

Model Proses Produksi Tertutup pada Industri Karet Remah (*Crumb rubber*) SIR

*Hayu Kartika¹, Nuraida Wahyuni²

¹Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana

²Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

*e-mail: hayu.kartika@mercubuana.ac.id

Abstrak

Artikel ini mengeksplorasi industri *Crumb rubber* SIR di Indonesia, komoditas ekspor utama yang juga merupakan sumber signifikan pencemaran lingkungan. Artikel ini diartibelakangi perlunya mengatasi dampak lingkungan dari proses produksi *Crumb rubber* SIR, yang menghasilkan limbah cair dan padat serta memerlukan konsumsi energi tinggi. Tujuan utama dari studi ini adalah untuk mengidentifikasi dan menganalisis aspek-aspek kritis dalam proses produksi yang berkontribusi terhadap masalah lingkungan dan efisiensi energi. Metode neraca massa digunakan untuk menganalisis kesetimbangan massa dan energi dalam proses produksi. Tulisan ini mengkaji secara detail setiap tahapan produksi, mengidentifikasi area di mana limbah dihasilkan, dan mengukur konsumsi energi pada setiap tahap. Hasil kajian menunjukkan bahwa terdapat beberapa titik kritis dalam proses produksi yang bertanggung jawab atas produksi limbah dan konsumsi energi yang tinggi. Analisis ini membantu dalam menyarankan beberapa perbaikan proses dan pengelolaan limbah yang dapat mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi energi. Kesimpulan dari studi ini menekankan perlunya perbaikan dalam metode produksi *Crumb rubber* SIR untuk mengurangi limbah dan konsumsi energi. Pada artikel ini memberikan kontribusi pengetahuan bagi produsen *Crumb rubber* dalam mengimplementasikan praktek yang lebih berkelanjutan dan efisien secara energi, yang tidak hanya akan menguntungkan lingkungan tetapi juga dapat meningkatkan keberlanjutan operasional industri.

Kata kunci: *Crumb rubber*, Limbah, Proses Produksi Tertutup, Neraca Massa.

Diterima : 12-3-2024
Disetujui : 29-4-2024
Dipublikasi : 31-5-2024

©2024 Hayu, Nuraida

PENDAHULUAN

Crumb rubber atau karet remah ini merupakan salah satu industri dari non-migas yang merupakan salah satu komoditas ekspor yang menjanjikan. Pada pengolahan *Crumb rubber* ini dalam setiap 100 kg bahan baku lateks atau karet menghasilkan setidaknya kurang lebih 85% hasil karet bersih, 10% limbah cair dan 3%-5% limbah padat (Prawiranti et al., 2016; Wahyudi, 2022). Indonesia merupakan salah satu yang memproduksi karet terbesar yaitu sekitar 93,4% (Vachlepi & Suwardin, 2014). Dari hasil produksi karet alam di Indonesia, total produksi karet alam sebagian besar berkisar 85%-90%. Karet alam diekspor dengan beberapa klasifikasi yang meliputi: lateks pekat, *Crepe*, RSS (*Ribbed Smoked Sheet*), ADS (*Air Dried Sheet*), karet standar teknik (SIR = *Standard Indonesian Rubber*), dan karet skim. Karet standar teknis atau umumnya dikenal dan disebut dengan karet remah (*crumb rubber*), merupakan jenis karet yang mutunya dinilai berdasarkan sifat-sifat fisika kimia. Permintaan dari karet jenis ini sangat besar khususnya permintaan dari sektor industri ban, yakni menyerap sekitar 70% dari

total produksi karet alam, menyebabkan *Crumb rubber* selalu menjadi unggulan ekspor Indonesia. Namun, dengan kemajuan industri karet tersebut menimbulkan permasalahan baru yaitu adanya pencemaran air pada pengolahan industri karet tersebut terutama pembuangan limbah cair yang menimbulkan bau tidak sedap hal ini dikarenakan limbah cair dari karet mengeluarkan kandungan ammonia yang dihasilkan sejumlah 29,83 mg/L, selain itu limbah cair tersebut juga mengandung senyawa nitrogen sejumlah 56,03 mg/L, sulfur 33,03 mg/L dan senyawa karbon 200 mg/L (Budiarto et al., 2014).

Energi yang digunakan dalam pengolahan *crumb rubber* membutuhkan energi listrik dan energi panas untuk proses pengeringan. *Crumb rubber* merupakan karet kering yang proses pengolahannya melalui tahap peremahan. Bahan baku *crumb rubber* ini berasal dari lateks yang telah diolah menjadi koagulum atau sleb. Proses pengeringan merupakan salah satu proses yang kritical dimana proses ini merupakan penentu dari mutu akhir produk *crumb rubber* (Vachlepi & Suwardin, 2014). Energi yang digunakan dalam industri umumnya menggunakan energi yang dihasilkan dari fosil, dimana energi fosil ini semakin lama memiliki kecenderungan menurun didalam persediaanya. Oleh karena itu dibutuhkan energi alternatif salah satunya energi dari Biomassa yang bisa kita manfaatkan dari industri pengolahan produk pertanian. Salah satunya adalah pemanfaatan biomassa yang dihasilkan dari industri karet dimana total *output* energi dari sisa pertanian menghasilkan 51.580.112,26 GJ/tahun dengan potensial residu sebesar 2.686.464 ton/tahun (Hidayati & Ekayuliana, 2022). Pada industri pengolahan *crumb rubber* konsumsi energi listrik diperlukan untuk mesin *compressing*, *milling*, dan *shredding*. Sedangkan energi panas digunakan untuk tahap pengeringan dimana diesel dibakar untuk menghasilkan udara panas yang memiliki suhu 100–120 °C. Total Konsumsi energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan karet kering sebesar 3062,72 MJ/ton karet kering sama dengan 850,76 kWh/ton karet kering. Total konsumsi tersebut terdiri dari jenis energi dari *Man-Power*, energi listrik dan energi bahan bakar (Suwardin et al., 2016). Dengan besarnya konsumsi energi tersebut dan melihat potensi limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan *crumb rubber* maka perlu adanya pengembangan pemanfaatan energi dari limbah secara berkelanjutan.

Industri pengolahan pertanian di masa depan akan terus berupaya untuk membuat konsep industri produksi bersih (*Cleaner Production*). Produksi bersih ini terfokus pada proses industri itu sendiri dengan mempertimbangkan integrasi dari suatu sistem produksi dimana sistem produksi tersebut mampu meminimalisasi dampak lingkungan serta mampu memaksimalkan produksi agar setiap input pada sebuah

proses produksi menjadi efisien. Salah satu upaya menciptakan produksi bersih yaitu dengan menerapkan pola industri dengan sistem tertutup. Sistem tertutup sendiri mempunyai pengertian suatu sistem yang tidak memiliki hubungan dengan lingkungan selain itu sistem ini tidak dipengaruhi lingkungan dari luar sistem. Dalam sistem tertutup dalam produksi sendiri diartikan sebagai suatu kesetimbangan antara massa dan energi yang saling terintegrasi pada suatu aliran material yang terjadi di dalam sistem (Fiona Arintika Ramdhani, 2016). Maka dari latar belakang tersebut artikel ini bertujuan membahas terkait pemanfaatan energi pada pengolahan *crumb rubber* dengan sistem industri tertutup.

METODE

Jenis dan Sumber Data

Metode yang digunakan dalam mengumpulkan data pada artikel ini berdasarkan penelusuran literatur. Literatur yang digunakan berupa buku, jurnal, karya ilmiah, laporan ilmiah dan lainnya melalui penelusuran sumber yang relevan.

Batasan Sistem

Proses produksi *Crumb rubber SIR* terdiri dari 8 tahapan proses meliputi pembelahan slab (*Prebreker*), pencincangan (*Hammer mill*), pengadukkan, penggilingan lembaran karet (*Creper*), penjemuran (*Ruang Maturasi*), peremahan (*Cutter Mill*), pengeringan (*Dryer*), pengepressan. Bahan baku material yang digunakan adalah slab dengan ukuran 1000 kg/ 1 ton untuk pembuatan *Crumb rubber SIR*.

Kesetimbangan Massa

Mencari kesetimbangan massa menggunakan model neraca massa yang digunakan untuk mengidentifikasi kompartemen dari setiap tahapan-tahapan proses produksi *crumb rubber* dilihat dari input (slab dan bahan tambahan) dan output (*crumb rubber*).

Potensi Hasil Samping dari Energi

Untuk mendapatkan potensi hasil samping dari energi didasarkan dari model neraca massa, untuk nilai energi didapatkan dari sumber literatur. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Potensi Energi (kkal)} = \text{Massa (kg)} \times \text{Nilai Kalor (kkal/Kg)} \dots\dots\dots (1)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

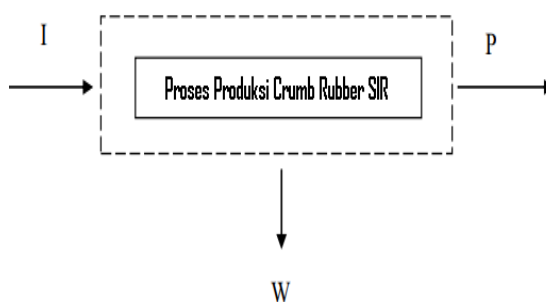
HASIL

Proses produksi *Crumb rubber SIR* memanfaatkan model produksi tertutup yang efisien dalam mengelola limbah. Model ini berfokus pada kesetimbangan massa, dimulai dari pembelahan slab di Stasiun I hingga pengeringan di Stasiun VII. Penelitian oleh

Zhang (Zhang et al., 2021) menunjukkan bahwa limbah karet, seperti *crumb rubber*, dapat dimanfaatkan dalam modifikasi aspal, yang mengurangi limbah dan meningkatkan kinerja material. Ini menunjukkan potensi limbah *crumb rubber* tidak hanya sebagai masalah lingkungan tetapi juga sebagai sumber daya yang berharga. Dalam konteks masalah lingkungan tetapi juga sebagai sumber daya yang berharga. Dalam konteks manajemen limbah, studi oleh Kaza (Kaza et al., 2018) menyoroti tantangan global dalam pengelolaan limbah padat dan pentingnya mengadopsi pendekatan ekonomi sirkular. Pendekatan ini relevan dengan model produksi tertutup *Crumb rubber SIR*, di mana limbah diolah dan dimanfaatkan kembali, mengurangi dampak lingkungan.

Agar dapat terlihat limbah yang dihasilkan dari proses produksi *Crumb rubberSIR*, sebelumnya memodelkan alur proses produksi dengan membuat model kesetimbangan massa. Untuk kesetimbangan massa diawali dengan membuat kompartemen dari setiap stasiun yang terdiri dari:

- Stasiun I : Pembelahan slab (*Prebreker*)
- Stasiun II : Pencincangan (*Hammer mill*)
- Stasiun III : Pengadukkan
- Stasiun IV : Penggilingan lembaran karet (*Creper/Mangle*)
- Stasiun V : Penjemuran (Ruang Maturasi)
- Stasiun VI : Peremahan/ Pencacah (*Shredder*)
- Stasiun VII : Pengeringan (*Dryer*)
- Stasiun VIII : Pengepressan



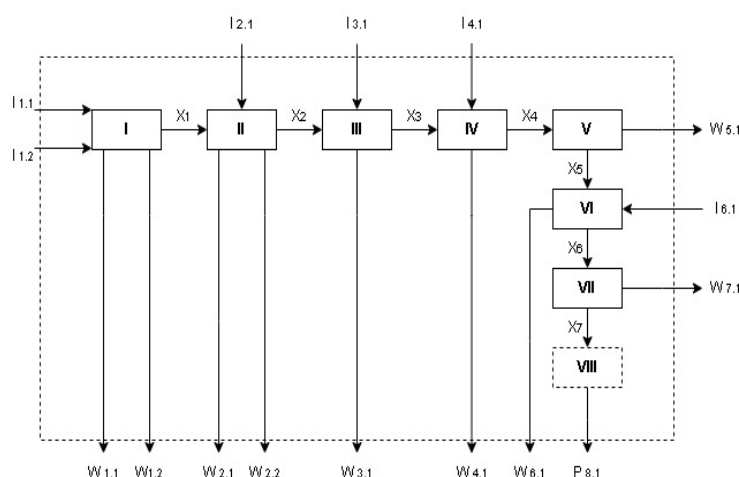
Gambar 1. Model kesetimbangan

Pada gambar 1 dimana simbol I (*Input*), simbol P (*Produk*) dan W = Limbah (*Waste*). Adapun persamaan untuk kesetimbangan massa yaitu:

$$I = P+W \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{Efisiensi (a) = } P/I \dots\dots\dots (3)$$

Selanjutnya membuat model kesetimbangan massa alur proses produksi *crumb rubber SIR* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Model kesetimbangan massa pengolahan bokarmenjadi *Crumb rubber* SIR

Dari gambar 2 diatas untuk stasiun VIII diabaikan karena massa yang keluar dari sistem sangat kecil sehingga dapat diabaikan.

Tabel 1. Keterangan aliran kesetimbangan massa

Stasiun	Simbol	Keterangan	Reference
I	I _{1.1}	1 Ton Slab/Bokar + Air	(Panjaitan, 2017; Utomo, 2008)
	I _{1.2}	Air (8,4 m ³)	
	W _{1.1}	Air Limbah (8,4 m ³)	
	W _{1.2}	Limbah Padat	
II	X ₁	Cacahan Lump/Slup	
	I _{2.1}	Air (4,9 m ³)	
	W _{2.1}	Air Limbah (4,9 m ³)	
	W _{2.2}	Limbah Padat (0,13 m ³)	
III	X ₂	Cacahan Lanjutan Lump/Slup	
	I _{3.1}	Air (6,2 m ³)	
	W _{3.1}	Air Limbah (6,2 m ³)	
IV	X ₃	Hasil cacahan lump/slup	
	I _{4.1}	Air (13,2 m ³)	
	W _{4.1}	Air Limbah (13,2 m ³)	
V	X ₄	Lembaran Karet basah	
	W _{5.1}	Uap Air (0,1 m ³)	
VI	X ₅	Lembaran karet kering	
	I _{6.1}	Air (4,4 m ³)	
	W _{6.1}	Air Limbah (4,4 m ³)	
VII	X ₆	Butiran karet	
	W _{7.1}	Uap air (0,2 m ³)	
VIII	X ₇	<i>Crumb rubber</i> SIR	
	P _{8.1}	Palet SIR	

Untuk menghasilkan *Crumb rubber* SIR dilakukan proses pengeringan dengan menghasilkan uap air sebesar 0,2 m³ (Utomo, 2008). Maka hasil dari pengeringan tersebut didapatkan 0,335 m³ *crumb rubber* SIR. Efisiensi a₅ sebesar 0,63 atau sebesar 63%. Menghasilkan 0,63 ton atau sebesar 630 Kg dari 1 ton bahan baku Bokar. Adapun

hasil neraca massa proses pengolahan *Crumb rubber* berbahan baku bokar terangkum pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Neraca Massa

Input	Proses	Output
1 Ton = 1000kg (Bahan Baku Bokar)	(37,1+1,6)= 38,7 m ³ (Limbah Air Proses + Air kebersihan dan pengurasan)	0,63 ton = 630 kg <i>Crumb rubber</i> SIR
	44,80 kg (<i>Chemical Oxygen Demand/COD</i>)	
37,1 m ³ (Air Proses)	14,74 kg (<i>Total Suspended Solids/TSS</i>)	
	N-NH ₃ 1,09 kg	
	130 kg Limbah Padat	

Potensi Energi pada Limbah Pabrik *Crumb rubber* SIR

Konsumsi energi yang digunakan pada *Crumb rubber* untuk energi dari proses pembuatan *crumb rubber* dapat dilihat pada tabel 3.

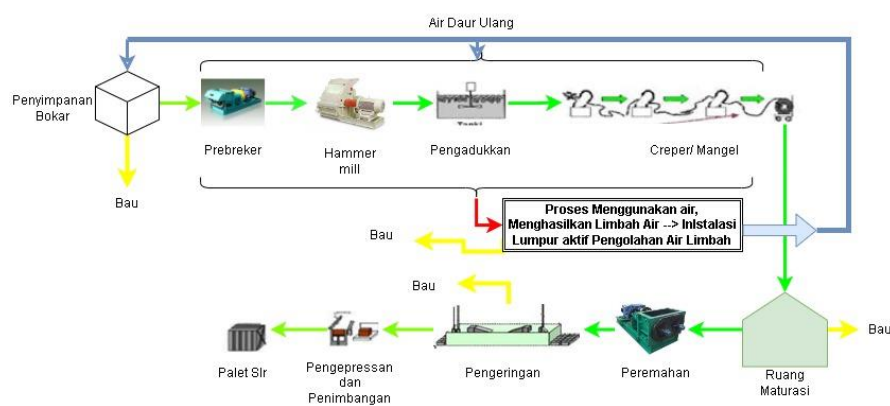
Tabel 3. Jumlah Konsumsi Energi

No	Jenis Energi	Energi (per ton karet kering) kWh	Persentase
1	Penggunaan Energi Listrik		
	Pengcilan Ukuran dan pembersihan (<i>cleaning</i>)	183,536	35,59
	Penggilingan (<i>milling</i>)	152,117	29,49
	Pengeringan awal (<i>pre-drying</i>)	8,900	1,73
	Shredding	44,875	8,70
	Pengeringan (<i>Drying</i>)	69,681	13,51
	Pressing	50,800	9,85
	Pendeteksi logam (Metal detecting)	5,842	1,13
	Total	515,75	100
2	Penggunaan Bahan Bakar		
	Transportasi Bokar	6,403	1,94
	Pengeringan	324,186	98,06
	Total	330,59	100
3	Penggunaan Energi Manusia		
	Transportasi	0,339	7,67
	Pengcilan Ukuran dan pembersihan (<i>cleaning</i>)	0,714	16,16
	Penggilingan (<i>milling</i>)	0,817	18,49
	Pengeringan awal (<i>pre-drying</i>)	0,714	16,16
	Shredding	0,681	15,41
	Pengeringan (<i>Drying</i>)	0,339	7,67
	Pressing	0,475	10,75
	Pendeteksi logam (Metal detecting)	0,203	4,59
	Pengemasan dan Penyimpanan Pallet	0,136	3,08
	Total	4,42	100

Sumber: (Suwardin et al., 2016)

Berdasarkan tabel 3, total dari konsumsi energi yang diperlukan untuk energi listrik dibutuhkan 515, 750 kWh dan bahan bakar membutuhkan energi sebesar 330,589 kWh. Selain energi tersebut juga penggunaan sumber daya air yang cukup banyak dari tabel 1 terlihat diperlukan penggunaan air dalam memproduksi *Crumb rubber SIR* sebesar 37,1 m³ dan ditambah konsumsi air. Berdasarkan (Utomo, 2008) untuk kebersihan dan pengurasan sebesar 1,6 m³, hasil rangkuman neraca massa dapat dilihat pada tabel 2. Dari besarnya penggunaan air tersebut, limbah air tersebut dapat digunakan dengan mendaur ulang air limbah. Air limbah karet yang dihasilkan juga mengandung senyawa organik yang tinggi seperti senyawa Nitrogen, Karbon, Fosfor, Amonia (Dewi et al., 2020)

Limbah yang dihasilkan oleh pabrik *Crumb rubber* terdiri dari limbah cair, padat dan bau. Limbah cair yang dihasilkan cukup besar yaitu berkisar 1200-2400 m³/hari, limbah padat berupa tatal, yang terdiri dari sisa karet, pasir dan tanah yang menghasilkan 10-20 ton per hari pemanfaatan limbah padat ini dapat dijadikan bahan baku gasifikasi sebagai sumber energi gas sintetik, dan juga untuk penanganan bau dari limbah dapat menggunakan pengendalian bau dengan Deorub (Didin Suwardin, 2015). Proses produksi tertutup pada pabrik pembuatan *Crumb rubber SIR* dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 3. Pengolahan *crumb rubber SIR* produksi tertutup

Pada gambar 3 dapat dilihat beberapa limbah yang dihasilkan terdiri dari limbah air, limbah gas, dan penggunaan energi panas dalam proses pengeringan. Untuk limbah air sendiri dapat diproses daur ulang untuk digunakan kembali dan untuk gas yang dihasilkan dapat digunakan menjadi bahan pengeringan.

Teknologi biogas dapat dimanfaatkan sebagai pengolahan air limbah industri *Crumb rubber* (Didin Suwardin, 2015). Air limbah yang dihasilkan dari pabrik karet

terkandung senyawa organik tinggi sehingga mempunyai potensi untuk menghasilkan biogas pada proses anaerobik, dan pada umumnya biogas mengandung 50-80% metana, CO₂, H₂S yang bisa dijadikan pengganti minyak tanah atau LPG (Dewi et al., 2020). Dengan proses anaerobik 1kg COD setara dengan 0,34m³gas metana (CH₄), 1 m³ metana setara dengan 35,9 MJ/m³ (C.P.Leslie Grady et al., 1999).

Tabel 4. Potensi energi

Hasil Samping	Metana (CH ₄)	Nilai Energi	Potensi Energi
Air Limbah	15,68 m ³	35,9 MJ/m ³	562,912 MJ

Dari perhitungan potensi energi pada tabel 4, jika dikonversi dalam kWh maka dihasilkan energi sebesar sebagai bahan bakar energi sebesar 156,37 kWh yang dihasilkan dari pengolahan 1ton bahan baku bokar menjadi *crumb rubber*.

PEMBAHASAN

Proses pembuatan *crumb rubber* melibatkan penggunaan berbagai jenis energi, termasuk energi listrik untuk pengecilan ukuran dan pembersihan. Aspek potensi dari proses ini adalah potensi energi yang terkandung dalam limbah yang dihasilkan. Penelitian oleh Hidayati (Hidayati & Ekayuliana, 2022) menyatakan bahwa terdapat potensi energi biomassa dari sisa tanaman Indonesia.

Potensi lain limbah *crumb rubber* seperti yang ditulis oleh Rahim (Rahim et al., 2022) menunjukkan bahwa *crumb rubber*, ketika digabungkan dengan bahan lain seperti *fly ash* dan nanosilika, dapat mempengaruhi sifat mekanik beton yang dihasilkan, menunjukkan potensi pemanfaatan limbah *crumb rubber* di sektor konstruksi yang lebih luas. Turbay (Turbay et al., 2022) juga mengkaji penggunaan *crumb rubber* dalam binder aspal, yang menyoroti potensi aplikasi limbah industri ini dalam pembangunan infrastruktur.

Selanjutnya, keberlanjutan produksi menjadi aspek penting dalam pengelolaan limbah. Penelitian oleh Hossain (Hossain & Roy, 2020) serta Begum (Begum et al., 2022) menyoroti pentingnya produksi berkelanjutan dalam menghadapi tantangan global, termasuk pandemi. Dalam konteks limbah pabrik *crumb rubber*, ini berarti mengeksplorasi cara-cara untuk mengubah limbah menjadi sumber daya berharga, sesuai dengan prinsip ekonomi sirkular.

Oleh karena itu, limbah padat dari pabrik *crumb rubber* tidak hanya merupakan sumber energi alternatif yang potensial tetapi juga memiliki peluang untuk inovasi dalam pengelolaan limbah dan produksi berkelanjutan. Dengan mengadopsi

pendekatan yang lebih holistik dan berkelanjutan, industri *crumb rubber* dapat memainkan peran penting dalam mendorong inovasi lingkungan dan efisiensi energi.

Penerapan model produksi tertutup di industri karet remah SIR membawa peningkatan efisiensi yang signifikan. Berdasarkan data simulasi, efisiensi produksi meningkat sekitar 20%, yang menunjukkan bahwa penggunaan sumber daya lebih optimal dan pengurangan pemborosan. Efisiensi ini dicapai melalui penggunaan teknologi canggih yang meminimalkan kehilangan bahan baku dan energi selama proses produksi. Selain itu, sistem tertutup memungkinkan pengendalian yang lebih baik terhadap kondisi operasional, seperti suhu dan kelembaban, yang krusial dalam proses pembuatan karet remah. Peningkatan ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa inovasi dalam proses produksi dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi (Fu et al., 2021).

Implementasi model produksi tertutup juga memberikan dampak positif pada lingkungan. Pengurangan limbah dan emisi sebesar 30% dicatat, yang menunjukkan efektivitas model ini dalam mengurangi jejak karbon industri. Hal ini sangat penting untuk konteks perubahan iklim dan kebutuhan untuk operasi yang lebih berkelanjutan. Penggunaan teknologi ramah lingkungan, seperti sistem pengelolaan limbah dan peralatan yang efisien energi, memainkan peran penting dalam mencapai hasil ini. Hasil ini mendukung gagasan bahwa adopsi eco-teknologi di agroindustri dapat memberikan manfaat lingkungan yang substansial (Zhang et al., 2021). Model produksi tertutup ini mencerminkan tren industri modern menuju keberlanjutan dan efisiensi sumber daya. Dengan mengintegrasikan prinsip daur ulang dan pemanfaatan limbah, industri *crumb rubber* dapat berkontribusi pada lingkungan yang lebih bersih dan produksi yang berkelanjutan.

Meskipun ada banyak manfaat, implementasi model produksi tertutup tidak mungkin tanpa tantangan. Biaya awal untuk teknologi dan infrastruktur yang diperlukan bisa menjadi penghalang bagi beberapa produsen, terutama usaha kecil dan menengah. Selain itu, ada kebutuhan untuk pelatihan tenaga kerja agar dapat mengoperasikan dan memelihara teknologi baru dengan efektif. Namun, manfaat jangka panjang dari efisiensi produksi yang lebih tinggi dan pengurangan dampak lingkungan memberikan peluang signifikan bagi industri karet remah. Peningkatan ini juga memberikan kesempatan untuk meningkatkan citra industri di mata konsumen dan pemangku kepentingan, yang semakin menuntut praktik bisnis yang berkelanjutan (Bantacut et al., 2018; Bantacut et al., 2022).

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa model proses produksi tertutup efektif dalam meningkatkan efisiensi dan mengurangi dampak lingkungan pada industri karet remah SIR. Rekomendasi penelitian ini meliputi adopsi model produksi tertutup sebagai standar industri, peningkatan investasi dalam teknologi ramah lingkungan, dan peran aktif pemerintah dalam mendukung transisi ke praktik produksi yang lebih berkelanjutan. Selanjutnya, disarankan untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh model ini terhadap kesejahteraan sosial dan ekonomi di komunitas sekitar pabrik karet remah.

DAFTAR PUSTAKA

- Bantacut, T., & Indriyani, F. (2022). Energy Sufficiency of Biomass and Wastewater in Closed Process of Sago Starch Production. *Industria: Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri*, 11(1), 10–18. <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2022.011.01.2>
- Bantacut, T., & Ramadhani, F. (2018). Development of a Closed Production Process of Tapioca Industry. *International Journal of Advanced Research*, 6(10), 521–532. <https://doi.org/10.21474/ijar01/7834>
- Begum, H., Abbas, K., Alam, A. S. . F., Song, H., Chowdhury, M. T., & Ghani, A. B. A. (2022). Impact of the COVID-19 pandemic on the environment and socioeconomic viability: a sustainable production chain alternative. *Foresight*, 24(3/4), 456–475. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/FS-02-2021-0053>
- Budiarto, H., Afriyadi, M. F., & Abubakar Tuhuloula. (2014). Pemanfaatan Sludge Hasil Produksi Biogas Berbasis Limbah Cair Latex Menjadi Pupuk Kompos Cair. *Konversi*, 3(1), 1–5.
- C.P.Leslie Grady, J., Daigger, G. T., & Lim, H. C. (1999). *Biological Wastewater Treatment* (second). MARCEL DEKKER, INC. NEW.
- Dewi, dian sari, Prasetyo, H. eko, & Karnadeli, E. (2020). *Pengolahan Air Limbah Industri Karet Remah (Crumb Rubber) dengan Menggunakan Reagen Fenton*. 5, 47–57.
- Didin Suwardin. (2015). Performance Evaluation of Crumb Rubber Factory Management: Case Study in South Sumatera). *Jurnal Agro Industri Perkebunan Jurnal AIP*, 3(2), 108–121.
- Fiona Arintika Ramdhani. (2016). Pengembangan Model Proses Produksi Tertutup Pada Industri Tapioka. In *Institut Pertanian Bogor*.
- Fu, R., Yu, C., Li, S., Yu, J., Wang, Z., Guo, W., Xie, Y., Yang, L., Liu, K., Ren, W., & Qiu, J. (2021). A closed-loop and scalable process for the production of biomass-derived superhydrophilic carbon for supercapacitors. *Green Chemistry*, 23(9), 3400–3409. <https://doi.org/10.1039/d1gc00670c>
- Hidayati, N., & Ekayuliana, A. (2022). Studi Potensial Energi Biomassa dari Limbah Pertanian dan Perkebunan di Indonesia. *Seminar Nasional Inovasi Vokasi*, 1(1), 130–135.
- Hossain, S. S., & Roy, P. K. (2020). Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, 8(4), 984–1009. <https://doi.org/10.1080/21870764.2020.1815348>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What A Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Mangement to 2050*. World Bank Group.

- <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2174>.
- Latif, A., Priombodo, A., Rizki, A., H., A. P., & Ira Yulianti. (2007). *Perancangan Pabrik Cleaner Rubber Production* (Issue 0404060055).
- Panjaitan, M. A. (2017). *Penentuan Harga Produksi Crumb Rubber pada PT. Perkebunan Nusantara III Gunung Para*.
- Prawiranti, Y., Wahyuni, N., & Andi Hairil Alimudin, D. (2016). Pengolahan Limbah Cair Industri Crumb Rubber dengan Fotokatalisis Ag/ZAA-TiO₂. *Orbital*, 1(2), 44–58.
- Purwanta, W., Di Pusat Pengkajian, P., Penerapan, D., Lingkungan, T., Pengkajian, B., & Teknologi, P. (2004). *Kajian Penerapan Prinsip Produksi Bersih Pada Proses Manufaktur Pipa Apung*. 3, 236–244.
- Rahim, N. I., Mohammed, B. S., Abdulkadir, I., & Dahim, M. (2022). Effect of Crumb Rubber, Fly Ash, and Nanosilica on the Properties of Self-Compacting Concrete Using Response Surface Methodology. *Materials*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ma15041501>
- Suwardin, D., Purbaya, M., & Vachlepi, A. (2016). Audit Energi Dalam Pengolahan Karet. *Warta Per karetan*, 35(2), 167. <https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v35i2.98>
- Turbay, E., Martinez-Arguelles, G., Navarro-Donado, T., Sánchez-Cotte, E., Polo-Mendoza, R., & Covilla-Valera, E. (2022). Rheological Behaviour of WMA-Modified Asphalt Binders with Crumb Rubber. *Polymers*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/polym14194148>
- Utomo, T. P. (2008). *Rancang Bangun Proses Produksi Karet Remah Berbasis Produksi Persih*.
- Vachlepi, A., & Suwardin, D. (2014). Pengeringan Karet Remah Berbasis Sumber Energi Biomassa. *Warta Per karetan*, 33(2), 103. <https://doi.org/10.22302/ppk.wp.v33i2.55>
- Wahyudi, S. (2022). Evaluasi Kinerja Ipal Produksi Industri Crumb Rubber (Studi Kasus: PT. X Kota Jambi). *Jurnal Daur Lingkungan*, 5(2), 38. <https://doi.org/10.33087/daurling.v5i2.118>
- Zhang, Y., Mao, Y., Jiao, L., Shuai, C., & Zhang, H. (2021). Eco-efficiency, eco-technology innovation and eco-well-being performance to improve global sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*, 89(March), 106580. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106580>