

DESAIN SISTEM PENGUKURAN PERGESERAN OBJEK DENGAN TRANSDUSER ULTRASONIK MENGGUNAKAN METODE KORELASI SILANG SECARA REAL TIME

Ridwan Awal, Agus Naba, D. J. Djoko Herry Santjojo

Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Malang, Indonesia, 65145

E-mail: Ridwanawalin@gmail.com

Abstrak

Pada umumnya sistem pengukuran pergeseran bekerja berdasarkan prinsip penentuan waktu tempuh gelombang ultrasonik. Waktu tempuh diukur dari saat gelombang terpancar sampai dengan diterima kembali oleh transduser. Waktu tempuh akan berubah seiring dengan perubahan jarak lintasan gelombangnya. Penentuan waktu tempuh dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya yaitu metode korelasi silang. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh waktu tempuh penjarangan gelombang dengan metode korelasi silang. Metode ini memerlukan masukan sinyal yang diperoleh pada transduser ultrasonik pemancar dan penerima. Kedua sinyal masukan ini dikorelasikan secara langsung pada sistem akuisisi data yang terintegrasi dengan LABVIEW. Pengukuran waktu tempuh dilakukan pada setiap pergeseran posisi objek pemantul gelombang sebesar 0,05mm dari transduser. Posisi awal objek pemantul setiap pengukuran dibuat bervariasi, yaitu 5cm, 10cm, 15cm dan 20 cm. Hasil percobaan pada setiap posisi pengukuran ini memberikan hubungan linear antara pergeseran dengan waktu tempuh gelombang, masing-masing dengan gradien 3×10^{-6} s/mm dan berturut-turut memberikan nilai $R^2_{(1)} = 0,989$, $R^2_{(2)} = 0,957$, $R^2_{(3)} = 0,968$ dan $R^2_{(4)} = 0,943$.

Keyword : gelombang ultrasonik, waktu tempuh, korelasi silang, transduser.

Pendahuluan

Kemajuan teknologi elektronika, fisika, ilmu bahan mendorong kemajuan alat pengukur jarak yang lebih presisi. Kemajuan tersebut menciptakan teknologi transduser yang dapat mengukur jarak tanpa menyentuh objek, namun penggunaan teknologi tersebut memerlukan pengolahan sinyal yang tidak sederhana.

Berbagai macam transduser mampu mengukur jarak tanpa menyentuh objek. Salah satu transduser tersebut adalah transduser ultrasonik yang berkerja dengan gelombang berfrekuensi 40 kHz. Rentang pengukuran transduser tersebut berada pada daerah pengukuran jarak yang berorde millimeter ataupun mikrometer. Pengukuran jarak tersebut sulit dilakukan oleh transduser yang bertipe tak menyentuh objek, karena pengukuran tipe ini memerlukan metode khusus dan ketelitian didalam pengolahannya. Metode khusus yang dapat diterapkan yaitu metode korelasi silang dengan dua masukkan sinyal dari transduser. Metode tersebut merupakan operasi matematika yang digunakan untuk menentukan jeda waktu dari dua sinyal yang identik .

Menurut Hammad [4] metode korelasi memiliki akurasi yang lebih tinggi daripada metode *threshold* dan *double threshold* pada pengukuran waktu tempuh

penjarangan gelombang. Operasi ini juga dipakai dalam penelitian yang dilakukan oleh Koriyanti [5] yang memperoleh hasil simpangan 1,68% dibanding hasil pengukuran langsung. Metode korelasi silang telah digunakan sebagai pendeteksi pergeseran objek dengan cara menganalisa sinyal yang terekam pada osiloskop digital yang hasilnya memperoleh koefisien regresi 0,9 [2]. Penelitian tersebut merancang dan membuat sistem transduser ultrasonik untuk mendeteksi pergeseran jarak benda dan kecepatan gelombang ultrasonik di udara dengan metode korelasi silang, tetapi hasil pergeseran jarak objek hanya diperoleh dengan perhitungan *non-realtime*. Penelitian ini menyempurnakan sistem pengukuran pada penelitian sebelumnya, yaitu mendesain sistem akuisisi data transduser ultrasonik yang dapat menghasilkan perhitungan pergeseran secara *realtime* yang terintegrasi dengan perangkat lunak LABVIEW.

Dasar Korelasi silang

Korelasi silang digunakan untuk menyatakan kesamaan sinyal diskrit yang dikirim dengan yang diterima. Contohnya pada sistem radar, apabila sinyal yang dipancarkan pemancar tidak menyentuh objek, sinyal tersebut tidak akan dipantulkan. Apabila sinyal mengenai objek, sinyal tersebut akan dipantulkan dan diterima kembali. Misalkan sinyal yang telah dipancarkan dinotasikan dengan x , sinyal pantulan yang diterima dinotasikan menjadi y dengan besar amplitudo tidak bernilai sama dengan sinyal mula-mula. Hasil korelasi silang antara sinyal x dan y dinyatakan sebagai berikut [6]:

$$h_j = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cdot y_{j+k} \quad (1)$$

dimana $j = -(N-1), -(N-2), \dots, -1, 0, 1, \dots, (M-2), (M-1)$.

x memiliki batas syarat $x_j = 0$ pada $j < 0$ dan $j \geq N$, sedangkan y memiliki batas syarat $y_j = 0$ pada $j < 0$ dan $j \geq M$. N merupakan jumlah indeks sinyal x dan M merupakan jumlah indeks sinyal y . Hasil h_j memiliki indeks j yang negatif dan positif. Penggunaan $R_{xy(i)}$ dilakukan untuk memudahkan pemberian indeks yang dimulai pada indeks nol. Sehingga penjabaran $R_{xy(i)}$ dinyatakan sebagai berikut [1]:

$$R_{xy(i)} = h_{i-(N-1)} \quad (2)$$

dimana $i = 0, 1, 2, 3, \dots, N+M-2$.

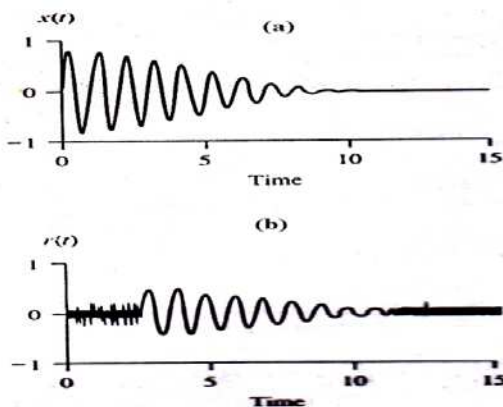
Persamaan (1) dan persamaan (2) merupakan persamaan yang bertipe *direct cross-correlation* (DCC) yang memiliki dua variabel masukan. Metode *direct cross-correlation* tersebut merupakan metode dasar korelasi silang. Metode ini dapat dijelaskan dengan melihat tabel 1 untuk menghasilkan korelasi silang R_{xy} [7].

Tabel 1. Metode perhitungan korelasi silang langsung dengan sebagai keluaran

x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	$R(i)$
y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9	$R(0) = x_0y_0 + x_1y_1 + x_2y_2 + x_3y_3 + x_4y_4 + x_5y_5 + x_6y_6 + \dots$
	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	$R(1) = x_1y_0 + x_2y_1 + x_3y_2 + x_4y_3 + x_5y_4 + x_6y_5 + x_7y_6 + \dots$
		y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	$R(2) = x_2y_0 + x_3y_1 + x_4y_2 + x_5y_3 + x_6y_4 + x_7y_5 + x_8y_6 + \dots$
			y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	$R(3) = x_3y_0 + x_4y_1 + x_5y_2 + x_6y_3 + x_7y_4 + x_8y_5 + x_9y_6 + \dots$
				y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	$R(4) = x_4y_0 + x_5y_1 + x_6y_2 + x_7y_3 + x_8y_4 + x_9y_5 + \dots$
					y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	$R(5) = x_5y_0 + x_6y_1 + x_7y_2 + x_8y_3 + x_9y_4 + \dots$
						y_0	y_1	y_2	y_3	$R(6) = x_6y_0 + x_7y_1 + x_8y_2 + x_9y_3 + \dots$
							y_0	y_1	y_2	$R(7) = x_7y_0 + x_8y_1 + x_9y_2 + \dots$
								y_0	y_1	$R(8) = x_8y_0 + x_9y_1 + \dots$

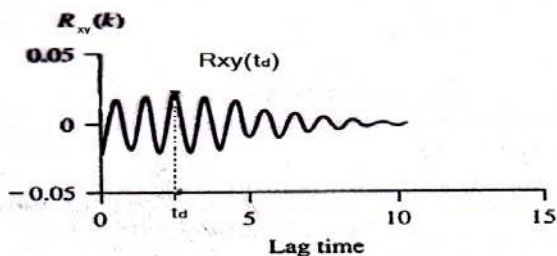
Hasil perhitungan korelasi silang R_{xy} memiliki nilai yang berbeda pada tiap indeksnya. Indeks yang diperoleh dari R_{xy} yang bernilai tinggi menjelaskan bahwa beda fase kedua sinyal berada pada rentang indeks tersebut. Sehingga nilai indeks tersebut dapat dikonversi menjadi beda fase dalam satuan waktu dengan cara mengalikan dengan periode sampling sistem pengukur.

Korelasi silang R_{xy} dapat diilustrasikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Sinyal yang ditransmisikan dinyatakan pada Gambar 1 (a), Sinyal tersebut memiliki amplitudo yang mengalami pelemahan. Gambar 1 (b) menyatakan sinyal yang diterima oleh penerima. Sinyal tersebut memiliki pergeseran fase sejauh 2,5 detik terhadap sinyal transmisi.



Gambar 1. Ilustrasi sinyal transducer: (a) transmisi dan (b) penerima

Gambar 2 menunjukkan hasil korelasi silang R_{xy} dari sinyal yang ditransmisikan dan sinyal yang diterima. Hasil korelasi R_{xy} berubah-ubah terhadap pergeseran waktu. R_{xy} maksimal berada pada saat td yang bernilai 2,5 detik [3].



Gambar 2. Ilustrasi korelasi silang R_{xy} dengan hasil maksimal pada pergeseran waktu 2,5 detik

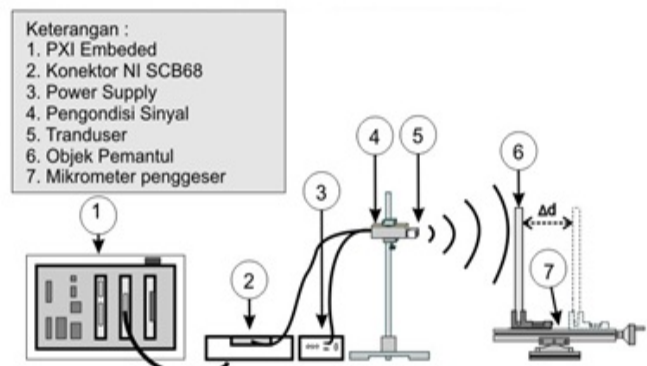
Desain Sistem Pengukuran

Sistem pengukuran terdiri dari beberapa bagian, diantaranya adalah transducer ultrasonik, pengkondisi sinyal (*Signal Conditioning*), pemrosesan sinyal (*Signal Processing*), *display*, dan objek pemantul. Blok sistem pengukuran pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Blok sistem pengukuran pergeseran objek dengan transducer ultrasonik

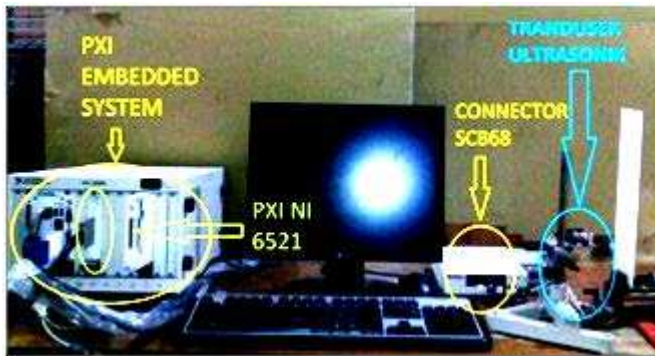
Sinyal-sinyal tersebut diproses dengan menggunakan metode korelasi silang untuk mendapatkan perbedaan fasenya. Desain sistem pengukuran pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Desain sistem pengukuran pergeseran objek

Gambar 4 menunjukkan sistem keseluruhan yang dipakai dalam penelitian ini. Sistem terdiri dari PXI embedded, konektor SCB68, power supply, pengondisi sinyal, transducer ultrasonik, objek pemantul, mikrometer skrup penggeser. PXI embedded merupakan prosesor utama pengolah sinyal. PXI embedded memiliki slot-slot yang dapat dipakai oleh peranti produk. Satu slot dipasang

PXI NI 6521 yang digunakan sebagai pengakuisisi sinyal di dalam penelitian. Sehingga pengukuran dapat dilakukan secara *realtime*. Foto sistem pengukuran ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Sistem pengukuran pergeseran dengan transducer ultrasonik

Metodologi

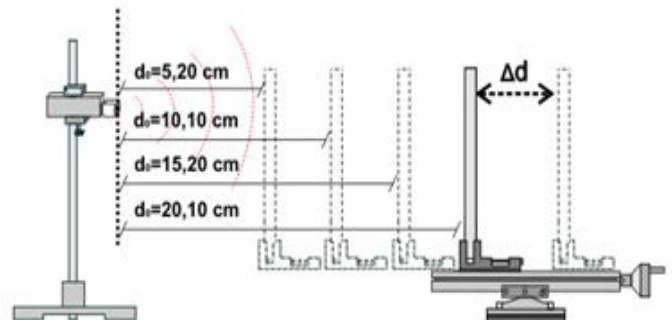
Pengambilan data dimulai dengan menentukan jarak awal antara transducer dengan objek pemantul. Jarak awal juga dikategorikan antara lain jarak dekat, sedang, dan jauh. Jarak awal terdekat di sekitar 4,00 cm, sedangkan jarak terjauh ditentukan dengan mengambil data pada jarak terjauh dengan sinyal transducer penerima masih dapat teramati. Kemudian penentuan jarak awal dilakukan pada saat terjadi kondisi hasil korelasi maksimum pada $R_{xy(49)}$ yang ditandai dengan sinyal pemancar dan sinyal hasil pantulan saling berhimpitan. Sehingga penelitian ini menggunakan jarak awal antara lain adalah 5,20 cm, 10,10 cm, 15,20 cm dan 20,10 cm.

Data-data sinyal dan hasil perhitungan korelasi silang diambil mula-mula pada jarak awal 5,20 cm. Kemudian objek pemantul digeser 0,05 mm menjauhi transducer dengan memutar knop pada mikrometer. Nilai 0,05 mm tersebut merupakan nilai pergeseran yang dapat diukur oleh mikrometer skrup. Setiap pergeseran objek menghasilkan indeks $R_{xy\ max}$ yang bernilai tinggi lebih dari indeks 49 secara *realtime*. Kemudian indeks dikalikan dengan periode sampling t_s sistem pengukur yaitu 2×10^{-6} detik. Sehingga indeks yang diperoleh sebelum dan sesudah pergeseran menghasilkan beda fase $\Delta\phi$ yang dapat dinyatakan dengan

$$\Delta\phi = (\text{indeks } R_{xy\ max} - \text{indeks } R_{xy(49)})t_s \quad (3)$$

Data-data sinyal diambil dan dilakukan pergeseran sejauh 0,05 mm kembali. Oleh karena itu setiap pergeseran objek sejauh 0,05mm, data-data dihitung dan disimpan

melalui program. Pergeseran objek maksimal dibatasi sampai dengan satu panjang gelombang. Perlakuan objek pada jarak awal 5,20 cm juga berlaku pada jarak awal 10,10 cm, 15,20 cm dan 20,10 cm. Perlakuan sistem pengukuran dapat ditunjukkan pada Gambar 3.1



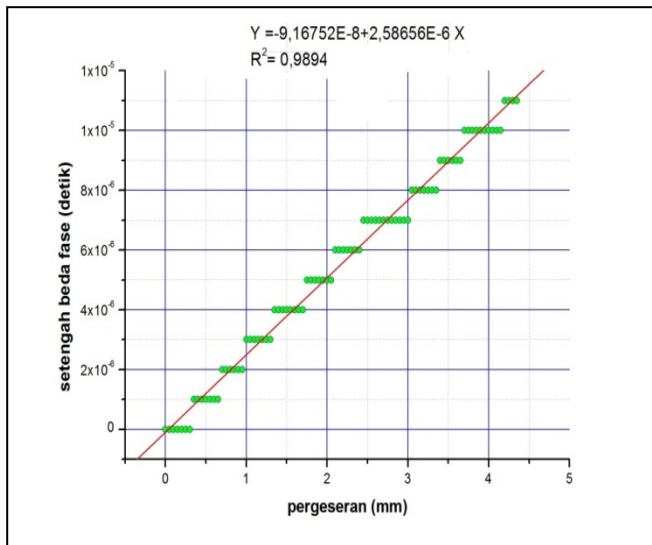
Gambar 6. Proses pengambilan data di dalam sistem pengukuran

Hasil Penelitian

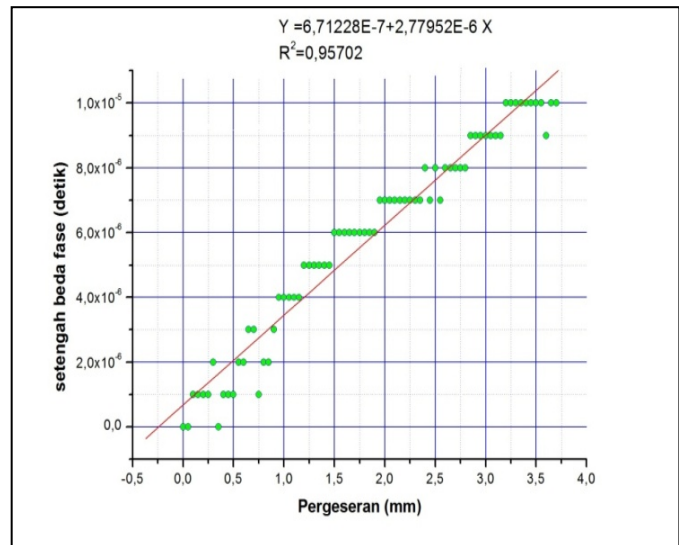
Waktu tempuh diperoleh dari hasil indeks yang dimiliki oleh R_{xy} maksimal dalam sistem pengukuran. Sistem pengukur memperoleh beda fase sinyal yang merupakan waktu tempuh penjalaran gelombang pada setiap pergeseran objek. Pergeseran dan waktu tempuh mempunyai hubungan yang ditunjukkan dengan hasil regresi linear fungsi yang mewakili datanya. Hasil regresi yang diperoleh dapat menunjukkan keakuratan sistem pengukur pada tiap perbedaan pengambilan jarak awal pengukuran.

Persamaan (3) menyatakan cara untuk memperoleh beda fase ($\Delta\phi$) sinyal pada lintasan penuh gelombang dari transducer pemancar hingga menuju transducer penerima. Setengah beda fase ($\Delta\phi/2$) merupakan waktu yang diperlukan gelombang merambat dari transducer menuju objek pemantul. Apabila lintasan gelombang menuju objek pemantul bertambah, setengah beda fase ($\Delta\phi/2$) akan bertambah.

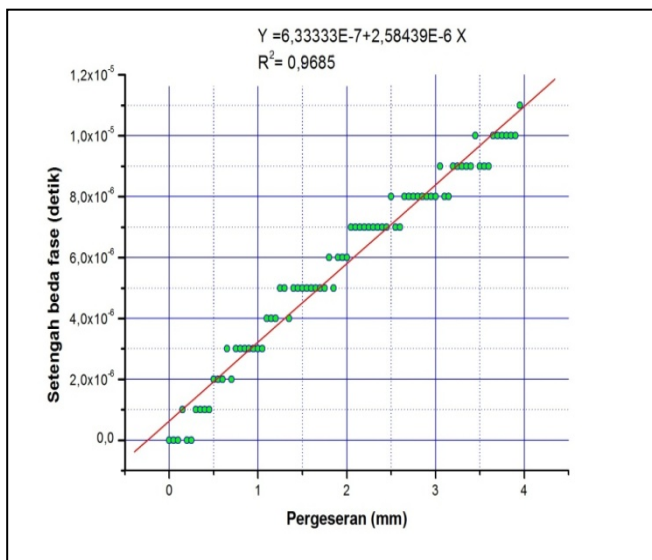
Gambar 7 menunjukkan pengaruh pergeseran terhadap ($\Delta\phi/2$) pada jarak awal antara lain yaitu 5,20 cm, 10,10 cm, 15,20 cm dan 20,10 cm. Penentuan jarak awal yang beragam dilakukan untuk mengetahui kemampuan metode korelasi silang ketika perubahan jarak terjadi. Kedua sinyal saling berhimpitan pada setiap nilai jarak awal. Kondisi tersebut ditandai dengan pertemuan antar puncak sinyal. Sehingga R_{xy} maksimal berada pada indeks $R_{xy(49)}$. Oleh karena itu beda fase dimulai pada $0,00 \times 10^0$ detik



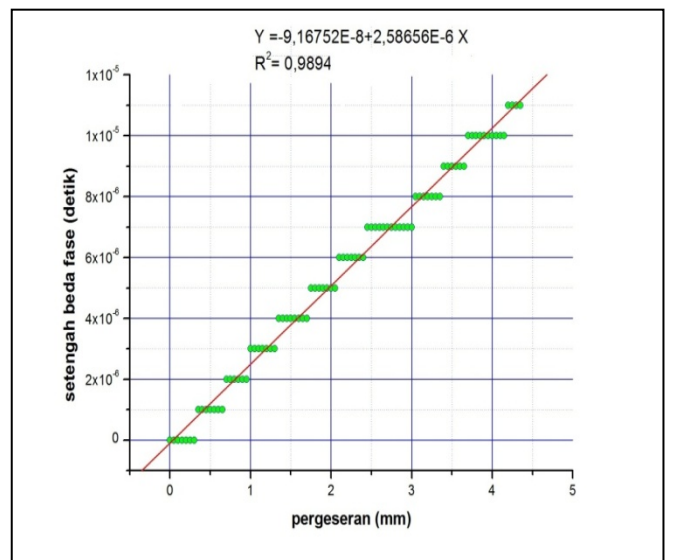
(a)



(b)



(c)



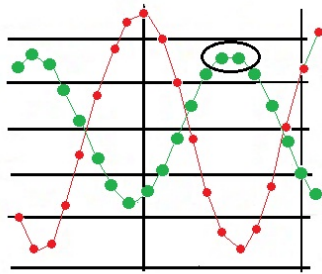
(d)

Gambar 7. Pengaruh pergeseran terhadap $(\Delta\phi/2)$ pada jarak awal: (a) 5,20 cm, (b) 10,10 cm, (c) 15,20 cm, dan (d) 20,10 cm

Hasil pengukuran pada setiap pergeseran 0,05 mm tidak selalu diikuti dengan perubahan $(\Delta\phi/2)$. Gambar 7 menunjukkan perubahan beda fase $(\Delta\phi/2)$ yang bertingkat, sebab resolusi sistem pengukur berbeda dengan resolusi mikrometer. Sehingga kemampuan resolusi sistem pengukur terbatas pada beberapa nilai rentang pergeseran.

Sementara rentang perubahan pergeseran pada tiap-tiap beda fase berbeda. Menurut Gambar 7 (a), lebar rentang pergeseran tiap beda fase memiliki lebar yang hampir sama kecuali pada beda fase $(\Delta\phi/2)$ $7 \cdot 10^{-6}$ detik. Jarak awal 5,20 cm memiliki rentang terlebar 0,6 mm dimulai pada jarak 2,45 mm hingga 3,05 mm. Gambar 7 (b) hingga Gambar 7 (d) juga memiliki rentang pergeseran yang lebih lebar dibandingkan dengan hasil rentang pergeseran dari beda fase $(\Delta\phi/2)$ yang lainnya. Jarak awal 10,10 cm memiliki rentang terlebar 0,45 mm yang dimulai

dari 1,95 mm hingga 2,40 mm. Jarak awal 15,20 cm memiliki rentang terlebar 0,45 mm yang dimulai dari pergeseran 2,05 mm hingga 2,50 mm. Jarak awal 20,20 cm memiliki rentang terlebar 0,45 mm yang dimulai dari 1,90 mm hingga 2,35 mm. Keadaan pelebaran rentang di beda fase $(\Delta\phi/2)$ $7 \cdot 10^{-6}$ detik disebabkan oleh masa transisi puncak R_{xy} . Masa transisi puncak R_{xy} disebabkan oleh puncak amplitudo sinyal transduser yang diwakili oleh dua titik data yang hampir sama.



Gambar 8. Hasil pencuplikan sinyal yang menyebabkan transisi pergeseran indeks

Keteraturan perubahan ($\Delta\phi/2$) terhadap pergeseran juga ditunjukkan pada Gambar 7. Perubahan ($\Delta\phi/2$) terhadap pergeseran pada Gambar 7 (a) dengan jarak awal 5,20 cm masih mengalami keteraturan yang menunjukkan keakuratan penentuan beda fase ($\Delta\phi/2$). Keakuratan ini dikarenakan oleh amplitudo sinyal cukup tinggi, sehingga pengaruh gangguan sistem pengukur, vibrasi objek penghalang serta gangguan sistem yang lain tidak terlalu berpengaruh.

Hasil ($\Delta\phi/2$) yang berjarak awal 10,10 cm memiliki ketidakteraturan ($\Delta\phi/2$) dari awal pergeseran hingga 1,0 mm dan beberapa bagian untuk ($\Delta\phi/2$) yang lain. Gambar 7 (b) membuktikan bahwa amplitudo sinyal pada jarak awal 10,10 cm berubah-ubah di awal pergeseran. Hasil ketidakteraturan ($\Delta\phi/2$) dan amplitudo yang berubah saling berkorelasi. Ketidakteraturan ($\Delta\phi/2$) ini dapat disebabkan ketidakakuratan amplitudo sinyal transduser tersebut. Kedekatan posisi transduser terhadap simpul juga berpengaruh terhadap penurunan amplitudo.

Hasil ($\Delta\phi/2$) yang berjarak awal 15,20 cm lebih teratur daripada hasil ($\Delta\phi/2$) berjarak awal 10,10 cm. Amplitudo sinyal transduser yang diperoleh pada jarak awal 15,20 cm juga lebih tinggi daripada amplitudo pada jarak awal 10,10 cm. Awal pergeseran 0,00 mm hingga 0,25 mm serta beberapa bagian yang lain menunjukkan ketidakteraturan ($\Delta\phi/2$).

Hasil ($\Delta\phi/2$) yang berjarak awal 20,10 cm memiliki ketidakteraturan anak tangga ($\Delta\phi/2$) dari awal pergeseran. Kondisi sistem ini memiliki jarak yang terjauh daripada kondisi yang lain. Gambar 7 (d) menunjukkan bahwa amplitudo yang berjarak awal 20,10 cm memiliki amplitudo terendah daripada kondisi yang lain. Sehingga, jarak tempuh gelombang, amplitudo sinyal, posisi transduser terhadap simpul, serta gangguan sistem yang lain mudah mempengaruhi keakuratan sistem pengukuran.

Kesimpulan

Setelah penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa :

1. Sistem yang dirancang bekerja dengan baik dan bisa digunakan untuk pengukuran pergeseran kecil menggunakan korelasi silang secara realtime.
2. Hasil perhitungan waktu tempuh diperoleh dari indeks R_{xy} maksimal tiap posisi objek terhadap transduser.

Keakuratan pengukuran ditunjukkan dengan nilai $R^2=0,9894$ pada jarak awal 5,20 cm, $R^2=0,9570$ pada jarak awal 10,10 cm, $R^2=0,9685$ pada jarak awal 15,20 cm, dan $R^2=0,94327$ pada jarak awal 20,20 cm.

3. Amplitudo berubah seiring dengan perubahan jarak lintasan gelombangnya. Hal ini sangat berpengaruh terhadap keakuratan pengukuran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anonymous(a). 2009. Getting Started With LabVIEW. National Instruments. New York.
- [2] Bahar, S. 2010. Rancang Bangun Generator Gelombang Ultrasonik Berbasis Mikrokontroler dan Implementasinya Untuk Pengukuran Pergeseran Benda. Fisika. Malang, Universitas Brawijaya.
- [3] Candy, J. V. 1988. Signal Processing The Modern Approach. McGraw-Hill, Inc. United States of America.
- [4] Hammad, A., A. Hafez dan M. T. Elewa. 2007. A LabVIEW Based Experimental Platform for Ultrasonic Range Measurements DSP Journal. 6(2): 1-8.
- [5] Koriyati, E. 2009. Pengukuran Waktu Tunda (Time Delay) pada Dua Sinyal dengan Cross-Correlation Function (CFC). Penelitian Sains. 12(1B 12102): 121021 - 121026.
- [6] Tanudjaja, H. 2007. Pengolahan Sinyal Digital dan Sistem Pemrosesan Sinyal. Andi Offset. Yogyakarta.
- [7] Wade, G. 1994. Signal Coding and Processing. Cambridge University Press. United Kingdom.