

Optimasi proses pemulihan tembaga dan nikel dari limbah PCB menggunakan machine learning

Halimatus Sa'diyah

Program Studi Matematika, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang

e-mail: 220601110036@student.uin-malang.ac.id

Kata Kunci:

Limbah elektronik, papan sirkuit cetak, machine learning, artificial neural network, logam berharga

Keywords:

E-waste, printed circuit board, machine learning, artificial neural network, metal

ABSTRAK

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi telah menyebabkan peningkatan limbah elektronik (e-waste), termasuk limbah papan sirkuit cetak (PCB). Limbah PCB mengandung logam berharga seperti tembaga (Cu) dan nikel (Ni), yang memiliki nilai ekonomi tinggi. Namun, metode konvensional dalam pemulihan logam dari limbah PCB, seperti pirometalurgi dan hidrometalurgi berbasis asam, memiliki kelemahan seperti konsumsi energi yang tinggi dan dampak lingkungan yang negatif. Oleh karena itu, diperlukan metode yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Artificial Neural Network (ANN) menawarkan solusi dengan memodelkan hubungan kompleks antara variabel proses dan hasil pemulihan logam, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi proses daur ulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penerapan ANN dalam memprediksi efisiensi pemulihan logam dari limbah PCB dan mendukung ekonomi sirkular.

ABSTRACT

The rapid advancement of information and communication technology has led to an increase in electronic waste (e-waste), including printed circuit board (PCB) waste. PCB waste contains valuable metals such as copper (Cu) and nickel (Ni), which have high economic value. However, conventional methods for metal recovery from PCB waste, such as pyrometallurgy and acid-based hydrometallurgy, have drawbacks such as high energy consumption and negative environmental impacts. Therefore, more efficient and environmentally friendly methods are needed. Artificial Neural Network (ANN) offers a solution by modeling complex relationships between process variables and metal recovery outcomes, thereby improving the efficiency and accuracy of the recycling process. This study aims to explore the application of ANN in predicting metal recovery efficiency from PCB waste and supporting the circular economy.

Pendahuluan

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang pesat telah menyebabkan peningkatan signifikan dalam produksi dan penggunaan perangkat elektronik. Salah satu komponen utama dalam perangkat elektronik adalah papan sirkuit cetak (Printed Circuit Boards/PCB), yang berfungsi sebagai dasar untuk menghubungkan dan mendukung berbagai komponen elektronik seperti resistor, kapasitor, dan mikroprosesor. PCB mengandung sejumlah logam berharga seperti tembaga (Cu) dan nikel (Ni), yang memiliki nilai ekonomi tinggi dan digunakan dalam berbagai aplikasi industri.



This is an open access article under the CC BY-NC-SA license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Namun, dengan meningkatnya produksi perangkat elektronik, jumlah limbah elektronik atau e-waste, termasuk limbah PCB, juga mengalami peningkatan drastis. Menurut data terbaru dari Global E-Waste Monitor 2024, limbah elektronik diperkirakan mencapai sekitar 74 juta ton metrik pada tahun 2030 (Forti et al., 2024). Limbah PCB merupakan salah satu komponen utama dari e-waste yang mengandung logam berharga namun sering kali tidak dikelola dengan baik. Proses pembuangan limbah PCB secara tidak tepat dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan dampak negatif terhadap kesehatan manusia akibat pelepasan logam berat dan bahan kimia berbahaya. Penempatan barang yang optimal dalam sistem logistik dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi waktu pemrosesan (Syawab et al., 2024).

Pemulihan logam dari limbah PCB menjadi sangat penting tidak hanya untuk mengurangi dampak lingkungan tetapi juga untuk mendukung ekonomi sirkular. Ekonomi sirkular adalah model ekonomi yang bertujuan untuk meminimalkan limbah dan memaksimalkan penggunaan kembali sumber daya. Dengan mendaur ulang logam dari limbah PCB, kita dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam baru, menghemat energi, dan mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari proses penambangan dan produksi logam baru.

Metode konvensional untuk pemulihan logam dari PCB, seperti pirometalurgi dan hidrometalurgi berbasis asam, memiliki beberapa kelemahan. Pirometalurgi memerlukan suhu tinggi yang menyebabkan konsumsi energi besar dan emisi gas berbahaya. Sementara itu, hidrometalurgi berbasis asam menghasilkan limbah cair yang beracun dan berpotensi mencemari air dan tanah. Oleh karena itu, diperlukan metode yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk pemulihan logam dari limbah PCB.

Dalam konteks ini, penerapan Machine Learning (ML), khususnya Artificial Neural Network (ANN), menawarkan solusi yang menjanjikan. ANN dapat digunakan untuk memodelkan hubungan kompleks antara variabel proses dan hasil pemulihan logam.

Selain aspek teknis, penelitian ini juga sejalan dengan prinsip-prinsip Islam yang menekankan pada konservasi sumber daya alam, tanggung jawab sebagai khalifah di bumi, dan keberlanjutan. Islam mengajarkan pentingnya menjaga keseimbangan alam dan mengelola sumber daya dengan bijaksana, yang sejalan dengan tujuan ekonomi sirkular dan keberlanjutan lingkungan.

Pembahasan

Limbah elektronik dan papan sirkuit cetak (PCB)

Limbah elektronik (e-waste)

Limbah elektronik atau e-waste adalah limbah yang berasal dari perangkat elektronik dan peralatan listrik yang tidak lagi digunakan, baik karena kerusakan, usang, atau penggantian teknologi yang lebih baru. E-waste meliputi berbagai barang elektronik seperti ponsel, komputer, laptop, televisi, dan perangkat rumah tangga. Limbah ini menjadi masalah lingkungan global karena mengandung bahan berbahaya seperti logam berat (timah, merkuri, kadmium) dan bahan kimia lain yang dapat mencemari tanah, air, dan udara.

Seiring perkembangan teknologi dan perubahan pola konsumsi masyarakat, e-waste terus meningkat dengan kecepatan yang signifikan. Menurut laporan *Global E-Waste Monitor 2024*, volume secara global diperkirakan mencapai 74 juta ton metrik pada tahun 2030, meningkat dari 53,6 juta e-waste ton pada 2019. Sayangnya, hanya sekitar 20% dari e-waste yang dikelola dengan cara yang benar melalui daur ulang formal, sedangkan sisanya dibuang sembarangan atau dikelola secara informal dengan metode yang berbahaya bagi lingkungan.

Komposisi kompleks dari limbah elektronik menjadikannya sebagai tantangan besar untuk dikelola. E-waste mengandung logam berat dan bahan kimia beracun yang, jika tidak ditangani dengan baik, dapat mencemari tanah, air, dan udara. Sebagai contoh, pembakaran limbah elektronik secara terbuka menghasilkan gas beracun seperti dioksin dan furan, yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Selain itu, limbah cair yang mengandung logam berat dapat merembes ke dalam tanah, mencemari sumber air, dan mengganggu ekosistem lokal.

Namun, e-waste juga mengandung sumber daya yang berharga yang dapat dimanfaatkan kembali. Pemulihan logam dari limbah elektronik tidak hanya memiliki nilai ekonomi, tetapi juga berkontribusi pada pengurangan eksplorasi sumber daya alam baru, mengurangi polusi, dan mendukung upaya global untuk mencapai keberlanjutan.

Limbah PCB (Printed Circuit Boards)

PCB (Printed Circuit Boards) adalah komponen utama dalam perangkat elektronik yang berfungsi sebagai penghubung antar komponen elektronik melalui jalur konduktif. PCB mengandung logam-logam berharga seperti tembaga (Cu), nikel (Ni), emas (Au), dan perak (Ag), yang memberikan nilai ekonomi tinggi. Limbah PCB memiliki potensi untuk didaur ulang, tetapi sebagian besar dikelola secara informal dengan metode yang tidak ramah lingkungan seperti pembakaran terbuka, yang berkontribusi pada pencemaran udara dan pelepasan bahan kimia beracun.

Limbah PCB yang berasal dari perangkat elektronik yang tidak digunakan atau rusak memiliki potensi untuk didaur ulang. Komposisi PCB mencakup logam berharga seperti tembaga (Cu), nikel (Ni), emas (Au), dan perak (Ag). Sebagai contoh, tembaga dapat mencapai 20-30% dari total berat PCB, sedangkan nikel sering digunakan sebagai pelapis dalam komponen elektronik. Selain logam berharga, PCB juga mengandung bahan non-logam seperti resin epoksi dan fiberglass, serta bahan berbahaya seperti timbal yang digunakan dalam solder.

Pengelolaan limbah PCB yang tidak tepat dapat menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan. Logam berat seperti tembaga dan timbal yang terkandung dalam PCB dapat mencemari tanah dan air jika PCB dibuang begitu saja di tempat pembuangan sampah. Selain itu, pembakaran PCB secara terbuka untuk mendapatkan logam-logam berharga melepaskan gas berbahaya ke udara, menyebabkan pencemaran udara yang signifikan.

Namun, limbah PCB juga memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan kembali melalui proses daur ulang yang tepat. Pemulihan logam dari PCB tidak hanya mengurangi limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir, tetapi juga mendukung ekonomi sirkular dengan menggunakan kembali sumber daya yang sudah ada. Proses ini membantu mengurangi kebutuhan akan penambangan logam baru, yang secara tidak langsung juga mengurangi dampak lingkungan dari eksplorasi sumber daya alam.

Pentingnya Pemulihan Logam dari Limbah PCB

Pemulihan logam dari limbah PCB memiliki banyak manfaat, baik dari sisi ekonomi, lingkungan, maupun keberlanjutan. Limbah PCB yang mengandung logam seperti tembaga dan nikel memiliki nilai ekonomi yang tinggi, menjadikannya sebagai sumber daya yang berharga untuk diolah kembali. Selain itu, pemulihan logam dari PCB dapat mengurangi jumlah limbah elektronik yang berakhir di tempat pembuangan akhir, sehingga membantu mengurangi pencemaran lingkungan.

Dari sisi keberlanjutan, daur ulang logam dari PCB membantu mengurangi ketergantungan pada penambangan logam baru. Proses penambangan logam, selain membutuhkan energi yang besar, juga menghasilkan emisi karbon yang signifikan. Dengan mendaur ulang logam dari PCB, kebutuhan energi dan emisi karbon dapat dikurangi, mendukung upaya global untuk mencapai net-zero emissions.

Namun, proses pemulihan logam dari PCB bukan tanpa tantangan. Struktur PCB yang kompleks, dengan lapisan-lapisan logam dan bahan non-logam, membuat proses pemisahan logam menjadi sulit. Metode konvensional seperti pirometalurgi dan hidrometalurgi memiliki kelemahan, seperti konsumsi energi yang tinggi dan produksi limbah beracun. Oleh karena itu, diperlukan teknologi baru yang lebih efisien dan ramah lingkungan untuk mengoptimalkan pemulihan logam dari limbah PCB.

Melalui pendekatan modern seperti pelindian alkali, ditambah dengan penerapan teknologi canggih seperti Machine Learning (ANN), proses pemulihan logam dari PCB dapat dioptimalkan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi pemulihan logam, tetapi juga membantu mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, menjadikannya sebagai solusi yang ideal untuk mendukung keberlanjutan di era modern.

Artificial Neural Network (ANN)

Konsep Artificial Neural Network (ANN)

Artificial Neural Network (ANN) adalah salah satu metode pembelajaran mesin yang terinspirasi oleh cara kerja otak manusia dalam memproses informasi. ANN terdiri dari kumpulan neuron buatan yang dihubungkan oleh bobot (weights), yang digunakan untuk mengolah data masukan dan menghasilkan keluaran yang sesuai. ANN sangat efektif dalam menangani masalah yang memiliki pola hubungan kompleks dan non-linear antara variabel input dan output(Biswas et al., 2025).

ANN terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu:

1. Lapisan Input (*Input Layer*):

Lapisan ini menerima data masukan yang merepresentasikan variabel proses, seperti konsentrasi bahan pelindih, waktu reaksi, suhu, dan rasio cairan terhadap padatan. Jumlah neuron dalam lapisan ini bergantung pada jumlah variabel input.

2. Lapisan Tersembunyi (*Hidden Layer*):

Lapisan ini melakukan komputasi untuk memproses data masukan. Setiap neuron dalam lapisan tersembunyi terhubung ke neuron di lapisan sebelumnya dan berikutnya melalui bobot. Aktivasi pada setiap neuron dilakukan menggunakan fungsi aktivasi, seperti ReLU (Rectified Linear Unit) atau sigmoid. Jumlah neuron dan lapisan tersembunyi dapat disesuaikan untuk mencapai performa model yang optimal.

3. Lapisan Output (*Output Layer*):

Lapisan ini menghasilkan keluaran yang merupakan prediksi berdasarkan data masukan. Dalam konteks pemulihan logam, keluaran ini dapat berupa persentase logam yang dipulihkan, seperti tembaga (Cu) dan nikel (Ni).

ANN dilatih menggunakan data historis melalui algoritma *backpropagation*, di mana model belajar untuk memperbarui bobot berdasarkan kesalahan antara keluaran model dan nilai aktual (Ashraf et al., 2022). Dengan cara ini, ANN dapat menemukan pola yang kompleks dan menghasilkan prediksi yang akurat.

Penerapan ANN dalam pemulihan Logam

ANN sangat cocok untuk menangani proses ini karena hubungan antara variabel proses, seperti konsentrasi bahan pelindih, suhu, dan waktu reaksi, sering kali bersifat non-linear. ANN mampu menangkap pola non-linear ini dengan akurasi yang tinggi. Pendekatan serupa juga diterapkan oleh (Iqbal et al., 2023) yang memanfaatkan kombinasi ResNet50 dan Support Vector Machine (SVM) dalam klasifikasi berbasis citra, menunjukkan bahwa model hybrid mampu meningkatkan akurasi prediksi dalam sistem berbasis pembelajaran mesin. ANN sangat cocok untuk menangani proses ini karena:

1. Hubungan antara variabel proses, seperti konsentrasi bahan pelindih, suhu, dan waktu reaksi, sering kali bersifat non-linear. ANN mampu menangkap pola non-linear ini dengan akurasi yang tinggi.
2. ANN dapat menghemat waktu dan biaya dengan mengurangi kebutuhan eksperimen fisik untuk mengevaluasi berbagai kombinasi parameter proses.

Sebagai contoh, sumber dari (EPA, 2019), ANN dapat memprediksi persentase pemulihan tembaga (Cu) dan nikel (Ni) dari PCB berdasarkan parameter seperti:

- a. Konsentrasi larutan amonia (NH_3).
- b. Konsentrasi ammonium sulfat ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).
- c. Konsentrasi hidrogen peroksida (H_2O_2).
- d. Suhu reaksi.
- e. Rasio cairan terhadap padatan (L/S ratio).

f. Waktu reaksi.

Hasil prediksi ANN dapat digunakan sebagai masukan untuk proses optimasi, untuk menentukan kondisi operasional yang optimal.

Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, penerapan Artificial Neural Network (ANN) terbukti mampu meningkatkan efisiensi dalam memprediksi pemulihan logam dari limbah PCB. ANN dapat mengidentifikasi pola hubungan kompleks antar variabel yang sulit diuraikan dengan metode konvensional, sehingga dapat memberikan estimasi yang lebih akurat. Dengan demikian, teknologi ini dapat mendukung proses daur ulang yang lebih efisien dan ramah lingkungan serta mendorong penerapan ekonomi sirkular.

Sebagai saran, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan mengintegrasikan ANN dengan teknik optimasi lainnya untuk meningkatkan akurasi prediksi. Selain itu, penerapan ANN dalam skala industri juga perlu dikaji lebih lanjut untuk memastikan keandalannya dalam kondisi nyata. Dukungan dari pemerintah dan industri dalam pengembangan serta penerapan teknologi berbasis kecerdasan buatan ini sangat diperlukan guna meningkatkan efisiensi pemulihan logam dan mengurangi dampak lingkungan dari limbah elektronik.

Daftar Pustaka

- Ashraf, W. M., Rafique, Y., Uddin, G. M., Riaz, F., Asim, M., Farooq, M., Hussain, A., & Salman, C. A. (2022). Artificial intelligence based operational strategy development and implementation for vibration reduction of a supercritical steam turbine shaft bearing. *Alexandria Engineering Journal*, 61(3), 1864–1880. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.07.039>
- Biswas, N., Mondal, A. S., Kusumastuti, A., Saha, S., & Mondal, K. C. (2025). Automated credit assessment framework using ETL process and machine learning. *Innovations in Systems and Software Engineering*, 21(1), 257–270. <http://repository.uin-malang.ac.id/13340/>
- EPA. (2019). Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)—Management Practices Chapters.
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2024). The Global E-waste Monitor 2024: Quantities, flows, and the circular economy potential. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU), and International Solid Waste Association (ISWA). <https://ewastemonitor.info/>
- Iqbal, E. A. Moh., Kusumawati, R., & Santoso, I. B. (2023). Hybrid Model Transfer Learning ResNet50 and Support Vector Machine for Face Mask Detection. *International Journal of Advances in Data and Information Systems*, 4(2), 125–134. <http://repository.uin-malang.ac.id/16448/>
- Syawab, M. H., Arief, Y. M., Nugroho, F., Kusumawati, R., Crysdiyan, C., & Almais, A. T. W. (2024). Optimizing Goods Placement in Logistics Transportation using Machine Learning Algorithms based on Delivery Data. *Jurnal ELTIKOM*, 8(2), 201–209. <http://repository.uin-malang.ac.id/23520/>