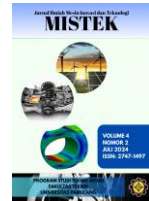




# JURNAL TEKNIK MESIN MISTEK MESIN INOVASI DAN TEKNOLOGI



## ANALISIS STRUKTUR MATERIAL *STAINLESS STEEL* 304 MENGUNAKAN METODE NDT PMI (*POSITIVE MATERIAL IDENTIFICATION*) BERBASIS XRF DAN UJI KEKERASAN

Rizki Amien Narwanto<sup>1</sup>, Ihat Solihat<sup>2</sup>, Mohamad Sjahmanto<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No.1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : rizkiamien16@gmail.com<sup>1</sup>, dosen00990@unpam.ac.id<sup>2</sup> dosen01538@unpam.ac.id<sup>3</sup>

Masuk : 04 Maret 2024

Direvisi : 08 April 2024

Disetujui : 02 Mei 2024

**Abstrak:** Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kandungan unsur logam dan karakteristik kekerasan baja tahan karat AISI 304 (SS304) untuk menilai kesesuaiannya sebagai material yang mengacu pada standar ASTM A182/A182M-14b F304. Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Brinell untuk menentukan ketahanan material terhadap penetrasi beban tekan pada spesimen uji. Analisis kandungan unsur dilakukan dengan metode *Positive Material Identification* (PMI) berbasis *X-Ray Fluorescence* (XRF) guna memperoleh jenis unsur penyusun serta persentase kandungannya dalam material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa ketiga spesimen SS304 memiliki nilai kekerasan rata-rata sebesar 155 HB. Analisis PMI-XRF memperlihatkan bahwa komposisi kimia rata-rata dari ketiga spesimen berturut-turut adalah nikel (Ni) 8,13%, besi (Fe) 71,83%, mangan (Mn) 1,17%, krom (Cr) 18,19%, vanadium (V) 0,102%, tembaga (Cu) 0,220%, dan molibdenum (Mo) 0,020%. Kombinasi nilai kekerasan dan komposisi kimia tersebut menunjukkan bahwa material yang diuji konsisten dengan karakteristik umum baja tahan karat austenitik tipe 304 serta berpotensi memenuhi persyaratan sifat mekanik dan komposisi untuk aplikasi industri sesuai standar yang dirujuk.

Kata Kunci: Baja Tahan Karat 304, Kekerasan Brinell, PMI-XRF, Komposisi Kimia, Pengujian Tanpa Merusak.

**Abstract:** This study aims to identify the elemental composition and hardness characteristics of AISI 304 stainless steel (SS304) to evaluate its conformity with the ASTM A182/A182M-14b Grade F304 standard. Brinell hardness testing was employed to determine the material's resistance to indentation under compressive loading on three test specimens. Elemental composition was analyzed using *Positive Material Identification* (PMI) based on *X-Ray Fluorescence* (XRF), which enables qualitative and quantitative determination of the constituent elements in the material. The experimental results show that the three SS304 specimens have an average Brinell hardness value of 155 HB. PMI-XRF analysis indicates that the average chemical composition of the specimens consists of nickel (Ni) 8.13%, iron (Fe) 71.83%, manganese (Mn) 1.17%, chromium (Cr) 18.19%, vanadium (V) 0.102%, copper (Cu) 0.220%, and molybdenum (Mo) 0.020%. The combination of hardness values and chemical composition confirms that the tested material is consistent with the typical characteristics of austenitic stainless steel type 304 and indicates its potential to meet the mechanical property and composition requirements for industrial applications in accordance with the referenced standard.

**Keywords:** AISI 304 Stainless Steel, Brinell Hardness, PMI-XRF, Chemical Composition, Non-Destructive Testing.

### PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang berlangsung begitu cepat telah membawa manusia memasuki era modern, di mana berbagai kebutuhan dipenuhi melalui penggunaan peralatan berteknologi tinggi. Banyak sektor industri memanfaatkan material berbasis logam, terutama untuk pembuatan komponen mesin, perkakas, dan bagian otomotif. Baja karbon menjadi salah satu material yang paling banyak digunakan untuk komponen seperti roda gigi, poros, dan elemen lain yang membutuhkan kombinasi sifat kekerasan dan keuletan. Namun, material ini sering mengalami masalah kelelahan dan keausan akibat beban mekanis berulang, yang akhirnya dapat memicu deformasi atau kerusakan bentuk [1]. Untuk mengurangi risiko tersebut, diperlukan material yang memiliki ketahanan aus lebih baik serta sifat mekanik yang stabil. Meski baja karbon memiliki kekerasan dan keuletan, sifat ketahanan lelahnya pada umumnya masih terbatas, sehingga komponen mesin sering kehilangan fungsinya karena kerusakan permukaan berupa keausan, retak, atau korosi [2].

*Stainless steel* merupakan salah satu material yang banyak diaplikasikan dalam kehidupan sehari-hari, terutama pada produk yang menuntut higienitas tinggi seperti peralatan makan, instrumen medis, dan perangkat pengolahan air. Selain sifat higienis, beberapa aplikasi juga memerlukan tingkat presisi tinggi pada permukaan material. Kekasaran atau ketidaksempurnaan permukaan dapat mempercepat penumpukan ion klorida, yang pada gilirannya merusak lapisan pasif dan meningkatkan risiko korosi [3].

Penelitian ini difokuskan pada karakterisasi *stainless steel* tipe 304 berbentuk batang (*rod*). Analisis dilakukan menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT) *Positive Material Identification* (PMI) berbasis *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kesesuaian komposisi kimia material terhadap standar ASTM (*American Standard for Testing and Materials*). Selain itu, material juga diuji menggunakan metode *hardness test* untuk mengetahui tingkat kekerasannya.

Metode Brinell dipilih sebagai teknik pengujian kekerasan karena kesederhanaannya, kemudahan operasional, serta penggunaannya yang luas di industri. Instrumen Brinell modern telah terotomatisasi, sehingga mampu menampilkan nilai kekerasan secara langsung setelah proses penjejakan selesai. Variasi beban dan ukuran indenter yang tersedia memungkinkan metode ini diaplikasikan pada material logam dengan tingkat kekerasan yang beragam, mulai dari material lunak hingga sangat keras. Prinsip pengujiannya adalah menekan bola baja atau indenter tertentu pada permukaan material untuk mengukur ketahanan terhadap deformasi permanen [4], [5].

Di sisi lain, analisis komposisi kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dipilih karena teknik ini mampu mendeteksi unsur hingga level *parts per million* (ppm). XRF memungkinkan identifikasi unsur beserta persentasenya secara cepat dan akurat, sehingga sangat efektif untuk menilai apakah material memenuhi standar kimia tertentu [6].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini diarahkan untuk menguji hubungan antara nilai kekerasan baja SS304 dengan komposisi unsur pembentuknya. Melalui kombinasi metode Brinell dan analisis PMI-XRF, penelitian ini berupaya memberikan gambaran mengenai karakteristik struktural dan mekanik *stainless steel* 304, yang selanjutnya dirangkum dalam kajian berjudul “**Analisis Struktur Material *Stainless Steel* 304 Menggunakan Metode NDT PMI (*Positive Material Identification*) Berbasis XRF dan Uji Kekerasan**”.

## METODOLOGI

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data teknis maupun non-teknis yang relevan dengan karakterisasi material *stainless steel*. Proses ini dilakukan melalui dua pendekatan utama, yaitu studi literatur dan studi lapangan. Studi literatur mencakup penelusuran serta pengkajian berbagai referensi ilmiah yang berkaitan dengan metode pengujian kekerasan dan identifikasi material. Sementara itu, studi lapangan dilakukan melalui survei dan wawancara dengan narasumber yang memahami aspek teoritis maupun praktis, serta melalui pengamatan langsung di Laboratorium PT Alfa Valves Indonesia.

Langkah-langkah penelitian dalam studi ini disusun secara sistematis untuk memastikan setiap tahapan pengumpulan data, pengujian, dan analisis dapat menghasilkan karakterisasi material yang akurat. Setiap tahap dirancang agar saling melengkapi, mulai dari persiapan spesimen, pelaksanaan pengujian kekerasan, identifikasi komposisi unsur menggunakan XRF, hingga proses analisis data yang bertujuan menginterpretasikan sifat fisik dan kimia *stainless steel* tipe SS304 secara menyeluruh.

### Penentuan Spesimen

Penentuan spesimen dalam penelitian ini diawali dengan pemilihan material *stainless steel* tipe SS304 yang sesuai dengan standar ASTM. Untuk pengujian komposisi dan persentase unsur, spesimen disiapkan dalam bentuk lempengan dan permukaannya dihaluskan agar bebas dari korosi serta kontaminasi yang dapat memengaruhi hasil karakterisasi. Spesimen untuk uji kekerasan menggunakan material yang sama, yaitu SS304, dan pengujian dilakukan pada titik-titik yang diberi jarak seragam sekitar 0,5 cm pada seluruh permukaan. Prosedur ini memastikan bahwa setiap pengukuran kekerasan dilakukan pada kondisi permukaan yang konsisten, sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat dan mampu merepresentasikan karakteristik material secara menyeluruh.

### Pengujian Kekerasan Menggunakan *Hardness Tester*

Tahap pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan deformasi plastis akibat penekanan beban. Proses ini menggunakan *Portable Hardness Test Machine* yang bekerja berdasarkan prinsip pengukuran jejak indentasi pada permukaan material. Agar hasil pengujian akurat dan merepresentasikan sifat mekanik material secara menyeluruh, setiap langkah persiapan dan pelaksanaan dilakukan secara sistematis.

Pengujian diawali dengan menyiapkan spesimen SS304 dan menghaluskan permukaannya menggunakan ampelas dengan tingkat kekasaran bertahap mulai dari grade 200 hingga 1500. Proses penghalusan ini bertujuan menghilangkan korosi serta ketidakrataan permukaan yang dapat memengaruhi pembacaan nilai kekerasan. Setelah proses penghalusan selesai, spesimen dibersihkan untuk memastikan permukaan benar-benar bebas dari residu

pengamplasan. Spesimen kemudian diuji menggunakan *Portable Hardness Test Machine*, di mana sampel diletakkan pada meja uji, probe ditempatkan pada permukaan, dan bola indenter dilepas untuk membuat jejak penekanan. Nilai kekerasan yang muncul pada layar monitor ditampilkan dalam satuan *Hardness Leeb* (HL), yang selanjutnya dikonversi ke satuan *Brinell Hardness* (HB) menggunakan tabel konversi standar.

### Karakterisasi Unsur Kimia Menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Karakterisasi unsur kimia pada material dilakukan menggunakan teknik *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk memperoleh informasi mengenai variasi unsur serta persentase kandungannya. Proses ini diawali dengan menyiapkan spesimen SS304 yang sama seperti pada pengujian sebelumnya, kemudian menghaluskan permukaannya menggunakan ampelas bertingkat dari grade 200 hingga 1500 untuk memastikan area yang terkena sinar-X bebas dari korosi dan ketidakrataan permukaan. Setelah permukaan spesimen dibersihkan, pengujian dilakukan menggunakan perangkat Niton XL2 Gold berbasis XRF. Alat diarahkan ke permukaan logam dan sinar-X ditembakkan untuk memicu fluoresensi karakteristik dari setiap unsur penyusun material. Hasil pengukuran kemudian muncul pada layar monitor dalam bentuk spektrum energi serta tabel komposisi kimia yang menampilkan jenis unsur beserta persentase kandungannya secara rinci.

### Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh meliputi hasil uji kekerasan menggunakan *Brinell Hardness Test Machine* dan hasil karakterisasi unsur menggunakan XRF. Nilai kekerasan awal yang diperoleh dalam satuan *Hardness Leeb* (HL) kemudian dikonversi ke satuan Brinell (HB) menggunakan tabel konversi standar.

Data hasil XRF berupa spektrum intensitas energi dan tabel kandungan unsur dianalisis dengan mengurutkan persentase komposisi setiap unsur pada masing-masing sampel. Nilai kekerasan spesimen diproses dengan menghitung rata-rata dari seluruh titik pengukuran dan disajikan dalam bentuk grafik batang. Ralat pengukuran ditentukan berdasarkan ketidakpastian pengujian berulang.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Pengujian Kekerasan Menggunakan *Hardness Test*

Pengujian kekerasan dilakukan di PT Alfa Valves Indonesia, Bogor, Jawa Barat, menggunakan tiga spesimen baja SS304 yang merujuk pada standar ASTM A182/A182M-14B F304. Setiap spesimen diuji sebanyak tiga kali menggunakan *Hardness Test Machine* sehingga diperoleh nilai kekerasan dalam satuan *Hardness Leeb* (HL). Data hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Hasil Pengujian Kekerasan Logam SS304 dalam Satuan *Hardness Leeb* (HL)**

Pengujian	Spesimen 1 (HL)	Spesimen 2 (HL)	Spesimen 3 (HL)
Uji 1	412	402	425
Uji 2	436	410	453
Uji 3	413	407	453
<b>Rata-rata</b>	<b>420</b>	<b>406</b>	<b>443</b>

Nilai rata-rata kekerasan yang diperoleh menunjukkan bahwa Spesimen 1 memiliki kekerasan sebesar  $420 \pm 16$  HL, Spesimen 2 sebesar  $406 \pm 4$  HL, dan Spesimen 3 sebesar  $443 \pm 10$  HL. Karena satuan HL bukan satuan standar untuk evaluasi kekerasan material teknik, nilai tersebut dikonversi ke satuan *Brinell Hardness* (HB) menggunakan tabel konversi standar.

Untuk hasil konversi ke satuan Brinell ditampilkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Hasil Konversi Nilai *Hardness Leeb* (HL) ke *Hardness Brinell* (HB)**

Pengujian	Spesimen 1 (HL)	Spesimen 2 (HL)	Spesimen 3 (HL)
Uji 1	146	152	156
Uji 2	164	144	177
Uji 3	147	142	177
<b>Rata-rata</b>	<b>152</b>	<b>146</b>	<b>170</b>

Nilai rata-rata kekerasan 152 HB, 146 HB, dan 170 HB berada jauh di bawah batas maksimum kekerasan ASTM untuk material F304, yaitu 486–626 HB (setara 50–62 HRC). Dengan demikian, ketiga spesimen memiliki karakteristik kekerasan yang sesuai dengan sifat dasar *stainless steel* austenitik, dan seluruh hasil pengujian dinyatakan memenuhi standar ASTM.

### Hasil Pengujian Komposisi Unsur dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Analisis komposisi unsur dilakukan menggunakan perangkat XRF Niton XL2 Gold. Pengujian menunjukkan keberadaan tujuh unsur utama pada spesimen SS304. Persentase setiap unsur beserta nilai acuan ASTM ditampilkan pada Tabel 3.

**Tabel 3. Komposisi Unsur Logam SS304 Berdasarkan Pengujian XRF**

Unsur	Spesimen 1 (%)	Spesimen 2 (%)	Spesimen 3 (%)	Rata-rata (%)	Rentang ASTM
Ni	8,11	8,24	8,03	8,13	8,0 – 11,0
Fe	71,85	71,79	71,84	71,83	70 – 90
Mn	1,16	1,14	1,21	1,17	≤ 2,00
Cr	18,25	18,14	18,18	18,19	18,0 – 20,0
V	0,088	0,091	0,128	0,102	≤ 0,150
Cu	0,202	0,257	0,202	0,22	≤ 0,265
Mo	0,02	0,021	-	0,02	0,02 – 0,03
C	-	-	-	-	0,08
P	-	-	-	-	0,045
S	-	-	-	-	0,03

Hasil pengujian menunjukkan bahwa semua unsur berada dalam rentang standar ASTM A182/A182M-14b F304. Fe, Cr, dan Ni merupakan unsur dominan, sedangkan Mn, V, Cu, dan Mo berada pada kadar minor yang khas untuk *stainless steel* tipe 304.

### Analisis Pengujian Kekerasan Menggunakan *Hardness Test* pada Baja

Kekerasan suatu baja sangat dipengaruhi oleh komposisi unsur paduannya. Setiap unsur dengan kadar tertentu memberikan kontribusi yang berbeda terhadap sifat mekanik baja, termasuk kekerasan, keuletan, dan ketahanan terhadap deformasi. Oleh karena itu, variasi persentase unsur paduan dalam baja akan menghasilkan karakteristik kekerasan yang khas pada setiap jenis baja.

Pada penelitian ini, pengujian kekerasan baja SS304 dilakukan menggunakan *Hardness Test Machine* dengan metode Brinell. Metode ini dipilih karena termasuk ke dalam kategori pengujian non-destruktif dengan jejak indentasi yang relatif kecil, sehingga lebih menghemat sampel, waktu, dan biaya dibandingkan metode lain. Setiap spesimen diuji sebanyak tiga kali, dengan perlakuan awal yang sama berupa proses pengamplasan dan pengaturan jarak 0,5 cm antar titik uji untuk menjaga konsistensi kondisi permukaan.

Nilai kekerasan yang diperoleh dari alat ditampilkan dalam satuan *Hardness Leeb* (HL) dan kemudian dikonversi ke satuan Brinell (HB) agar dapat dibandingkan dengan standar ASTM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa Spesimen 1 memiliki kekerasan sebesar 152 HB, Spesimen 2 sebesar 146 HB, dan Spesimen 3 sebesar 170 HB. Ketiga nilai tersebut berada dalam rentang yang masih dapat diterima untuk baja *stainless steel* tipe 304, yang secara umum memiliki struktur austenitik dengan nilai kekerasan menengah.

Apabila dibandingkan dengan standar ASTM A182/A182M-14b F304, seluruh nilai kekerasan yang diperoleh berada dalam batas yang diperbolehkan menurut spesifikasi manufaktur. Dengan demikian, ketiga spesimen SS304 pada penelitian ini dinyatakan memenuhi karakteristik mekanik yang sesuai dengan kelas materialnya.

### Analisis Pengujian Variasi dan Persentase Unsur Menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF)

Pengujian komposisi unsur kimia dilakukan pada tiga spesimen baja SS304 menggunakan perangkat X-Ray Fluorescence (XRF). *Stainless steel* tipe 304 terdiri atas berbagai unsur paduan, namun alat XRF yang digunakan dapat mendeteksi tujuh unsur utama, yaitu Ni, Fe, Mn, Cr, V, Cu, dan Mo. Perbedaan kecil dalam komposisi antar spesimen terutama terjadi pada unsur Ni dan Cr, yang merupakan penguat utama struktur austenitik.

Analisis XRF bekerja berdasarkan prinsip fluoresensi sinar-X. Ketika permukaan logam ditembakkan sinar-X, atom-atom dalam material mengalami ionisasi dan eksitasi. Elektron yang berpindah dari tingkat energi tinggi ke rendah memancarkan kembali energi dalam bentuk sinar-X sekunder, yang kemudian ditangkap oleh detektor sebagai spektrum. Spektrum tersebut memberikan informasi intensitas energi yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis unsur serta besar persentase kandungannya.

Setiap spesimen diuji sebanyak tiga kali, dan alat menampilkan keluaran dalam bentuk tabel komposisi unsur. Hasil uji untuk Spesimen 1 menunjukkan keberadaan tujuh unsur dengan rata-rata kandungan sebagai berikut: Ni 8,11%, Fe 71,85%, Mn 1,16%, Cr 18,25%, V 0,088%, Cu 0,202%, dan Mo 0,020%. Spesimen 2 memiliki komposisi yang hampir serupa, yaitu Ni 8,24%, Fe 71,79%, Mn 1,14%, Cr 18,18%, V 0,128%, Cu 0,202%, dan Mo 0,021%. Untuk

Spesimen 3, enam unsur utama terdeteksi dengan nilai Ni 8,03%, Fe 71,84%, Mn 1,21%, Cr 18,25%, V 0,088%, dan Cu 0,202%.

Perbandingan ketiga spesimen menunjukkan bahwa seluruh nilai komposisi unsur berada dalam rentang standar ASTM A182/A182M-14b F304. Konsistensi komposisi ini menegaskan bahwa material yang diuji merupakan baja *stainless steel* 304 yang sesuai spesifikasi, baik dari sisi manufaktur maupun standar internasional. Dengan demikian, berdasarkan pengujian XRF, ketiga spesimen dapat diklasifikasikan sebagai SS304 yang autentik dan memenuhi persyaratan kimiawi material.

### KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dan karakterisasi komposisi unsur menggunakan metode *Non-Destructive Test* (NDT) PMI berbasis XRF serta *Hardness Test*, dapat disimpulkan bahwa material baja SS304 yang dianalisis memenuhi spesifikasi standar ASTM A182/A182M-14b F304.

1. Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa Spesimen 1, 2, dan 3 masing-masing memiliki nilai sebesar 152 HB, 146 HB, dan 170 HB. Seluruh nilai tersebut berada dalam rentang normal untuk baja *stainless steel* tipe 304 dan sesuai dengan batas kekerasan yang ditetapkan ASTM A182/A182M-14b F304.
2. Hasil karakterisasi XRF memperlihatkan bahwa ketiga spesimen memiliki komposisi unsur yang konsisten dengan standar SS304. Rata-rata kandungan Ni, Fe, Mn, Cr, V, Cu, dan Mo seluruhnya berada dalam rentang spesifikasi ASTM, sehingga material dapat dinyatakan memenuhi kriteria kimiawi baja *stainless steel* 304.

Dengan demikian, dari pengujian *Hardness Test* dan PMI-XRF yang dilakukan pada tiga spesimen dengan tiga kali pengulangan dan jarak titik uji 0,5 cm, material yang diuji dinyatakan memenuhi standar mekanik dan kimiawi yang ditetapkan oleh ASTM A182/A182M-14b F304. Data ini menegaskan bahwa baja SS304 dalam penelitian ini memiliki karakteristik yang sesuai untuk aplikasi industri yang memerlukan kestabilan sifat mekanik dan komposisi kimia yang terkontrol.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan jenis pengujian lain, seperti analisis struktur mikro atau uji tarik, agar karakteristik material SS304 dapat dievaluasi lebih menyeluruh. Selain itu, penggunaan metode karakterisasi dengan akurasi lebih tinggi dapat membantu memperkuat validasi komposisi unsur yang terdeteksi.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Hejwowski and M. Szala, "Wear-Fatigue Study of Carbon Steels," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 179–190, 2021, doi: <https://doi.org/10.12913/22998624/140200>.
- [2] A. Apelfeld *et al.*, "Enhancement of Medium-Carbon Steel Corrosion and Wear Resistance by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing," *Metals*, vol. 11, no. 10, p. 1599, 2021. doi: <https://doi.org/10.3390/met11101599>.
- [3] E. Messinese *et al.*, "A Comprehensive Investigation on the Effects of Surface Finishing on the Resistance of Stainless Steel to Localized Corrosion," *Metals*, vol. 12, no. 10, p. 1751, 2022. doi: <https://doi.org/10.3390/met12101751>.
- [4] O. A. Katok, M. R. Muzyka, V. P. Shvets, A. V. Sereda, V. V. Kharchenko, and S. P. Bisyk, "Determination of Hardness of High-Strength Steels by Brinell Method. Part 2. Improvement of the Method and Measurement Results," *Strength Mater.*, vol. 54, no. 5, pp. 802–808, 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-022-00456-6>.
- [5] Y. Tanaka, Y. Seino, and K. Hattori, "Measuring Brinell hardness indentation by using a convolutional neural network," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 30, no. 6, p. 65012, 2019, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab150f>.
- [6] T. D. T. Oyedotun, "X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview," *Geol. Ecol. Landscapes*, vol. 2, no. 2, pp. 148–154, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>.