e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Analisis Variasi Komposisi Paduan Logam Pada Bros Militer Romawi Akhir Sebagai Kajian Material Pertahanan

Analysis of Metal Alloy Composition Variation in Late Roman Military Brooches as a Study of Defense Materials

Muhammad Andhika Choir*, Sofian Aritonang
*Program Studi Matematika, Universitas Pertahanan

muhandhika678@gmail.com* , sovian.aritonang@idu.ac.id

Abstract

This study examines the characteristics, variation, and consistency of chemical composition in Late Roman military brooches and considers lessons relevant to Indonesian defense-material studies. The objects are crossbow brooches from the Krefeld-Gellep cemetery complex in Germany, previously examined using portable X-ray fluorescence (pXRF). A quantitative descriptive-comparative approach is applied to secondary data comprising 155 pXRF readings from 52 brooches. The analyses include descriptive statistics, comparisons by measurement location and typology, K-Means clustering, Centered Log-Ratio (CLR) transformation, and Aitchison distances to compare between-object variation with variation among measured parts of the same object. The measured composition is dominated by four elements: Cu, with a mean of 54.96%; Pb, 26.21%; Sn, 13.61%; and Zn, 2.47%. The Friedman tests indicate no statistically significant differences in the major elements among the bow, foot, and axis-mount locations. Nevertheless, variation between individual objects remains evident, including among brooches assigned to the same typology. The average compositional distance between objects is approximately 2.30 times greater than the distance among measured locations within the same object. K-Means results are also sensitive to the selected compositional-data treatment. These findings indicate between-object heterogeneity, but do not directly establish different production recipes because measurements were taken from corroded artifact surfaces. The study concludes that similarity in form does not necessarily imply similarity in material composition. This historical case offers conceptual lessons concerning functional material selection, variation control, and quality standardization in defense-material studies.

Keywords **:** *Crossbow Brooch, pXRF, Metal Alloys, Compositional Data, Defense Materials*

Abstrak

Berisi abstrak dalam bahasa Indonesia dengan jumlah kata antara 200-250. Untuk abstrak english menyesuaikan. Abstrak harus berisi pendahuluan, metode, hasil dan pembahasan serta kesimpulan (tanpa sitasi). Ditulis seperti format abstrak ini. [10 pt] Penelitian ini mengkaji karakteristik, variasi, dan konsistensi komposisi unsur kimia pada bros militer Romawi Akhir serta pembelajaran yang dapat diperoleh bagi kajian material pertahanan Indonesia. Objek kajian berupa crossbow brooch dari kompleks pemakaman Krefeld-Gellep, Jerman, yang dianalisis dalam penelitian terdahulu menggunakan portable X-ray fluorescence (pXRF). Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan data sekunder yang terdiri atas 155 pembacaan pXRF dari 52 objek bros. Analisis dilakukan melalui statistik deskriptif, perbandingan berdasarkan lokasi pengukuran dan tipologi, pengelompokan K-Means, transformasi Centered Log-Ratio (CLR), serta pengukuran jarak Aitchison untuk membandingkan variasi antarobjek dan variasi antarbagian pada objek yang sama. Hasil menunjukkan bahwa empat unsur utama yang terukur adalah Cu dengan rata-rata 54,96%, Pb 26,21%, Sn 13,61%, dan Zn 2,47%. Uji Friedman tidak menunjukkan perbedaan signifikan komposisi unsur utama pada bagian bow, foot, dan axis mount. Namun, variasi antarobjek tetap terlihat, termasuk pada bros dengan tipologi yang sama. Jarak komposisi antarobjek secara rata-rata sekitar 2,30 kali lebih besar dibandingkan jarak antarbagian dalam objek yang sama. Pengelompokan K-Means juga menunjukkan sensitivitas terhadap pendekatan pengolahan data komposisional. Temuan ini mengindikasikan heterogenitas komposisi antarobjek, tetapi tidak membuktikan

Author@ This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

secara langsung perbedaan resep produksi karena pengukuran dilakukan pada permukaan artefak yang telah mengalami korosi. Penelitian menyimpulkan bahwa kesamaan bentuk tidak selalu menunjukkan kesamaan komposisi material. Kasus historis ini memberikan pembelajaran konseptual mengenai pemilihan material sesuai fungsi, pengendalian variasi, dan standardisasi mutu dalam kajian material pertahanan.

Kata Kunci: Bros Militer Romawi, pRXF, Panduan Logam, Data Komposisional, Material Pertahanan

Penulis Korespondensi : Muhammad Andhika Choir

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi militer pada masa kuno tidak terlepas dari kemampuan masyarakat dalam memilih dan mengolah material. Logam digunakan untuk membuat senjata, perlengkapan perlindungan, dan atribut prajurit. Salah satu artefak yang memperlihatkan hubungan antara teknologi material dan identitas militer Romawi Akhir adalah crossbow brooch, yaitu bros berbentuk busur silang yang banyak digunakan pada abad keempat Masehi. Selain berfungsi sebagai pengikat pakaian, bros ini juga berkaitan dengan status dan identitas pemakainya di lingkungan militer (Swift, 2000).

Salah satu kumpulan artefak penting ditemukan di kompleks pemakaman Krefeld-Gellep, Jerman. Dari 67 bros yang ditemukan, 52 objek dianalisis melalui 155 pengukuran portable X-ray fluorescence (pXRF) pada bagian bow, foot, dan axis mount. Penelitian van der Meulen-van der Veen (2023) menunjukkan bahwa bros tersebut didominasi paduan tembaga dengan kandungan timbal tinggi, terutama kelompok leaded gunmetal dan leaded bronze, sedangkan penggunaan kuningan relatif terbatas. Temuan ini memberikan dasar untuk menelaah pilihan material dan pola produksi perlengkapan militer Romawi Akhir.

Kesamaan bentuk atau tipologi tidak selalu menunjukkan kesamaan komposisi logam. Variasi dapat dipengaruhi oleh bahan baku, pencampuran, daur ulang, teknik pengerjaan, serta kondisi korosi setelah artefak terkubur. Penelitian terdahulu telah membahas kemungkinan standardisasi dan kendali produksi pada pembuatan crossbow brooch (Van Thienen and Lycke, 2017; Van Thienen, 2021). Namun, persentase unsur hasil pXRF merupakan data komposisional yang jumlah totalnya dinormalisasi menjadi 100%, sehingga analisisnya perlu mempertimbangkan hubungan relatif antarunsur melalui pendekatan seperti Centered Log-Ratio (CLR) (Aitchison, 1986).

Penelitian ini mengembangkan analisis tersebut dengan membedakan variasi antarobjek dari variasi antarbagian pada objek yang sama. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi komposisi unsur utama, membandingkan hasil berdasarkan lokasi dan tipologi, serta mengevaluasi pola pengelompokan dan konsistensi komposisi. Hasilnya kemudian dibahas sebagai pembelajaran konseptual bagi kajian material pertahanan Indonesia, terutama mengenai pemilihan material, efisiensi sumber daya, dan standardisasi mutu. Penelitian ini tidak bermaksud menerapkan secara langsung teknologi paduan Romawi pada perlengkapan pertahanan modern.

II. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-komparatif dengan data sekunder dari van der Meulen-van der Veen (2023), yaitu 155 hasil pengukuran pXRF pada 52 crossbow brooch dari Krefeld-Gellep, Jerman. Dataset memuat sebelas unsur kimia (Cu, Sn, Zn, Pb, As, Sb, Hg, Ag, Au, Ni, dan Fe) serta informasi

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

tipologi dan lokasi pengukuran. Analisis utama difokuskan pada Cu, Sn, Zn, dan Pb karena keempat unsur tersebut paling relevan untuk menggambarkan jenis paduan tembaga. Pengukuran pXRF dilakukan pada tiga bagian bros: bow, foot, dan axis mount.

Unit pengamatan adalah pembacaan pXRF, sedangkan unit analisis untuk perbandingan antarobjek adalah 52 bros. Pengukuran dari beberapa lokasi pada satu bros dirata-ratakan untuk mencegah satu artefak dihitung sebagai beberapa objek independen. Statistik deskriptif disajikan melalui rata-rata, standar deviasi, minimum, dan maksimum. Perbandingan lokasi menggunakan 50 objek dengan pengukuran lengkap pada ketiga bagian dan diuji memakai Friedman. Perbandingan tipologi dilakukan secara deskriptif dengan tetap memperhatikan ketidakseimbangan jumlah objek pada setiap kelompok.

Pola komposisi dieksplorasi menggunakan K-Means pada data terstandardisasi dengan tiga klaster, kemudian dibandingkan dengan pengelompokan setelah transformasi CLR. Kualitas klaster dievaluasi menggunakan Silhouette Score dan kesesuaian dua hasil pengelompokan menggunakan Adjusted Rand Index (ARI). Transformasi CLR dinyatakan sebagai $\mathrm{clr}(x_i) = \ln(x_i/g(x))$, sedangkan jarak Aitchison dihitung pada ruang CLR untuk membandingkan variasi antarobjek dan antarbagian dalam objek. Analisis juga mencakup dekomposisi variasi dan uji permutasi. Karena pXRF dilakukan pada permukaan artefak yang telah mengalami korosi, hasilnya ditafsirkan sebagai komposisi permukaan, bukan kepastian komposisi inti logam; penelitian ini juga tidak menguji sifat mekanis material.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil

Sebanyak 155 pembacaan pXRF dari 52 bros menunjukkan bahwa komposisi permukaan didominasi oleh tembaga (Cu), timbal (Pb), dan timah (Sn). Rata-rata Cu mencapai 54,96%, Pb 26,21%, Sn 13,61%, dan Zn 2,47% (Tabel 1). Kandungan timbal yang relatif tinggi serta seng yang rendah menunjukkan dominasi paduan tembaga bertimbal, sejalan dengan identifikasi leaded gunmetal dan leaded bronze pada penelitian sumber. Hasil ini menggambarkan komposisi permukaan artefak dan perlu dibaca dengan mempertimbangkan pengaruh korosi.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Unsur Utama

Unsur	Rata-rata (%)	Standar deviasi	Minimum (%)	Maksimum (%)
Cu	54,96	20,44	12,87	95,81
Sn	13,61	11,06	0,03	41,96
Zn	2,47	3,05	0,04	23,63
Pb	26,21	16,95	0,52	80,06

Perbandingan tiga lokasi pengukuran memperlihatkan rata-rata Cu sebesar 57,39% pada bow, 54,30% pada foot, dan 53,16% pada axis mount. Perbedaan rata-rata juga tampak pada Sn, Zn, dan Pb (Tabel 2), tetapi uji Friedman terhadap 50 objek dengan data lengkap tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada keempat unsur utama (seluruh $p > 0,05$; Tabel 3). Dengan demikian, data belum memberikan bukti adanya perbedaan sistematis komposisi antara bow, foot, dan axis mount.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 2. Rata-Rata Komposisi Unsur Berdasarkan Lokasi Pengukuran

Unsur	Bow (%)	Foot (%)	Axis Mount (%)
Cu	57,39	54,30	53,16
Sn	12,67	14,47	13,69
Zn	2,42	2,78	2,23
Pb	26,14	26,26	26,24

Tabel 3. Hasil Uji Friedman Berdasarkan Lokasi Pengukuran

Unsur	Statistik Friedman	Nilai p	Keputusan
Cu	1,56	0,458	Tidak signifikan
Sn	0,52	0,771	Tidak signifikan
Zn	1,96	0,375	Tidak signifikan
Pb	0,84	0,657	Tidak signifikan

Perbandingan tipologi menunjukkan variasi kecenderungan komposisi antar kelompok (Tabel 4). HF 68b3 memiliki rata-rata Sn tertinggi di antara empat tipologi yang ditampilkan, yaitu 25,35%, sedangkan HF 68c2 memiliki Pb rata-rata 29,83%. Namun, komposisi objek dalam tipologi yang sama juga bervariasi. Oleh karena itu, kesamaan bentuk tidak dapat langsung dianggap sebagai bukti penggunaan resep paduan yang seragam.

Tabel 4. Rata-Rata Komposisi Berdasarkan Tipologi Bros

Tipologi	Jumlah objek	Cu (%)	Sn (%)	Zn (%)	Pb (%)
HF 68c2	20	55,38	9,40	3,03	29,83
HF 68c1	10	54,48	12,57	2,90	26,39
HF 68b3	5	46,14	25,35	2,07	24,39
HF 68c5	4	53,08	21,16	2,64	20,23

K-Means pada data terstandardisasi membentuk tiga klaster dengan karakteristik berbeda (Tabel 5). Klaster 0 memiliki rata-rata Sn dan Pb lebih tinggi serta Cu lebih rendah; Klaster 1 menunjukkan Zn tertinggi; sedangkan Klaster 2 memiliki Cu tertinggi dan Pb terendah. Silhouette Score sebesar 0,353 menunjukkan pemisahan klaster yang masih terbatas. Setelah transformasi CLR, Silhouette Score meningkat menjadi 0,390, tetapi ukuran klaster berubah dan ARI hanya 0,115 (Tabel 6). Hal ini menunjukkan bahwa hasil pengelompokan sensitif terhadap cara data komposisional diolah dan lebih tepat digunakan sebagai eksplorasi pola.

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 5. Karakteristik klaster K-Means biasa

Klaster	Jumlah objek	Cu (%)	Sn (%)	Zn (%)	Pb (%)
0	21	40,35	20,38	1,04	35,48
1	15	53,50	8,94	5,24	30,04
2	16	75,17	9,20	1,72	10,65

Tabel 6. Perbandingan K-Means biasa dan K-Means CLR

Indikator	K-Means biasa	K-Means CLR
Jumlah klaster	3	3
Jumlah objek	52	52
Silhouette Score	0,353	0,390
Ukuran klaster	21, 15, 16	31, 4, 17

Analisis jarak Aitchison menunjukkan bahwa variasi antarobjek lebih besar daripada variasi antarbagian dalam objek yang sama pada tipologi yang dibandingkan (Tabel 7). Untuk 48 objek yang masuk dalam perhitungan tersebut, rata-rata jarak antarobjek adalah 2,421, sedangkan jarak dalam objek 1,053, atau sekitar 2,30 kali lebih besar. Dekomposisi variasi menunjukkan bahwa 60,87% variasi berasal dari perbedaan antarobjek dalam tipologi yang sama, 24,89% dari perbedaan antartipologi, dan 14,24% dari variasi dalam objek (Tabel 8).

Tabel 7. Perbandingan Variasi Dalam Objek Dan Antarobjek

Tipologi	Jumlah objek	Jarak dalam objek	Jarak antarobjek	Rasio antar/dalam
HF 68c2	20	0,929	2,640	2,84
HF 68c1	10	1,415	2,842	2,01
HF 68b3	5	0,590	1,071	1,82
HF 68c5	4	1,516	2,288	1,51

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

Tabel 8. Kontribusi sumber variasi komposisi

Sumber variasi	Kontribusi
Antartipologi	24,89%
Antarobjek dalam tipologi yang sama	60,87%
Dalam objek	14,24%
Total	100%

2. Pembahasan

Temuan utama memperlihatkan bahwa bros militer Romawi Akhir dari Krefeld-Gellep cenderung menggunakan paduan tembaga bertimbal, tetapi tingkat konsistensi komposisi antarobjek tidak tinggi. Pola ini penting dalam diskusi mengenai standardisasi produksi. Van Thienen dan Lycke (2017) serta Van Thienen (2021) membahas kemungkinan standardisasi, regionalitas, dan kendali negara dalam produksi crossbow brooch. Namun, variasi kimia tidak dapat digunakan sendirian untuk memastikan lokasi bengkel atau tingkat kendali administratif. Kesamaan komposisi dapat muncul dari bahan baku atau tradisi pengerjaan yang sama, sedangkan variasi dapat pula terjadi dalam jaringan produksi yang terkoordinasi.

Variasi komposisi mungkin berkaitan dengan pencampuran logam dan penggunaan kembali bahan. Van der Meulen-van der Veen (2023) mengemukakan bahwa sebagian paduan bertimbal dengan seng rendah dapat terbentuk melalui pencampuran bahan yang berbeda. Meski demikian, data pXRF permukaan tidak cukup untuk memastikan proses tersebut. Korosi dapat mengurangi proporsi Cu dan Zn secara relatif serta memperkaya Sn dan Pb pada permukaan; lapisan dekoratif atau perlakuan permukaan juga dapat memengaruhi pembacaan (Liritzis and Zacharias, 2011; Roxburgh et al., 2019). Karena itu, angka komposisi dalam penelitian ini tidak boleh langsung diperlakukan sebagai resep asli logam inti.

Bagi kajian material pertahanan Indonesia, kasus ini memberi pembelajaran konseptual bahwa kesamaan bentuk produk belum tentu menjamin keseragaman material. Efisiensi pemanfaatan sumber daya perlu dihubungkan dengan kesesuaian bahan terhadap fungsi, sedangkan standardisasi mutu memerlukan spesifikasi material, pemeriksaan komposisi, ketertelusuran bahan baku, dan dokumentasi proses. Pemanfaatan bahan daur ulang juga perlu disertai karakterisasi dan pengujian agar variasi material tetap terkendali. Implikasi tersebut merupakan analogi manajemen material, bukan rekomendasi teknis untuk menggunakan paduan Romawi pada peralatan modern. Interpretasi tetap dibatasi oleh penggunaan pXRF pada permukaan yang telah mengalami korosi, ketidakseimbangan jumlah objek antar tipologi, dan tidak tersedianya pengujian mekanis; penelitian ini belum dapat memastikan apakah variasi berasal dari komposisi asli, korosi, atau perlakuan permukaan.

IV. KESIMPULAN

Analisis 155 pengukuran pXRF pada 52 bros militer Romawi Akhir dari Krefeld-Gellep menunjukkan dominasi Cu (54,96%), Pb (26,21%), Sn (13,61%), dan Zn (2,47%) pada permukaan artefak. Uji Friedman tidak menemukan perbedaan signifikan antara lokasi bow, foot, dan axis mount, tetapi variasi antarobjek tetap terlihat, termasuk dalam tipologi yang sama. Jarak Aitchison antarobjek sekitar 2,30 kali jarak antarbagian dalam objek, sementara variasi terbesar berasal dari perbedaan antarobjek dalam tipologi yang sama (60,87%). Hasil K-Means bersifat eksploratif karena pengelompokan berubah setelah transformasi CLR. Temuan ini menunjukkan bahwa kesamaan bentuk tidak selalu diikuti komposisi material yang seragam. Namun, pengukuran permukaan yang

e-ISSN: 2964-0849
Vol.5 No.1 November 2026
DOI :https://doi.org/10.59585/bajik

Barongko
Jurnal Ilmu Kesehatan

telah mengalami korosi belum dapat menggambarkan secara pasti komposisi inti logam. Bagi kajian material pertahanan Indonesia, kasus ini menegaskan pentingnya pemilihan material sesuai fungsi, efisiensi sumber daya, pengendalian variasi, dan standardisasi mutu. Penelitian berikutnya perlu menguji bagian inti logam dan memperluas pembandingan objek serta konteks arkeologis

DAFTAR PUSTAKA

Aitchison, J. (1986) The Statistical Analysis of Compositional Data. London: Chapman and Hall.

Heginbotham, A., Basset, J., Bourgarit, D., Eveleigh, C., Glinsman, L., Hook, D., Smith, D., Speakman, R.J., Shugar, A. and Van Langh, R. (2015) 'The copper CHARM set: A new set of certified reference materials for the standardization of quantitative X-ray fluorescence analysis of heritage copper alloys', Archaeometry, 57(5), pp. 856–868. doi: 10.1111/arcm.12117.

Liritzis, I. and Zacharias, N. (2011) 'Portable XRF of archaeological artefacts: Current research, potentials and limitations', in Shackley, M. (ed.) X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology. New York: Springer, pp. 109–142.

Roxburgh, M., Heeren, S., Huisman, D.J. and Van Os, B.J.H. (2019) 'Non-destructive survey of early Roman copper-alloy brooches using portable X-ray fluorescence spectrometry', Archaeometry, 60, pp. 1–15. doi: 10.1111/arcm.12414.

Swift, E. (2000) Regionality in Dress Accessories in the Late Roman West. Montagnac: Instrumentum Monographies 11.

van der Meulen-van der Veen, B.S. (2023) 'Chemical compositional data of the corrosion products on Late Roman military crossbow brooches: A comparative study', Journal of Archaeological Science: Reports, 48, 103839. doi: 10.1016/j.jasrep.2023.103839.

Van Thienen, V. (2021) 'State control, regionality or guidelines? The production of the crossbow brooch', in Hoss, S. (ed.) The Production of Military Equipment – Fabricae, Private Production and More. Heidelberg: Propylaeum, pp. 47–57.

Van Thienen, V. and Lycke, S. (2017) 'From commodity to singularity: The production of crossbow brooches and the rise of the Late Roman military elite', Journal of Archaeological Science, 82, pp. 50–61. doi: 10.1016/j.jas.2017.04.005.