

DETEKSI KOROSI PADA MATERIAL LOGAM BERBASIS PENGOLAHAN SINYAL DIGITAL MENGGUNAKAN RADAR FMCW

CORROSION DETECTION ON METAL MATERIALS BASED ON DIGITAL SIGNAL PROCESSING USING FMCW RADAR

Wiyana Yusuf¹, Raditiana Patmasari², Yussi Perdana Saputera³

^{1,2,3}Prodi S1 Teknik Telekomunikasi, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, Bandung

¹wiyana.yusuf@gmail.com, ²raditiana@telkomuniversity.ac.id, ³yussips@gmail.com

Abstrak

Pada era teknologi ini, manusia tidak bisa dipisahkan dari teknologi. Radar merupakan salah satu perangkat yang banyak digunakan di dunia militer serta penerbangan. Radar sendiri berfungsi untuk objek – objek yang ada di sekitar radar. Pada penelitian ini digunakan data primer hasil dari pengukuran di lapangan kemudian diproses menggunakan *Fast-Fourier Transform* serta visualisasi data dengan menggunakan teknik *surface plotting*. Hasil dari penelitian ini merupakan hasil dari pengujian objek-objek *random* untuk diketahui tingkat korosinya. Tingkat akurasi yang dihasilkan pada penelitian ini sebesar 33,3% dalam pendeteksian tingkat korosi dari objek-objek yang diuji cobakan. Tingkat korosi dapat mempengaruhi nilai *magnitude* objek-objek yang diujikan. Jarak pengukuran mempengaruhi nilai *magnitude* yang ditandai adanya perubahan nilai *magnitude* saat percobaan objek yang sama dengan jarak yang berbeda.

Kata Kunci: FMCW, Radar, FFT, Heatmap, korosi, deteksi korosi

Abstract

In this technological era, humans cannot be separated from technology. Radar is a device that is widely used in the military and aviation. The radar itself functions for objects around the radar. In this study, the primary data used from the measurements in the field are then processed using *Fast-Fourier Transform* and data visualization using *surface plotting* techniques. The results of this study are the results of testing *random* objects to determine the level of corrosion. The level of accuracy generated in this study was 33,3% in detecting the level of corrosion of the objects tested. The level of corrosion can affect the magnitude of the objects being tested. Measurement distance affects the magnitude value marked by changes in the magnitude value when experimenting with the same object with different distances.

Keyword : FMCW, Radar, FFT, Heatmap, corrosion, corrosion detection

1. Pendahuluan

Korosi

Korosi dapat disebabkan logam yang bereaksi dengan udara serta air di sekitar logam tersebut, serta proses korosi akan lebih cepat jika terdapat zat garam yang bereaksi juga dengan udara dan air [1].

Korosi pada tembaga dapat terjadi walaupun sifat tembaga itu sendiri tahan terhadap korosi, korosi pada tembaga dapat diakibatkan oleh hujan asam. Jika ion dari logam tembaga bereaksi dengan ion sulfat (zat dari hujan asam) maka akan menghasilkan tembaga sulfat yang berupa endapan berwarna biru hijau [2].

Tembaga

Tembaga digunakan karena mudah direntangkan, dibentuk, tahan terhadap korosi dan menjadi konduktor yang sangat baik serta efisien. Korosi pada tembaga dapat terjadi walaupun sifat tembaga itu sendiri tahan terhadap korosi, korosi pada tembaga dapat diakibatkan oleh hujan asam. Jika ion dari logam tembaga bereaksi dengan ion sulfat (zat dari hujan asam) maka akan menghasilkan tembaga sulfat yang berupa endapan berwarna biru hijau [3].

Besi

Besi merupakan logam yang banyak dipakai di dunia ini. Besi memiliki simbol kimia Fe dan nomor atom 26. Logam ini merupakan bahan dasar pembuatan baja dan penyebarannya di dunia sangat tinggi. Manusia mulai mengolah besi sejak tahun 2000 sebelum masehi. Dikarenakan besi memiliki sifat yang keras dan digunakan untuk peralatan serta senjata. Tetapi besi memiliki ketahanan terhadap korosi yang rendah dikarenakan atom dari besi sangat mudah bereaksi dengan oksigen dan air. Sehingga, besi membutuhkan campuran logam lainnya agar tahan dengan korosi[4].

Seng

Seng ditemukan pada zaman dahulu. Gelang seng ditemukan pada reruntuhan Cameros pada tahun 500 sebelum masehi. Logam ini sangat rapuh pada suhu ruangan. Seng memiliki titik didih 907 derajat Celsius. Logam ini adalah konduktor yang cukup baik dan juga banyak diaplikasikan pada kehidupan. Produksi logam ini mulai dilakukan secara komersial pada tahun 1734 di Bristol, Inggris [5].

Radar

Radar merupakan singkatan dari *Radio Detection and Ranging* adalah sistem elektromagnetik untuk mendeteksi dan mengalokasikan target objek seperti kapal , pesawat udara, kendaraan, pesawat ruang angkasa dan lingkungan alam yang dapat memantulkan sinyal yang dipancarkan. Gelombang radio elektromagnetik digunakan pada radar untuk ditentukannya jarak , sudut, atau kecepatan dari suatu objek [6].

Jarak antara antena dengan objek dapat diketahui dengan menggunakan persamaan [6]:

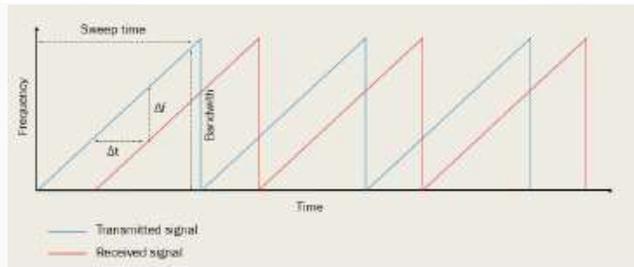
$$R = \frac{cT_R}{2} \tag{1}$$

Keterangan:

c = kecepatan cahaya

T_R = waktu yang dibutuhkan oleh gelombang untuk mencapai target hingga gelombang tersebut kembali ke radar.

Frequency Modulated Continous Wave merupakan jenis radar yang berbeda dari *pulsed radar* dimana sinyal elektromagnetik yang terus menerus ditransmisikan. Frekuensi sinyal yang dihasilkan berubah seiring waktu. Perbedaan frekuensi sinyal yang ditransmisikan dengan sinyal yang diterima ditentukan dengan mencampurkan dua buah sinyal, sehingga dihasilkan sinyal baru dimana dapat diukur untuk menentukan jarak maupun kecepatan objek. Fungsi yang digunakan pada FMCW radar ini adalah fungsi *sawtooth*. *Sawtooth* ini merupakan fungsi yang sederhana, sering digunakan untuk perubahan pola frekuensi [7].

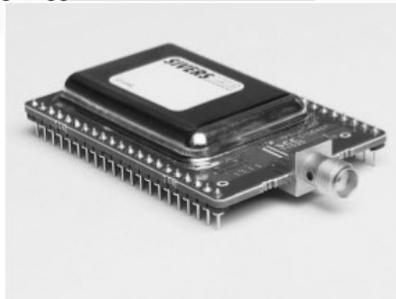


Gambar 1 Modulasi pada FMCW Radar.

Gambar 1 menunjukkan proses modulasi pada radar FMCW dimana gelombang yang direfleksikan kembali ditumpangi oleh gelombang gerigi (*sawtooth*). Perbedaan frekuensi antara gelombang yang diterima dan yang dipancarkan adalah [7]:

$$\Delta f = \frac{bandwidth}{sweep\ time} - \Delta t \tag{2}$$

Radar yang digunakan pada penelitian ini merupakan radar yang dipasarkan oleh SiversIMA. Seri yang digunakan adalah SiversIMA RS3400X, dengan frekuensi kerja pada 10 Ghz (X-Band) dan juga antena horn karena antena horn memiliki gain yang tinggi.



Gambar 2 Radar Sensor SiversIMA RS3400X (X-Band).

SiversIMA RS3400X bekerja seperti cara kerja radar lainnya yaitu dengan menembakkan gelombang elektromagnetik dari antena yang dipasangkan pada radar lalu data yang diterima merupakan sinyal pantul dari semua objek yang ada pada radius tertentu di depan antena. SiversIMA RS3400X merupakan jenis radar yang bekerja dengan cara FMCW dimana sinyal elektromagnetik akan terus menerus ditransmisikan hingga memungkinkannya pendeteksian objek secara *realtime*.

Output Data

Data yang digunakan untuk penelitian ini merupakan data primer yang didapatkan dari hasil pengukuran / pengoperasian perangkat yang digunakan. Tipe data yang akan diolah berbentuk *array of floating point numbers* [7]. Tipe data *floating point* memiliki jangkauan yang sangat luas dibandingkan tipe data seperti *integer*. *Floating point* mewakili bilangan real yang mendukung berbagai nilai sehingga data yang dihasilkan presisi.

Fast Fourier Transform (FFT)

Fast-Fourier Transform merupakan salah satu metode pada pengolahan sinyal digital penelitian ini. Penggunaan FFT ini bertujuan untuk mengubah domain data dari domain waktu menjadi domain frekuensi. Digunakannya metode ini dikarenakan agar data saat diproses dengan aplikasi yang digunakan dapat menampilkan tampilan waktu (*range*) serta *doppler* (kecepatan) dari objek yang dideteksi. Proses pertama FFT dilakukan selama *pulse repetition period*, untuk mendapatkan jarak objek. Proses FFT kedua dilakukan melalui beberapa pulsa dari data yang didapatkan agar dapat menampilkan kecepatan dari objek (*Doppler*) [8][9]. Persamaan dasar dari transformasi fourier yaitu:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} X(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

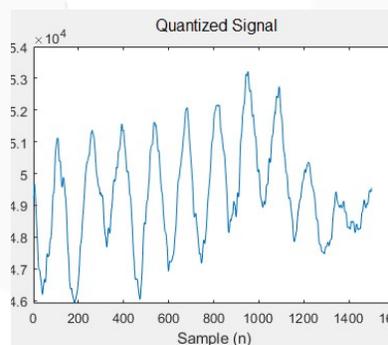
2. Pemrosesan dan Pengolahan Data

Proses pengumpulan data dilakukan di lapangan dengan mengoperasikan SiversIMA RS3400X dan diarahkan pada objek. Setelah proses pengunduhan data, data kemudian diproses dengan aplikasi matlab 2018a dengan tahap :

Fast-Fourier Transform

Proses ini bertujuan untuk memproses *raw data* dari radar dikarenakan sinyal yang akan diproses merupakan jenis sinyal digital. FFT akan mengubah domain data dari domain waktu menjadi domain frekuensi, agar bentuk data dapat diolah kembali.

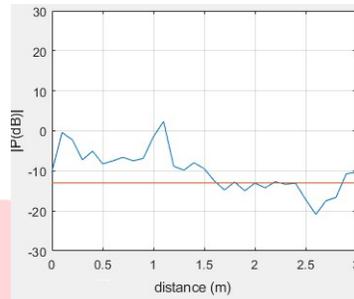
Proses pertama merupakan *plotting raw data* yang menghasilkan grafik nilai amplitude yang belum dapat dibaca secara jelas. Maka, dibutuhkan proses pengolahan kembali agar grafik tersebut dapat menjadi grafik *magnitude* objek dan jarak agar dapat diketahui letak objek yang diujikan dimana sumbu tegak (sumbu y) merupakan nilai kuantisasi dari data serta sumbu datar (sumbu x) merepresentasikan nilai dari sample berdasarkan *bandwidth* alat yang besarnya 1500 Mhz.



Gambar 3 Grafik *raw data*.

Proses kedua dari Gambar 3 merupakan pengolahan kembali data yang sudah terkuantisasi dari perangkat. Proses ini melibatkan *Discrete Fourier Transform* (DFT) dan menggunakan algoritma *Fast-Fourier Transform* (FFT). Hasil akhir dari proses ini merupakan grafik nilai *magnitude* dalam satuan μW .

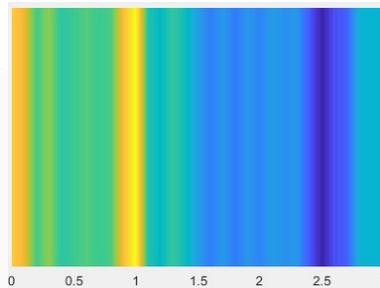
Pada Gambar 4, objek terlihat di jarak sekitar 1 meter, dan pada grafik dengan satuan desibel ini, nilai nilai magnitude dari objek-objek yang ada disekitar objek yang diujikanpun ikut terlihat. Objek terlihat pada jarak sekitar 1 meter dengan nilai magnitude sekitar 1700 μW dimana sumbu y merupakan besarnya sinyal yang diterima dalam satuan μW dan sumbu x adalah *frequency bin* (jarak). Selanjutnya, dilakukan proses pengkonversian satuan dari μW menjadi desibel agar data lebih jelas.



Gambar 4 Grafik nilai *magnitude* setelah proses FFT dalam satuan desibel.

Plotting Data dengan Surface Plot

Pada proses ini data yang telah diolah dengan FFT diplot dengan menggunakan teknik *surface plot* agar nilai data dapat tervisualisasi menjadi warna dan bertujuan untuk mempermudah saat perhitungan nilai dari data uji. Setelah nilai data diplot dengan *surface plot*, *colorbar* akan dibuat untuk menyimpan nilai *threshold* agar dapat melihat data yang diujikan termasuk karat atau tidak.



Gambar 5 Plotting data dengan menggunakan *surface plot*.

Pada Gambar 5, terlihat bahwa objek ditunjukkan dengan warna kuning, semakin kuning warna maka objek yang diujikan semakin reflektif dan semakin biru maka nilai magnitude semakin kecil dan tidak reflektif.

3. Pengujian Sistem

Pada proses ini, sistem akan melakukan pengukuran terhadap kedua jenis data (data referensi dan data uji), pengolahan sinyal digital pada *raw data*, dan proses klasifikasi pada data uji. Output dikatakan baik apabila data yang diujikan dapat terdeteksi tingkat korosinya berdasarkan nilai magnitude dari objek yang diujikan.

$$\text{Tingkat Akurasi} = \frac{\text{Data Benar}}{\text{Tot Data}} \times 100\% \tag{5}$$

Proses Pengukuran Data Referensi

Data referensi terdiri dari 3 jenis objek yang berbeda (Besi, Seng, Tembaga), serta kondisi tingkat korosi yang berbeda (Korosi dan tidak korosi). Jarak yang digunakan pada pengukuran adalah 80cm, 90cm, dan 100cm. Pengukuran pada objek dilakukan 3 kali setiap jarak untuk menghindari data error.

Tabel 1 Nilai *magnitude* setiap objek pada berbagai jarak.

| Tingkat Korosi | Nilai Magnitude (dBm) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | Besi | | | Seng | | | Tembaga | | |
| | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm |
| Non-Korosi | 3.895 | 2.3 | 1.895 | 2.616 | 2.099 | 0.151 | 3.632 | 3.411 | 2.535 |
| | 3.861 | 2.289 | 1.896 | 2.753 | 2.139 | 0.19 | 3.626 | 3.405 | 2.506 |
| | 3.849 | 2.299 | 1.893 | 2.698 | 2.137 | 0.167 | 3.648 | 3.405 | 2.522 |
| Korosi | 1.323 | -2.563 | -4.443 | -2.847 | -3.366 | -3.44 | 1.706 | -2.15 | -2.227 |
| | 1.344 | -2.512 | -4.51 | -2.815 | -3.393 | -3.444 | 1.712 | -2.165 | -2.207 |
| | 1.333 | -2.53 | -4.603 | -2.776 | -3.375 | -3.513 | 1.705 | -2.196 | -2.213 |

Tabel 1 menunjukkan nilai *magnitude* dari masing-masing objek data referensi pada beberapa jarak. Berdasarkan tabel tersebut, nilai *magnitude* objek yang terkorosi memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan objek yang tidak terkorosi. Setelah itu, dilakukan proses perata-rataan nilai *magnitude* daripada Tabel 1.

Tabel 2 Nilai rata-rata *magnitude* data referensi.

| Tingkat Korosi | Tabel Rata - Rata Magnitude (dBm) | | | | | | | | |
|----------------|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | Besi | | | Seng | | | Tembaga | | |
| | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm |
| Bagus | 3.868 | 2.296 | 1.895 | 2.689 | 2.138 | 1.379 | 3.635 | 3.407 | 2.521 |
| Karat | 1.333 | -2.535 | -4.519 | -2.813 | -3.378 | -3.466 | 1.708 | -2.170 | -2.216 |

Pada Tabel 2 dilakukan proses perata-rataan nilai *magnitude* yang ada pada Tabel 1. Dikarenakan setiap jarak objek memiliki 3 buah data dan hasilnya yang tidak jauh berbeda. Nilai rata-rata ini selanjutnya akan dicari nilai *threshold*nya untuk pengukuran data uji.

Setelah dilakukan proses pengukuran data referensi dan proses perata-rataan nilai, dilakukan proses pencarian nilai *range* dan *threshold*.

Tabel 3 Nilai *range* dari objek yang terkorosi dan tidak terkorosi.

| Objek | Range (Karat - Bagus) | | | | | |
|---------|------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 80cm | | 90cm | | 100cm | |
| Besi | 1.333 | 3.868 | -2.535 | 2.296 | -4.519 | 1.895 |
| Seng | -2.813 | 2.689 | -3.378 | 2.138 | -3.466 | 0.179 |
| Tembaga | 1.708 | 3.635 | -2.170 | 3.407 | -2.216 | 2.521 |

Nilai *magnitude* pada Tabel 3 menunjukkan 2 buah nilai yaitu batas bawah dan batas atas berdasarkan tingkat korosi. Selanjutnya, dilakukan proses pencarian nilai *threshold* dari masing-masing nilai *range* pada Tabel 3.

Tabel 4 Nilai *threshold* objek pada berbagai jarak.

| Objek | Nilai Threshold | | |
|---------|-----------------|-------|--------|
| | 80cm | 90cm | 100cm |
| Besi | 2.6 | 0.12 | -1.312 |
| Seng | -0.062 | -0.62 | -1.64 |
| Tembaga | 2.671 | 0.61 | 0.152 |

Pengukuran Data Uji

Data uji terdiri dari 2 objek yang dipilih secara *random* untuk diketahui tingkat korosinya. Proses pengukuran menggunakan jarak yang sama seperti pada pengukuran data referensi. Data uji tidak memiliki tingkat korosi yang berbeda karena hanya 1 objek dan diukur sebanyak 3 kali untuk menghindari data *error*.

Tabel 5 Nilai *magnitude* dari data uji.

| Tingkat Korosi | Nilai Magnitude (dBm) | | | | | |
|----------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Besi | | | Seng | | |
| | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm |
| Uji | 2.081 | 0.175 | 1.211 | 2.323 | 1.03 | 0.25 |
| | 2.073 | 0.146 | 1.206 | 2.327 | 1.04 | 0.339 |
| | 2.079 | 0.157 | 1.206 | 2.322 | 1.008 | 0.275 |
| Total | 2.078 | 0.159 | 1.208 | 2.324 | 1.026 | 0.288 |

Tabel 5 merupakan nilai *magnitude* dari data uji serta nilai rata-rata dari nilai *magnitude* masing-masing objek. Data ini kemudian akan dibandingkan dengan nilai dari data referensi.

4. Skenario Pengujian 1

Pada skenario ini, nilai range data referensi akan dijadikan nilai *threshold*. Sehingga *threshold* dibagi menjadi 2 nilai yaitu batas bawah (karat) dan batas atas (tidak karat). Nilai dari *threshold* tersebut dapat dilihat pada Tabel 3 dan nilai dari data uji dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 6 Tingkat akurasi dari skenario pengujian pertama.

| Tabel Akurasi Skenario 1 (%) | | | | | | | Total |
|------------------------------|-----------------------|------|-------|------|------|-------|-------|
| Tingkat Korosi | Nilai Magnitude (dBm) | | | | | | |
| | Besi | | | Seng | | | |
| | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm | |
| Uji | T | T | T | T | T | F | 83.3% |

Berdasarkan Tabel 6, pengujian pada objek besi berhasil pada jarak 80cm dan 100cm, sedangkan seng pada jarak 90cm dan 100cm. Dan akurasi total yang dihasilkan sistem adalah 83.3% karena 2 data dari 6 data salah.

5. Skenario Pengujian 2

Pada skenario kedua ini, data referensi akan dijadikan 1 *level* nilai *threshold* yang didapatkan dengan pencarian nilai tengah dari nilai *range* data referensi yang terdapat pada Tabel 4.

Tabel 7 Tingkat akurasi dari skenario pengujian kedua.

| Tabel Akurasi Skenario 2(%) | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| Tingkat Korosi | Nilai Magnitude (dBm) | | | | | |
| | Besi | | | Seng | | |
| | 80cm | 90cm | 100cm | 80cm | 90cm | 100cm |
| Uji | Korosi | Tidak | Tidak | Korosi | Tidak | Tidak |
| Total | 33,3% | | | 33,3% | | |

Berdasarkan objek yang diujikan, kedua objek tersebut sudah terkorosi berdasarkan pengaplikasian metode *visual inspection* atau pengamatan dengan mata. Setelah kedua objek tersebut diujikan, akurasi pendeteksian korosi besi sebesar 33,3%, sedangkan pada seng korosi terdeteksi dengan akurasi 33,3% dan akurasi total sebesar 33.3%. Kedua objek terdeteksi korosi pada jarak 80 cm.

6. Analisis

Pengaruh Tingkat Korosi Terhadap Nilai Magnitude

Berdasarkan proses pengambilan data referensi yang melibatkan 3 buah jenis objek yang berbeda dan tingkat korosi yang berbeda, korosi mempengaruhi objek yang bersangkutan sehingga terjadi penurunan nilai *magnitude* pada objek. Dapat dilihat pada Tabel 3, perbedaan nilai *magnitude* objek yang terkorosi dan yang tidak terkorosi sangat signifikan. Contohnya pada pengukuran data referensi besi pada jarak 100cm terjadi penurunan sebesar kurang lebih 4 dBm. Hal ini terjadi karena korosi memiliki pengaruh yang negatif terhadap konstanta dielektrik logam serta *loss factor* logam.

Dikarenakan konstanta dielektrik logam berubah nilainya, maka logam dapat dikondisikan menjadi :

1. Logam yang baik semakin reflektif.
2. Logam yang terkorosi semakin tidak reflektif.



Gambar 6 Grafik pengaruh korosi terhadap nilai *magnitude* di jarak 80 cm. Berdasarkan Gambar 6 korosi sangat berpengaruh terhadap nilai *magnitude* objek. Ini terbukti pada pengujian 3 objek menghasilkan hasil yang sama.



Gambar 7 Grafik pengaruh korosi terhadap nilai *magnitude* di jarak 90 cm. Pada Gambar 7 di jarak 90 cm, pengaruh dari korosi sangat terlihat pada objek seng dan tembaga. Sedangkan pada besi korosi tidak terlalu jauh perbedaannya.



Gambar 8 Grafik pengaruh korosi terhadap nilai *magnitude* di jarak 100 cm. Gambar 8 menunjukkan pada jarak 1 meter, perbedaan tingkat korosi sangat terlihat dibandingkan dengan jarak 80 cm dan 90 cm. Dengan penurunan nilai *magnitude* masing-masing objek mencapai 3 dBm.

Pengaruh Jarak Terhadap Nilai Magnitude

Berdasarkan pengukuran data referensi, setiap objek diukur pada jarak yang berbeda untuk melihat apakah parameter jarak berpengaruh terhadap hasil pengukuran. Nilai *magnitude* pada jarak yang berbeda terlihat perbedaannya, pada objek besi nilai *magnitude* semakin besar jika jarak semakin dekat, sedangkan pada seng dan tembaga semakin jauh jarak semakin tinggi *magnitudenya*.



Gambar 9 Pengaruh jarak terhadap nilai *magnitude* pada objek yang tidak korosi.

Pengaruh jarak terhadap objek yang tidak terkorosi terjadi pengurangan nilai pada objek besi, sedangkan penaikan pada seng dan tembaga.



Gambar 10 Pengaruh jarak terhadap nilai *magnitude* objek yang terkorosi.

Berdasarkan Gambar 10, objek yang terkorosi sangat terpengaruhi oleh nilai jarak pada proses pengukuran. Dari hasil pengukuran tersebut bisa dilihat bahwa grafik menunjukkan semua objek mengalami penurunan nilai.

7. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian data yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan, sebagai berikut:

1. Sistem mampu mengenali objek yang terkorosi dan yang tidak terkorosi berdasarkan nilai *magnitude* objek dengan tingkat akurasi 66,7%.
2. Tingkat korosi sangat berpengaruh pada tingkat reflektivitas objek. Terjadi penurunan nilai *magnitude* yang sangat signifikan, dimana semakin korosi logam semakin kecil nilai *magnitudenya* dan semakin tidak korosi semakin tinggi nilai *magnitudenya*.
3. Jarak berpengaruh pada nilai *magnitude* objek. Pada objek yang terkorosi semakin jauh jarak semakin kecil nilai *magnitudenya*.
4. Radar SiversIMA RS3400X mampu mendeteksi korosi pada objek dengan syarat merancang sistem tambahan untuk pengolahan sinyal dari radar.

8. Daftar Pustaka

- [1] Nugrahaeni, N. T., Ardiati, M., Rani, D. E., Setiawan, F. E., Sari, R. Y., & Humam, A. Z. (2014). Korosi Suatu Material, (081211333009), 1-5.
- [2] Putri, F. A., Cahyono, W.E., & Sains, P. (2015). Korosifitas Tembaga Sebagai Dampak Hujan Asam, *10*(1), 18-19.
- [3] F. A. Putri, W. E. Cahyono, and P. Sains, "Korosifitas Tembaga Sebagai Dampak Hujan Asam," vol. 10, no. 1, pp. 18–19, 2015
- [4] W. S. Kirk, *Iron Ore*. 1993.
- [5] *Zinc And Its Alloys*. 1931.
- [6] M. I. Skolnik, *INTRODUCTION TO RADAR SYSTEMS*.
- [7] Siversima. (2011). FMCW Radar Sensors. Retrieved from <http://www.siversima.com/wp-content/uploads/2011/07/FMCW-Radar-App-Notes-Advantages-and-Disadvantages.pdf>
- [8] Peek, K. (2011). An Analysis of the Effects of Digital Phase Errors on the Performance of a FMCW-Doppler Radar by, (September).
- [9] I. F.W., *DSP for MATLAB™ and LabVIEW™*, vol. I. 2009.