© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 5 (2026) : 1307-1314 *ISSN 1829-8907*

Analisis Aliran dan Efisiensi Material pada Proses Pemesinan Kayu Solid Menggunakan Pendekatan Neraca Massa

Anshah Silmi Afifah*, Alfani Risman Nugroho, Nurmadina, Dhian Juwitasari, dan Taufik Ramadhan Fitriyanto

Program Studi Teknik Produksi Furnitur, Politeknik Industri Furnitur dan Pengolahan Kayu, Indonesia; e-mail: anshah.silmi@poltek-furnitur.ac.id

ABSTRAK

Proses pemesinan kayu solid menghasilkan reduksi material yang tidak dapat dihindari selama konversi bahan baku menjadi komponen produk. Namun, informasi mengenai distribusi aliran material dan proporsi material yang tidak berhasil dikumpulkan kembali pada setiap tahapan pemesinan masih terbatas, terutama pada skala workshop. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi distribusi reduksi material dan fraksi material tidak terkumpul pada proses pemesinan kayu solid menggunakan pendekatan neraca massa (mass balance). Analisis dilakukan pada tahapan *ripsaw, jumpsaw, single planer,* dan *thicknesser* dalam satu siklus produksi menggunakan satu papan kayu durian *(Durio zibethinus)* sebagai satu sampel produksi (n = 1) untuk menghasilkan dua unit bench. Massa teoritis reduksi material dihitung berdasarkan perubahan dimensi komponen dan massa jenis kayu, kemudian dibandingkan dengan massa material yang berhasil dikumpulkan pada setiap proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa total reduksi material teoritis mencapai 5.436,56 g, dengan 4.378,50 g berhasil dikumpulkan kembali dan 1.058,06 g tidak berhasil dikumpulkan. Tingkat pemulihan material mencapai 80,54%, sedangkan fraksi material tidak terkumpul secara keseluruhan sebesar 19,46%. Distribusi reduksi material didominasi oleh proses pengurangan ketebalan yang berkontribusi sebesar 46,7% terhadap total reduksi material. Nilai fraksi material tidak terkumpul tertinggi juga ditemukan pada proses pengurangan ketebalan (0,247), sedangkan nilai terendah terdapat pada proses ketam (0,147). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik material hasil reduksi pada setiap tahapan pemesinan berkaitan dengan keterpulihan material, dengan proses thicknessing menunjukkan kontribusi material tidak terkumpul paling besar. Pendekatan neraca massa dapat digunakan untuk mengidentifikasi material yang tidak berhasil dikumpulkan melalui sistem pengumpulan dan menjadi dasar evaluasi efisiensi pemanfaatan bahan baku pada proses pemesinan kayu solid.

Kata kunci: aliran material, efisiensi pemulihan material, material tidak terkumpul, neraca massa, pemesinan kayu solid

ABSTRACT

Solid wood machining generates unavoidable material reduction during the conversion of raw materials into product components. However, information on material flow distribution and uncollected material at each machining stage remains limited, particularly at the workshop scale. This study aimed to characterize material reduction distribution and the fraction of uncollected material in solid wood machining using a mass balance approach. The analysis covered the ripsaw, jumpsaw, single planer, and thicknesser stages within a single production cycle using one durian wood board *(Durio zibethinus)* as one production sample (n = 1) to produce two bench units.Theoretical material reduction was calculated from changes in component dimensions and wood density and compared with the material mass collected at each process. The results showed that total theoretical material reduction reached 5,436.56 g, of which 4,378.50 g was recovered and 1,058.06 g was not collected. The material recovery rate was 80.54%, while the overall fraction of uncollected material was 19.46%. Material reduction was dominated by thicknessing, contributing 46.7% of the total reduction. The highest fraction of uncollected material occurred in thicknessing (0.247), whereas the lowest was observed in the single planer process (0.147). The findings indicate that differences in material reduction characteristics across machining stages are associated with material recoverability, with the thicknessing process contributing the largest amount of uncollected material. The mass balance approach can identify material not captured by the collection system and support evaluation of raw material utilization efficiency in solid wood machining.

Keywords: mass balance, material flow, material recovery efficiency, solid wood machining, uncollected material

Citation: Afifah, A. S., Nugroho, A. R., Nurmadina, Juwitasari, D., dan Fitriyanto, T. R., (2026). Analisis Aliran dan Efisiensi Material pada Proses Pemesinan Kayu Solid Menggunakan Pendekatan Neraca Massa. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(5), 1307-1314, doi:10.14710/jil.24.5.1307-1314

1. PENDAHULUAN

Industri pengolahan kayu merupakan salah satu sektor manufaktur yang memiliki intensitas penggunaan sumber daya material yang tinggi. Selama proses konversi bahan baku menjadi produk, sebagian material mengalami transformasi dimensi melalui berbagai tahapan pemesinan sehingga tidak seluruh massa awal dapat dipertahankan dalam bentuk produk akhir. Pada tahap penggergajian primer, nilai perolehan kayu gergajian *(lumber recovery) dilaporkan* mencapai sekitar 75%, sedangkan sisanya mengalami reduksi material dalam bentuk slab, serbuk gergaji, dan potongan sisa (Amadi, dkk., 2025). Pada tahap pengolahan sekunder seperti produksi furnitur, reduksi material masih terus berlangsung melalui proses pemotongan, perataan permukaan, dan pengurangan ketebalan yang diperlukan untuk memperoleh dimensi dan kualitas produk sesuai spesifikasi (Soesilo dkk., 2024).

Dalam perspektif efisiensi sumber daya, besarnya reduksi material selama proses manufaktur menjadi indikator penting untuk mengevaluasi kinerja pemanfaatan bahan baku. Pendekatan *resource efficiency* menekankan pentingnya pemahaman terhadap distribusi material dalam sistem produksi sehingga peluang peningkatan efisiensi dapat diidentifikasi secara lebih tepat (Oyelakin, 2025). Oleh karena itu, kuantifikasi perubahan massa material selama proses pemesinan diperlukan untuk memahami bagaimana material terdistribusi, terkonversi, dan keluar dari sistem produksi, sehingga peluang peningkatan efisiensi material dapat diidentifikasi secara lebih sistematis (Gould & Colwill, 2015)

Pada proses pemesinan kayu solid, perubahan massa material terjadi sebagai konsekuensi dari interaksi antara alat potong dan benda kerja. Proses pemotongan menghasilkan reduksi material yang dipengaruhi oleh lebar kerf mata gergaji (Görgün & Ünsal, 2017), sedangkan proses perataan dan pengurangan ketebalan menyebabkan penghilangan material secara kontinu pada permukaan benda kerja. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada peningkatan *material yield*, optimasi parameter pemotongan, dan efisiensi produksi (Jozić, dkk., 2021). Namun demikian, informasi mengenai distribusi reduksi material antar proses pemesinan serta proporsi material yang tidak dapat dikumpulkan kembali melalui sistem pengumpulan masih relatif terbatas, khususnya pada skala workshop.

Pendekatan neraca massa *(mass-balance approach)* memungkinkan evaluasi distribusi aliran material secara kuantitatif melalui perbandingan antara massa teoritis hasil reduksi dimensi dan massa material yang berhasil dikumpulkan selama proses pemesinan. Melalui pendekatan ini, seluruh aliran material dalam sistem dapat ditelusuri dan dianalisis secara sistematis, sehingga memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai distribusi material dalam proses produksi (Gould & Colwill, 2015; Khan, 2024). Dalam konteks material flow analysis (MFA), pendekatan tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi aliran material yang terukur maupun aliran material yang tidak berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan yang digunakan (Khan, 2024).

Berbeda dengan pengukuran rendemen material secara konvensional yang umumnya menilai proporsi material yang menjadi produk terhadap bahan baku pada tingkat proses atau sistem secara keseluruhan, pendekatan neraca massa dalam penelitian ini menelusuri distribusi material pada setiap tahapan pemesinan dan memisahkan material yang berhasil dikumpulkan dari material yang tidak berhasil direkam. Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya menunjukkan besarnya reduksi material, tetapi juga mengidentifikasi lokasi proses yang memiliki potensi kehilangan atau material tidak terkumpul paling besar. Informasi tersebut penting dalam perspektif lingkungan karena material yang tidak berhasil dikumpulkan berpotensi menjadi residu yang terdispersi atau limbah apabila tidak dikelola lebih lanjut. Identifikasi proses dengan fraksi material tidak terkumpul yang tinggi dapat menjadi dasar untuk meningkatkan sistem pengumpulan, mengurangi material yang berpotensi menjadi limbah, dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya kayu.

Workshop skala kecil memiliki karakteristik proses yang berbeda dibandingkan industri manufaktur berskala besar (Colak & Cetin, 2016). Keterbatasan sistem pengumpulan residu (Makarova & Tkalich, 2021), variasi kondisi permesinan, dan pengendalian proses yang lebih sederhana berpotensi memengaruhi distribusi aliran material (Nasir & Cool, 2020) selama pemesinan. Meskipun volume produksi relatif rendah, kehilangan material yang tidak teridentifikasi secara sistematis tetap dapat memengaruhi efisiensi pemanfaatan bahan baku (Wieruszewski, dkk., 2023) dan akurasi evaluasi kinerja proses. Oleh karena itu, diperlukan kajian yang mampu mengkarakterisasi distribusi reduksi material pada setiap tahapan pemesinan untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai aliran material dalam sistem produksi kayu solid (Wang & Haller, 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi distribusi reduksi material dan material yang tidak dapat dikumpulkan pada proses pemesinan kayu solid skala workshop menggunakan pendekatan neraca massa. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi pengembangan strategi peningkatan efisiensi pemanfaatan bahan baku dan pengelolaan material yang lebih efektif pada proses pemesinan kayu solid.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis neraca massa *(mass-balance approach) untuk* mengkarakterisasi distribusi reduksi material pada proses pemesinan kayu solid. Analisis dilakukan pada skala workshop praktikum menggunakan satu papan kayu durian *(Durio zibethinus)* sebagai satu sampel produksi (n = 1) dalam satu siklus produksi untuk menghasilkan komponen dua unit bench.

Pendekatan neraca massa digunakan untuk membandingkan massa teoritis material yang tereduksi selama proses pemesinan dengan massa material yang berhasil dikumpulkan pada setiap tahapan proses (Brunner & Rechberger, 2017; Gould & Colwill 2015)

2.2. Batas Sistem *(System Boundary)*

Batas sistem dalam penelitian ini adalah *gate-to-gate* (Rinawati, dkk., 2018), yaitu mencakup seluruh tahapan pemesinan kayu solid dalam *workshop*, mulai dari proses pemotongan awal hingga pengurangan ketebalan akhir. Tahapan yang dianalisis meliputi:

1. *Ripsaw*
2. *Jumpsaw*
3. *Single planeri*
4. *Thicknesser*

Tahapan perakitan dan finishing tidak termasuk dalam batas analisis.

2.3. Material

Material yang digunakan adalah kayu durian *(Durio zibethinus)* dengan nilai massa jenis sebesar 0,64 g/cm^3 yang mengacu pada karakteristik rata-rata kayu durian yang dilaporkan oleh Mariana & Ariyanti (2013). Nilai massa jenis rata-rata digunakan karena pengukuran massa jenis aktual setiap bagian papan tidak dilakukan dalam penelitian ini. Nilai tersebut digunakan sebagai parameter konversi volume reduksi material menjadi massa teoritis reduksi material pada setiap proses pemesinan.

Nilai massa jenis digunakan untuk mengonversi volume reduksi material menjadi massa teoritis reduksi material pada setiap proses pemesinan.

2.4. Perhitungan Massa Teoritis Reduksi Material

Volume reduksi material pada masing-masing mesin dihitung berdasarkan perubahan dimensi komponen yang diproses. Volume reduksi material *(V)* dihitung dalam satuan mm^3.

Massa teoritis reduksi material *(Mt)* dihitung menggunakan persamaan:

$$\mathrm{Mt} = \mathrm{V} \times \rho$$

dengan:
Mt = massa teoritis reduksi material (gram)
V = volume reduksi material (mm^3)
ρ = massa jenis kayu (g/mm^3)

Konversi satuan dilakukan dengan menyesuaikan satuan volume ke cm^3 atau mm^3 agar konsisten dengan massa jenis.

2.5. Pengukuran Massa Material Terkumpul

Material hasil reduksi pada setiap tahapan pemesinan dikumpulkan secara manual setelah proses pemesinan selesai dilakukan. Pengumpulan dilakukan pada area kerja dan di sekitar mesin pemrosesan setelah setiap tahapan proses selesai dan sebelum tahapan berikutnya dilakukan. Prosedur ini bertujuan untuk merekam kembali material hasil reduksi yang terdistribusi di sekitar area pemesinan dan yang tidak seluruhnya tertangkap selama proses pemesinan, sejalan dengan pentingnya evaluasi efektivitas sistem penangkapan partikel pada proses pemesinan kayu (Makarova & Tkalich, 2021).

Pengumpulan dilakukan secara terpisah pada setiap tahapan proses untuk menjaga keterlacakan material hasil reduksi dari masing-masing mesin. Material yang berhasil dikumpulkan dipisahkan berdasarkan tahapan pemesinannya, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,1 gram untuk memperoleh massa material terkumpul (Ma). Pengumpulan dilakukan dalam satu siklus produksi menggunakan satu papan kayu sebagai satu sampel produksi (n = 1) dan tidak menggunakan pengulangan independen. Tidak terdapat batas waktu pengumpulan yang ditetapkan secara khusus, material dikumpulkan setelah setiap tahapan proses selesai sebelum material dari tahapan berikutnya diproses.

Metode pengumpulan secara manual memungkinkan sebagian material yang berukuran sangat halus, terdispersi di area kerja, atau tertinggal pada bagian mesin tidak seluruhnya berhasil dikumpulkan. Kondisi tersebut dapat menjadi salah satu sumber ketidakpastian dalam estimasi material tidak terkumpul (Mu) dan fraksi material tidak terkumpul (FL).

2.6. Perhitungan Fraksi Material Tidak Terkumpul

Pendekatan neraca massa digunakan untuk mengidentifikasi material hasil reduksi yang tidak berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan yang digunakan selama proses pemesinan. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip konservasi massa, yaitu bahwa massa material yang masuk dan keluar dari suatu sistem harus dapat diperhitungkan melalui aliran material yang teridentifikasi. Dalam analisis aliran material, prinsip neraca massa juga digunakan untuk mengidentifikasi aliran material yang belum terukur atau *missing flows* dalam suatu sistem (Cullen & Cooper, 2022; Schmidt, 2015). Massa material tidak terkumpul dihitung sebagai selisih antara massa teoritis reduksi material dan massa material yang berhasil dikumpulkan pada setiap tahapan proses.

$$Mu = Mt - Ma$$

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Selanjutnya, fraksi material tidak terkumpul dihitung untuk menggambarkan proporsi material hasil reduksi yang tidak berhasil dikumpulkan relatif terhadap massa teoritis reduksi material. Perhitungan fraksi tersebut digunakan untuk mengkuantifikasi bagian aliran material yang tidak berhasil direkam melalui pengukuran langsung, sehingga dapat digunakan sebagai indikator kehilangan atau material yang belum teridentifikasi dalam sistem (Cullen & Cooper, 2022).

$$FL = Mu/Mt$$

di mana:
Mt = massa teoritis hasil reduksi material (g)
Ma = massa material terkumpul (g)
Mu = massa material tidak terkumpul (g)
FL = fraksi material tidak terkumpul (tanpa satuan)

Nilai (FL) menunjukkan proporsi material hasil reduksi yang tidak berhasil direkam kembali dalam sistem pengumpulan. Semakin besar nilai (FL), semakin besar pula bagian material yang tidak teridentifikasi melalui proses pengumpulan yang dilakukan.

Selain fraksi material tidak terkumpul, tingkat pemulihan material *(material recovery efficiency)* dihitung untuk mengevaluasi proporsi material hasil reduksi yang berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan (Shahbazi dkk., 2018). Nilai MRE dihitung menggunakan persamaan:

$$MRE = (Ma/Mt) \times 100$$

di mana:
MRE = tingkat pemulihan material (%)
Ma = massa material terkumpul (g)
Mt = massa teoritis reduksi material (g)

Semakin tinggi nilai MRE, semakin besar proporsi material hasil reduksi yang berhasil direkam kembali dalam sistem pengumpulan.

2.7. Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif kuantitatif menggunakan pendekatan neraca massa. Analisis dilakukan dengan membandingkan massa teoritis reduksi material, massa material terkumpul, dan fraksi material tidak terkumpul pada setiap proses pemesinan. Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi distribusi reduksi material, tingkat pemulihan material, dan proporsi material yang tidak berhasil dikumpulkan dalam sistem pemesinan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Distribusi Aliran Material pada Proses Pemesinan Kayu Solid

Hasil analisis berbasis neraca massa menunjukkan bahwa total reduksi material teoritis selama satu siklus produksi komponen bench mencapai 5.436,56 gram. Nilai tersebut merupakan akumulasi reduksi material yang terjadi pada seluruh tahapan pemesinan, yaitu ripsaw, jumpsaw, single planer, dan thicknesser. Dari total material yang tereduksi, sebesar 4.378,50 gram berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan material, sedangkan 1.058,06 gram atau sekitar 19,46% tidak berhasil dikumpulkan. Temuan ini menunjukkan bahwa tidak seluruh material hasil reduksi dapat teridentifikasi melalui pengukuran langsung sehingga diperlukan pendekatan neraca massa untuk memperoleh gambaran aliran material yang lebih komprehensif (Brunner & Rechberger, 2017; Gould & Colwill 2015).

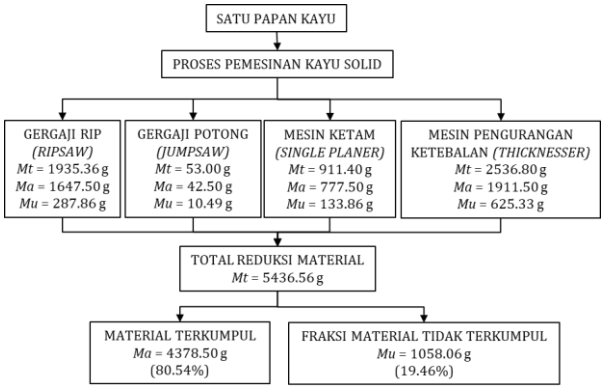
Berdasarkan hasil perhitungan, tingkat pemulihan material *(material recovery efficiency)* mencapai 80,54%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar material hasil reduksi masih dapat direkam kembali dalam sistem pengumpulan yang digunakan. Namun demikian, masih terdapat fraksi material yang tidak berhasil dikumpulkan sehingga tidak tercatat dalam pengukuran langsung. Dalam perspektif material flow analysis, fraksi tersebut merepresentasikan bagian aliran material yang keluar dari sistem pemulihan dan menjadi sumber ketidakpastian dalam evaluasi efisiensi pemanfaatan material. Dalam konteks lingkungan, material yang tidak berhasil dikumpulkan tidak serta-merta dapat dikategorikan sebagai kehilangan material permanen, tetapi menunjukkan bagian aliran material yang belum tertangkap oleh sistem pengumpulan. Oleh karena itu, nilai 19,46% menunjukkan adanya peluang untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya melalui perbaikan sistem pengumpulan dan pengelolaan residu hasil pemesinan.

Gambar 1 menunjukkan distribusi aliran material selama proses pemesinan kayu solid berdasarkan pendekatan neraca massa. Diagram tersebut menggambarkan hubungan antara total reduksi material teoritis, material yang berhasil dikumpulkan, dan material yang tidak berhasil dikumpulkan. Melalui pendekatan ini, perubahan massa material dalam sistem dapat ditelusuri secara kuantitatif sehingga distribusi aliran material pada setiap tahapan proses dapat dievaluasi secara lebih menyeluruh.

Distribusi material pada Gambar 1 menunjukkan bahwa kontribusi reduksi material tidak terdistribusi secara merata pada seluruh tahapan pemesinan. Proses thicknessing melibatkan penghilangan material secara kontinu pada permukaan benda kerja (Öhman dkk., 2016), sehingga pada penelitian ini menghasilkan volume reduksi material yang lebih besar dibandingkan proses pemesinan lainnya, yaitu sebesar 2.536,80 gram atau 46,7% dari total material yang direduksi selama proses produksi. Tahapan berikutnya adalah ripsaw sebesar 1.935,36 gram (35,6%), single planer sebesar 911,40 gram (16,8%), dan jumpsaw sebesar 53,00 gram (0,9%). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap proses

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

pemesinan memiliki karakteristik transformasi material yang berbeda sehingga kontribusinya terhadap perubahan massa material dalam sistem juga tidak sama.



Gambar 1. Diagram Neraca Massa Aliran Material pada Proses Pemesinan Kayu Solid

Konsentrasi reduksi material pada tahapan tertentu mengindikasikan bahwa efisiensi pemanfaatan bahan baku tidak hanya ditentukan oleh jumlah proses yang digunakan, tetapi juga oleh besarnya allowance pemesinan yang diterapkan (Kujawińska dkk., 2017). Semakin besar selisih antara dimensi awal bahan baku dan dimensi akhir yang ditargetkan, semakin besar pula massa material yang harus direduksi selama proses produksi. Oleh karena itu, pengendalian allowance dan pemilihan dimensi bahan baku menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan material pada proses pemesinan kayu solid.

Secara keseluruhan, hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi aliran material selama pemesinan kayu solid tidak berlangsung secara merata antar proses. Sebagian besar transformasi massa material terkonsentrasi pada tahapan yang melibatkan pengurangan dimensi penampang, khususnya thicknessing. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian tambahan pemesinan, peningkatan akurasi dimensi bahan baku, dan optimasi parameter proses berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan material dalam sistem produksi kayu solid. Dalam perspektif analisis aliran material, distribusi reduksi material tersebut menunjukkan bahwa aliran material dalam sistem pemesinan tidak terdistribusi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada tahapan tertentu yang berperan dominan dalam transformasi massa material.

3.2. Karakterisasi Fraksi Material Tidak Terkumpul Antar Proses Pemesinan

Nilai FL yang diperoleh dalam penelitian ini merepresentasikan material yang tidak berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan yang digunakan. Nilai tersebut tidak secara langsung menunjukkan kehilangan material permanen, karena sebagian material masih mungkin tertinggal pada permukaan mesin, area kerja, atau komponen yang diproses.

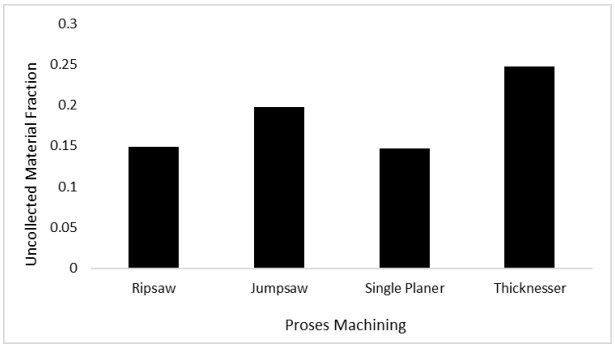
Karakterisasi material tidak terkumpul menunjukkan bahwa setiap proses pemesinan memiliki kontribusi yang berbeda terhadap fraksi material yang tidak berhasil direkam kembali dalam sistem pengumpulan. Rekapitulasi hasil neraca massa pada masing-masing proses pemesinan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Material Tidak Terkumpul pada Setiap Proses Pemesinan

Mesin	Massa Teoritis (g)	Massa Material Terkumpul (g)	Material Tidak Terkumpul (g)	FL
Ripsaw	1935,4	1647,5	287,9	0,149
Jumpsaw	53,0	42,5	10,5	0,198
Single Planer	911,4	777,5	133,9	0,147
Thicknesser	2536,8	1911,5	625,3	0,247

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai fraksi material tidak terkumpul (FL) bervariasi antar proses pemesinan. Variasi tersebut menunjukkan bahwa proporsi material yang tidak berhasil direkam kembali tidak selalu sebanding dengan besarnya reduksi material yang terjadi pada masing-masing proses. Oleh karena itu, FL dapat digunakan untuk mengevaluasi tingkat keterpulihan material pada setiap tahapan pemesinan.

Gambar 2 menunjukkan bahwa fraksi material tidak terkumpul tidak selalu mengikuti pola distribusi reduksi material yang ditunjukkan pada Gambar 1. Meskipun thicknessing menunjukkan nilai FL tertinggi, proses jumpsaw memiliki nilai FL yang lebih tinggi dibandingkan ripsaw dan single planer meskipun massa material tidak terkumpulnya jauh lebih kecil. Temuan ini menunjukkan bahwa besarnya material tidak terkumpul secara absolut belum tentu mencerminkan tingkat keterpulihan material secara proporsional. Oleh karena itu, penggunaan FL memberikan gambaran yang lebih representatif mengenai efektivitas pengumpulan material pada setiap proses pemesinan, sebagaimana indikator kinerja recovery digunakan untuk mengevaluasi efektivitas sistem pemulihan material pada berbagai sistem pengelolaan material (Mastellone dkk., 2017).



Gambar 2. Distribusi Fraksi Material Tidak Terkumpul (FL) pada Setiap Proses Pemesinan

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Perbedaan nilai FL antar proses pemesinan tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya reduksi material, tetapi juga oleh karakteristik fisik material hasil reduksi yang dihasilkan pada setiap proses. Karakteristik tersebut memengaruhi kemudahan material untuk direkam kembali melalui sistem pengumpulan yang digunakan selama proses pemesinan. Pada proses ripsaw, reduksi material menghasilkan kombinasi serbuk gergaji dan potongan memanjang (Nasir & Cool, 2020) yang relatif mudah dikenali dan dikumpulkan kembali. Kondisi tersebut diduga berkontribusi terhadap nilai FL yang relatif rendah (0,149).

Sebaliknya, proses mesin penebal menghasilkan serutan kayu dalam jumlah besar dengan ukuran yang lebih beragam, mulai dari serutan kasar hingga partikel halus. Karakteristik material hasil reduksi tersebut meningkatkan kemungkinan sebagian material terdispersi di sekitar area kerja atau tertinggal pada komponen mesin sehingga tidak seluruhnya berhasil direkam kembali dalam proses pengumpulan. Kondisi ini sejalan dengan nilai FL tertinggi yang ditemukan pada proses thicknessing (0,247), yang menunjukkan bahwa sekitar 24,7% material hasil reduksi pada proses tersebut tidak berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan yang digunakan.

Pada proses mesin gergaji potong, meskipun massa material tidak terkumpul relatif kecil secara absolut, nilai FL mencapai 0,198. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proporsi material yang tidak berhasil direkam kembali cukup besar dibandingkan total reduksi material yang terjadi. Fenomena ini diduga berkaitan dengan ukuran potongan yang relatif kecil dan sebaran residu di sekitar area pemotongan sehingga sebagian material tidak berhasil dikumpulkan selama proses pengambilan manual. Akibatnya, meskipun massa material tidak terkumpul relatif rendah, proporsinya terhadap total reduksi material menjadi cukup besar sebagaimana tercermin dari nilai FL sebesar 0,198.

Sementara itu, proses mesin ketam menghasilkan serutan kayu yang ukurannya relatif lebih besar dibandingkan serbuk gergaji sehingga lebih mudah direkam kembali melalui pengumpulan manual, sebagaimana karakteristik serutan hasil pengetaman yang umumnya berbentuk serpihan berukuran lebih besar dibandingkan partikel serbuk kayu (Gößwald dkk., 2021). Kondisi tersebut tercermin dari nilai FL terendah yang diperoleh pada penelitian ini, yaitu sebesar 0,147.

Perbedaan nilai FL antar proses pemesinan juga berkaitan dengan karakteristik fisik material hasil reduksi yang dihasilkan oleh masing-masing mesin. Gambar 3 menunjukkan bahwa ripsaw menghasilkan kombinasi potongan memanjang dan serbuk gergaji, sedangkan single planer dan thicknesser menghasilkan serutan kayu dengan karakteristik ukuran yang berbeda. Pada mesin penebal, material hasil reduksi didominasi oleh serutan berukuran kecil dan partikel halus yang terdistribusi lebih luas di sekitar area kerja. Karakteristik ukuran partikel yang lebih kecil meningkatkan peluang material untuk terdispersi dan tidak berhasil direkam kembali selama proses pengumpulan (Vítěz & Trávníček, 2010). Kondisi ini konsisten dengan nilai FL tertinggi yang diperoleh pada penelitian ini.

Perbedaan ukuran dan bentuk material hasil reduksi yang terlihat pada Gambar 3 menunjukkan bahwa karakteristik fisik material berpengaruh terhadap peluang material untuk direkam kembali. Material berbentuk serutan halus dan partikel kecil cenderung lebih mudah terdispersi (Makarova & Tkalich, 2021) di area kerja dibandingkan potongan berukuran besar atau serutan kasar, sehingga berpotensi meningkatkan fraksi material tidak terkumpul.



(a) Ripsaw (b) Jumpsaw

(c) Single Planer (d) Thicknesser

Gambar 3. Karakteristik Fisik Material Hasil Reduksi pada Setiap Proses Pemesinan

Hasil observasi visual menunjukkan bahwa karakteristik fisik material hasil reduksi berkaitan dengan tingkat keterpulihan material yang dicapai pada setiap proses pemesinan. Ukuran dan bentuk material hasil reduksi memengaruhi kecenderungannya untuk terdispersi, dan pada akhirnya, memengaruhi jumlah material yang berhasil dikumpulkan kembali (Vítěz & Trávníček, 2010; Makarova & Tkalich, 2021). Temuan ini menunjukkan bahwa efisiensi pemulihan material tidak hanya dipengaruhi oleh besarnya reduksi material, tetapi juga oleh karakteristik fisik material hasil reduksi yang terbentuk pada setiap proses pemesinan. Dalam konteks analisis aliran material, pendekatan neraca massa memungkinkan kuantifikasi distribusi material, sedangkan observasi karakteristik fisik dapat membantu menjelaskan perbedaan keterpulihan material antarproses (Brunner & Rechberger, 2017; Gould & Colwill, 2015).

Hasil neraca massa menunjukkan bahwa total massa teoritis material yang tereduksi sebesar 5.436,56 g dapat dijelaskan melalui 4.378,50 g material yang berhasil dikumpulkan dan 1.058,06 g

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

material yang tidak berhasil dikumpulkan. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai $Mt = Ma + Mu$, yaitu 5.436,56 g = 4.378,50 g + 1.058,06 g. Berdasarkan neraca massa tersebut, sebesar 80,54% material hasil reduksi berhasil direkam kembali melalui sistem pengumpulan, sedangkan 19,46% merupakan material yang tidak berhasil dikumpulkan. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan neraca massa dapat melengkapi pengukuran langsung dengan mengidentifikasi bagian aliran material yang tidak berhasil direkam selama proses pemesinan.

Jika dibandingkan secara kuantitatif dengan penelitian terdahulu, tingkat pemulihan material sebesar 80,54% pada penelitian ini berada pada kisaran efisiensi material 77,5–84,8% yang dilaporkan Wieruszewski dkk. (2023) pada proses prefabrikasi komponen furnitur berbahan kayu. Namun, kedua indikator tersebut tidak sepenuhnya identik. Wieruszewski dkk. (2023) menghitung efisiensi material berdasarkan proporsi material yang digunakan secara efektif dalam proses produksi, sedangkan MRE pada penelitian ini secara khusus mengukur proporsi material hasil reduksi yang berhasil dikumpulkan kembali terhadap massa teoritis reduksi material. Perbedaan definisi tersebut menunjukkan bahwa MRE memberikan informasi tambahan mengenai keterpulihan residu hasil pemesinan yang tidak secara langsung ditunjukkan oleh pengukuran rendemen atau efisiensi material konvensional.

Dengan demikian, nilai MRE 80,54% tidak hanya menunjukkan tingkat keberhasilan pengumpulan material hasil reduksi, tetapi juga memungkinkan identifikasi proses yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Pada penelitian ini, proses thicknessing menghasilkan 625,3 g material tidak terkumpul atau sekitar 59,1% dari total material tidak terkumpul sebesar 1.058,06 g. Temuan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan efektivitas sistem pengumpulan pada proses thicknessing berpotensi memberikan dampak paling besar terhadap peningkatan keterpulihan material dalam sistem yang diamati.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena pengumpulan material dilakukan secara manual dan menggunakan nilai massa jenis rata-rata kayu durian. Variasi kadar air, heterogenitas massa jenis kayu, dan kemungkinan material yang tertinggal pada mesin dapat memengaruhi akurasi estimasi FL. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat mengintegrasikan sistem pengumpulan mekanis dan pengukuran kadar air untuk meningkatkan ketelitian neraca massa.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan neraca massa dapat digunakan untuk mengidentifikasi distribusi aliran material dan bagian material hasil reduksi yang tidak berhasil direkam melalui pengumpulan langsung pada proses pemesinan kayu solid. Hasil analisis menunjukkan bahwa keterpulihan material berbeda antarproses dan berkaitan dengan karakteristik fisik material hasil reduksi yang terbentuk pada masing-masing tahapan pemesinan.

Secara praktis, proses thicknessing perlu menjadi prioritas dalam peningkatan sistem pengumpulan material karena menghasilkan kontribusi material tidak terkumpul terbesar. Perbaikan dapat diarahkan pada peningkatan efektivitas penangkapan dan pengumpulan serutan serta partikel halus yang berpotensi terdispersi di area kerja. Upaya tersebut tidak hanya berpotensi meningkatkan efisiensi pemanfaatan bahan baku, tetapi juga mengurangi material hasil pemesinan yang berpotensi menjadi residu atau limbah di lingkungan kerja.

DAFTAR PUSTAKA

Amadi, I., Ogunbode, S., & Nnyam, L. (2025). Wood Waste Valuation of Selected Timber Species in Iloabuchi Sawmill, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria. Journal of Applied Sciences & Environmental Management, 29(7).

Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2017). Handbook of material flow analysis: For environmental, resource, and waste engineers. CRC press.

Colak, M., & Cetin, T. (2016). Qualities Required By Sme Businesses In Technical Staff In Case Of Crisis: Woodworking Industry Sample. Journal of Business Economics and Finance, 5(3), 294-306.

Cullen, J. M., & Cooper, D. R. (2022). Material flows and efficiency. Annual Review of Materials Research, 52, 525–559

Gößwald, J., Barbu, M. C., Petutschnigg, A., Krišťák, Ľ., & Tudor, E. M. (2021). Oversized planer shavings for the core layer of lightweight particleboard. Polymers, 13(7), 1125.

Gould, O., & Colwill, J. (2015). A framework for material flow assessment in manufacturing systems. Journal of Industrial and Production Engineering, 32(1), 55-66.

Görgün, H. V., & Ünsal, Ö. (2017). Approaches on primary log breakdown process. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 17(3), 479-490.

Ika Rinawati, D., Sriyanto, Puspita Sari, D., & Cantya Prayodha, A. (2018). Eco-efficiency analysis of furniture product using life cycle assessment. In E3S Web of Conferences (Vol. 31, p. 08005). EDP Sciences.

Jozić, S., Bajić, D., Dumanić, I., & Bagavac, Ž. (2021). Optimization for an efficient and highly productive turning process. Reports in Mechanical Engineering, 2(1), 212-221.

Khan, M. T., Pettenella, D., & Masiero, M. (2024). Material flow analysis of the wood-based value chains in a rapidly changing bioeconomy: a literature review. Forests, 15(12), 2112.

Kujawińska, A., Diering, M., Żywicki, K., Rogalewicz, M., Hamrol, A., Hoffmann, P., & Konstańczak, M. (2017). Methodology supporting the planning of machining allowances in the wood industry. In L. A. Zadeh et al. (Eds.), International Workshop on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications (pp. 338–347)

Makarova, V., & Tkalich, V. (2021, March). Evaluation of the efficiency of dust and gas collecting units of

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

woodworking shops in shipbuilding industry. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 666, No. 4, p. 042049). IOP Publishing.

Mariana, E., & Ariyanti, E. (2013). Uji retensi dan efektivitas tanaman kumis kucing (Orthosiphon aristatus) terhadap serangan rayap tanah (Coptotermes sp) pada kayu durian (Durio zibethinus). War Rimba, 1(1).

Mastellone, M. L., Cremiato, R., Zaccariello, L., & Lotito, R. (2017). Evaluation of performance indicators applied to a material recovery facility fed by mixed packaging waste. Waste Management, 64, 3–11.

Nasir, V., & Cool, J. (2020). A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process. Wood Material Science & Engineering, 15(1), 1-16.

Öhman, M., Grubîi, V., Sandberg, D., & Ekevad, M. (2016). Moistening of the wood surface before planing for improved surface quality. Wood Material Science & Engineering, 11(3), 156–163.

Oyelakin, I. O., Yusuf, A. H., Arbak, S., & Dhar, B. K. (2025). Building resource capabilities through green servitization and ISO 14001 for sustainable performance: perspectives from manufacturing firms. Corporate Social Responsibility and Environmental Management, 32(3), 3770-3784.

Schmidt, M. (2015). The interpretation and extension of Material Flow Cost Accounting (MFCA) in the context of environmental material flow analysis. Journal of Cleaner Production, 108, 1310–1319.

Setiawan, D., Hidayat, A., Supriyadi, S., & Lestari, W. (2023). Environmental ethics policy in Jepara: Optimization of handicraft designs from wood waste in the furniture industry. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 51(5), 392-409.

Shahbazi, S., Jönsson, C., Wiktorsson, M., Kurdve, M., & Bjelkemyr, M. (2018). Material efficiency measurements in manufacturing: Swedish case studies. Journal of Cleaner Production, 181, 17-32

Soesilo, R., Valentin, A. D., & Ramadhani, A. (2024). Proses Manufaktur Modern: Memahami Proses dan Metode Produksi. Mega Press Nusantara.

Vítěz, T., & Trávníček, P. (2010). Particle size distribution of sawdust and wood shavings mixtures. Research in Agricultural Engineering, 56(4), 147–154.

Wang, R., & Haller, P. (2024). Dynamic material flow analysis of wood in Germany from 1991 to 2020. Resources, Conservation and Recycling, 201, 107339.

Wieruszewski, M., Turbański, W., Mydlarz, K., & Sydor, M. (2023). Economic efficiency of pine wood processing in furniture production. Forests, 14(4), 688.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP