

DETEKSI KERETAKAN DINDING BERBASIS PENGOLAHAN SINYAL DIGITAL MENGUNAKAN RADAR FMCW

WALL CRACK DETECTION BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSING USING FMCW RADAR

Regan Fairuz Akbar¹, Raditiana Patmasari, S.T., M.T.², Yussi Perdana S, S.T., M.T.³
^{1,2,3} Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom
¹reganfairuz@gmail.com, ²raditiana@telkomuniversity.ac.id, ³yussips@gmail.com

Abstrak

Keretakan pada dinding bangunan sangat berpengaruh terhadap segi ketahanan dinding bangunan yang dapat menimbulkan masalah bagi pengguna bangunan. Kejadian ini terjadi karena adanya faktor dari lingkungan, kualitas dari material, dan pengaruh struktural. Keretakan pada dinding terjadi akibat ketidakstabilan pada struktur dalam menahan beban yang disebabkan oleh pergerakan tertentu. Dengan menggunakan radar FMCW sebagai pendeteksi keretakan dinding, dilakukan proses klasifikasi kategori keretakan.

Pada penelitian ini, sistem bekerja dengan mengklasifikasikan tingkat kepadatan dinding berdasarkan data yang digunakan dari hasil pendeteksian keretakan pada dinding berbasis pengolahan sinyal digital menggunakan radar FMCW yaitu radar SiversIMA RS3400X 10 GHz. Pengklasifikasian ini dilakukan pada berbagai posisi antara sistem dengan dinding.

Penelitian ini menghasilkan tingkat akurasi sebesar 75% dengan hasil pengujian sistem terhadap klasifikasi tingkat kepadatan data referensi dan data uji. Nilai *magnitude* data didapatkan dengan pendeteksian keretakan pada dinding menggunakan radar FMCW SiversIMA RS3400X dengan posisi tegak lurus, 45 derajat ke kiri, dan 45 derajat ke kanan. Analisa dilakukan dengan proses yang sudah ditentukan yang menghasilkan hasil akhir berupa *Surface Plot* yang berfungsi untuk klasifikasi keretakan pada dinding.

Kata kunci : keretakan, dinding, tingkat kepadatan, FMCW, klasifikasi, *surface plot*.

Abstract

Cracks on building walls greatly affect the durability of building walls which can cause problems for building users. This incident occurred because of factors from the environment, the quality of the material, and structural influences. Cracks on the wall occur due to instability in the structure in holding the load caused by certain movements. By using FMCW radar as a wall crack detector, a crack category classification process is carried out.

In this study, the system works by classifying the wall density based on the data used from the results of crack detection on the wall based on digital signal processing using FMCW radar that is SiversIMA RS3400X 10 GHz radar. This classification is carried out in various positions between the system and the wall.

This research resulted in an accuracy rate of 75% with the results of system testing of the classification of reference data density and test data. Magnitude data values are obtained by detecting cracks in the wall using SiversIMA RS3400X FMCW radar in an upright position, 45 degrees to the left, and 45 degrees to the right. The analysis is carried out with a predetermined process that produces the final result in the form of a *Surface Plot* that functions for the classification of cracks in the wall.

Keywords: cracks, walls, density level, FMCW, classification, *surface plot*.

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan analisis tingkat kerusakan bangunan lebar keretakan, beberapa yang sering terjadi pada kerusakan bangunan berupa keretakan, keruntuhan, patah, puntiran, lengkung, dan lendutan. Tingkat kerusakan pada bangunan dapat ditentukan dengan cara mengukur lebar retak yang terjadi pada elemen yang mengalami retak. Semakin tinggi tingkat kerusakan yang terjadi maka semakin besar lebar keretakan yang terjadi [1].

Tingkat kepadatan pada dinding dapat mengalami keretakan jika tingkat kepadatannya menurun.. Seperti pada kondisi osteoporosis, ketika tulang menjadi keropos dan rentan patah, karena kualitas kepadatan tulang menurun. Umumnya osteoporosis diketahui setelah baru ditemukan adanya keretakan pada tulang [2].

Penelitian terhadap dinding telah dilakukan sebelumnya, salah satunya adalah dengan menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR). GPR adalah metode *Non-Destructive Evaluation* (NDE) yang menggunakan gelombang elektromagnetik untuk mempelajari komposisi material. Peralatan GPR mentransmisikan pulsa dari gelombang radio melalui struktur material. Setelah itu, respon material diukur dengan sinyal yang mengandung pantulan yang dihasilkan oleh mikrostruktur butiran materi ditambah gema yang disebabkan oleh ketidakhomogenan di dalam material. Tujuan utama pemrosesan sinyal GPR terdiri dari karakteristik media propagasi dan kemudian mengalihkannya dari sinyal yang diukur untuk mendeteksi ketidakhomogenan material[3].

Seperti pada penelitian sebelumnya oleh Gonzalo Safont yang berjudul "*Intelligent System For Non-Destructives Evaluation of Historic using Ground-Penetrating Radar*" yang menganalisis dua dinding pasangan bata, yang satu homogen dalam struktur dan yang lainnya dengan banyak ketidaksempurnaan yang dibor di dalamnya dengan menggunakan alat 1.6 GHz antenna model 5100, dengan *encoder*[3]. Pada penelitian deteksi keretakan dinding sebelumnya oleh Dongna Hu, Tian Tian, Hengxiang Yang, Shibo Xu, and Xiujin Wang yang berjudul "*Wall Crack Detection Based on Image Processing*" yang merekam kondisi permukaan dinding secara akurat dan kemudian mendapatkan karakteristik linier dari gambar untuk mengetahui keretakan[4]. Pada Tugas Akhir ini, peneliti akan melakukan penelitian mengenai pengolahan sinyal radar FMCW dengan radar SiversIMA RS3400X sebagai pendeteksi keretakan pada dinding berbasis radar dengan data primer berupa *array of floating point numbers*. Proses tampilan dari sistem yang di rancang dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) sebagai *sampling* dan digitalisasi dari analog ke digital.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Batu Bata Merah

Batu bata merah adalah bahan dasar yang dipergunakan sebagai pembuatan konstruksi bangunan yang merupakan suatu unsur bangunan yang terbuat dari tanah dengan campuran atau tanpa campuran bahan-bahan lain dan dibuat dengan cara dibakar cukup tinggi, hingga tidak dapat hancur kemudian jika direndam dalam air (NI-10, 1978)[5].

2.2 Batako

Batako adalah campuran yang terbuat antara semen *Portland* atau semen hidrolis, air dengan bahan atau tanpa tambahan, agregat kasar, dan agregat halus membentuk masa padat. Batako terdiri dari agregat, pasta, dan admixture. Perlu ditentukan jumlah agregat dan pasta yang sesuai dengan mutu tertentu dalam membuat suatu batako. Pasta adalah campuran air dan semen yang digunakan dalam batako untuk merekatkan agregat-agregat[6].

2.3 Radar

Radar (*Radio Detection and Ranging*) dipergunakan untuk mendeteksi, mengukur suatu objek, serta mengukur jarak yang merupakan suatu blok sistem. Radar secara umum bekerja ke arah tertentu dengan cara memancarkan gelombang elektromagnetik, lalu objek yang ada pada lintasannya memantulkan gelombang tersebut. Dari pantulan tersebut sinyal yang diterima relatif lemah karena adanya redaman, namun tetap dapat diterima dan diperkuat sinyal tersebut oleh amplifier yang terdapat pada radar[9].

2.4 Radar FMCW

Radar *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCW) dalam hal sinyal elektromagnetik diteruskan ke transmisi, berbeda dari radar pulsa. Frekuensi sinyal pada radar FMCW seiring waktu berubah, pada umumnya dalam menyapu semua bandwidth yang ditetapkan. Frekuensi yang ditransmisikan dan sinyal yang diterima perbedaannya adalah dengan menentukan dua sinyal yang dicampur, menghasilkan sinyal baru yang digunakan untuk mengukur jarak atau kecepatan. radar FMCW memancarkan sinyal *Radio Frequency* yang umumnya disapu secara *linear* dalam frekuensi[11].

2.5 Keluaran Data

Data yang digunakan adalah *Array of Floating Point Numbers*. *Floating point* ini adalah tipe data yang dihasilkan oleh radar SiversIMA RS3400X yang merupakan tipe data yang mewakili bilangan riil. *Floating numbers* ini memiliki jangkauan yang lebih besar melebihi data integer, dikarenakan data integer memiliki batas. *Floating point* berupa angka desimal agar mencakup data yang didapat presisi.

2.6 Fast Fourier Transform (FFT)

Fast Fourier Transform (FFT) menjadi salah satu metode pengolahan sinyal yang dilakukan penulis pada penelitian ini. Proses FFT dilakukan terhadap sinyal *output Analog to Digital Converter* (ADC) sebelumnya terdapat dua aspek yaitu *sampling interval* dan *sampling rate criterion*[14][15].

2.7 Discrete Fourier Transform (DFT)

DFT pada pengolahan sinyal digital dapat digunakan dari domain waktu ke domain frekuensi untuk mentransformasikan sinyal. Waktu yang diperlukan untuk mencapai gelombang penuh pada sebuah gelombang merupakan domain waktu diskrit, sedangkan banyaknya gelombang yang terjadi dalam waktu 1 detik merupakan domain frekuensi. Pada domain frekuensi, satuan detik diubah menjadi Hertz (1-per detik). Berikut adalah persamaan yang dimiliki *Discrete Fourier Transform* (DFT)[16] :

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{kn} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.4) digunakan dengan menggunakan notasi :

$$W_N = e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (2.10)$$

sehingga menjadi :

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j(2\pi kn)/N} \quad (2.11)$$

dengan komposisi :

- X = koefisien pada domain frekuensi
- k = indeks dalam domain frekuensi
- x = koefisien pada domain waktu
- n = indeks dalam domain waktu
- N = banyak data yang ditransformasi
- W = koefisien pada matriks DFT.

Pada Matlab atau aplikasi analisis matematis, persamaan (2.11) diubah karena indeks yang diproses tidak dapat kurang dari nol atau bernilai sama dengan, menjadi[12] :

$$X_k = \sum_{n=1}^N x[n]e^{-j(2\pi(k-1)(n-1))/N} \quad (2.12)$$

3. Desain Sistem

3.1 Desain Sistem

Pada penelitian ini perancangan sistem dilakukan sesuai dengan flowchart dibawah ini :



Gambar 3.1 Flowchart Desain Sistem

Dari *Flowchart* tersebut, dilakukan proses pengumpulan data awal sampai dengan proses yang dilakukan oleh pengolahan pada aplikasi analisis matematis yaitu aplikasi Matlab. Data yang digunakan merupakan data primer yang berupa *raw data* yang didapat dari proses penelitian yang berupa *Array of Floating Point Numbers*. Pada tahap *pre-processing raw data*, data diproses untuk mempersiapkan data mentah sebelum akan dilakukan proses pada FFT. Pada penelitian ini, proses FFT berperan untuk merubah domain waktu menjadi domain frekuensi dilanjutkan dengan membuat *Surface Plot* sebagai visualisasi dari klasifikasi.

Untuk itu, pada tahap pengumpulan data awal digunakan aplikasi Matlab untuk melakukan komunikasi serial ke perangkat SiversIMA RS3400X. Pada aplikasi ini dilakukan konfigurasi sesuai dengan konfigurasi perangkat SiversIMA RS3400X. Kemudian menghubungkan konektor *SubMiniature version A (SMA)* perangkat SiversIMA RS3400X dengan sebuah antena *Horn*, dan menghubungkan perangkat SiversIMA RS3400X dengan sebuah PC/Laptop melalui kabel USB serial.

3.2 Performasi Sistem

Parameter dalam pengujian ini dilakukan dengan mengklasifikasikan kelas pada ukuran data sample yang digunakan untuk menghasilkan keluaran yang tepat. Keluaran sistem dikatakan tepat jika sistem mampu mendeteksi tingkat kepadatan dinding bangunan pada tingkat kepadatan yang telah diklasifikasikan sesuai data referensi yang digunakan.

$$\text{Tingkat Akurasi} = \frac{\text{Banyak Data Benar}}{\text{Banyak Total Data}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Hasil dari pengujian sistem merupakan besar tingkat akurasi pada setiap tingkat kepadatan dengan persamaan (3.1). Hasil dari tingkat akurasi didapat dari hasil data referensi yang menjadi acuan untuk data uji.

4. Hasil dan Analisis Sistem

4.1 Cara Kerja Sistem

4.1.1 Proses Pengambilan Raw Data

Pengambilan data diawali dengan proses menghubungkan perangkat radar FMCW SiversIMA RS3400X dengan komputer secara serial dengan menggunakan kabel *USB to serial RS232*. Berikut adalah konfigurasinya :

- *Bits per second* : 115200
- *Data bits* : 8
- *Parity* : None
- *Stop bits* : 1
- *Flow control* : None

Selanjutnya dilakukan beberapa tahapan setelah perangkat radar FMCW SiversIMA RS3400X dan komputer terhubung : pengaturan parameter pengukuran, inialisasi perangkat, pengunduhan data, dan pemicuan radar sensor.

1. Pengaturan Parameter Pengukuran

Sistem pada pengujian ini menggunakan tipe modulasi dan frekuensi pengukuran. Berikut komposisinya :

- *Frequency Range*: 9250 – 10750 MHz
- *Sweep Number* : 1
- *Sweep Type* : Sawtooth
- *Frequency Span* : 1500 MHz
- *Frequency Start* : 9250 MHz
- *Frequency Center*: 10000 MHz
- *Frequency Stop* : 10750 MHz

Pada sistem ini frekuensi awal 9250 MHz hingga frekuensi 10750 MHz dipancarkan gelombang dengan radar sensor. Rentang pada frekuensi tersebut merupakan rentang terbesar pada frekuensi yang dapat digunakan pada radar RS3400X. Tipe modulasi *sawtooth* digunakan dengan tujuan dilakukannya pancaran dengan frekuensi meningkat dari frekuensi awal sampai akhir sebelum frekuensi kembali ke awal pada akhirnya.

2. Inialisasi Perangkat

Inialisasi perangkat bertujuan untuk mendeklarasikan nilai awal pada *controller board*. Pada perangkat radar FMCW SiversIMA RS3400X, inialisasi perangkat mengirimkan sintaks 'INIT' dilanjutkan dengan 'HARDWARE:SYSTEM RS3400X' yang bertujuan menginisialisasi *controller* bahwa sensor radar yang dilakukan pada pengujian adalah RS3400X. Setelah itu, sintaks 'SWEEP:MEASURE ON' diperlukan dengan tujuan mengaktifkan parameter pemancaran gelombang.

3. Pengunduhan Raw Data dan Pemicuan Radar Sensor

Setelah dilakukan pengaturan parameter pengukuran dan penginisialisasi perangkat, dilakukan pemicuan pada radar sensor yang dilakukan pada pengujian dengan mengirimkan sintaks 'TRIG: ARM' dan selanjutnya *raw data* dapat diunduh dengan cara mengirimkan sintaks 'TRACE:DATA ?'.

4.1.2 Pengolahan Sinyal Digital pada Raw Data

Pengolahan sinyal digital dilakukan setelah proses pengambilan data, selanjutnya pengolahan digital pada *raw data* dengan tujuan mendapatkan besar nilai amplitude domain frekuensi. Proses *Fast Fourier Transform* (FFT) digunakan transformasi fourier diskrit pada vektor, disebabkan karena sinyal digital adalah sinyal yang diproses. Proses FFT ini untuk mengubah sinyal diskrit keluaran SiversIMA menjadi domain frekuensi pada domain waktu.

4.1.3 Pencarian Nilai Threshold Tingkat Kepadatan

Sistem pada nilai *Threshold* tiap tingkat keretakan dicari menggunakan 10 sample dinding dengan komposisi : 4 dinding sample buatan, 1 dinding bangunan baru (padat), 1 dinding bangunan lama (sudah retak), 2 dinding bangunan bata merah acak, dan 2 dinding bangunan bata putih acak. Pengukuran pertama dilakukan pada 4 dinding sample buatan dengan komposisi : 2 dinding dengan bata merah posisi horizontal dan 2 dinding dengan bata merah posisi vertikal. Masing- masing dinding horizontal ataupun vertikal mempunyai dinding dengan komposisi : 1 dinding padat atau tidak retak dan 1 dinding lainnya diletakkan dalamnya. Masing-masing dilakukan kondisi pengukuran pada jarak : 1 meter posisi lurus berhadapan, 1 meter posisi 45 derajat ke kiri, dan 1 meter posisi 45 derajat ke kanan. Ukuran setiap masing-masing dinding buatan yaitu 60 cm x 11 cm x 50 cm untuk horizontal dan 60 cm x 8 cm x 50 cm untuk vertikal, maka volume pada dinding horizontal lebih besar dibandingkan vertikal.

Data referensi yang digunakan pada pengujian ini dengan komposisi : 2 dinding Horizontal sample buatan, 1 dinding bangunan baru (padat), dan 1 dinding bangunan lama (sudah retak). Data referensi yang

digunakan diklasifikasi pada 4 jenis : dinding bangunan baru (Padat 1), dinding Horizontal sample buatan padat (Padat 2), dinding Horizontal sample buatan retak dalam (Retak 1), dan dinding bangunan lama (Retak 2).

Tabel 4.1 Nilai Threshold pada Data Referensi

Tingkat Kepadatan	Magnitude (dBm)			Σ
	Posisi			
	1 m tegak lurus	1 m 45 derajat ke kiri	1 m 45 derajat ke kanan	
Padat 1	-0,271	-7,291	-10,45	-6,004
Padat 2	-0,317	-10,38	-9,178	-6,625
Retak 1	-0,598	-10,82	-9,738	-7,052
Retak 2	-3,021	-11,49	-11,68	-8,730

A. Level *threshold* tanpa memperhitungkan posisi

Pada level *threshold* ini, nilai tengah dari rata-rata *magnitude* total setiap tingkat kepadatan didapatkan. Nilai *threshold* ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.2 Level threshold tanpa memperhitungkan posisi

Tingkat Kepadatan	Level <i>threshold magnitude</i> (dBm)
Padat 1 – Padat 2	-6,314
Padat 2 – Retak 1	-6,838
Retak 1 – Retak 2	-7,891

B. Level *threshold* dengan memperhitungkan posisi

Pada level *threshold* ini, nilai tengah dari rata-rata *magnitude* total setiap tingkat kepadatan posisi didapatkan. Nilai *threshold* ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 4.3 Level threshold memperhitungkan posisi

Posisi	Tingkat Kepadatan	Level <i>threshold magnitude</i> (dBm)
1 m	Padat 1 – Padat 2	-0,294
	Padat 2 – Retak 1	-0,457
	Retak 1 – Retak 2	-1,809
1 m 45 derajat ke kiri	Padat 1 – Padat 2	-8,835
	Padat 2 – Retak 1	-10,6
	Retak 1 – Retak 2	-11,155
1 m 45 derajat ke kanan	Padat 2 – Retak 1	-9,458
	Retak 1 – Padat 1	-10,094
	Padat 1 – Retak 2	-11,065

4.2 Pengujian Sistem

Pada proses pengujian sistem ini nilai *magnitude* pada dinding data referensi dibuat sebagai acuan berdasarkan level *threshold* yang telah didapatkan. Klasifikasi dikatakan akurat apabila tingkat kepadatan data uji didapatkan nilai *magnitude*-nya berdasarkan data referensi yang telah diklasifikasikan. Klasifikasi terdiri dari 2 jenis yaitu Padat dan Retak. Padat adalah klasifikasi dari Padat 1 atau Padat 2 dan Retak adalah klasifikasi dari Retak 1 atau Retak 2. Berikut adalah hasil pengujian sistem dengan rumus akurasi pada persamaan (3.1):

A. Pengujian dengan level *threshold* tanpa memperhitungkan posisi**Tabel 4.4** Tingkat akurasi pengujian sistem tanpa memperhitungkan posisi

Data Uji	Data yang masuk dilihat dari rentang nilai Data Referensi	Tingkat Akurasi
	Σ Magnitude (dBm)	
Dinding		
BM1	Retak 2	50%
BM2	-	
BP1	Padat 1	
BP2	-	
Total	2 dari 4	

Berdasarkan **Tabel 4.5** dapat diketahui dengan nilai *magnitude* Data Uji yang masuk dilihat dari rentang nilai *magnitude* Data Referensi, sistem yang paling baik bekerja pada posisi jarak 1 m Tegak Lurus dan sistem memiliki tingkat akurasi sebesar 50%.

B. Pengujian dengan level *threshold* dengan memperhitungkan posisi**Tabel 4.5** Tingkat akurasi pengujian sistem dengan memperhatikan posisi

Dinding Uji	Tingkat Akurasi (%)			Total
	1 m Tegak Lurus	1 m 45 derajat		
		ke kiri	ke kanan	
BM1	-	Padat 1	-	
BM2	Padat 2	-	Padat 2	
BP1	Retak 1	Padat 2	-	
BP2	Retak 2	Padat 1	-	
Total	75%	75%	25%	58,33%
Total Posisi 45 derajat		50%		

Berdasarkan **Tabel 4.6**, dapat diketahui dengan memperhatikan posisi, setiap sistem memiliki tingkat akurasi pada posisi 1 m Tegak Lurus senilai 75% dan posisi 1 m 45 derajat senilai 50% dengan total rata-rata 58,33%. Sistem paling baik bekerja pada posisi 1 m Tegak Lurus yaitu senilai 75%.

4.3 Analisa Hasil Pengukuran

Pada penelitian ini, analisa dari pengujian pada nilai *magnitude* dinding yang dikelompokkan dari berbagai perhitungan berdasarkan : tingkat kepadatan dinding dan posisi antara radar dan dinding pada setiap tingkat kepadatan dinding.

4.3.1 Pengaruh Tingkat Kepadatan dan Posisi Terhadap Tingkat Refleksi

Analisa pengujian pengaruh ini dilakukan berdasarkan grafik nilai *magnitude* dinding setiap tingkat kepadatan pada jarak 1 m dengan posisi tegak lurus, 45 derajat ke kiri, dan 45 derajat ke kanan

5. Kesimpulan

Kesimpulan pengujian yang dihasilkan dari deteksi keretakan dinding berbasis pengolahan sinyal digital ini adalah :

1. Deteksi keretakan dinding berbasis pengolahan sinyal digital menggunakan radar FMCW SiversIMA RS3400X mampu mendeteksi tingkat kepadatan untuk mengetahui keretakan pada dinding dengan tingkat akurasi maksimal 75%.

2. Lebar pada dinding dapat berpengaruh pada tingkat refleksi secara signifikan dan semakin lebar dinding, maka dinding akan berpotensi lebih besar refleksinya pada tingkat kepadatan.
3. Posisi pada pengukuran dapat mempengaruhi refleksi gelombang sinyal radar yang dipantulkan untuk diterima kembali. Posisi yang paling baik adalah posisi tegak lurus.

Daftar Pustaka :

- [1] W. Nuswantoro, "ANALISIS JENIS KERUSAKAN PADA BANGUNAN PERUMAHAN," vol. 11, pp. 1–14, 2010.
- [2] W. A. K. P. Saryono, Warsinah, Atikah Proverawati, "DETEKSI KALSIMUM MELALUI PEMERIKSAAN KEPADATAN TULANG PADA LANSIA DI DESA LINGGASARI, SEBAGAI UPAYA ALIH TEKNOLOGI DAN PENINGKATAN PENGETAHUAN KADER KESEHATAN MENUJU DESA MANDIRI KESEHATAN," no. November, pp. 641–647, 2017.
- [3] G. Safont, A. Salazar, J. Gosalbez, and L. Vergara, "Intelligent System for Non-Destructive Evaluation of Historic Walls using Ground-Penetrating Radar," *2010 IEEE 9th Int. Conf. Cybern. Intell. Syst. CIS 2010*, pp. 6–11, 2010.
- [4] D. Hu, T. Tian, H. Yang, S. Xu, and X. Wang, "Wall Crack Detection Based on Image Processing," *ICICIP 2012 - 2012 3rd Int. Conf. Intell. Control Inf. Process.*, pp. 597–600, 2012.
- [5] S. Handayani, "Kualitas Batu Bata Merah," *Kualitas Batu Bata Merah*, vol. 12, no. Handayani Sri, pp. 41–50, 2010.
- [6] H. Kusna, "Analisis Kandungan Kimia Dan Pemanfaatan Sludge Industri Kertas Sebagai Bahan Pembuatan Batako," Universitas Negeri Semarang, 2013.
- [7] Lestari, "Analisis Kerusakan Dinding Sampai Berdasarkan Tinjauan Struktural," Universitas Tanjungpura, 2013.
- [8] P. R. Muduli and U. C. Pati, "A Novel Technique for Wall Crack Detection Using Image Fusion," *2013 Int. Conf. Comput. Commun. Informatics, ICCCI 2013*, pp. 4–9, 2013.
- [9] M. Purba, "PERANCANGAN DAN REALISASI PATCH ARRAY ANTENA RADAR FMCW PADA FREKUENSI 9.4GHZ DENGAN CATUAN PROBE COAXIAL," vol. 2, no. 3, pp. 10–17, 2015.
- [10] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems, 2nd Edition*. Singapore, 1981.
- [11] SiversIMA, "FMCW Radar Sensors - Application Notes," p. 42, 2011.
- [12] I. Octarina Nur Samijayani, Suci Rahmatia, Vita Nur Septiyani, "Perancangan Software Defined Radar Untuk Radar Pulsa dan Radar FMCW," vol. 3, no. 3, pp. 144–149, 2016.
- [13] SiversIMA, "10 GHz Radar Sensor," pp. 8–11, 2011.
- [14] M. Ansori, S. Hadi, and M. A. Muslim, "Desain , Simulasi dan Analisis Peningkatan," vol. 9, no. 2, pp. 150–156, 2015.
- [15] K. Peek, "An Analysis of the Effects of Digital Phase Errors on the Performance of a FMCW-Doppler Radar," The University of Twente, 2011.
- [16] F. W. Isen, *DSP for MATLAB™ and LabVIEW™ II: Discrete Frequency Transforms*, vol. 2, no. 1. 2009.