



Optimasi Efisiensi Biaya Produksi dan Produktivitas pada Manufaktur Pencetak Logam Berharga Presisi Melalui Strategi Substitusi Material Dies Berbasis Analisis Tekno-Ekonomi

Neneng Selvia Mediana¹

¹Program Studi Magister Teknik Industri, Universitas Pasundan, Bandung 40132, Indonesia

Email: selfian72@gmail.com

ABSTRACT / ABSTRAK

Abstract: This study addresses operational challenges in a 800 million coin production order, primarily focused on the high dependency on imported existing material tool steel. The research explores a substitution strategy using substitution material through techno-economic analysis. Experimental results confirmed that substitution material maintains operational requirements with a die life improvement from 1.2 million to 1.35 million strokes/set (+12.5%). Economically, raw material costs decreased from Rp 305,000/kg to Rp 182,000/kg, while total material consumption was optimized from 1,088.0 kg to 967.1 kg (1.632 kg/set). This resulted in an 8.70% TCO reduction per set (from Rp 5,497,760 to Rp 5,019,246) and an annual saving of Rp 155,825,778. Cost per piece was reduced from Rp 0.415 to Rp 0.220 (saving Rp 0.195/piece). Lead time efficiency improved by 33% - 84% (from 90 days to 14 - 60 days). Hybrid AHP-TOPSIS analysis (CR=0.0033) yielded weights of $w_1=0.421$, $w_2=0.268$, $w_4=0.197$, and $w_3=0.114$, with a preference score of 0.790 for substitution material against 0.481 for Existing material.

Abstrak: Penelitian ini membahas tantangan operasional pada pesanan produksi 800 juta koin, berfokus pada ketergantungan terhadap material eksisting. Strategi substitusi menggunakan material substitusi dianalisis melalui pendekatan tekno-ekonomi. Hasil eksperimen menunjukkan peningkatan die life dari 1,2 juta menjadi 1,35 juta stroke/set (+12,5%). Secara ekonomi, biaya bahan baku turun dari Rp 305.000/kg menjadi Rp 182.000/kg, dengan konsumsi material optimal dari 1.088,0 kg ke 967,1 kg (1,632 kg/set). Hal ini menghasilkan penurunan TCO sebesar 8,70% per set (dari Rp

ARTICLE INFO

Article history :

Received month dd, yyyy

Revised month dd, yyyy

Accepted month dd, yyyy

Published online month dd, yyyy

Keywords: *Material Substitution, Tool Steel, Techno-Economic Analysis, Field Trial, Total Cost of Ownership, Supply Chain Stability, AHP-TOPSIS*

Kata Kunci: *Substitution Material, Tool Steel, Analisis Tekno-Ekonomi, Field Trial, Total Cost of Ownership, Stabilitas Rantai Pasok, AHP-TOPSIS*

Kata Kunci / Kecap Kunci: *Material substitusi, Tool Steel, Analisis Tekno-Ékonomi, AHP-TOPSIS, Total Cost of Ownership (TCO), Ranté Pasokan.*

*Corresponding author :

Neneng Selvia Mediana

Selfian72@gmail.com

5.497.760 menjadi Rp 5.019.246) dan penghematan biaya material tahunan Rp 155.825.778. Biaya per keping turun dari Rp 0,415 menjadi Rp 0,220 (hemat Rp 0,195/keping). Efisiensi lead time meningkat 33% - 84% (dari 90 hari menjadi 14 - 60 hari). Analisis AHP-TOPSIS (CR=0,0033) dengan bobot $w_1=0,421$, $w_2=0,268$, $w_4=0,197$, dan $w_3=0,114$ menghasilkan skor preferensi 0,790 untuk material substitusi vs 0,481 untuk material eksisting.

Abstrak: Ieu panalungtikan ngabahas tangtangan operasional dina pesenan produksi 800 juta koin, nu fokus kana katangtungan kana material eksisting. Strategi substitusi ngagunakeun material substitusi dianalisis ngaliwatan pendekatan tekno-ekonomi. Hasil eksperimen nembongkeun ayana paningkatan die life ti 1,2 juta jadi 1,35 juta stroke/set (+12,5%). Secara ekonomi, waragad bahan baku nyirorot ti Rp 305.000/kg jadi Rp 182.000/kg, kalawan konsumsi material nu optimal ti 1.088,0 kg jadi 967,1 kg (1,632 kg/set). Hal ieu ngahasilkeun penurunan TCO gedena 8,70% per set (ti Rp 5.497.760 jadi Rp 5.019.246) sarta panghematan waragad bahan baku taunan Rp 155.825.778. Waragad per keping nyirorot ti Rp 0,415 jadi Rp 0,220 (hemat Rp 0,195/keping). Efisiensi lead time ngaronjat 33% - 84% (ti 90 poé jadi 14 - 60 poé). Analisis AHP-TOPSIS (CR=0,0033) kalawan bobot $w_1=0,421$, $w_2=0,268$, $w_4=0,197$, jeung $w_3=0,114$ ngahasilkeun skor preferensi 0,790 pikeun material substitusi vs 0,481 pikeun material eksisting.

DOI: <http://dx.doi.org/xx.xxxxx/atthulab.xxx.xxx>

Received: xx (bulan), xxxx (tahun). Accepted: xx (bulan), xxxx (tahun).

Published: xx (bulan), xxxx (tahun)

PENDAHULUAN

Pasar *tool steel* global diproyeksikan akan terus mengalami pertumbuhan signifikan hingga tahun 2026, didorong oleh permintaan sektor otomotif dan manufaktur presisi (Fortune Business Insights, 2026). Di Indonesia, industri besi dan baja nasional tengah menghadapi tekanan akibat tingginya angka impor yang membebani neraca perdagangan dan daya saing industri dalam negeri (Indonesian Iron and Steel Industry Association, 2026). Fenomena ini

dirasakan secara langsung oleh PT. XXX Karawang, sebuah perusahaan manufaktur pencetak logam berharga yang memiliki ketergantungan kritis pada material *tool steel* spesifik, yakni Eksisting/S1.

Ketergantungan pada satu sumber (*single sourcing*) dari luar negeri menciptakan permasalahan operasional yang kompleks. Material ini merupakan *major cost driver* dalam struktur biaya produksi *dies*. Selain harganya yang fluktuatif, perusahaan menghadapi *stochastic lead time* selama 90 hari. Kondisi ini memicu munculnya *bullwhip effect*, di mana ketidakpastian pasokan memaksa perusahaan untuk melakukan penumpukan *safety stock* yang berlebihan guna menghindari downtime (Chopra & Meindl, 2016; Lee et al., 1997; Ostwald & Munoz, 1997).

Oleh karena itu, diperlukan sebuah evaluasi *data-driven decision* untuk melakukan Substitution material material ke alternatif yang lebih tersedia di pasar lokal, seperti substitution material, tanpa menurunkan batas toleransi teknis yang dipersyaratkan oleh proses manufaktur presisi (Astakhov, 2006; Groover, 2020). Masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana mengoptimalkan efisiensi* biaya dan produktivitas melalui Substitution material material yang secara teknis setara namun secara ekonomi lebih menguntungkan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi dari Substitution material material *dies*. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi antara rekayasa material (Ashby, 2011; Smith & Hashemi, 2018; Ulrich & Eppinger, 2015), manajemen rantai pasok (Christopher, 2016; Zhang et al., 2021), dan analisis tekno-ekonomi terintegrasi (Almutairi et al., 2022; Dutta et al., 2020; Peters et al., 2019) guna menciptakan resiliensi manufaktur.

TINJAUAN PUSTAKA DAN HIPOTESIS PENELITIAN

Resiliensi Rantai Pasok dan Substitution material Material

Dalam perspektif manajemen rantai pasok modern, strategi *material substitution* bukan sekadar upaya mencari harga murah, melainkan langkah strategis untuk meningkatkan resiliensi terhadap disrupsi pasokan (Christopher, 2016). Substitution material material yang tepat dapat memitigasi risiko long lead time dan fluktuasi harga global (Dutta et al., 2020; Smith, 2023).

Mekanisme Keausan dan Metalurgi Tool Steel

Tool steel yang digunakan pada *stamping dies* presisi mengalami tekanan mekanis yang ekstrem. Mekanisme kegagalan utama meliputi *abrasive wear* dan *adhesive wear* atau *galling* (Callister & Rethwisch, 2018; Hutchings & Shipway, 2017). Unsur paduan seperti Kromium (Cr), Vanadium (V), dan Molibden (Mo) berperan krusial dalam membentuk karbida keras yang meningkatkan ketahanan aus (Roberts et al., 1998; Stachowiak & Batchelor, 2014). Proses perlakuan panas (*heat treatment*) yang mencakup *austenitizing*, *quenching*, serta pemanfaatan *secondary hardening peak* pada rentang 500°C–570°C sangat menentukan umur pakai komponen (ASM International, 1991, 1998; Bryson, 1999; Smith & Hashemi, 2018).

Analisis Tekno-Ekonomi dan MCDM

Evaluasi pemilihan material harus dilakukan menggunakan pendekatan *Total Cost of Ownership* (TCO) dan *Life Cycle Cost* (LCC) untuk menangkap biaya tersembunyi seperti biaya simpan dan biaya kehilangan kesempatan (Blank & Tarquin, 2018; Ellram, 1995; Peters et al., 2019; Rahman et al., 2022). Pengambilan keputusan dilakukan dengan metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM), khususnya hibrida *Analytic Hierarchy Process* (AHP) untuk pembobotan kriteria dan *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) untuk perankingan alternatif (Hwang & Yoon, 1981; Rao, 2007; Saaty, 1980; Yoon & Hwang, 1995).

Hipotesis Penelitian

1. **H1:** Substitusi material dari material baja eksisting ke material baja substitusi mampu mempertahankan atau meningkatkan *tool life* (durabilitas) dalam kondisi operasional nyata.
2. **H2:** Strategi Substitusi material secara signifikan menurunkan *Total Cost of Ownership* (TCO) melalui pengurangan biaya bahan baku dan biaya logistik.
3. **H3:** Berdasarkan kriteria teknis dan ekonomi, material baja substitution memiliki nilai preferensi yang lebih tinggi dibandingkan material baja eksisting melalui analisis AHP-TOPSIS.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan rancangan eksperimental dan analitis. Variabel independen adalah jenis material *tool steel*, sedangkan variabel dependen meliputi kekerasan material, struktur mikro, jumlah pukulan (*stroke count*), dan biaya total. Variabel kontrol meliputi parameter *heat treatment* dan kondisi mesin presisi yang seragam.

Sampel penelitian diambil secara purposive sampling yang terdiri dari 2 unit *Dies Control* (eksisting) dan 2 unit *Dies Eksperimen* (substitution material) untuk memastikan perbandingan *apple-to-apple*. Prosedur laboratorium mengikuti standar ASTM E18 untuk uji kekerasan Rockwell C. Pengamatan mikrostruktur dilakukan melalui metalografi untuk mengidentifikasi fasa ferit, sementit, dan perlit.

Field trial dilaksanakan di lini produksi Karawang untuk menghitung *stroke count* hingga batas umur teknis. Formulasi tekno-ekonomi dihitung menggunakan rumus *Unit Cost* (UC) dan % *Cost Saving*. Terakhir, algoritma hibrida AHP-TOPSIS diimplementasikan dengan ambang batas *Consistency Ratio* (CR) $\leq 0,10$ untuk memastikan validitas pembobotan kriteria.

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Data Teknis dan Metalurgi

Berdasarkan hasil pengujian laboratorium, kedua material mencapai target kekerasan operasional yang ditetapkan.

Parameter Pengujian	Eksisting (Control)	Substitution material (Eksperimen)
Hardness Before Heat Treatment	22 - 25 HRC	20 - 24 HRC
Hardness After Heat Treatment	59.2 HRC	59.5 HRC
Microstructure	Martensit Tempered + Karbida	Martensit Tempered + Karbida Halus
Modus Kegagalan	Micro-chipping	Uniform Wear

Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa substitution material memiliki distribusi karbida yang lebih halus dan merata, yang berkontribusi pada ketahanan terhadap *micro-chipping*.

Data Operasional dan Logistik

Data dari lini produksi menunjukkan performa durabilitas yang lebih baik pada material baja Substitusi.

Indikator Performa	Eksisting	SUBSTITUTION MATERIALI
Total Output Tool Life (Strokes)	1.200.000	1.350.000
Lead Time Pengadaan	90 Hari (Impor)	60 Hari (Lokal/Distributor)
Raw Material Cost	Rp 305.000 / kg	Rp 182.000 / kg

Analisis Tekno-Ekonomi (TCO)

Penghitungan TCO per set *dies* mencakup biaya material, biaya proses, dan biaya *downtime*. Dengan Substitution materiali ini, potensi penghematan tahunan yang berhasil diidentifikasi adalah sebesar Rp 155.825.778,-.

Hasil AHP-TOPSIS

Pembobotan kriteria melalui AHP menghasilkan nilai CR sebesar 0,034 (Konsisten). Kriteria biaya dan ketersediaan material memiliki bobot tertinggi. Hasil perankingan TOPSIS adalah sebagai berikut:

Alternatif Material	Nilai Kedekatan Relatif (Ci*)	Peringkat
Material Baja Substitusi	0.790	1
Material Baja Eksisting	0.481	2

ANALISIS DAN PEMBAHASAN INTEGRATIF

Analisis karakteristik teknis menunjukkan bahwa substitution materiali memiliki komposisi metalurgi yang sangat kompetitif. Kehadiran unsur pembentuk karbida yang stabil memungkinkan material ini mencapai puncak pengerasan sekunder yang efektif (ASM International, 1998; Roberts et al., 1998). Peningkatan tool life sebesar 12,5% (dari 120.000 ke 135.000 strokes) membuktikan bahwa substitution materiali memiliki ketahanan tribologi yang lebih baik terhadap beban kerja presisi (Astakhov, 2006; Groover, 2020).

Dari sisi rantai pasok, pemangkasan lead time dari 90 hari menjadi 60 hari secara dramatis mengurangi ketidakpastian. Hal ini memungkinkan perusahaan untuk mengadopsi kebijakan inventori yang lebih ramping dan mengurangi biaya simpan yang selama ini membebani modal kerja (Christopher, 2016; Lee et al., 1997).

Secara ekonomi, penurunan biaya material sebesar 46% per kilogram menjadi faktor dominan dalam efisiensi. Pemodelan TCO membuktikan bahwa penghematan tidak hanya terjadi pada harga beli, tetapi juga pada biaya operasional jangka panjang (Blank & Tarquin, 2018; Rahman et al., 2022). Dengan hasil ini, Hipotesis H1, H2, dan H3 dinyatakan diterima.

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa strategi substitusi dari material eksisting ke material substitusi memberikan keunggulan ganda. Secara teknis, material baja substitusi memberikan durabilitas yang lebih tinggi (135.000 *strokes*). Secara ekonomi, material baja substitusi ini menghasilkan efisiensi biaya material yang signifikan dan penghematan TCO tahunan sebesar Rp 155.825.778,-. Analisis AHP-TOPSIS mengukuhkan material baja substitusi sebagai pilihan optimal dengan skor preferensi 0,790.

Rekomendasi

1. **Manajerial:** PT. XXX Karawang disarankan segera melakukan standarisasi penggunaan material substitusi untuk seluruh kategori *dies* serupa dan melakukan renegosiasi kontrak jangka panjang dengan distributor lokal guna menjamin stabilitas harga.
2. **Akademis:** Penelitian selanjutnya dapat mengeksplorasi penggunaan teknologi *surface coating* (PVD/CVD) pada material baja substitusi untuk melihat potensi peningkatan *tool life* yang lebih ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. S., & Hosseini Dehshiri, S. J. (2022). Techno-economic analysis and optimization of industrial manufacturing processes. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132710.

Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

ASM International. (1991). ASM Handbook, Volume 4: Heat treating. ASM International.

ASM International. (1998). ASM Handbook, Volume 18: Friction, lubrication, and wear technology. ASM International.

Astakhov, V. P. (2006). *Tribology of metal cutting*. Elsevier.

Blank, L., & Tarquin, A. (2018). Engineering economy (8th ed.). McGraw-Hill Education.

Bryson, W. E. (1999). Heat treatment, selection, and application of tool steels. Hanser Gardner Publications.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials science and engineering: An introduction (10th ed.). John Wiley & Sons.

Chopra, S., & Meindl, P. (2016). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (6th ed.). Pearson Education.

Christopher, M. (2016). Logistics & supply chain management (5th ed.). Pearson Higher Education.

Dutta, S., Kumar, R., & Ramachandran, V. (2020). Material substitution strategies in manufacturing industries: Supply chain resilience and cost optimization. *International Journal of Production Economics*, 224, 107550.

Ellram, L. M. (1995). Total cost of ownership: An analysis approach for purchasing. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 25(8), 4–23.

Fortune Business Insights. (2026). *Tool steel market size, share, growth & industry analysis, by material type, by application, and regional forecast 2025–2034*. Fortune Business Insights.

Groover, M. P. (2020). Fundamentals of modern manufacturing: Materials, processes, and systems (7th ed.). John Wiley & Sons.

Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: Friction and wear of engineering materials* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.

Indonesian Iron and Steel Industry Association. (2026, 26 Agustus). Industri besi baja nasional tertekan impor, patuhi aturan WTO. Indonesian Iron and Steel Industry Association.

Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). The bullwhip effect in supply chains. *Sloan Management Review*, 38(3), 93–102.

Ostwald, P. F., & Munoz, J. (1997). *Manufacturing processes and systems* (9th ed.). John Wiley & Sons.

Peters, M. S., Timmerhaus, K. D., & West, R. E. (2019). *Plant design and economics for chemical engineers* (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Rahman, A., Nasir, M., & Setyawan, B. (2022). Integrating laboratory technical data with techno-economic models for industrial materials selection. *Journal of Manufacturing Systems*, 63, 112–125.

Rao, R. V. (2007). *Decision making in the manufacturing environment: Using graph theory and fuzzy MULTI-attribute decision making methods*. Springer-Verlag.

Roberts, G. A., Krauss, G., & Kennedy, R. (1998). *Tool steels* (5th ed.). ASM International.

Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.

Smith, J. (2023). Post-pandemic supply chain stability: Lead time and material sourcing strategies in high-precision manufacturing. *Supply Chain Management Review*, 27(3), 45–58.

Smith, W. F., & Hashemi, J. (2018). *Foundations of materials science and engineering* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2014). *Engineering tribology* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2015). *Product design and development* (6th ed.). McGraw-Hill Education.

Yoon, K., & Hwang, C. L. (1995). *Multiple attribute decision making: An introduction*. SAGE Publications.

Zhang, Y., Wang, L., & Liu, T. (2021). Supply chain optimization and material resiliency in precision manufacturing. *Computers & Industrial Engineering*, 152, 107020.