

EVALUASI OPTIMALISASI DAUR ULANG LIMBAH INDUSTRI BASIS INDUSTRI 4.0 UNTUK MENURUNKAN EMISI KARBON

Rame¹, FaridaCrisnaningtyas²

^{1,2,3} Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri

rame@kemenperin.go.id¹

ABSTRAK

Tingkat karbon dioksida yang tinggi memiliki beberapa efek lingkungan yang signifikan, terutama emisi karbon dari industri dan aktivitas manusia. Emisi karbon merupakan kontributor signifikan terhadap perubahan iklim global, kerusakan lingkungan, dan risiko kelangsungan hidup manusia. Isu iklim menjadi semakin mendesak karena emisi karbon. Pendekatan evaluasi menggunakan tinjauan pustaka sistematis pada penelitian bertujuan untuk mengevaluasi publikasi akademis yang ada tentang peluang dan potensi Industri 4.0 dalam rangka mendukung pengurangan emisi karbon. ScienceDirect digunakan sebagai basis data utama publikasi dan abstrak. Penelusuran literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci "Industri 4.0" dan "emisi Karbon". Optimasi industri 4.0 terbukti dapat menurunkan emisi karbon di industri global. Implementasi Industri 4.0 harus dilakukan secara global oleh pemerintah, industri, dan masyarakat untuk mencegah perubahan iklim global..

Kata kunci: Industri 4.0, optimasi, evaluasi, emisi karbon.

ABSTRACT

High levels of carbon dioxide have significant environmental effects, especially carbon emissions from industry and human activities. Carbon emissions are significant contributors to global climate change, environmental damage, and human survival risks. Climate issues are becoming increasingly urgent because of carbon emissions. The evaluation approach using a systematic literature review on research aims to evaluate existing academic publications on the opportunities and potential of Industry 4.0 to reduce carbon emissions. ScienceDirect is used as the primary database of publications and abstracts. The literature search was conducted using the keywords "Industry 4.0" and "Carbon emissions." Industry optimization 4.0 is proven to reduce carbon emissions in global industries. Implementation of Industry 4.0 must be carried out globally by governments, industries, and communities to prevent global climate change. Keywords: Waste, aluminum powder, alum, KOH, purification.

Keywords: Industry 4.0, optimization, evaluation, carbon emission.

PENDAHULUAN

Tingkat karbon dioksida yang tinggi memiliki beberapa dampak lingkungan yang signifikan, terutama emisi karbon dari industri dan aktivitas manusia. Kandungan karbon dioksida dalam emisi atmosfer meningkatkan suhu bumi [1]-[2]. Mencairnya es di kutub menyebabkan naiknya permukaan air laut, salah satu efek dari peningkatan suhu bumi akibat emisi karbon. Kekeringan dan kekurangan air bersih akibat perubahan iklim yang ekstrem juga menyebabkan naiknya permukaan air laut dan kekeringan di daratan. Bencana alam seperti banjir, angin topan, dan tsunami adalah beberapa efek destruktif. Banyaknya tanaman yang rusak akibat cuaca yang tidak dapat diprediksi akan mengurangi pasokan pangan dan menyebabkan perubahan rantai makanan. Perluasan bumi tropis membantu penyebaran penyakit tropis ke daerah subtropis, seperti malaria, di bidang kesehatan. Kerusakan ekosistem laut seperti terumbu karang adalah keasaman laut yang tinggi, penyerap karbon, dan peningkatan suhu air laut. Perusakan tersebut telah mengurangi jumlah ikan kecil dan plankton, sehingga mengganggu rantai makanan hewan laut lainnya.

Di berbagai industri, sistem pemilahan produk limbah otomatis secara khusus telah dikembangkan untuk mengotomatisasi identifikasi, pembongkaran, dan pemilahan peralatan elektronik. Sistem pemilahan bagian sampah otomatis yang secara

optimal memilah sampah sebagai bahan peleburan. Penelitian tentang penggunaan yang efektif dari konsep ekonomi sirkular dan teknologi serta sistem inovatif untuk pengurangan karbon dalam bidang energi dan lingkungan terus dilakukan secara global [3]-[8]. Proses otomatisasi secara efisien mendaur ulang sumber daya logam dan membantu industri mencapai sumber daya dan pasokan energi yang stabil sambil mendorong konservasi energi [9]. Pendekatan industri 4.0 dapat digunakan untuk mengoptimalkan daur ulang limbah industri dengan mengurangi emisi karbon. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi publikasi akademis yang ada tentang peluang dan potensi Industri 4.0 dalam rangka mendukung pengurangan emisi karbon.

METODE PENELITIAN

Science Direct digunakan sebagai basis data utama karena merupakan basis data publikasi dan abstrak terbesar. Penelusuran literatur dilakukan dengan menggunakan kata kunci "Industri 4.0" dan "emisi Karbon". Pendekatan evaluasi menggunakan tinjauan pustaka sistematis, yaitu mencari publikasi, memilih dan mengevaluasi berdasarkan kontribusi, menganalisis dan mensintesis hasil, dan melakukan pembahasan hasil secara ilmiah.

Pencarian berbasis kata kunci tanpa batasan waktu menghasilkan 79 artikel. Artikel dipilih berdasarkan keterbaruan dan relevansi. Evaluasi optimalisasi daur ulang limbah industri dilakukan melalui pendekatan industri 4.0 berdasarkan reduksi karbon. Dalam pemilihan tersebut, perhatian khusus diberikan pada konsistensi tematik terkait Industri 4.0 dan reduksi emisi karbon industri. Artikel yang menggunakan istilah Industri 4.0 dalam kata kunci ketika merujuk pada solusi teknologi tanpa implikasi langsung terhadap emisi karbon di industri dihapus. Seleksi akhir terdiri dari 25 artikel, yang digunakan untuk penelitian ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Semua makhluk hidup akan mengeluarkan 'karbon' khususnya dalam bentuk senyawa karbon dioksida. Karbon dioksida salah satunya dikeluarkan tiap makhluk hidup dari proses pernapasan. Kita menghirup oksigen dan mengeluarkan karbondioksida. Sederhananya, karbon dioksida akan diserap oleh tumbuh-tumbuhan dan melalui proses fotosintesis, oksigen akan kembali dihasilkan ke udara. Namun, laju produksi karbon dioksida jauh lebih cepat daripada produksi oksigen. Dengan adanya industri, kemajuan teknologi, dan pertumbuhan populasi, kadar karbon dioksida di bumi meningkat pesat. Sementara itu, lahan-lahan hijau semakin sempit.

Emisi karbon menjadi salah satu kontributor terbesar dalam perubahan iklim global yang berdampak buruk pada lingkungan dan kelangsungan hidup manusia. Dalam konteks lingkungan industri, emisi karbon yang dimaksud akan merusak adalah gas-gas emisi yang memiliki kandungan karbon dioksida tinggi. Gas-gas ini dihasilkan dari pembakaran senyawa yang mengandung karbon. Misalnya, asap dari pembakaran sampah, limbah industri, dan bahan lain yang mengandung hidrokarbon.

Regulasi pemerintah dalam pembangunan rendah karbon

Pemanasan global adalah realita, sedangkan bagaimana industri menyikapi adalah dominan pemilihan strategi. Respons strategi yang tepat dan adil terhadap perubahan iklim harus bersifat global, harmonis, dan terintegrasi. Pemerintah Indonesia telah Menyusun strategi pembangunan rendah karbon sesuai RPJMN 2020-2024 dapat dilakukan melalui efisiensi pengelolaan limbah dan pengembangan industri hijau dengan penerapan modifikasi proses teknologi dan manajemen limbah industri. Pemerintah Indonesia membuat desain kebijakan yang holistik dan komprehensif. Pembangunan industri dilakukan melalui penerapan digitalisasi berbasis ekonomi hijau. Strategi utama adalah minimisasi penggunaan energi berbasis fosil sebagai penyumbang utama emisi karbon terbesar. Komitmen industri dan dukungan Pemerintah secara domestik maupun internasional merupakan kunci utama dalam upaya penurunan emisi karbon. Pemerintah Indonesia saat ini sedang berupaya melakukan efisiensi dan efektivitas beban melalui integrasi pembiayaan publik melalui kolaborasi skema carbon trading, carbon credit, dan carbon tax.

Industri di Indonesia sedang dalam fase transisi menuju ekonomi hijau dan berkelanjutan, yaitu pertumbuhan industri dengan skenario pembangunan rendah karbon. Penurunan intensitas energi fosil, transisi industri 4.0, dan manajemen limbah merupakan strategi yang dilakukan industri untuk mencapai net zero emission. Sehingga pembangunan industri rendah karbon dapat mendukung program lingkungan hidup lestari, meningkatkan ketahanan bencana, dan mencegah perubahan iklim global. Sumber daya manusia yang kompeten diperlukan dalam modernisasi industri melalui transformasi digital yaitu, kompetensi dalam infrastruktur digital, pemanfaatan digital, dan penguatan industri 4.0. Digitalisasi infrastruktur industri akan meningkatkan produktivitas sekaligus mencapai industri rendah karbon.

Implementasi Industri 4.0 dalam reduksi emisi karbon

Desain daur ulang yang sederhana dapat meningkatkan produk yang bisa digunakan kembali dan mengurangi biaya operasi bagi industri seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Transformasi digital proses dan teknologi daur ulang secara bertahap dapat

meningkatkan minat industri dan memberikan waktu bagi industri untuk beradaptasi. Sebagai contoh, beberapa industri elektronika dapat menggunakan kembali beberapa komponen elektronik sebagai output dari seleksiotomatis limbah elektronik.

Tabel 1. Pendekatan industri 4.0 untuk menurunkan emisi karbon di industri global

No.	Industri	Objek Implementasi	Efisiensi	Reduksi Emisi Karbon	Ref
1	Susu, Kanada	Separasi pengomposan padat-cair.	Waktu pengomposan <24 jam	Tinggi	[1]
2	Serat Karbon	Sistem Pemanfaatan Panas	Mengurangi jejak karbon sebesar 28,5 t/y	Tinggi	[2]
3	Kemasan Plastik	Skrining pada emisi kontaminan berbau	Mengurangi emisi bau	Tinggi	[3]
4	Sistem Industri dan Manufaktur	Pemeliharaan untuk manufaktur berkelanjutan	Mengurangi energi, konsumsi sumber daya dan emisi	Tinggi	[4]
5	Pertambangan Batu bara, Cina	Pertambangan Batu Bara	Mengurangi tenaga kerja, kerusakan ekologis, dan tingkat emisi	Tinggi	[5]
6	Manufaktur Aditif	Tiga Tahapan menjadi satu terintegrasi	Mengurangi biaya produksi dan penurunan emisi CO ₂	Tinggi	[6]
7	Semen	Menerapkan adsorpsi tambahan pada arang aktif	Mengurangi emisi merkuri	Tinggi	[7]
8	Kendaraan Listrik	Perakita Baterai isi ulang Li-ion	Transportasi dan dekarbonisasi emisi rendah	Tinggi	[8]
9	Logam Bekas dan Pengelolaan Limbah, India	Otomatisasi prosedur pemantauan dan pemilihan untuk logam dan pengolahan logam bekas	Pengurangan emisi CO ₂ , ketersediaan sumber daya dan pengoptimalan waktu respons	Tinggi	[9]
10	Gas, Amerika Serikat	Unit penghapusan nitrogen optimal	Volume unit lebih tinggi, murah untuk dibangun dan mudah dioperasikan	Tinggi	[10]

Konsep Industri 4.0 semakin mendapat perhatian global dengan menggabungkan teknologi Internet of Things, Big Data dan Cyber Physical Systems untuk meningkatkan efektivitas operasi, produktivitas, dan otomatisasi [17]. Industri 4.0 mempengaruhi 85% standar lingkungan, 65% ekonomi dan 50% sosial, serta dampak langsung pada kinerja ekonomi, dampak ekonomi tidak langsung, energi dan emisi [12]. Industri 4.0 sebagai Revolusi Industri Keempat melalui Transformasi Digital menawarkan fungsi keberlanjutan di seluruh dunia yang efektif [13]. Digitalisasi rantai pasokan mendorong industri untuk mengadopsi solusi IoT (Industri 4.0 / *Internet of Things*) sebagai peluang manajemen yang lebih berkelanjutan [9]. Transformasi dari batch ke proses berkelanjutan merupakan realita pentingnya aspek keselamatan dan perhatian lingkungan seperti transportasi energi dan emisi proses dalam produksi [22]. Industri 4.0 berdampak pada lingkungan, yaitu resiko meningkatnya penggunaan dan pemborosan bahan dan sumber daya energi [2]. Penggunaan energi sangat penting dikaitkan dengan resiko emisi karbon dan meningkatnya biaya produksi [18]. Industri 4.0 mendorong pengurangan produksi emisi dan mempromosikan penggunaan teknologi [19]. Energi terbarukan dari angin dan matahari adalah dua teknologi yang akan mendominasi dalam beberapa dekade mendatang [15]. Pengembangan penghematan energi dan pengurangan emisi merupakan komitmen bersama secara global [20, 23]. Baterai Li-Ion dan Li-Po yang menyimpan energi tingkat tinggi dimanfaatkan pada kapal penumpang, seperti feri dan yacht, karena ramah lingkungan [11].

Berbagai teknik dan metodologi telah digunakan untuk penentuan kualitas dan pemantauan sensor. Otomatisasi Industri 4.0 memungkinkan pertukaran data yang efisien untuk pertumbuhan industri yang berkelanjutan. Integrasi sensor kedalam mesin yang ada memungkinkan informasi proses disalurkan secara real time dan membantu mengelola kelainan proses dan memastikan presisi dan kualitas produk. Sensor yang berbeda telah dimanfaatkan untuk mendapatkan informasi tentang

proses seperti parameter suhu, emisi, dan citra [14]. Metode pemeliharaan prediktif telah sangat bervariasi dalam industri, termasuk visual, pencitraan termal, analisis ultrasound, getaran dan energi. Pengembangan teknologi pemeliharaan saat ini melibatkan pemasangan sistem sensor kompleks yang ditempatkan atau dekat dengan sistem pengujian. Namun tingginya biaya sensor dan potensi kerusakan serta biaya penggantian yang tinggi, menyebabkan peluang berkembangnya sistem pemantauan jarak jauh [21]. Strategi pemeliharaan prediktif alat mesin [24] dan perencanaan sistem industri otomatis akan memberikan peluang untuk ketersediaan aset yang lebih besar, kualitas produk yang lebih baik dan biaya investasi serta operasi yang lebih rendah.

Desain daur ulang harus memberikan kejelasan dalam hal kriteria komponen yang dapat didaur ulang yang dibedakan berdasarkan karakteristik pengujian untuk setiap sensor yang digunakan. Pemanfaatan kembali komponen industri dari pengolahan limbah industri secara digital yang sejalan dengan industri rendah karbon secara kontinyu dan sirkular menjadi penting untuk meningkatkan pendapatan industri dan mengantisipasi emisi karbon.

Konsep penguatan industri 4.0 pada daur ulang limbah industri semestinya diletakkan dalam bingkai proses dan teknologi, yang dimanfaatkan industri dalam mendorong pencapaian visi ramah lingkungan. Tantangan berikutnya adalah komitmen dukungan Pemerintah pada industri dalam menerapkan strategi atau skema digitalisasi yang tepat. Pengembangan digitalisasi daur ulang limbah industri menjadi terobosan penting dan babak baru penerapan industri hijau yang berkelanjutan. Proses adopsi, implementasi industri 4.0 yang tepat dan terbuka menjadi kesempatan yang baik bagi Pemerintah maupun industri untuk menyampaikan hambatan dan masukan demi tercapainya suatu desain daur ulang digital yang holistik. Insentif Pemerintah pada industri yang telah menerapkan digitalisasi daur ulang limbah industri secara sirkular dan ramah lingkungan akan meningkatkan animo industri lainnya untuk berkontribusi dalam daur ulang limbah industri dan dapat menjadi langkah awal yang baik serta meyakinkan dalam informasikeberhasilan industri rendah karbon.

KESIMPULAN

Risiko perubahan iklim dan tren digitalisasi global dapat menghambat pembangunan industri. Idealnya proses dan teknologi industri 4.0 perlu diterapkan oleh industri pada semua sektor. Namun implementasi industri 4.0 pada daur ulang limbah industri perlu dilakukan secara bertahap untuk meningkatkan minat industri dan memberikan waktu bagi industri untuk beradaptasi. Pendekatan industri 4.0 yang terintegrasi dengan kebijakan industri rendah karbon dapat mendukung implementasi industri hijau. Daur ulang limbah industri secara digital dapat meningkatkan pendapatan industri dan mengantisipasi emisi karbon. Publikasi terkini menunjukkan optimasi industri 4.0 terbukti dapat menurunkanemisi karbon di industri global. Transisi digitalisasi industri membutuhkan investasi yang sangat besar sehingga mengharuskan perhatian dan komitmen pihak berkepentingan untuk menyiapkan kebijakan yang lebih komprehensif dan efektif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Aris Mukimin atas diskusi terkait Industri 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Fournel et al. Production of Recycled Manure Solids for Use As Bedding In Canadian Dairy Farms: II.Composting Methods. *J. Dairy Sci.* 102(2):1847–1865. 2019.
- [2] H. Khayyam et al. Improving Energy Efficiency of Carbon Fiber Manufacturing Through Waste Heat Recovery: A Circular Economy Approach With Machine Learning. *Energy* 225, 2021.
- [3] M. Strangl, B. Lok, P. Breunig, E. Ortner, and A. Buettner. The Challenge Of Deodorizing Post Consumer Polypropylene Packaging: Screening of The Effect Of Washing, Color-Sorting And Heat Exposure. *Resour. Conserv. Recycl.* 164. 2021.
- [4] C. Franciosi, B. Lung, S. Miranda, and S. Riemma. Maintenance for Sustainability in the Industri 4.0 context: a Scoping Literature Review. *International Federation of Automatic Control*. 2018.
- [5] G. Wang, Y. Xu, and H. Ren. Intelligent and Ecological Coal Mining As Well As Clean Utilization Technology in China: Review and Prospects. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 29(2): 161–169. 2019.
- [6] S. Scharf et al. FOUNDRY 4.0: An Innovative Technology for Sustainable And Flexible Process Design In Foundries. *Procedia CIRP*: 73–78. 2021.
- [7] K. Kogut, J. Górecki, and P. Burmistrz. Opportunities for Reducing Mercury Emissions In The Cement Industri. *J. Clean. Prod.* 293. 2021.
- [8] R. D'Souza, J. Patsavellas, and K. Salonitis. Automated Assembly Of Li-Ion Vehicle Batteries: A Feasibility Study. *Procedia CIRP*: 131–136. 2020.
- [9] T. D. Mastos et al. Industri 4.0 sustainable supply chains: An Application Of An Iot Enabled Scrap Metal Management Solution. *J. Clean. Prod.* 269. 2020.

- [10] J. C. Kuo, K. H. Wang, and C. Chen. Pros and Cons of Different Nitrogen Removal Unit (NRU) Technology. *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 7:52–59. 2012.
- [11] V. Ruggiero. New Approach To The Fire Risk and Firefighting in Small Ships, as Consequence of Latest Developments in Industri 4.0 for The Use of Hybrid Propulsion. *Procedia Computer Science.* 2021.
- [12] S. Narula et al. Applicability of industri 4.0 Technologies in The Adoption of Global Reporting Initiative Standards for Achieving Sustainability. *J. Clean. Prod.* 305. 2021.
- [13] M. Ghobakhloo. Industri 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *J. Clean. Prod.* 252. 2020.
- [14] X. Ma, J. Wang, Q. Bai, and S. Wang. Optimization Of A Three-Echelon Cold Chain Considering Freshness- Keeping Efforts Under Cap-And-Trade Regulation in Industri 4.0. *Int. J. Prod. Econ.* 220. 2020.
- [15] T. Zaimovic. Setting Speed-Limit On Industri 4.0- A N Outlook Of Power-Mix and Grid Capacity Challenge. *Procedia Computer Science.* 2019.
- [16] F. S. Tesch da Silva, C. A. da Costa, C. D. Paredes Crovato, and R. da Rosa Righi. Looking at Energy Through The Lens of Industri 4.0: A Systematic Literature Review of Concerns And Challenges. *Comput. Ind. Eng.* 143. 2020.
- [17] Y. Kazancoglu, M. D. Sezer, Y. D. Ozkan-Ozen, S. K. Mangla, and A. Kumar. Industri 4.0 Impacts on Responsible Environmental and Societal Management in The Family Business. *Technol. Forecast. Soc. Change.* 173. 2021.
- [18] H. M. Alswat and P. T. Mativenga. The International Dimension of Electrical Energy Derived Emissions for Machine Tools. *Procedia CIRP.* 2021.
- [19] K. N. Khaqqi, J. J. Sikorski, K. Hadinoto, and M. Kraft. Incorporating Seller/Buyer Reputation-Based System In Blockchain-Enabled Emission Trading Application. *Appl. Energy.* 209: 8–19. 2018.
- [20] M. Song and S. Wang. Measuring Environment-Biased Technological Progress Considering Energy Saving and Emission Reduction. *Process Saf. Environ. Prot.* 116: 745–753. 2018.
- [21] J. Coady, D. Toal, T. Newe, and G. Dooly. Remote Acoustic Analysis for Tool Condition Monitoring. *Procedia Manufacturing.* 2019.
- [22] J. Ilare and M. Sponchioni. From Batch to Continuous Free-Radical Polymerization: Recent Advances and Hurdles Along The Industrial Transfer. *Adv. Chem. Eng.* 56(1): 229–257. 2020.
- [23] J. Patsavellas and K. Salonitis. The Carbon Footprint of Manufacturing Digitalization: Critical Literature Review and Future Research Agenda. *Procedia CIRP:* 1354–1359. 2019.
- [24] S. Costa, F. J. G. Silva, R. D. S. G. Campilho, and T. Pereira. Guidelines for Machine Tool Sensing and Smart Manufacturing Integration. *Procedia Manufacturing:* 251–257. 2020.