



Pendekatan Statistical Mass Balancing Menggunakan JK Metal Accounting (JKMA) Pada Industri Pertambangan

Dian Paramita

Program Studi Teknik Metalurgi, Universitas Teknologi Sumbawa, Nusa Tenggara Barat, Indonesia

E-mail: dianparamita523@gmail.com

Article Info

Article history:

Received August 28, 2026
Revised September 01, 2026
Accepted September 03, 2026

Keywords:

Metal Accounting, Statistical Mass Balancing, Weighted Least Squares, JK Metal Accounting, Data Reconciliation, Measurement Uncertainty, AMIRA P754

ABSTRACT

Background: Metal accounting requires production data that can be traced and reconciled against the principles of mass and metal conservation. In mineral processing, measured data are subject to uncertainty arising from measurement, sampling, sample preparation, and laboratory analysis. Statistical mass balancing provides a framework for adjusting measured data to satisfy balance constraints while accounting for measurement uncertainty. Research Objective: This article develops a methodological framework for applying statistical mass balancing using JK Metal Accounting (JKMA) through the Weighted Least Squares (WLS) method. Research Methods: The framework focuses on measured data, process flowsheet modelling, mass and metal balance constraints, measurement uncertainty, fitting, and evaluation of balancing results. JKMA is positioned as a balance engine for obtaining balanced data across a process network. Research Results: Fitted value, fitted standard deviation, Weighted Sum of Squares (WSSQ), Pooled Standard Error (PSE), iteration count, and convergence are used to evaluate the optimisation process and the resulting balanced data. Conclusion: The framework does not use, display, or analyse confidential operational data or datasets provided for thesis purposes. It therefore provides a methodological basis for future studies using publicly available data, synthetic datasets, or other non-confidential sources.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received August 28, 2026
Revised September 01, 2026
Accepted September 03, 2026

Kata Kunci:

Metal Accounting, Statistical Mass Balancing, Weighted Least Squares, JK Metal Accounting, Data Reconciliation, Measurement Uncertainty, AMIRA P754

ABSTRAK

Latar Belakang: Metal accounting membutuhkan data produksi yang dapat ditelusuri dan direkonsiliasi terhadap prinsip konservasi massa dan logam. Dalam pengolahan mineral, data hasil pengukuran memiliki ketidakpastian yang berasal dari pengukuran, sampling, preparasi sampel, dan analisis laboratorium. Statistical mass balancing menyediakan kerangka untuk menyesuaikan data pengukuran terhadap batasan neraca dengan tetap mempertimbangkan ketidakpastian pengukuran. Tujuan Penelitian: Artikel ini menyusun kerangka metodologis penerapan statistical mass balancing menggunakan JK Metal Accounting (JKMA) melalui metode Weighted Least Squares (WLS) untuk mendukung rekonsiliasi pada sistem metal accounting. Metode Penelitian: Pembahasan difokuskan pada hubungan antara data pengukuran, model flowsheet, batasan neraca massa dan neraca logam, ketidakpastian pengukuran, proses fitting, serta evaluasi hasil balancing. JKMA ditempatkan sebagai balance engine untuk



memperoleh balanced data dari jaringan proses. Hasil Penelitian: Fitted value, fitted standard deviation, Weighted Sum of Squares (WSSQ), Pooled Standard Error (PSE), jumlah iterasi, dan convergence digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi proses optimisasi dan hasil balancing. Kesimpulan: Artikel ini tidak menggunakan, menampilkan, atau menganalisis data operasional rahasia maupun dataset yang diberikan untuk keperluan tesis. Kerangka yang disusun ditujukan sebagai dasar metodologis untuk penerapan pada data publik, data simulasi, atau sumber data lain yang tidak dibatasi kerahasiaan.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Dian Paramita

Universitas Teknologi Sumbawa

E-mail: dianparamita523@gmail.com

PENDAHULUAN

Metal accounting merupakan salah satu instrumen penting dalam pengendalian produksi di industri pertambangan karena memungkinkan penelusuran pergerakan material dan kandungan logam serta akuntabilitas distribusinya di sepanjang rantai proses. Dalam penerapannya, reconciliation berperan dalam menghubungkan informasi hasil pengukuran yang berasal dari berbagai sumber dan periode untuk memperoleh gambaran produksi yang konsisten. Macfarlane (2015) mengidentifikasi reconciliation sebagai bagian penting dari mekanisme pengendalian dan tata kelola pada rantai nilai pertambangan. Sementara itu, Ghorbani et al. (2022) menegaskan bahwa sistem metal accounting perlu didukung oleh karakteristik yang terintegrasi, traceable, dan auditable. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas data pengukuran dan konsistensi informasi yang dihasilkan merupakan aspek mendasar dalam mendukung pengendalian produksi berbasis metal accounting.

Pada proses pengolahan mineral, informasi produksi diperoleh melalui serangkaian aktivitas yang mencakup pengukuran massa, sampling aliran proses, preparasi sampel, serta analisis kadar. Rangkaian tersebut menyebabkan data hasil pengukuran selalu memiliki tingkat ketidakpastian tertentu (measurement uncertainty). Ramsey dan Rostrom (2024) menjelaskan bahwa ketidakpastian dapat terbentuk sejak tahap primary sampling dan terus berkontribusi melalui tahapan preparasi sampel hingga analisis laboratorium. Oleh sebab itu, ketidaksesuaian nilai yang ditemukan antar-stream tidak selalu dapat dipandang sebagai akibat dari kesalahan pada satu instrumen atau lokasi pengukuran tertentu. Interpretasi terhadap perbedaan tersebut perlu mempertimbangkan karakteristik dan akumulasi ketidakpastian yang terdapat dalam keseluruhan sistem pengukuran.

Persoalan tersebut menempatkan konsistensi data terhadap hubungan fisik proses sebagai salah satu aspek penting dalam reconciliation. Data reconciliation memungkinkan variabel proses diestimasi kembali agar lebih konsisten dengan hubungan fisik yang telah diketahui. Dalam sistem pengolahan mineral, pendekatan ini dapat mengakomodasi parameter seperti laju alir dan kadar secara bersamaan dengan prinsip konservasi massa dan unsur



(Sadeghi et al., 2018). Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah statistical mass balancing, yaitu pendekatan yang mempertimbangkan ketidakpastian pengukuran dalam proses penyesuaian data terhadap batasan neraca. Dengan demikian, hasil rekonsiliasi tidak hanya diarahkan untuk mendekati nilai pengukuran awal, tetapi juga untuk memperoleh sekumpulan nilai yang konsisten dengan hubungan neraca yang merepresentasikan kondisi fisik sistem proses.

Penerapan statistical mass balancing dapat dilakukan melalui Weighted Least Squares (WLS) sebagai pendekatan optimisasi yang mempertimbangkan perbedaan tingkat ketidakpastian antar-pengukuran. Melalui pembobotan tersebut, kontribusi setiap data terhadap proses rekonsiliasi dapat disesuaikan dengan karakteristik ketidakpastiannya. Pendekatan WLS selanjutnya memungkinkan penyesuaian data dilakukan dengan tetap mempertimbangkan mass balance dan metal balance sebagai bagian dari hubungan yang harus dipenuhi oleh model proses. Meskipun demikian, kualitas hasil balancing tidak hanya bergantung pada algoritma optimisasi yang digunakan. Representasi jaringan proses, karakteristik data pengukuran, penetapan measurement uncertainty, serta kesesuaian solusi terhadap kondisi fisik proses turut menentukan keandalan hasil rekonsiliasi.

Dalam implementasi metal accounting, JK Metal Accounting (JKMA) dapat dimanfaatkan sebagai balance engine untuk melakukan mass balancing pada jaringan proses. Dokumentasi Datamine menjelaskan bahwa JKMetAccount digunakan untuk melakukan balancing massa, sementara pengembangan Production Accounting pada versi yang lebih baru mengintegrasikan fungsi tersebut dengan fitur integrasi data, validasi, perhitungan, approval, dan audit trail (Datamine Software, 2025a, 2025b). Integrasi tersebut menunjukkan bahwa aktivitas balancing dapat menjadi bagian dari rangkaian pengelolaan dan pengendalian data produksi yang lebih luas. Namun demikian, pemanfaatan JKMA sebagai balance engine untuk mendukung statistical mass balancing memerlukan kerangka metodologis yang mampu menjelaskan hubungan antara data pengukuran, representasi proses, measurement uncertainty, proses fitting, dan hasil balancing secara terstruktur.

Kajian mengenai metal accounting, data reconciliation, dan statistical mass balancing telah berkembang dalam konteks pengelolaan data proses dan rekonsiliasi neraca. Akan tetapi, masih diperlukan suatu kerangka yang secara khusus mengintegrasikan pendekatan statistical mass balancing dan WLS dengan penggunaan JKMA sebagai balance engine. Kebutuhan tersebut tidak hanya berkaitan dengan proses memperoleh nilai hasil rekonsiliasi, tetapi juga dengan bagaimana measurement uncertainty berperan dalam proses penyesuaian data serta bagaimana kualitas solusi dapat dievaluasi dari perspektif statistik dan fisik. Permasalahan ini menjadi relevan karena keberhasilan optimisasi secara algoritmik, termasuk tercapainya convergence, belum dapat dijadikan satu-satunya dasar untuk menyatakan bahwa hasil balancing telah merepresentasikan kondisi proses secara fisik. Dengan demikian, diperlukan pendekatan yang menghubungkan proses pemodelan, rekonsiliasi data, pemenuhan neraca, dan evaluasi hasil dalam satu kerangka yang koheren.

Atas dasar kebutuhan tersebut, kebaruan artikel ini terletak pada pengembangan kerangka metodologis penerapan statistical mass balancing menggunakan JKMA melalui pendekatan Weighted Least Squares dengan mempertimbangkan measurement uncertainty sebagai bagian integral dari proses rekonsiliasi. Kerangka yang dikembangkan menempatkan JKMA sebagai balance engine untuk memperoleh balanced data dari jaringan proses, sementara



prinsip WLS digunakan untuk merepresentasikan hubungan antara penyesuaian data dan ketidakpastian pengukuran. Pendekatan ini memandang balancing sebagai suatu proses yang tidak berhenti pada pemenuhan persamaan neraca, tetapi mencakup keterkaitan antara representasi sistem proses, kualitas data, ketidakpastian pengukuran, optimisasi, serta evaluasi terhadap kewajaran hasil.

Berdasarkan kerangka tersebut, artikel ini bertujuan menyusun dan menjelaskan kerangka metodologis penerapan statistical mass balancing menggunakan JKMA melalui metode Weighted Least Squares, dengan menitikberatkan pada keterkaitan antara measured data, model flowsheet, mass and metal balance constraints, measurement uncertainty, proses fitting, dan evaluasi balanced data. Penelitian ini tidak diarahkan untuk menguji penerapan framework pada suatu operasi pengolahan mineral tertentu dan tidak menggunakan, menampilkan, ataupun menganalisis data operasional yang bersifat rahasia maupun dataset yang diberikan untuk keperluan tesis. Oleh karena itu, kerangka yang dihasilkan ditujukan sebagai dasar metodologis yang dapat dikembangkan dan diterapkan pada penelitian selanjutnya dengan menggunakan data publik, data simulasi, maupun sumber data lain yang tidak memiliki pembatasan kerahasiaan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan methodological study yang didukung oleh kajian literatur dan dokumentasi teknis mengenai metal accounting, data reconciliation, statistical mass balancing, measurement uncertainty, Weighted Least Squares (WLS), dan JK Metal Accounting (JKMA). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berorientasi pada penyusunan kerangka metodologis untuk menjelaskan penerapan statistical mass balancing secara sistematis, bukan untuk menguji kinerja balancing pada kondisi operasional suatu fasilitas pengolahan mineral tertentu. Sumber informasi diperoleh dari publikasi ilmiah dan dokumentasi teknis yang relevan dengan prinsip reconciliation, statistical mass balancing, serta penggunaan perangkat yang mendukung proses metal accounting.

Penyusunan kerangka metodologis dilakukan melalui tahapan identifikasi konsep, penelaahan keterkaitan antarkomponen, dan sintesis prosedur penerapan statistical mass balancing menggunakan JKMA. Literatur ilmiah digunakan untuk memperoleh landasan mengenai data reconciliation, measurement uncertainty, dan Weighted Least Squares, sedangkan dokumentasi teknis digunakan untuk memahami fungsi serta keluaran yang berkaitan dengan JKMA. Informasi yang diperoleh dari kedua sumber tersebut kemudian dianalisis dan diintegrasikan untuk membentuk hubungan metodologis antara measured data, model flowsheet, parameter fitting, uncertainty, proses balancing, dan evaluasi hasil.

Tahap penyusunan model dimulai dengan menetapkan batas sistem dan periode rekonsiliasi yang menjadi ruang lingkup analisis. Penetapan batas sistem dilakukan untuk menentukan material yang memasuki sistem, meninggalkan sistem, maupun berpindah antarbagian dalam jaringan proses. Setiap stream selanjutnya didefinisikan berdasarkan identitas, arah aliran, serta parameter pengukuran yang relevan, seperti massa material dan kadar unsur. Hubungan antar-stream kemudian direpresentasikan dalam bentuk flowsheet yang menggambarkan jaringan proses secara matematis. Flowsheet tersebut menjadi dasar dalam membentuk hubungan antarparameter serta merumuskan mass balance dan metal balance constraints. Pada jaringan proses yang kompleks, penyelesaian model dapat melibatkan proses



iteratif untuk memperoleh solusi yang konsisten dengan hubungan neraca (Cresswell, 2025). Oleh karena itu, ketepatan struktur flowsheet menjadi aspek fundamental karena kesalahan dalam menentukan konektivitas atau arah aliran dapat menghasilkan constraint yang tidak sesuai dan tidak dapat diperbaiki hanya melalui peningkatan jumlah iterasi.

Setelah struktur flowsheet ditetapkan, measured data ditetapkan ke dalam parameter proses yang sesuai dengan model. Parameter yang digunakan dapat berupa massa material, kadar unsur, maupun variabel lain yang memiliki keterkaitan dengan hubungan neraca. Pada model multi-element, beberapa unsur dapat dilibatkan secara simultan sehingga hubungan konservasi masing-masing unsur dapat dipertimbangkan dalam proses rekonsiliasi. Selanjutnya, parameter yang akan mengalami fitting ditentukan berdasarkan karakteristik pengukuran, struktur model, dan tujuan rekonsiliasi. Tidak seluruh data yang tersedia harus dijadikan parameter fitting karena pemilihannya bergantung pada kebutuhan model dan kualitas informasi pengukuran. Parameter yang dilibatkan dalam proses fitting perlu disertai informasi measurement uncertainty yang sesuai agar tingkat kepercayaan terhadap masing-masing pengukuran dapat direpresentasikan dalam proses optimisasi.

Measurement uncertainty kemudian ditetapkan sebagai informasi yang digunakan dalam pembobotan statistical mass balancing. Nilai uncertainty harus merepresentasikan karakteristik sistem pengukuran dan tidak ditentukan secara arbitrer berdasarkan hasil balancing. Sumber ketidakpastian dapat mencakup pengukuran massa, sampling, preparasi sampel, dan analisis kadar. Untuk setiap parameter fitting, uncertainty dinyatakan dalam bentuk yang sesuai dengan karakteristik pengukurannya. Apabila model menggunakan representasi relatif, uncertainty dapat dinyatakan melalui relative standard deviation atau RSD. Penetapan uncertainty dilakukan sebelum proses fitting sehingga informasi tersebut menjadi bagian dari input model. Pada model yang melibatkan banyak parameter dan unsur, konsistensi penetapan uncertainty menjadi semakin penting karena setiap parameter dapat memberikan kontribusi yang berbeda terhadap fungsi objektif. Ketidaksesuaian antara nilai uncertainty dan karakteristik pengukuran dapat memengaruhi bobot relatif parameter serta menghasilkan penyesuaian yang tidak merepresentasikan tingkat kepercayaan sebenarnya terhadap measured data.

Statistical mass balancing selanjutnya diformulasikan menggunakan pendekatan Weighted Least Squares (WLS). Pendekatan ini digunakan untuk memperoleh estimasi parameter yang memenuhi hubungan neraca dengan meminimalkan residual antara measured value dan fitted value berdasarkan bobot yang ditentukan oleh measurement uncertainty. Fungsi objektif WLS secara sederhana dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{minimize} = \sum_i \left[\frac{x_i - \hat{x}_i}{\sigma_i} \right]^2$$

Dengan sebagai $\hat{x}_i$ measured value, x_i sebagai fitted value atau balanced value, dan $\sum_i$ sebagai representasi measurement uncertainty. Fungsi objektif tersebut diselesaikan bersama constraints yang dibentuk berdasarkan hubungan fisik dalam model proses, termasuk mass balance dan metal balance (Sadeghi et al., 2018). Mekanisme pembobotan menyebabkan besarnya penyesuaian terhadap measured value dipengaruhi oleh tingkat uncertainty yang melekat pada setiap parameter. Dengan demikian, pengukuran dengan uncertainty yang lebih rendah memperoleh bobot yang lebih besar dibandingkan pengukuran dengan uncertainty yang lebih



tinggi. Balanced value merupakan hasil penyesuaian yang mempertimbangkan kedekatan terhadap measured data sekaligus kebutuhan untuk memenuhi constraints dalam model proses.

Setelah measured data, parameter fitting, uncertainty, dan constraints ditetapkan, proses balancing dilakukan menggunakan JKMA sebagai balance engine. Model proses digunakan untuk memperoleh sekumpulan nilai parameter yang konsisten dengan hubungan neraca yang telah ditetapkan. Nilai sebelum optimisasi digunakan sebagai value atau measured value, sedangkan nilai yang diperoleh setelah proses fitting dinyatakan sebagai fitted value atau balanced value. Perbandingan antara measured value dan fitted value digunakan untuk melihat besarnya penyesuaian yang terjadi pada masing-masing parameter selama proses rekonsiliasi. Selain fitted value, hasil balancing dapat mencakup fitted standard deviation (fitted SD) sebagai informasi tambahan mengenai ketidakpastian yang berkaitan dengan hasil estimasi setelah rekonsiliasi. Interpretasi fitted SD mengikuti definisi dan implementasi pada versi JKMA yang digunakan. Proses fitting dapat berlangsung secara iteratif hingga kriteria convergence yang ditetapkan oleh sistem tercapai.

Selain hubungan neraca, proses balancing mempertimbangkan batas fisik yang relevan terhadap parameter. Prinsip non-negativity dapat diterapkan pada parameter seperti massa dan laju alir yang secara fisik tidak dapat bernilai negatif, sedangkan parameter tertentu dapat memiliki rentang nilai berdasarkan karakteristik proses atau batas pengukuran yang dapat diterima. Penerapan batas fisik bertujuan memastikan bahwa solusi hasil optimisasi tidak hanya memenuhi persamaan neraca, tetapi juga berada dalam ruang solusi yang dapat diterima secara fisik. Apabila solusi memenuhi constraints neraca tetapi menghasilkan parameter yang berada di luar batas fisik yang ditentukan, hasil tersebut perlu ditinjau dan tidak dapat secara langsung dikategorikan sebagai balanced data yang valid.

Evaluasi hasil balancing dilakukan dengan mempertimbangkan aspek statistik, algoritmik, dan fisik. Indikator yang digunakan meliputi Weighted Sum of Squares (WSSQ), Pooled Standard Error (PSE), jumlah iterasi, convergence, fitted value, fitted SD, pemenuhan mass balance dan metal balance, serta kesesuaian terhadap batas fisik. WSSQ digunakan untuk menggambarkan besarnya residual berbobot dalam fungsi objektif, sedangkan PSE memberikan ukuran agregat residual dengan mempertimbangkan derajat kebebasan model. Interpretasi kedua indikator tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan jumlah parameter, struktur model, serta measurement uncertainty yang digunakan sebagai input. Jumlah iterasi dan convergence digunakan untuk menilai proses optimisasi secara algoritmik, tetapi tidak dijadikan sebagai bukti tunggal validitas hasil karena convergence tidak secara otomatis menunjukkan terpenuhinya kewajaran fisik. Fitted value dibandingkan dengan measured value untuk mengidentifikasi perubahan parameter selama proses rekonsiliasi, sedangkan fitted SD digunakan sebagai informasi pendukung mengenai ketidakpastian hasil estimasi. Pemeriksaan akhir dilakukan terhadap pemenuhan mass balance dan metal balance serta kesesuaian fitted value dengan batas fisik yang telah ditentukan. Dengan demikian, hasil balancing dinilai melalui kombinasi indikator statistik, hasil optimisasi, pemenuhan hubungan neraca, dan kewajaran fisik solusi.

Berdasarkan keseluruhan tahapan tersebut, penerapan statistical mass balancing menggunakan JKMA dalam sistem metal accounting dirumuskan melalui alur yang mencakup penetapan batas sistem dan periode rekonsiliasi, penyusunan flowsheet dan hubungan antar-stream, pemetaan measured data dan parameter fitting, penetapan measurement uncertainty, pelaksanaan balancing menggunakan JKMA, evaluasi hasil fitting dan indikator optimisasi, serta



review dan dokumentasi sebelum balanced data digunakan dalam proses metal accounting. Balancing ditempatkan sebagai salah satu bagian dari siklus pengendalian data produksi yang terhubung dengan proses validasi, review, approval, dan dokumentasi. Datamine menjelaskan bahwa Production Accounting mendukung integrasi data, validasi, penyimpanan historis, approval, dan audit trail sehingga proses balancing dapat diintegrasikan ke dalam sistem pengelolaan data produksi yang lebih luas (Datamine Software, n.d.). Dengan demikian, balanced data diposisikan tidak hanya sebagai keluaran numerik dari proses optimisasi, tetapi sebagai informasi hasil rekonsiliasi yang perlu ditinjau, didokumentasikan, dan dapat ditelusuri dalam sistem metal accounting.

Penelitian ini tidak menggunakan, menampilkan, ataupun menganalisis data operasional yang bersifat rahasia maupun dataset yang diberikan untuk keperluan tesis. Oleh karena itu, kerangka yang dikembangkan tidak diarahkan untuk menghasilkan estimasi produksi atau mengevaluasi kinerja suatu operasi pengolahan mineral tertentu. Penerapan terhadap data aktual, data publik, maupun data simulasi dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya sebagai tahap validasi empiris terhadap kerangka metodologis yang telah disusun.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penyusunan kerangka metodologis menunjukkan bahwa statistical mass balancing dapat dipahami sebagai suatu proses estimasi berbasis model yang mengintegrasikan informasi hasil pengukuran dengan hubungan fisik dalam jaringan proses. Measured data menjadi informasi awal yang digunakan dalam proses rekonsiliasi, sedangkan model neraca berfungsi menghubungkan parameter dan stream melalui constraint yang merepresentasikan hubungan fisik sistem. Dalam mekanisme tersebut, Weighted Least Squares (WLS) digunakan untuk menentukan penyesuaian terhadap hasil pengukuran dengan mempertimbangkan measurement uncertainty. Balanced data yang dihasilkan, dengan demikian, tidak sekadar merupakan perubahan terhadap nilai awal, tetapi merupakan estimasi yang diperoleh melalui keseimbangan antara informasi pengukuran dan pemenuhan constraint yang ditetapkan oleh model proses.

Penggunaan model multi-element memungkinkan beberapa unsur dianalisis secara simultan dalam jaringan proses yang sama. Kondisi ini memberikan representasi yang lebih menyeluruh terhadap hubungan antar-parameter, tetapi sekaligus meningkatkan kompleksitas model karena semakin banyak hubungan neraca yang harus dipenuhi. Konsekuensinya, peningkatan jumlah parameter atau unsur yang dilibatkan dalam fitting tidak dapat secara langsung diartikan sebagai peningkatan kualitas hasil balancing. Keandalan solusi tetap dipengaruhi oleh kualitas measured data, ketepatan measurement uncertainty, struktur flowsheet, konfigurasi parameter fitting, serta kemampuan model mencapai convergence tanpa menghasilkan nilai yang tidak sesuai dengan karakteristik fisik proses. Oleh karena itu, kompleksitas model perlu diimbangi dengan konsistensi data input dan ketepatan asumsi yang mendasari pembentukan model.

Peran measurement uncertainty menjadi semakin penting ketika hasil balancing digunakan untuk menentukan besarnya penyesuaian terhadap measured value. Ketidakpastian pengukuran tidak hanya berasal dari instrumen, tetapi dapat mencakup berbagai tahapan dalam rantai pengukuran, termasuk sampling, preparasi sampel, dan analisis laboratorium. Ramsey dan Rostron (2024) menunjukkan bahwa kontribusi uncertainty dapat muncul sejak primary sampling dan berlanjut hingga tahapan preparasi serta analisis. Dalam statistical mass



balancing, informasi tersebut digunakan sebagai dasar pembobotan sehingga pengukuran dengan tingkat ketidakpastian yang berbeda dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap solusi fitting. Dengan demikian, proses balancing tidak menghilangkan uncertainty yang terdapat dalam data, melainkan memasukkan informasi tersebut ke dalam mekanisme penyesuaian agar distribusi perubahan terhadap measured value tetap mempertimbangkan kualitas relatif setiap pengukuran.

Hasil proses fitting dapat diamati melalui perubahan antara measured value dan fitted value. Besarnya perubahan tersebut memberikan informasi mengenai parameter yang memperoleh penyesuaian relatif besar dalam upaya memenuhi constraint model. Parameter dengan perubahan yang signifikan perlu menjadi perhatian pada tahap review karena dapat berkaitan dengan tingkat uncertainty, ketidaksesuaian antara data pengukuran dan model, maupun kemungkinan permasalahan pada struktur flowsheet atau input data. Fitted standard deviation (fitted SD) memberikan informasi tambahan mengenai ketidakpastian yang berkaitan dengan hasil estimasi setelah rekonsiliasi. Namun, interpretasi fitted SD perlu disesuaikan dengan definisi dan implementasi pada versi JKMA yang digunakan sehingga penggunaannya dalam evaluasi harus tetap mempertimbangkan konteks model dan konfigurasi balancing.

Evaluasi terhadap kualitas hasil balancing tidak cukup dilakukan berdasarkan satu indikator. Weighted Sum of Squares (WSSQ) dan Pooled Standard Error (PSE) memberikan informasi mengenai karakteristik residual dan hasil optimisasi secara statistik, sedangkan pemeriksaan mass balance, metal balance, serta batas fisik memberikan perspektif teknis terhadap kewajaran solusi. WSSQ yang lebih rendah menunjukkan residual berbobot yang lebih kecil terhadap measured value, tetapi nilainya dipengaruhi oleh jumlah parameter, struktur model, dan measurement uncertainty. Demikian pula, PSE dapat memberikan gambaran agregat mengenai residual dengan mempertimbangkan derajat kebebasan model, tetapi nilai yang rendah tidak secara mandiri membuktikan bahwa solusi telah memenuhi validitas fisik. Oleh sebab itu, kedua indikator tersebut perlu dibaca bersama informasi lain yang dihasilkan selama proses balancing.

Jumlah iterasi dan convergence juga memberikan informasi mengenai proses optimisasi yang berlangsung. Jumlah iterasi menunjukkan banyaknya tahapan komputasi yang diperlukan hingga kriteria penghentian tercapai, sedangkan convergence menunjukkan bahwa kriteria penghentian algoritmik telah dipenuhi. Meskipun demikian, convergence tidak dapat diperlakukan sebagai bukti tunggal bahwa hasil balancing telah valid. Solusi yang telah mencapai convergence masih harus diperiksa terhadap pemenuhan mass balance dan metal balance, fitted value, fitted SD, WSSQ, PSE, serta batas fisik yang berlaku. Dengan demikian, keberhasilan algoritmik perlu dibedakan dari validitas statistik dan kewajaran fisik hasil yang diperoleh.

Dalam kerangka metodologis ini, JKMA ditempatkan sebagai balance engine yang mendukung pelaksanaan balancing pada jaringan metal accounting. Perangkat tersebut menyediakan mekanisme komputasi untuk mengolah hubungan antar-stream dan menghasilkan parameter hasil rekonsiliasi. Namun, keberadaan balance engine tidak menghilangkan kebutuhan terhadap pengendalian kualitas data dan pemahaman mengenai karakteristik proses yang dimodelkan. Ketepatan hasil tetap bergantung pada penyusunan flowsheet, kualitas measured data, penetapan measurement uncertainty, pemilihan parameter fitting, serta constraint yang digunakan. Dengan demikian, JKMA berfungsi sebagai perangkat untuk



menjalankan proses balancing secara sistematis, sedangkan validitas hasil tetap ditentukan oleh kualitas model, data, dan asumsi yang mendasarinya.

Secara keseluruhan, hasil penyusunan kerangka menunjukkan bahwa statistical mass balancing sebaiknya ditempatkan sebagai bagian yang terintegrasi dalam siklus pengendalian data pada metal accounting. Proses tersebut mencakup pembentukan representasi jaringan melalui flowsheet, penetapan parameter dan measurement uncertainty, pelaksanaan fitting menggunakan WLS, serta evaluasi balanced data berdasarkan indikator statistik dan pemeriksaan teknis. Hasil rekonsiliasi selanjutnya dapat menjadi bagian dari proses review, approval, dan dokumentasi sebelum digunakan dalam pelaporan produksi. Pendekatan ini menempatkan balancing bukan hanya sebagai prosedur untuk memenuhi persamaan neraca, tetapi sebagai mekanisme untuk menghasilkan informasi yang lebih konsisten, dapat ditelusuri, dan dapat dievaluasi berdasarkan dasar statistik maupun karakteristik fisik proses.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena berfokus pada penyusunan kerangka metodologis dan tidak melakukan validasi empiris menggunakan dataset operasional tertentu. Kondisi tersebut menyebabkan efektivitas kerangka terhadap variasi komoditas mineral, konfigurasi flowsheet, jumlah unsur, serta karakteristik data belum dapat dievaluasi secara kuantitatif. Oleh karena itu, penerapan pada sistem pengolahan mineral yang berbeda masih memerlukan pengujian lebih lanjut menggunakan data publik, data simulasi, synthetic dataset, atau sumber data lain yang dapat digunakan secara sah untuk keperluan penelitian dan publikasi.

Synthetic dataset dapat menjadi pendekatan yang relevan untuk menguji karakteristik kerangka secara transparan dan dapat direplikasi. Dataset tersebut dapat dikembangkan dengan memberikan variasi pada Relative Standard Deviation (RSD), jumlah parameter fitting, tingkat noise pada measured data, kompleksitas flowsheet, jumlah unsur yang direkonsiliasi, serta batas fisik yang diterapkan. Pengujian tersebut memungkinkan pengaruh masing-masing faktor terhadap fitted value, fitted SD, WSSQ, PSE, jumlah iterasi, convergence, dan pemenuhan neraca dianalisis secara kuantitatif. Dengan demikian, evaluasi dapat dilakukan tanpa bergantung pada data operasional perusahaan yang bersifat rahasia.

Arah pengembangan lainnya adalah pengujian penerapan two-step balance sebagai bagian dari proses rekonsiliasi bertahap. Pada pendekatan ini, balancing awal dapat digunakan untuk memperoleh kondisi data yang lebih konsisten berdasarkan konfigurasi parameter dan constraint tertentu, kemudian hasil tersebut dimanfaatkan sebagai kondisi awal pada tahap balancing berikutnya dengan cakupan parameter yang lebih luas. Strategi tersebut berpotensi diterapkan pada jaringan dengan kompleksitas flowsheet atau jumlah parameter yang tinggi. Meskipun demikian, manfaat dan efektivitas two-step balance masih perlu dibuktikan melalui pengujian kuantitatif menggunakan dataset non-rahasia. Perbandingan dengan pendekatan balancing satu tahap dapat dilakukan berdasarkan WSSQ, PSE, convergence, perubahan fitted value, pemenuhan mass balance dan metal balance, serta kewajaran fisik parameter yang dihasilkan.

KESIMPULAN

Statistical mass balancing menggunakan Weighted Least Squares menyediakan kerangka untuk merekonsiliasi data pengukuran terhadap prinsip konservasi massa dan neraca logam dengan mempertimbangkan ketidakpastian. Dalam JKMA, balancing dilakukan pada



jaringan flowsheet sehingga hubungan antar-stream dan parameter dapat dievaluasi secara terpadu.

Evaluasi hasil perlu mencakup fitted value, fitted SD, WSSQ, PSE, iterasi, convergence, pemenuhan neraca, dan batas fisik. Tidak satu pun indikator sebaiknya digunakan secara tunggal. Kombinasi indikator statistik dan pemeriksaan teknis diperlukan agar balanced data tidak hanya memenuhi kriteria matematis, tetapi juga tetap memiliki makna fisik.

Kerangka ini dapat menjadi dasar penelitian berikutnya menggunakan data publik atau synthetic dataset sehingga validasi kuantitatif dapat dilakukan secara transparan dan dapat direplikasi tanpa menggunakan data operasional rahasia.

DAFTAR PUSTAKA

- Chieregati, A. C., Prado, G. C., Fernandes, F. L., Villanova, F. L. S. P., & Dominy, S. C. (2023). A comparison between the standard heterogeneity test and the simplified segregation free analysis for sampling protocol optimisation. *Minerals*, 13(5), 680. <https://doi.org/10.3390/min13050680>
- Cresswell, M. (2025). Mass balancing for coal processing plant design. *MATEC Web of Conferences*, 416, 07005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202541607005>
- Datamine Software. (2025a). Datamine Production Accounting 1.14.0 public release. <https://dataminesoftware.com/production-accounting-1-14-0-public-release/>
- Datamine Software. (2025b). Production Accounting 1.14.0 release notes. <https://docs.dataminesoftware.com/ProductionAccounting/Production%20Accounting%201.14.0%20Release%20Notes.pdf>
- Datamine Software. (2025c). Datamine Production Symposium 2025 – Production Accounting Part 2/3 [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=UGXN437LaRk>
- Datamine Software. (n.d.). Production Accounting. <https://dataminesoftware.com/production-accounting/>
- Ghorbani, Y., Nwaila, G. T., & Chirisa, M. (2022). Systematic framework toward a highly reliable approach in metal accounting. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 43(5), 664–678. <https://doi.org/10.1080/08827508.2020.1784164>
- Macfarlane, A. S. (2015). Reconciliation along the mining value chain. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(8), 679–685. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/V115N8A3>
- Ramsey, M. H., & Rostron, P. D. (2024). Measurement uncertainty from sampling and its role in validation of measurement procedures. *Accreditation and Quality Assurance*, 29(2), 153–162. <https://doi.org/10.1007/s00769-024-01575-0>
- Sadeghi, M., Hodouin, D., & Bazin, C. (2018). Mineral processing plant data reconciliation including mineral mass balance constraints. *Minerals Engineering*, 123, 117–127. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.04.023>