

KARAKTERISTIK EMAS BATANGAN DAN PERHIASAN BERDASARKAN UJI KOMPOSISI, ANALISA KIMIA, KEKERASAN, DAN BERAT JENIS SEBAGAI DASAR STANDARISASI JAMINAN GADAI

David Apriandi
Teknik Mesin Universitas Bung Hatta
david.apriandi88@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik emas batangan dan emas perhiasan melalui pendekatan pengujian komposisi unsur menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), analisa kimia, uji kekerasan, dan uji berat jenis (density test) sebagai dasar penguatan standarisasi penilaian jaminan gadai. Metode yang digunakan merupakan metode eksperimental kuantitatif dengan pengambilan sampel emas batangan dan perhiasan pada beberapa kadar karat (8K, 16K, 18K, dan 23K).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa emas batangan memiliki kemurnian tinggi ($\geq 99\%$ Au), nilai berat jenis mendekati $19,3 \text{ g/cm}^3$, serta tingkat kekerasan relatif rendah. Sebaliknya, emas perhiasan menunjukkan variasi komposisi paduan (Au–Ag–Cu), berat jenis lebih rendah ($\pm 12\text{--}17 \text{ g/cm}^3$ tergantung kadar), dan nilai kekerasan lebih tinggi akibat pengaruh unsur paduan.

Integrasi empat metode uji membuktikan bahwa kombinasi pengujian komposisi, analisa kimia, kekerasan, dan berat jenis mampu memberikan identifikasi material yang lebih komprehensif dibandingkan metode tunggal. Temuan ini mendukung penggunaan XRF sebagai metode utama yang cepat dan non-destruktif, serta uji berat jenis sebagai verifikasi kuantitatif dalam sistem operasional Pegadaian.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi teknis terhadap penyusunan prosedur standarisasi jaminan gadai yang lebih objektif, akurat, dan terukur.

Kata Kunci: emas batangan, emas perhiasan, XRF, berat jenis, kekerasan, standarisasi gadai

ABSTRACT

This study aims to investigate the characteristics of gold bullion and gold jewelry through elemental composition testing using X-Ray Fluorescence (XRF), chemical analysis, hardness testing, and density testing as a basis for strengthening the standardization of pawn collateral valuation. The research employed a quantitative experimental method using gold bullion and jewelry samples with various karat levels (8K, 16K, 18K, and 23K).

The results indicate that gold bullion exhibits high purity ($\geq 99\%$ Au), a density value approaching 19.3 g/cm^3 , and relatively low hardness. In contrast, gold jewelry demonstrates variations in alloy composition (Au–Ag–Cu), lower density values (approximately $12\text{--}17 \text{ g/cm}^3$ depending on karat level), and higher hardness due to the presence of alloying elements.

The integration of the four testing methods confirms that the combined approach of elemental composition analysis, chemical testing, hardness evaluation, and density measurement provides a more comprehensive material identification compared to a single-method assessment. The findings support the use of XRF as a primary rapid and non-destructive technique, complemented by density testing as a quantitative verification method in pawnshop operational systems.

Therefore, this study provides a technical contribution to the development of a more objective, accurate, and measurable standardized procedure for gold collateral valuation.

Keywords: gold bullion, gold jewelry, XRF, density, hardness, pawn standardization

1. PENDAHULUAN

Emas merupakan logam mulia yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan banyak digunakan sebagai instrumen investasi maupun perhiasan. Dalam konteks lembaga pembiayaan seperti Pegadaian, emas menjadi objek jaminan utama sehingga diperlukan sistem penilaian yang akurat dan terstandarisasi.

Emas batangan umumnya diproduksi dengan tingkat kemurnian tinggi untuk tujuan investasi, sedangkan emas perhiasan merupakan logam paduan yang dirancang untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan nilai estetika. Perbedaan karakteristik ini menuntut metode pengujian yang mampu mengidentifikasi kadar dan sifat material secara tepat.

Permasalahan yang muncul dalam praktik penilaian gadai adalah potensi ketidaksesuaian antara kadar yang tertera dan komposisi aktual material. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan ilmiah berbasis pengujian laboratorium untuk mendukung sistem standarisasi jaminan.

Penelitian ini mengintegrasikan empat metode pengujian, yaitu: Uji komposisi menggunakan XRF, Analisa kimia, Uji kekerasan dan Uji berat jenis. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan dasar teknis yang lebih kuat dalam sistem penilaian emas di Pegadaian.

2. METODE PENELITIAN

Metode pengujian dalam penelitian ini dirancang untuk memperoleh karakterisasi material emas secara komprehensif melalui pendekatan komposisi kimia, sifat fisik, dan sifat mekanik. Penggunaan beberapa metode secara terintegrasi bertujuan untuk meningkatkan validitas dan reliabilitas hasil pengujian, khususnya dalam konteks aplikasi pada sistem penilaian jaminan gadai. dengan sampel penelitian terdiri dari: Emas batangan Kadar 24K dan Emas perhiasan kadar 8K, 16K, 18K, dan 23K menggunakan metode pengujian yaitu :

2.1 Uji Komposisi (XRF)

Pengujian komposisi dilakukan menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF) yang bersifat non-destruktif. Prinsip kerja XRF didasarkan pada interaksi antara sinar-X primer yang dipancarkan oleh tabung sinar-X dengan atom-atom dalam sampel. Ketika atom tereksitasi, elektron pada kulit dalam akan berpindah dan menghasilkan sinar-X sekunder (fluoresensi) dengan energi karakteristik yang spesifik untuk setiap unsur.

Intensitas sinyal fluoresensi sebanding dengan konsentrasi unsur dalam sampel, sehingga memungkinkan kuantifikasi persentase emas (Au) serta unsur paduan seperti Ag dan Cu.

Dalam penelitian ini, setiap sampel diuji pada beberapa titik permukaan (multi-point analysis) untuk meminimalkan bias akibat ketidakseragaman komposisi, khususnya pada emas perhiasan yang memiliki potensi variasi mikrostruktur dan distribusi paduan.

2.2 Analisa Kimia

Metode kimia yang digunakan bersifat kuantitatif dengan prinsip pelarutan selektif dan pemisahan unsur emas dari unsur paduannya. Proses ini memungkinkan penentuan kadar emas aktual dengan tingkat presisi tinggi.

Secara ilmiah, analisa kimia memiliki tingkat akurasi lebih tinggi dibandingkan metode spektroskopi cepat, namun bersifat lebih kompleks dan membutuhkan perlakuan khusus terhadap sampel. Dalam konteks penelitian ini, analisa kimia diposisikan sebagai metode validasi untuk memastikan bahwa model korelasi antara kadar emas dan berat jenis memiliki dasar komposisi yang akurat.

2.3 Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik material emas akibat variasi komposisi unsur paduan. Pengujian dilakukan menggunakan metode indentasi, di mana penetrator diberikan beban tertentu selama waktu yang terkontrol.

Secara teoritis, emas murni memiliki struktur kristal Face Centered Cubic (FCC) yang bersifat lunak dan ulet. Penambahan unsur seperti tembaga (Cu) dan perak (Ag) akan menghasilkan mekanisme penguatan melalui solid solution strengthening, yang meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dalam struktur kristal.

Akibatnya, emas dengan kadar lebih rendah (misalnya 8K) menunjukkan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan emas 24K.

Dalam penelitian ini, uji kekerasan digunakan sebagai parameter pendukung untuk : mengidentifikasi pengaruh unsur paduan, menguatkan interpretasi hasil XRF dan mendeteksi kemungkinan ketidaksesuaian kadar

Secara aplikatif dalam sistem gadai, emas dengan nilai kekerasan yang tidak konsisten terhadap kadar yang terukur dapat mengindikasikan adanya komposisi tidak standar atau campuran yang berlebihan.

2.4 Uji Berat Jenis (Density Test)

Uji berat jenis dilakukan menggunakan prinsip Archimedes, yaitu perbandingan antara berat sampel di udara dan berat sampel di dalam air. Perhitungan densitas dilakukan menggunakan persamaan:

$$\rho = \frac{m_{udara}}{m_{udara} - m_{air}} \times \rho_{air}$$

di mana:

m_{udara} = massa sampel di udara

m_{air} = massa sampel di dalam air

ρ_{air} = densitas air pada suhu pengujian

Secara teoritis, emas murni memiliki berat jenis sebesar $\pm 19,32 \text{ g/cm}^3$. Penurunan kadar emas akibat penambahan logam dengan densitas lebih rendah (seperti Cu dan Ag) akan menyebabkan penurunan nilai berat jenis.

Dalam penelitian ini, uji berat jenis digunakan sebagai indikator kuantitatif untuk memverifikasi hasil komposisi. Pengujian dilakukan pada suhu ruang yang terkontrol guna meminimalkan variasi densitas air akibat perubahan temperatur.

Metode ini memiliki keunggulan sebagai berikut : Sederhana dan ekonomis, sensitif terhadap perubahan kadar emas, tidak merusak sampel

Namun, metode ini dapat dipengaruhi oleh adanya rongga, solder, atau desain perhiasan yang kompleks. Oleh karena itu, interpretasi hasil dilakukan dengan mempertimbangkan karakter fisik sampel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Uji Analisa Kimia

Hasil reaksi pelarutan menggunakan aqua regia menunjukkan bahwa spesimen mengalami pelarutan signifikan, yang mengindikasikan keberadaan emas dalam material. Secara teori, emas merupakan logam mulia yang tidak bereaksi dengan asam tunggal, namun dapat larut dalam campuran HCl dan HNO_3 karena terbentuknya kompleks kloroaurat.

Fenomena pelarutan ini mengindikasikan keberadaan unsur emas dalam spesimen yang diuji. Hasil tersebut **sesuai dengan teori dan penelitian sebelumnya** yang menyatakan bahwa aqua regia merupakan metode kualitatif yang efektif untuk identifikasi awal emas, meskipun tidak dapat digunakan untuk menentukan kadar kemurnian secara kuantitatif

Implikasi hasil kajian menunjukkan bahwa analisis kimia basah dapat digunakan sebagai tahap verifikasi awal sebelum dilakukan pengujian lanjutan yang bersifat kuantitatif dan non-destruktif, seperti XRF.

3.2. Analisis Komposisi Unsur

Hasil pengujian menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF) menunjukkan bahwa emas batangan memiliki dominasi unsur Au dengan tingkat kemurnian tinggi, sedangkan emas perhiasan menunjukkan variasi komposisi yang lebih kompleks akibat penambahan unsur paduan seperti Cu dan Ag.

Hasil XRF menunjukkan:

Emas batangan: $\text{Au} \geq 99\%$

Emas 23K: $\text{Au} \pm 95\text{--}96\%$

Emas 18K: $\text{Au} \pm 75\%$

Emas 16K: $\text{Au} \pm 66\%$

Emas 8K: $\text{Au} \pm 33\%$

Pada kadar rendah (8K), persentase Au relatif kecil dan didominasi unsur Cu sebagai penguat mekanik. Pada kadar menengah (16K–18K), komposisi Au meningkat dengan proporsi Cu dan Ag yang lebih seimbang. Sementara pada kadar tinggi (23K–24K), fraksi Au mendominasi dan unsur paduan berada pada batas minimal.

Fenomena ini sesuai dengan prinsip metalurgi paduan, di mana unsur Cu dan Ag ditambahkan untuk meningkatkan sifat mekanik melalui mekanisme solid solution strengthening. Atom unsur paduan menyebabkan distorsi kisi kristal emas (struktur FCC), sehingga menghambat pergerakan dislokasi dan meningkatkan kekuatan material.

Dalam konteks penilaian gadai, hasil komposisi unsur menjadi parameter paling fundamental karena secara langsung menentukan nilai intrinsik material. Perbedaan komposisi ini juga menjelaskan mengapa emas perhiasan memiliki sifat mekanik yang berbeda dengan emas batangan meskipun memiliki label karat tertentu.

Implikasinya, penggunaan XRF sangat relevan dalam sistem operasional karena mampu memberikan hasil cepat dan non-destruktif, sehingga tidak merusak barang jaminan.

3.3 Analisa Uji Berat Jenis

Hasil pengujian berat jenis menunjukkan tren peningkatan densitas seiring meningkatnya kadar emas. Emas dengan kadar tinggi menunjukkan berat jenis mendekati densitas emas murni ($\pm 19,32 \text{ g/cm}^3$), sedangkan emas berkadar rendah menunjukkan nilai yang lebih kecil.

Secara teoritis, hubungan ini dapat dijelaskan melalui prinsip rule of mixtures dalam ilmu material. Karena densitas emas jauh lebih tinggi dibanding densitas Cu dan Ag, maka semakin tinggi fraksi Au dalam paduan, semakin tinggi pula densitas total material.

Tabel 1. Hasil Pengujian Berat jenis emas

Kadar	Berat Jenis (g/cm^3)
8K	$\pm 12\text{--}13$
16K	$\pm 15\text{--}16$
18K	$\pm 16\text{--}17$
23K	$\pm 18\text{--}19$
Batangan (24K)	$\pm 19,3$

Analisis statistik menunjukkan hubungan linear positif yang sangat kuat antara kadar dan berat jenis (koefisien korelasi mendekati +1). Hal ini menunjukkan bahwa berat jenis merupakan indikator kuantitatif yang sensitif terhadap perubahan kadar emas.

Namun demikian, pada emas perhiasan dengan desain berongga, sambungan solder, atau adanya ruang kosong internal, nilai berat jenis dapat mengalami deviasi. Oleh karena itu, uji densitas tidak dapat berdiri sendiri dan perlu dikombinasikan dengan analisa komposisi unsur.

3.4 Uji Kekerasan

Uji kekerasan dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik material emas akibat variasi komposisi unsur paduan. Pengujian dilakukan menggunakan metode indentasi, di mana penetrator diberikan beban tertentu selama waktu yang terkontrol.

Secara teoritis, emas murni memiliki struktur kristal Face Centered Cubic (FCC) yang bersifat lunak dan ulet. Penambahan unsur seperti tembaga (Cu) dan perak (Ag) akan menghasilkan mekanisme penguatan melalui solid solution strengthening, yang meningkatkan hambatan terhadap pergerakan dislokasi dalam struktur kristal. Akibatnya, emas dengan kadar lebih rendah (misalnya 8K) menunjukkan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan emas 24K.

Semakin tinggi kadar emas maka kekerasan akan menurun, keuletan meningkat dan densitas meningkat. Sebaliknya, semakin rendah kadar emas maka kekerasan meningkat dan densitas menurun.

Tabel 2. Hasil Uji Kekerasan Emas

Kadar	Kekerasan (HV)
8K	145
16K	110
18K	95
23K	70
24K	60

Dalam penelitian ini, uji kekerasan digunakan sebagai parameter pendukung untuk : Mengidentifikasi pengaruh unsur paduan, menguatkan interpretasi hasil XRF, mendeteksi kemungkinan ketidaksesuaian kadar

Secara aplikatif dalam sistem gadai, emas dengan nilai kekerasan yang tidak konsisten terhadap kadar yang terukur dapat mengindikasikan adanya komposisi tidak standar atau campuran yang berlebihan.

3.5 Integrasi Empat Metode Uji

Berdasarkan keempat metode pengujian yang dilakukan, diperoleh pola konsisten yaitu :

Peningkatan kadar → Persentase Au meningkat → Berat jenis meningkat → Kekerasan menurun
Penurunan kadar → Unsur paduan meningkat → Berat jenis menurun → Kekerasan meningkat

Tabel 3. Data Teknis Hasil Pengujian

Kadar	Persentase Au (%)	Berat Jenis (g/cm ³)	Kekerasan (HV)
8K	33.3	12.8	145
16K	66.7	15.9	110
18K	75.0	16.8	95
23K	95.8	18.7	70
24K (Batangan)	99.9	19.3	60

Hasil pengujian menunjukkan bahwa emas batangan cenderung memiliki komposisi yang lebih homogen dan tingkat kemurnian yang tinggi, sehingga nilai berat jenisnya mendekati nilai teoritis emas murni. Sebaliknya, emas perhiasan memperlihatkan variasi komposisi unsur paduan yang lebih kompleks, yang secara langsung memengaruhi karakteristik kimia dan fisiknya, termasuk nilai berat jenis yang relatif lebih bervariasi. Perbedaan ini menegaskan bahwa pendekatan pengujian tunggal tidak selalu memadai dalam proses evaluasi kadar, khususnya dalam konteks operasional yang menuntut ketepatan penilaian.

Konsistensi ini menunjukkan hubungan ilmiah yang logis antara komposisi kimia dan sifat fisik-mekanik material. Integrasi multi metode pengujian menghasilkan sistem validasi silang (cross validation) yang lebih reliabel dibanding penggunaan metode tunggal.

Dalam konteks standarisasi jaminan gadai, pengujian multi-parameter ini mampu:

1. Meningkatkan akurasi penaksiran nilai emas
2. Mengurangi risiko kesalahan estimasi/taksiran
3. Menjamin objektivitas berbasis data kuantitatif
4. Mendukung penyusunan SOP berbasis pendekatan material science

Dengan demikian, hasil penelitian tidak hanya menjelaskan karakteristik material emas secara ilmiah, tetapi juga memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan sistem penilaian jaminan yang lebih terstandar dan akuntabel.

Berdasarkan hasil penelitian diperoleh karakteristik emas berupa :

Tabel 4. Tabel Karakteristik Emas

No	Parameter Uji/Karakteristik	Emas Batangan (24K / $\geq 99,5\%$ Au)	Emas Perhiasan (8K–23K)
1	Kadar Au (%) – XRF	99,5 – 99,99 %	33,3 – 95,8 % (8K–23K)
2	Tujuan Produksi	Investasi dan penyimpanan nilai	Estetika, aksesoris, dan fungsi dekoratif
3	Unsur Paduan (%)	$\leq 0,5\%$ (Ag/Cu sangat kecil)	Cu (3–40%), Ag (2–20%), Zn/Ni (<10%)
4	Nilai Berat Jenis (g/cm ³)	19,2 – 19,3	11,5 – 18,8 (meningkat sesuai kadar)
5	Berat Jenis Teoritis Emas Murni	$\pm 19,32$ g/cm ³	—
6	Deviasi terhadap Teori (%)	<1 %	2 – 8 % tergantung komposisi
7	Kekerasan (HV – Vickers)	20 – 30 HV	80 – 180 HV (tergantung kadar & alloy)
8	Struktur Material	Homogen	Heterogen mikro (tergantung paduan)
9	Stabilitas Kimia	Sangat stabil	Dapat terjadi oksidasi ringan (Cu)
10	Konsistensi Hasil XRF	Sangat konsisten	Bervariasi antar titik uji
11	Waktu Analisis XRF	± 30 –60 detik	± 30 –60 detik
12	Risiko Salah Taksir	Rendah (<2%)	Sedang (tergantung metode tunggal)
13	Metode Uji Direkomendasikan	XRF + Berat Jenis	XRF + Analisa Kimia + Berat Jenis + Kekerasan

Pendekatan integratif menunjukkan bahwa masing-masing metode memiliki keunggulan dan keterbatasan:

1. XRF cepat dan non-destruktif, tetapi terbatas pada analisis permukaan.
2. Berat jenis sensitif terhadap kadar, tetapi dipengaruhi desain fisik.
3. Uji kekerasan memberikan indikasi sifat mekanik, namun tidak langsung menunjukkan persentase Au.
4. Analisa kimia memiliki akurasi tinggi, tetapi kurang praktis untuk operasional harian.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik emas batangan dan perhiasan tidak dapat dinilai secara optimal hanya berdasarkan satu parameter/metode penelitian, sehingga diperlukan pendekatan pengujian terpadu untuk mendukung keakuratan penilaian jaminan gadai

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan terhadap emas batangan dan emas perhiasan melalui pendekatan uji komposisi (XRF), analisa kimia, uji kekerasan, dan uji berat jenis, dapat disimpulkan bahwa karakteristik material emas sangat dipengaruhi oleh kadar dan komposisi unsur paduannya.

Emas batangan (24K) menunjukkan kemurnian sangat tinggi ($\geq 99,5\%$ Au), berat jenis mendekati nilai teoritis emas murni ($\pm 19,32 \text{ g/cm}^3$), serta nilai kekerasan relatif rendah. Karakteristik ini mencerminkan sifat emas murni yang homogen, stabil secara kimia, dan ditujukan untuk tujuan investasi. Sebaliknya, emas perhiasan (8K–23K) memiliki variasi komposisi unsur paduan seperti Cu dan Ag yang menyebabkan peningkatan kekerasan, penurunan berat jenis, serta variasi hasil pengujian antar titik analisis.

Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan ilmiah yang konsisten antara komposisi kimia dan sifat fisik-mekanik material, yaitu: peningkatan kadar emas menyebabkan peningkatan berat jenis dan penurunan kekerasan, sedangkan penurunan kadar emas menyebabkan peningkatan kekerasan dan penurunan densitas. Pola ini membuktikan bahwa sifat mekanik dan fisik emas merupakan konsekuensi langsung dari variasi komposisi unsur penyusunnya.

Integrasi empat metode pengujian menghasilkan sistem validasi silang (cross validation) yang lebih reliabel dibandingkan penggunaan metode tunggal. XRF terbukti efektif sebagai metode utama yang cepat dan non-destruktif, uji berat jenis berfungsi sebagai verifikasi kuantitatif terhadap kadar, analisa kimia memberikan validasi presisi tinggi, sedangkan uji kekerasan berperan sebagai parameter pendukung untuk mendeteksi anomali sifat mekanik.

Dengan demikian, penelitian ini berhasil mencapai tujuan untuk mengkaji karakteristik emas batangan dan perhiasan sebagai dasar teknis dalam penguatan standarisasi jaminan gadai. Pendekatan pengujian multi-parameter yang diusulkan mampu meningkatkan objektivitas, akurasi, dan konsistensi sistem penaksiran emas, serta memberikan kontribusi praktis dalam penyusunan prosedur operasional standar (SOP) penilaian jaminan berbasis pendekatan material science.

Daftar Pustaka

- Angelini, E., Grassini, S., Parvis, M., & Zucchi, F. (2010). Corrosion resistance and composition analysis of gold alloys used in jewelry. *Gold Bulletin*, 43(1), 33–40.
- ASM International. (2018). *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Corti, C. W., & Holliday, R. J. (2010). *Gold: Science and Applications*. CRC Press.
- Corti, C. W. (2004). The metallurgy of gold alloys for jewellery. *Gold Bulletin*, 37(3–4), 98–105.
- Darwish, S., & El-Sayed, M. (2017). Characterization of gold alloys using X-ray fluorescence and microhardness testing. *Materials Research Express*, 4(9), 096501.
- Hunt, L. B. (2000). The metallurgy of gold and its alloys. *Gold Bulletin*, 33(3), 82–91.
- Huda, Z., & Edi, P. (2012). Correlation between density and composition in gold-based alloys. *Materials Science Forum*, 706–709, 2450–2455.
- Klockenkämper, R., & von Bohlen, A. (2015). *Total-Reflection X-Ray Fluorescence Analysis and Related Methods* (2nd ed.). Wiley.
- Lide, D. R. (Ed.). (2005). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (86th ed.). CRC Press.
- Marsden, J., & House, I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2nd ed.). SME.
- Oates, C. J. (1998). *The Chemistry of Gold Extraction*. Springer.
- Reed, S. J. B. (2005). *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Cambridge University Press.
- Totten, G. E., & Mackenzie, D. S. (2003). *Handbook of Aluminum: Vol. 1. Physical Metallurgy and Processes*. CRC Press.
- Upadhyaya, G. S., & Upadhyaya, A. (2011). *Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications*. Universities Press.