struktur menggunakan suatu sistem otomatis. Penggunaan dari konsep struktur cerdas merupakan alat yang tepat untuk melakukan tugas monitor tersebut karena interaksi manusia dengan struktur tersebut dapat diminimumkan. Dengan situasi ini kesalahan manusia (human error) dapat sebesar-besarnya dapat dikurangi, sehingga hal ini akan meningkatkan ketelitian dari pengambilan data

1. UPT BPPH-BPPT, Surabaya

yang dibutuhkan untuk mengkaji kerusakan pada struktur. Tujuan utama dari penggunaan struktur cerdas ini adalah untuk memperpanjang umur pakai struktur dan mencegah kejadian kegagalannya. Hasil – hasil penelitian dari material /struktur cerdas ini dapat diterapkan pada industri industri sebagai berikut : (1) penerbangan seperti ageing pesawat terbang, wahana ruang angkasa, satelit dan stasiun ruang angkasa; (2) kelautan seperti kapal samudra, kapal cepat dan bangunan lepas pantai di industri minyak dan gas; (3) infrastruktur seperti bangunan, jaringan pipa dan bejana bertekanan. Struktur - struktur besar ini harus tetap dijaga kondisinya dengan baik agar dapat melayani masyarakat dalam melaksanakan tugas kesehariannya. Konsep struktur cerdas ini seperti diperlihatkan pada Gambar 1. pada dasarnya adalah mengkombinasikan pasangan aktuator - sensor dengan sebuah struktur. Aktuator ini akan menggerakkan sebuah titik atau lokasi pada struktur tersebut dan respon dari struktur ini akan dirasakan oleh sensor pada titik atau lokasi lainnya.

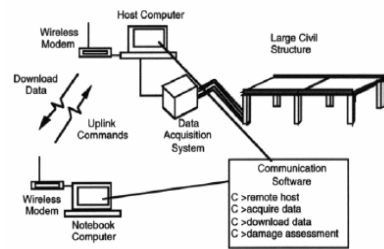


Gbr. 1. Konsep dari suatu struktur cerdas

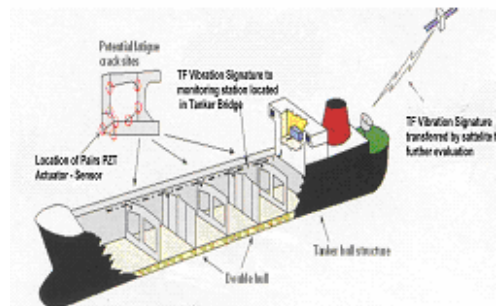
Adanya perubahan kondisi pada struktur tersebut akan menghasilkan perubahan yang dirasakan oleh sensor tersebut. Sinyal dari pasangan sensor – aktuator ini akan di proses melalui sebuah algoritma kontrol. Algoritma kontrol ini dapat berupa sebuah metoda yang dipakai untuk menganalisa data yang diterima oleh sensor. Dengan menggunakan metoda yang benar dan baik untuk mencegah kerusakan total pada struktur.

Dalam penulisan ini akan ditunjukkan penggunaan Piezoceramics yaitu Lead Zirconate Titanate (PZT) yang merupakan keluarga dari apa yang disebut dengan material cerdas atau “*smart material*”. PZT ini akan menghasilkan beda potensial jika diberi gaya mekanik dan juga sebaliknya jika diberi beda potensial akan menghasilkan gaya mekanik berupa regangan atau “strain”. Keunggulan dari penggunaan sensor

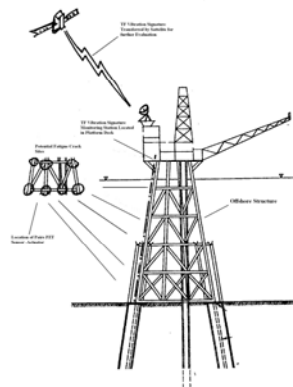
aktif PZT pada struktur adalah pemantauan integritas dapat dilakukan walaupun struktur tidak mendapatkan beban operasional sehingga pemantauan terhadap struktur tersebut dapat dilakukan terus menerus. Pengembangan dari sistem pemantauan integritas struktur ini akan berupa suatu sistem nirkabel deteksi dini dari kerusakan pada struktur dengan mengkombinasikan penggunaan sensor aktif PZT (lihat Gambar 2). Yang mana sebagai contoh untuk struktur kapal atau bangunan lepas pantai ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gbr 2. Konsep nirkabel dari sistem aktif deteksi aktif



Gbr. 3. Konsep Struktur Cerdas untuk Kapal



Gbr. 4. Konsep Struktur Cerdas untuk Bangunan Kelautan

METODE PENGUJIAN

Pada penelitian ini metoda yang dipakai untuk mendeteksi dini keretakan pada struktur logam ini bekerja dengan cara menghitung luasan dibawah spektrum frekuensi dari fungsi alih (TF) dari pasangan aktuator dan sensor dimana lebar data frekuensi TF yang dianalisa terbatas pada kejadian moda dominan pertama (untuk menghindari kesulitan dari analisa modal). TF diperoleh dengan mengukur sinyal getaran dari suatu rentang frekuensi “broadband” dari lembar – lembar PZT yang dipasang pada permukaan struktur. Lembar – lembar PZT ini terpasang secara merata sebagai pasangan aktuator – sensor dimana mereka akan digunakan untuk menghasilkan dan mengukur sinyal getaran gelombang elastis pada komponen struktur. Dengan demikian sistem ini akan tidak tergantung dari informasi moda struktur karena deteksi dan karakteristik dari kerusakan berdasarkan sinyal input/output lokal dari PZT. Dengan memanipulasi spektrum getaran dari setiap pasangan aktuator – sensor kita dapat menghasilkan TF dari masing – masing pasangan sensor – aktuator. Kumpulan dari lembar – lembar PZT ini dapat digunakan untuk menentukan secara umum lokasi kerusakan struktur dan/atau kerusakan dari pasangan sensor – aktuator tertentu. Jika TF dari suatu pasangan aktuator –sensor menunjukkan hal yang aneh maka daerah kerusakan atau pasangan aktuator – sensor dapat diketahui dengan mudah. Selanjutnya untuk memasang pasangan aktuator – sensor ini diperlukan pengetahuan tentang lokasi – lokasi yang kritis dari suatu struktur. Untuk mendapatkan hal ini perlu dilakukan pengamatan/penelitian yang intensif terhadap struktur dan diskusi dengan pihak – pihak yang berwenang terhadap kelaikan suatu struktur.

Selanjutnya pada bagian ini akan diterangkan persamaan-persamaan dan asumsi-asumsi dasar yang dipakai dalam penelitian ini baik untuk pekerjaan numerik ataupun eksperimen dalam menghitung fungsi alih tersebut. Saat lembar PZT yang terpasang di struktur diaktifkan oleh medan listrik , lembar PZT ini akan menghasilkan regangan(strain). Regangan ini juga dirasakan oleh struktur yang terpasang PZT ini. Aktivasi sebidang atau regangan yang terjadi ϵ dari PZT berbanding lurus dengan koefisien koupling mekanik dan listrik d_{31} dari keramik dan medan listrik yang terpakai V , sehingga dapat dihasilkan persamaan ini sebagai

berikut:

$$\epsilon = d_{31}V \quad (1)$$

Jika lapisan pengikat tipis dan kaku, regangan yang dihasilkan oleh lembar PZT sebagai aktuator adalah sama dengan regangan yang terjadi pada luasan plat dibawahnya. Kondisi ini juga berlaku saat lembar PZT bertindak selaku sensor. Hal ini disebut dengan aktuator atau sensor yang menyatu dengan sempurna (a perfectly bonded actuator or sensor). Persamaan regangan dapat ditulis dengan:

$$\epsilon_{pzt} = \epsilon_{struktur} \quad (2)$$

Lembar PZT ini mempunyai tiga arah gerakan. Karena lembar PZT yang dipergunakan dalam penelitian ini tipis maka gerakan dalam arah ketebalan sangat kecil dibanding dengan yang lainnya sehingga dapat diabaikan. Maka hubungan antara regangan terhadap perpindahan untuk deformasi kecil dan tarikan murni dapat ditulis :

$$\epsilon = \Delta L / L \quad (3)$$

disini ΔL and L adalah tambahan panjang dan panjang dari lembar PZT saat terkena gaya atau aktivasi tegangan

Pada setiap pasangan aktuator-sensor, masukan *broadband* tegangan listrik digunakan untuk mengaktifkan aktuator dan sensor akam mendeteksi respon struktur yang terjadi akibat masukan tersebut. Fungsi alih (TF) yang terjadi dari pasangan aktuator-sensor tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$TF = \frac{V_{ks}}{V_{kact}} \quad (4)$$

V_{ks} = Spektrum getaran yang dihasilkan sensor (VOLT)

V_{act} = Spektrum getaran yang dihasilkan aktuator (VOLT)

Spektrum getaran ini didefinisikan sebagai :

$$V_k(\omega) = A_k(\omega) e^{i\theta_k(\omega)} \quad (5)$$

dimana ω = frekuensi

θ_k = sudut fase

A_k = amplitude

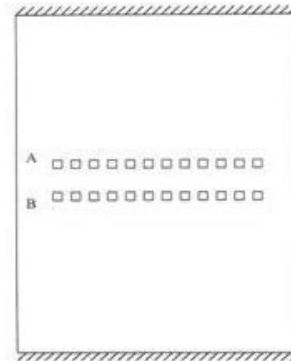
Selanjutnya pada persamaan (4) dilakukan pengintegralan pada daerah frekuensi tertentu. Integral daerah ini didefinisikan sebagai kurva R:

$$R = \int_{f_0}^f A_{TF} df \quad (6)$$

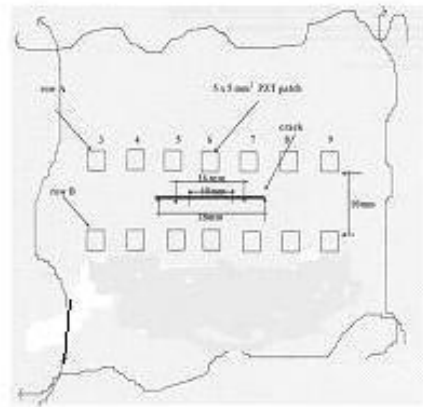
Disini A_{TF} adalah amplitude dari spektrum frekuensi TF

Dalam uji laboratorium, spektrum getaran ini diukur menggunakan frekuensi analiser. Sedang dalam uji numerik fungsi alih (TF) dapat dihitung dengan persamaan (1) sampai dengan (5). Tujuan utama dari penelitian ini untuk menentukan apakah TF yang diperoleh pada persamaan (4) dapat digunakan untuk memantau penjarangan keretakan di struktur. Penelitian ini menggunakan sebuah plat aluminium tipis, yang mana kedua sisi lebarnya dijepit. Logam Aluminium dipakai untuk uji numerik dan laboratorium ini dipilih karena diharapkan dapat memperjelas medan stress/strain yang terjadi karena sifatnya yang lebih lunak dari logam baja. Plat tersebut, terlihat pada Gambar 4.a, mempunyai dimensi 200 x 400 x 2 mm³. Array dari aktuator dan sensor yang dinotasikan dengan baris A,B dilekatkan pada permukaan plat. Dua baris A, B lembar PZT berukuran 5 x 5 mm² ditempelkan pada plat. Jarak antara baris A dan baris B adalah 10mm dimana diantara kedua baris tepat ditengah-tengahnya diharapkan terjadi keretakan. Lokasi keretakan relatif terhadap posisi sensor – aktuator PZT diperlihatkan pada Gambar 4b. Fungsi alih diukur dihitung/diukur dari setiap pasangan aktuator – sensor. Pasangan aktuator – sensor dikombinasikan dalam dua cara untuk menghasilkan TF: (a) Perhitungan/Pengukuran TF- langsung i.e. $A_n B_n$ ($n = 1 \dots 11$), (b) Perhitungan/Pengukuran TF - silang i.e. $A_n B_{n+1}$ ($n = 1 \dots 10$), dimana pasangan ini dihitung mulai dari kiri ke kanan (perhatikan Gambar 4b). Pada kombinasi $A_n B_n$, $A_n B_{n+1}$ ini, baris A adalah array dari sensor dan baris B adalah array dari aktuator. Ada tiga buah kondisi kerusakan dari struktur yang diteliti perubahan sinyal TF-nya sebagai acuan

utama dalam analisa, yakni tanpa retak, Kemudian, panjang retak dengan ukuran 10mm (kerusakan1), 20mm (kerusakan 2), dan 30mm (kerusakan 3) atau retak dengan aspek rasio(a/h) sebesar 0,05, 0,1, 0,15 dimana a merupakan panjang retak dan h merupakan panjang plat.



Gbr. 4a. Plat Al tipis yang dijepit kedua ujung – ujungnya dimana terdapat array pasangan sensor – aktuator PZT



Gbr. 4b. Lokasi detail dari retak relatif terhadap pasangan sensor – aktuator PZT

PENGUJIAN NUMERIK

Model metode elemen hingga dibuat dengan mendiskritkan plat Al pada Gambar 4.a kedalam 1122 *eight-node shell elements*. Pemodelan metode elemen hingga dari plat dibuat untuk setiap kondisi pengujian. Properti material uji dan PZT diperlihatkan pada Table 1. Adalah hal yang penting untuk memperhatikan properti material ini terutama pada

lokasi dimana lembar – lembar PZT dipasang. Di lokasi dimana lembar – lembar PZT dipasang ini ukuran dari elemen disesuaikan dengan ukuran dari lembar PZT tersebut. Titik nodal dari elemen – elemen ini kemudian dipilih untuk diberi gaya eksitasi jika bertindak sebagai aktuator atau dihitung responnya jika bertindak sebagai sensor. Besaran dari gaya eksitasinya dibuat 10 Newton dengan kisaran dari 250 ke 30kHz. Semua perhitungan dari model elemen hingga ini dilakukan di PC, begitu juga perhitungan fungsi alih(TF)nya setelah hasil dari elemen hingga didapatkan.

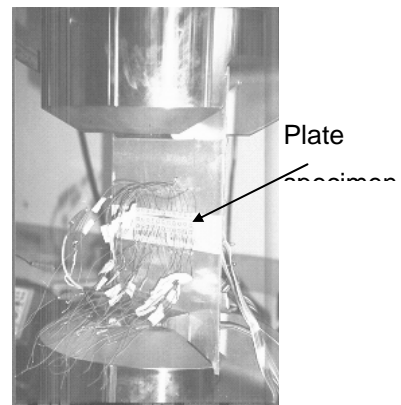
Tabel 1. *Properti Material dari plat Al dan PZT*

| Material | Young's modulus(GPa) |
|-------------------------------|----------------------|
| Aluminium | 68.5 |
| PZT – 5A | 52 |
| Density (kg m ⁻³) | Poisson's ratio |
| 2695 | 0.33 |
| 7800 | 0.33 |

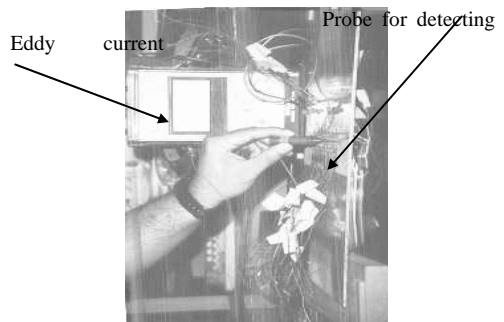
PENGUJIAN LABORATORIUM

Pada pekerjaan penelitian ini, alat-alat uji terdiri dari sebuah signal generator (SG) Hewlet-Packard 33120A, sebuah oskilloskop dengan 2 kanal HAMEG HM305, sebuah frekuensi analyser AND AD-3525 dan Alat Uji Material (MTS) untuk menghasilkan keretakan pada spesimen plat. Pada spesimen plat ini lembaran PZT ditempelkan padanya. Pengujian ini menggunakan sebuah plat aluminium tipis, yang mana kedua sisi lebarnya dijepit pada mesin uji material MTS. Kemudian fungsi alih diukur dari setiap pasangan aktuator – sensor PZT. Sebelum uji laboratorium dimulai semua aktuator – sensor PZT actuators-sensors yang terpasang pada spesimen plat dicek dengan mengukur kapasitansi mereka dan respon mereka terhadap masukan tegangan listrik. Pada eksperimen plat aluminium yang mewakili suatu komponen struktur diberi beban berulang (cyclic) pada besar amplitudo yang tetap dengan menggunakan mesin uji material MTS (perhatikan Gambar 5). Kemudian untuk menghasilkan

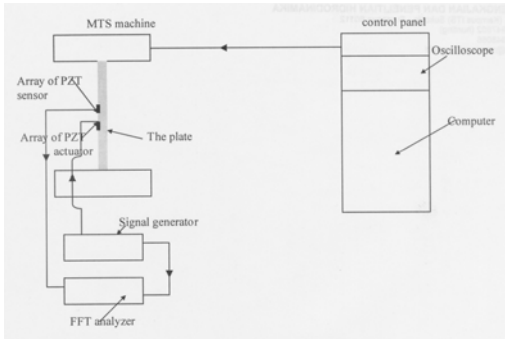
retak karena kelelahan logam plat aluminium tersebut diberi beban berulang sebesar 15 (15kN. Retak sebesar 10mm dihasilkan setelah beban diberikan pada plat selama 450000cycles. Beban berulang kemudian dilanjutkan hingga 750000cycles sehingga dihasilkan retak sebesar 16mm. Kemudian eksperimen terus dilanjutkan untuk mendapatkan retak yang terakhir yaitu 28mm. Retak ini dihasilkan setelah beban diberikan selama 810000cycles). Untuk mengetahui adanya keretakan tersebut digunakan Halec Eddy current crack detector (perhatikan Gambar 6). Diagram skema dari percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 7. Pada setiap ukuran retak yang terjadi dilakukan juga pengukuran fungsi transfer TF dengan menggunakan cara mengaktifkan pembangkit sinyal yang menyuplai *broadband Gaussian white noise* dengan range dari 250 sampai dengan 100KHz sebesar 10V *peak to peak* untuk mengaktifkan aktuator PZT actuator.). Sehingga pengukuran TF dilakukan pada semua kondisi keretakan yang terjadi.



Gbr. 5. Spesimen plat yang dijepit pada mesin MTS



Gbr. 6. Detektor retak Halec Eddy current



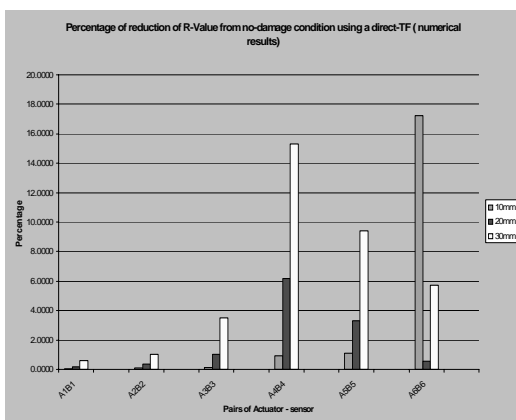
Gbr. 7. Diagram skema dari metoda Transfer Function untuk deteksi retak karena kelelahan logam

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil – hasil uji numerik dan laboratorium dari studi dianalisa dengan menerapkan Metoda Kurva – R ini. Hasil – hasil ini di tampilkan dalam bentuk perbandingan selisih luas kurva TF terhadap kondisi tanpa kerusakan dari masing – masing pasangan sensor – aktuator sehingga sensitifitas dari masing – masing pasangan AnBn terhadap berbagai kondisi keretakan dapat dianalisa.

HASIL UJI NUMERIK

Hasil hasil dari uji numerik untuk pasangan AnBn sampai pada frekuensi 20 ditunjukkan pada Gambar 8. Dari gambar ini terlihat pengurangan nilai R untuk pasangan A1B1 dan A2B2 tidak menunjukkan pengurangan yang berarti (kurang dari 1%) hal ini disebabkan dari pasangan A1B1 dan A2B2 jauh dari lokasi keretakan.

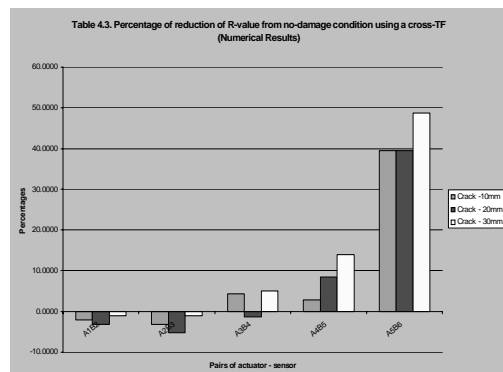


Gbr. 8. Hasil Pengujian Numerik menggunakan pengukuran TF-langsung

Jika Gambar 8 ini diperhatikan dengan seksama maka terlihat bahwa:

- Pengurangan nilai – R dari pasangan sensor – aktuator AnBn bernilai kecil kecuali saat keretakan terjadi persis di depan pasangan. Untuk kasus retak 10 mm (aspek rasio $a/h = 0.05$) pengurangan nilai R terjadi pada pasangan A6B6.
- Untuk kasus retak 20 mm (aspek rasio $a/h = 0.1$), dimana retak ini berada di depan pasangan A5B5 (lihat Gambar 4b). Pengurangan nilai R diamati untuk pasangan A4B4 dan A5B5. Disini dapat dikatakan bahwa retak memanjang dari pasangan sensor-aktuator ke 6 ke pasangan ke 5. Kesimpulan ini diambil dari terjadinya pengurangan nilai R dari A5B5 dan A6B6. Pengurangan A5B5 menunjukkan bahwa retak belum secara penuh melewati pasangan ke 5 dari pasangan aktuator-sensor tersebut.
- Untuk kasus retak 30mm (aspek rasio $a/h = 0.15$) yang ditunjukkan pada Gambar 4b, pengurangan nilai R terjadi pada pasangan A4B4 dan A3B3. Menarik untuk diamati bahwa nilai R untuk A4B4 berkurang secara dramatis dibanding A3B3. Hasil ini mengimplikasikan bahwa retak sekarang memanjang dari pasangan sensor-aktuator dari 5 ke 6 dan ujung retak mendekati pasangan pasangan ke 4. Pengurangan besar pada A4B4 mengimplikasikan bahwa retak mendekati pasangan ke 4 dari sensor-aktuator.

Selanjutnya hasil perhitungan untuk TF silang berupa persentasi pengurangan nilai R hingga frekuensi 20 kHz diperlihatkan pada Gambar 9.



Gbr. 9. Hasil Pengujian Numerik menggunakan pengukuran TF- Silang

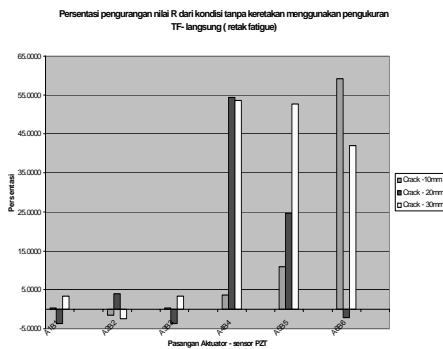
Dari pengamatan gambar ini terlihat bahwa:

- Pengurangan yang berarti dari nilai R pada pasangan A4B5 untuk kasus retak 30mm. Ini menunjukkan ujung retak (*crack tip*) kondisi ini terletak antara sensor A4 dan aktuator B5. (lihat Gambar 4b)
- Pengurangan nilai R yang berarti juga berarti pada pasangan A5B6 yang mana dapat dipakai untuk mendeteksi keberadaan retak 10mm yang berlokasi didekat sensor A5 dan aktuator B6.

Berdasarkan hasil – hasil perhitungan numerik dari fungsi alih (TF) – langsung yang dikombinasikan dengan hasil – hasil dari TF – silang di atas prediksi keberadaan keretakan pada suatu komponen struktur seperti ini dapat dilakukan. Oleh karena itu hasil – hasil perhitungan numerik di atas perlu kiranya untuk dibandingkan dengan hasil – hasil dari uji laboratorium sebagai sarana untuk memvalidasinya.

HASIL UJI LABORATORIUM

Untuk uji laboratorium ini hasil – hasil dari persentasi pengurangan nilai – R untuk pengukuran TF – langsung AnBn dan TF – Silang AnBn+1 diperlihatkan pada Gambar 10.



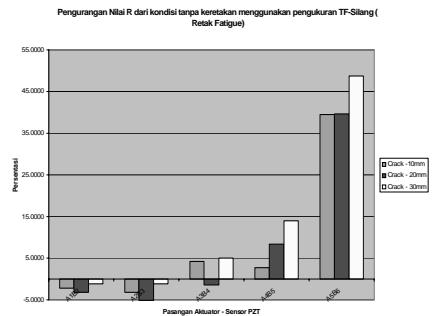
Gbr. 10. Hasil uji Laboratorium menggunakan pengukuran TF- Langsung

Berdasarkan pengamatan dari hasil – hasil tersebut dapat ditengarai hal – hal sebagai berikut:

- Seperti yang telah diperlihatkan dari simulasi numerik, pada hasil uji laboratorium juga menunjukkan bahwa pasangan A1B1, A2B2, and A3B3 mengalami pengurangan nilai R yang tak berarti (berkisar $\pm 5\%$) dikarenakan posisi yang relatif jauh dari daerah keretakan.

- Sedikit berbeda dengan hasil numerik untuk pasangan A4B4 pengurangan nilai R cukup berarti dimulai pada keretakan dengan aspek rasio 0.1 dan saat retak telah mencapai aspek rasio sekitar 0.15 pengurangan nilai R terhadap kondisi tanpa kerusakan berkisar sama.
- Kecendrungan yang serupa dengan hasil numerik juga terjadi pada pasangan sensor – aktuator A5B5 dimana hasil uji laboratorium memperlihatkan bahwa retak dengan aspek rasio 0.05 dan 0.1 masih berada di depan pasangan tersebut dan saat keretakan telah melampaui pasangan tersebut, yakni retak dengan aspek rasio berkisar 0.15 pengurangan terhadap nilai R semakin membesar.
- Pengurangan nilai R yang relatif besar untuk pasangan A6B6 pada kasus retak dengan aspek rasio 0.05 dan untuk keretakan berikutnya pengurangan berlanjut tetapi dengan kecendrungan yang aneh, akan tetapi hal yang serupa juga diperlihatkan pada simulasi numerik mungkin hal ini menunjukkan bahwa keretakan telah membesar dan telah melewati pasangan sensor – aktuator A6B6.
- Menarik untuk diperhatikan walaupun kondisi retak hasil dari uji kelelahan logam (retak 16mm dan 28mm) berbeda dengan retak simulasi numerik (retak 20mm dan 30mm), trend yang dihasilkan dari respon pasangan aktuator-sensor tersebut serupa .

Selanjutnya seperti pada simulasi numerik, pengukuran TF – silang yang diperlihatkan pada Gambar 11 juga digunakan untuk mengkonfirmasi kemiripan kecendrungan yang diperoleh di atas.



Gbr. 11. Hasil uji Laboratorium menggunakan pengukuran TF- Silang

Dengan mengamati Gambar 11, kiranya dapat dihasilkan hal – hal sebagai berikut :

- Seperti pada simulasi numerik nilai dari kurva R untuk pasangan -pasangan aktuator-sensor A1B2, A2B3 dan A3B4 relatif tidak berubah atau berubah dengan besaran yang kecil.
- Pasangan sensor – aktuator A4B5 sepertinya mempunyai sensitifitas lebih tinggi dari yang diperoleh dari hasil numerik. Pasangan ini dapat mendeteksi adanya retak dengan aspek rasio 0.15. Hal ini mungkin disebabkan bahwa retak pada plat uji menghasilkan kekakuan yang lebih rendah dibanding yang diperoleh dari simulasi numerik. Akan tetapi pengamatan pada pasangan A3B4 hasil dari uji laboratorium ini menunjukkan hal yang konsisten dengan simulasi numeric, hal ini jelas menunjukkan bahwa ujung retak dengan aspek rasio 0,15 terletak diantara sensor A4 dan B5 (perhatikan Gambar 4b).
- Seperti pada simulasi numerik, pengurangan nilai R cukup berarti terjadi pada pasangan A5B6 dimana menunjukkan pendeteksian retak dengan aspek rasio 0,05. Hal ini juga menunjukkan bahwa ujung retak terletak di daerah dekat sensor A5 dan B6. (lihat Gambar 4b)
- Seperti juga pasangan langsung AnBn, pasangan silang AnBn+1 ini juga menunjukkan kemiripan kecendrungan respon dari pasangan sensor – aktuator karena adanya keretakan untuk aspek rasio 0.1 dan 0.15 antara simulasi numerik dan hasil uji laboratorium.

KESIMPULAN

Seperti ditunjukkan dengan simulasi numerik dan kemudian diperkuat oleh uji laboratorium. Maka hasil dari perhitungan fungsi alih TF dari lembar-lembar PZT ini berpotensi besar digunakan untuk mendeteksi dini dan melokalisir daerah kerusakan di sebuah komponen struktur. Selanjutnya pemakaian sensor aktif berbasis PZT ini tentunya dapat dikembangkan memakai sistem nirkabel pemantauan integritas struktur dimana pemantauan/pendeteksian dapat dilakukan terus – menerus dengan kondisi berbeban atau tak ada beban operasional dari struktur karena PZT ini dapat berfungsi sebagai aktuator pemberi beban. Sehingga jika terjadi kerusakan, maka struktur dengan cepat dapat mengetahuinya dan melakukan diagnosa melalui algoritma yang terdapat pada sistemnya untuk

mengetahui hingga berapa lama lagi umur pakai dari struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Darryll J Pinesy and Philip A Lovellz “Conceptual framework of a remote wireless health monitoring system for large civil structures” *Smart Mater. Struct.* 7 (1998) 627–636
- Lichtenwalner P.F., Dunne J.P., Becker R.S., and Baumann E.W.,”Active Damage Interrogation System for Structural Health Monitoring”, *SPIE Vol.3044* (1997), pp 186-194.
- Spillman Jr, W.B., Sirkis, J.S., and Gardiners, P.T.,” Smart materials and structures: what are they?” *Smart Material , Structure* (vol 5, 1996), pp 247-254.
- Wibowo, H.N., “On the Use of Transfer Function Method to Detect the Development Cracks in a Metallic Structure (an Experimental Study)”,*Conference of Marine Technology 2001, on 30-31 October 2001 at Johor, Malaysia*
- Wibowo. N, WK. Chiu,” Crack Monitoring of a Structural Component “published at *Applied Mechanics: Progress and Applications Proceedings of the Third Australasian Congress on Applied Mechanics, Sydney, Australia, 20-22, February 2002, pp 439-445*
- Wibowo, H.N., “Penggunaan array aktuator-sensor Piezoceramics (PZT) untuk memonitor keretakan pada sebuah komponen struktur”, *Journal Pengkajian Industri - Material* edisi 16/April/2002
- Wibowo H.N, Sahlan RB,” Active Damage Detection of an Offshore Structural Component Using Pairs of PZT sensor - actuator ”, *Published and Presented for 5th Regional Conference of Marine Technology 2006, on 4 & 6 September 2006 at Makassar, Malaysia*
- Wibowo, H.N., and Samudro,” Potential use of pairs of sensor - actuator to extend the life of tanker hull structures (in Indonesian Language)”, *Published and presented for Seminar nasional Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan, ITS-Surabaya/24November 2005*
- W K Chiu, S C Galea, L L Koss and N Rajic.”Damage detection in bonded repairs using piezoceramics,” *Smart Mater. Struct.* 9 (2000) 466–475.