

DAFTAR PUSTAKA

- Akhtaruzzaman, M., Ali, M. R., Rahman, M. M., & Ahamed, M. S. (2013). Drying Tea in a Kilburn Vibro Fluid Bed Dryer. *AgEcon Search*, *11*(1), 153–158. file:///F:/Spec 2/Traffic Delay Model.pdf
- Anoune, K., Ghazi, M., Ghazouani, M., Nasiri, B., & Zebraoui, O. (2024). Empowering industry through energy auditing: a case study of savings and sustainability. *International Journal of Applied Power Engineering*, *13*(4), 952–962. <https://doi.org/10.11591/ijape.v13.i4.pp952-962>
- Ayyadurai, S., & Kandasamy, V. K. (2017). Performance Investigation of an Advanced Robust Biomass Gasifier Operation for Drying Process at Hilly Region in India. *Journal of Electrical & Electronic Systems*, *06*(01), 1–7. <https://doi.org/10.4172/2332-0796.1000212>
- Baaqel, H. A., Bernardi, A., Hallett, J. P., Guillén-Gosálbez, G., & Chachuat, B. (2023). Global Sensitivity Analysis in Life-Cycle Assessment of Early-Stage Technology using Detailed Process Simulation: Application to Dialkylimidazolium Ionic Liquid Production. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *11*(18), 7157–7169. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00547>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). Teh Hijau (SNI 3945:2016). In *Badan Standardisasi Nasional: Vol. 3945: 2016*.
- Bandara, A. B. P., Dharmasena, D. A. N., & Mannapperuma, J. D. (2016). Testing and Evaluation of Particle Motion in a Multi-Pass Vibro- Fluidized Bed Tea Dryer. *International Journal Of Engineering And Science*, *5*(9), 48–55.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2005). Engineering Thermodynamics: A Practical Approach. In *Thermodynamics an Engineering Approach*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math.
- Chen, Y. Q., Li, Y. F., Shen, C. W., & Xiao, L. Z. (2023). Topics and Trends in Fresh Tea (*Camellia sinensis*) Leaf Research: A Comprehensive Bibliometric Study. *Frontiers in Plant Science*, *14*(1), 1–16.

<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1092511>

Department for Energy Security and Net Zero. (2023). *UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting 2023*. UK Government.

Firdausi, A., Oktaviana, A. S. A., & Tiara, Y. D. A. (2024). Kebijakan Green Industry dalam Sektor Pangan terhadap Tantangan Lingkungan dan Keberlanjutan Pangan Global. *Prosiding Seminar Nasional Hukum, Bisnis, Sains Dan Teknologi*, 569–575.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., & Van Dorland, R. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In H. L. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 129–234). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.20892/j.issn.2095-3941.2017.0150>

GÜLER, B. (2020). Investigation of Thermal Efficiency and Emission Values of Pellet Obtained from Tea Waste. *CAMA Centre for Applied Macroeconomic Analysis*, 7(3), 1–14.

Gupta, P., Mamtani, K., Singh, G., Guttapadu, S., & Venkatesh, P. (2014). Thermal Inactivation Kinetics of Polyphenol Oxidase in Tea (*Camellia sinensis*). *Research Article International Journal of Tea Science*, 10(3&4), 2014.

Habsari, S., Sugandi, W. K., Sita, K., & Herwanto, T. (2022). Analisis Energi pada Proses Pengolahan Teh Hijau (Studi Kasus di Pusat Penelitian Teh dan Kina). *Jurnal Sains Teh Dan Kina*, 1(1), 8–14. <https://doi.org/10.22302/pptk.jur.jstk.v1i1.154>

He, M., Li, Y., Zong, S., Li, K., Han, X., & Zhao, M. (2023). Life Cycle Assessment of Carbon Footprint of Green Tea Produced by Smallholder Farmers in Shaanxi Province of China. *Agronomy*, 13(2).

<https://doi.org/10.3390/agronomy13020364>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Chapter 1: Introduction. In *Annals of Discrete Mathematics* (Vol. 2, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70670-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70670-8)

International Organization for Standardization. (2006a). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework (ISO 14040:2006). In *European standard* (2nd ed.). ISO. <https://www.iso.org/standard/37456.html><https://www.iso.org/standard/23151.html>

International Organization for Standardization. (2006b). *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)* (1st ed.). ISO. www.iso.org

International Organization for Standardization. (2014). *Energy audits — Requirements with guidance for use (ISO 50002:2014)* (First edit). ISO.

IPCC. (2006). Stationary Combustion (Chapter 2). In H. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.), *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Vol. 2: Energy)*. IGES (Institute for Global Environmental Strategies). <https://doi.org/10.1007/BF00914340>

Isrofi, N. (2022). Kajian Permasalahan Lingkungan dan Usulan Pengaplikasian Cleaner Production di Industri Kertas. *Juminten : Jurnal Manajemen Industri Dan Teknologi*, 03(01), 145–156.

Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K. R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W. R., Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R., & Zhang, D. (2007). Palaeoclimate. In H. L. Solomon, S.; Qin, D.; Manning, M.; Chen, Z.; Marquis, M.; Averyt, K. B.; Tignor, M.; Miller (Ed.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp.

434–497). Cambridge University Press.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). *Keputusan Menteri ESDM No. 163.K/HK.02/MEM.S/2021 tentang Penetapan Faktor Emisi Rumah Kaca Sistem Ketenagalistrikan*. <https://jdih.esdm.go.id/index.php/web/result/2183/detail>

Kibet, J. J., & Letema, S. (2024). Energy Use and Greenhouse Gas Emissions in Selected Tea Factories in Kenya. *PLOS Climate*, 3(10), 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000329>

Kim, A., Mutel, C. L., Froemelt, A., & Hellweg, S. (2022). Global Sensitivity Analysis of Background Life Cycle Inventories. *Environmental Science and Technology*, 56(9), 5874–5885. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07438>

Laurent, A., Weidema, B. P., Bare, J., Liao, X., Souza, D. M. De, Pizzol, M., Sala, S., Schreiber, H., Thonemann, N., & Verones, F. (2021). Methodological Review and Detailed Guidance for the Life cycle Interpretation Phase. *EPA Public Access*, 24(5), 986–1003. <https://doi.org/10.1111/jiec.13012.Submit>

Lawrence, A., Thollander, P., Andrei, M., & Karlsson, M. (2019). Specific Energy Consumption/Use (SEC) in Energy Management for Improving Energy Efficiency in Industry: Meaning, Usage and Differences. *Energies*, 12(247), 1–22. <https://doi.org/10.3390/en12020247>

Lestari, P. W., Harianto, S., Prawira-Atmaja, M. I., Andriyani, M., Shabri, S., Maulana, H., & Putri, S. H. (2022). Identifikasi Sifat Fisik Produk Sampung dari Mesin Ball Tea pada Pengolahan Teh Hijau. *Jurnal Teknotan*, 16(2), 85. <https://doi.org/10.24198/jt.vol16n2.4>

Liang, L., Ridoutt, B. G., Wang, L., Xie, B., Li, M., & Li, Z. (2021). China's tea industry: Net greenhouse gas emissions and mitigation potential. *Agriculture (Switzerland)*, 11(4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040363>

Muslim, R., Prasetyo, A., & Harsito, C. (2024). Pelatihan Penggunaan Teknologi Pengereng Teh Berbasis IOT untuk Kelompok Tani semakin Berdikari. *BERBAKTI Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 01(02), 65–70.

- Ozturk, B., Seyhan, F., Ozdemir, I. S., Karadeniz, B., Bahar, B., Ertas, E., & Ilgaz, S. (2016). Change of Enzyme Activity and Quality During the Processing of Turkish Green Tea. *LWT-Food Science and Technology*, *65*, 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.068>
- Paiva, L. S., Dias, A. P., Marccone, M. F., & Baptista, J. A. B. (2023). The Impact of Different Withering Process Conditions on the Bioactivity and Quality of Black Tea from Azorean *Camellia sinensis*. *Beverages*, *9*(94), 1–15. <https://doi.org/10.3390/beverages9040094>
- Pangestu, R. C. K., & Ayuningsasi, A. A. K. (2024). Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia. *Inisiatif: Jurnal Ekonomi, Akuntansi Dan Manajemen*, *3*(4), 297–311.
- Prawira-Atmaja, M. I., Azhari, B., Harianto, S., Maulana, H., Shabri, & Rohdiana, D. (2019). Grade Teh Hijau Berpengaruh Terhadap Total Polifenol, Rasio Rehidrasi dan Warna Seduhan Teh. *Jurnal Ilmu Pangan Dan Hasil Pertanian*, *3*(2), 159–169.
- Putri, S. H., Andriyani, M., Sita, K., & Widyasanti, A. (2023). Analisis Kinerja Lingkungan Unit Bisnis Teh Hijau Perusahaan X dengan Metode IEPMS dan LCA. *Teknotan*, *17*(2), 143–152. <https://doi.org/10.24198/jtvoll7n2.9>
- Suprpto, Y. K., & Retnowati. (2025). Integration of MCDM and GIS in Household Gas Network Development Strategy Planning Through DSS. *INOVTEK Polbeng - Seri Informatika*, *10*(3), 1707–1717. <https://doi.org/10.35314/y1kmay03>
- Suprianti, Y. (2020). Evaluasi Kinerja Proses Pengeringan Di Pabrik Teh PT. Perkebunan Nusantara VIII Dayeuh Manggung. *Jurnal Material Dan Energi Indonesia*, *9*(02), 61–70. <https://doi.org/10.24198/jmei.v9i2.24132>
- Taheri-Garavand, A., Meda, V., & Naderloo, L. (2018). Artificial Neural Network–Genetic Algorithm Modeling for Moisture Content Prediction of Savory Leaves Drying Process in Different Drying Conditions. *Engineering*

in Agriculture, Environment and Food, 11(4), 232–238.
<https://doi.org/10.1016/j.eaef.2018.08.001>

United Nations Industrial Development Organization. (2008). From Cleaner Production to Environmental Management Systems (Volume 11). In *Management Review*.

US EPA. (2021). *Best Practices for Estimating Emissions Using Emissions Factors for Clean Air Act Permitting*.
https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-02/emissions-factors-best-practices_0.pdf

Wardani, R. K., & Ferry Fernanda, M. A. H. (2016). Analisis Kadar Kafein dari Serbuk Teh Hitam, Teh Hijau dan Teh Putih (*Camellia sinensis* L.). *Journal Pharmasci (Journal of Pharmacy and Science)*, 1(1), 15–17.
<https://doi.org/10.53342/pharmasci.v1i1.48>

World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. In *WRI & WBCSD* (Revised ed, Vol. 9). World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development.
<http://www.ghgprotocol.org/files/ghg-protocol-revised.pdf>

Yafi, M. A., & Adyanti, A. S. (2024). Kinerja Daya Saing Teh Hijau Indonesia Di Pasar Internasional. *SEPA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian Dan Agribisnis*, 21(2), 289–301. <https://doi.org/10.20961/sepa.v21i2.84185>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan neraca massa sistem produksi teh hijau

Dasar Rumus:

Neraca Massa:

$$m_{\text{masuk}} = m_{\text{keluar}} + m_{\text{susut}}$$

$$\text{Rendemen Tahap} \quad : R_i (\%) = \left(\frac{m_{\text{out},i}}{m_{\text{in},i}} \right) \times 100\%$$

$$\text{Rendemen Total} \quad : R_{\text{total}} (\%) = \left(\frac{m_{\text{produk jadi}}}{m_{\text{pucuk segar}}} \right) \times 100\%$$

A. Stasiun Pelayuan

Diketahui:

- Massa pucuk segar masuk (m_{in}) = 10.424,75 kg
- Massa teh layu keluar (m_{out}) = 6.681,03 kg
- Kadar air pucuk segar (KA_{in}) = 75,83% (basis basah)
- Kadar air teh layu keluar (KA_{out}) = 62,90% (basis basah)

Ditanya:

- Massa susut (Δm) dan jenis kehilangan
- Rendemen tahap *Rotary Panner* (R_{RP})

Jawab:

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{RP}} &= m_{\text{in}} - m_{\text{out}} \\ &= 10.424,75 - 6.681,03 \\ &= 3.743,72 \text{ kg} \end{aligned}$$

Massa air dalam pucuk segar:

$$\begin{aligned} m_{\text{air in}} &= m_{\text{in}} \times KA_{\text{in}} \\ &= 10.424,75 \times 0,7583 \\ &= 7.905,48 \text{ kg} \end{aligned}$$

Massa air dalam teh layu:

$$\begin{aligned} m_{\text{air out}} &= m_{\text{out}} \times KA_{\text{out}} \\ &= 6.681,03 \times 0,6290 \\ &= 4.202,37 \text{ kg} \end{aligned}$$

Massa air yang diuapkan (*Rotary Panner*):

$$\begin{aligned} m_{\text{air uap RP}} &= m_{\text{air in}} - m_{\text{air out}} \\ &= 7.905,48 - 4.202,37 \\ &= 3.703,11 \text{ kg} \approx 3.703,28 \text{ kg} \end{aligned}$$

Rendemen tahap *Rotary Panner*:

$$\begin{aligned} R_{\text{RP}} &= (6.681,03 / 10.424,75) \times 100\% \\ &= 64,09\% \end{aligned}$$

Catatan: Susut massa pada *Rotary Panner* (3.743,72 kg) didominasi oleh penguapan air bebas (*free water*) akibat paparan panas konduksi pada suhu 80–100°C.

B. Stasiun Pendinginan (*Cooling*)

Diketahui:

- m_{in} (teh layu) = 6.681,03 kg
- m_{out} (teh dingin) = 6.255,05 kg

Jawab:

$$\Delta m_{\text{Cooling}} = 6.681,03 - 6.255,05 = 425,98 \text{ kg}$$

$$R_{\text{Cooling}} = (6.255,05 / 6.681,03) \times 100\% = 93,62\%$$

C. Stasiun Penggulungan (*Open Top Roller*)

Diketahui:

- $m_{\text{in}} = 6.255,05 \text{ kg}$
- $m_{\text{out}} = 6.044,43 \text{ kg}$

Jawab:

$$\Delta m_{OTR} = 6.255,05 - 6.044,43 = 210,62 \text{ kg}$$

$$R_{OTR} = (6.044,43 / 6.255,05) \times 100\% = 96,63\%$$

Catatan: Susut pada OTR bersifat mekanis, cairan sel yang terekstrusi menempel pada meja giling dan serpihan daun (*reject*), bukan penguapan termal.

D. Stasiun Pengeringan I (*Endless Chain Pressure/ECP*)

Diketahui:

- $m_{in} = 6.044,43 \text{ kg}$
- $m_{out} = 5.185,58 \text{ kg}$
- KA_{in} (setelah OTR, terukur) $\approx 59,25\%$
- $KA_{out} = 52,63\%$

Jawab:

$$\Delta m_{ECP} = 6.044,43 - 5.185,58 = 858,85 \text{ kg}$$

$$R_{ECP} = (5.185,58 / 6.044,43) \times 100\% = 85,79\%$$

Massa air diuapkan *ECP*:

$$\begin{aligned} m_{air\ ECP} &= (6.044,43 \times 0,5925) - (5.185,58 \times 0,5263) \\ &= 3.581,32 - 2.728,30 \\ &= 853,02 \text{ kg} \end{aligned}$$

E. Stasiun Pengeringan II (*Ball tea*) ← *Hotspot* Utama

Diketahui:

- $m_{in} = 5.185,58 \text{ kg}$
- $m_{out} = 2.508,10 \text{ kg}$
- $KA_{in} = 52,63\%$

- $KA_{out} = 3,33\%$

Jawab:

$$\Delta m_{BT} = 5.185,58 - 2.508,10 = 2.677,48 \text{ kg}$$

$$R_{BT} = (2.508,10 / 5.185,58) \times 100\% = 48,37\%$$

Massa air diuapkan *Ball tea*:

$$\begin{aligned} m_{airBT} &= (5.185,58 \times 0,5263) - (2.508,10 \times 0,0333) \\ &= 2.728,91 - 83,52 \\ &= 2.645,39 \text{ kg} \approx 2.645,43 \text{ kg} \end{aligned}$$

F. Stasiun Pengepakan

Diketahui:

- m_{in} (teh kering curah) = 2.508,10 kg
- m_{out} (produk terkemas) = 2.066,50 kg

Jawab:

$$\Delta m_{PKG} = 2.508,10 - 2.066,50 = 441,60 \text{ kg}$$

$$R_{PKG} = (2.066,50 / 2.508,10) \times 100\% = 82,39\%$$

G. Rendemen Total Sistem

Diketahui:

- $m_{pucuk \text{ segar}} = 10.424,75 \text{ kg}$ (*gate-in*)
- $m_{produk \text{ jadi}} = 2.066,50 \text{ kg}$ (*gate-out*)

Ditanya: Rendemen total sistem (R_{total})

Jawab:

$$R_{total} = (m_{produk \text{ jadi}} / m_{pucuk \text{ segar}}) \times 100\%$$

$$R_{total} = (2.066,50 / 10.424,75) \times 100\%$$

$$R_{total} = 0,1982 \times 100\%$$

$$R_{\text{total}} = 19,82\%$$

Interpretasi: Dibutuhkan 5,05 kg pucuk teh segar untuk menghasilkan 1 kg teh hijau kering terkemas (sesuai LCI: 5,0446 kg/kg produk).

Tabel 25. Lampiran rekapitulasi neraca massa seluruh unit proses

No	Unit Proses	Massa Masuk (kg)	Massa Keluar (kg)	Susut (kg)	Rendemen (%)
1	<i>Rotary Panner</i>	10.424,75	6.681,03	3.743,72	64,09
2	<i>Cooling</i>	6.681,03	6.255,05	425,98	93,62
3	<i>Open Top Roller</i>	6.255,05	6.044,43	210,62	96,63
4	<i>ECP</i>	6.044,43	5.185,58	858,85	85,79
5	<i>Ball tea</i>	5.185,58	2.508,10	2.677,48	48,37
6	Pengepakan	2.508,10	2.066,50	441,60	82,39
Total Gate-to-gate		10.424,75	2.066,50	8.358,25	19,82

Lampiran 2. Rekap konsumsi input per batch, rasio penggunaan input terhadap produk terkemas, dan rendemen proses pada 8 batch produksi teh hijau

Lampiran ini menyajikan rekap konsumsi input utama per batch produksi, meliputi *wood pellet*, LPG, listrik, material kemasan, serta limbah padat, beserta rasio penggunaannya terhadap produk teh hijau kering terkemas pada batch yang sama. Selain itu, disajikan pula rekap rendemen proses per batch untuk menunjukkan variasi konversi massa bahan sepanjang proses. Penyusunan tabel ini mengacu pada logsheet pengamatan lapangan 8 batch yang pada penelitian ini memang mencakup konsumsi *wood pellet* per unit proses, konsumsi LPG pada ECP dan Ball Tea, konsumsi listrik per unit proses, material kemasan, serta limbah padat.

Keterangan WP-RP = *wood pellet* Rotary Panner; WP-ECP = *wood pellet* ECP; singkatan: WP-BT = *wood pellet* Ball Tea; LPG-BT = LPG Ball Tea; El-RP = listrik Rotary Panner; El-BT = listrik Ball Tea; BT = Ball Tea

Tabel 26. Rekap konsumsi wood pellet dan LPG per batch beserta rasionya

Batch	Tanggal	Produk (kg)	WP-RP (kg)	Rasio WP-RP	WP-ECP (kg)	Rasio WP-ECP	WP-BT (kg)	Rasio WP-BT	Total WP (kg)	Rasio Total WP	LPG-ECP (kg)	Rasio LPG-ECP	LPG-BT (kg)	Rasio LPG-BT	Total LPG (kg)	Rasio Total LPG
1	20/02/2026	2423	1295	0,5345	555	0,2291	2000	0,8254	3850	1,5889	0	0,0000	50	0,0206	50	0,0206
2	21/02/2026	1812	1765	0,9741	735	0,4056	2800	1,5453	5300	2,9249	0	0,0000	200	0,1104	200	0,1104
3	23/02/2026	1273	870	0,6834	355	0,2789	1600	1,2569	2825	2,2192	0	0,0000	150	0,1178	150	0,1178
4	25/02/2026	2720	2200	0,8088	250	0,0919	2425	0,8915	4875	1,7923	150	0,0551	0	0,0000	150	0,0551
5	26/02/2026	1120	650	0,5804	500	0,4464	1050	0,9375	2200	1,9643	0	0,0000	0	0,0000	0	0,0000
6	28/02/2026	3502	2250	0,6425	750	0,2142	2800	0,7995	5800	1,6562	0	0,0000	100	0,0286	100	0,0286
7	02/03/2026	882	850	0,9637	250	0,2834	1275	1,4456	2375	2,6927	0	0,0000	50	0,0567	50	0,0567
8	04/03/2026	2800	1830	0,6536	770	0,2750	2200	0,7857	4800	1,7143	0	0,0000	150	0,0536	150	0,0536

Tabel 27. Rekap konsumsi listrik per batch beserta rasionya

Batch	Tanggal	Produk (kg)	Listrik-RP (kWh)	Rasio Listrik-RP	Listrik-Cooling (kWh)	Rasio Listrik-Cooling	Listrik-OTR (kWh)	Rasio Listrik-OTR	Listrik-ECP (kWh)	Rasio Listrik-ECP	Listrik-BT (kWh)	Rasio Listrik-BT	Listrik-Utilitas (kWh)	Rasio Listrik-Utilitas	Total Listrik (kWh)	Rasio Total Listrik
1	20/02/2026	2423	191,886	0,0792	40,405	0,0167	97,984	0,0404	369,012	0,1523	389,983	0,1610	283,121	0,1168	1372,391	0,5664
2	21/02/2026	1812	74,105	0,0409	58,886	0,0325	128,213	0,0708	141,703	0,0782	236,013	0,1302	118,687	0,0655	757,607	0,4181
3	23/02/2026	1273	63,182	0,0496	44,066	0,0346	91,725	0,0721	122,520	0,0962	169,156	0,1329	104,536	0,0821	595,184	0,4675
4	25/02/2026	2720	170,048	0,0625	90,060	0,0331	212,968	0,0783	321,789	0,1183	390,837	0,1437	248,272	0,0913	1433,975	0,5272
5	26/02/2026	1120	81,903	0,0731	32,002	0,0286	75,558	0,0675	119,576	0,1068	419,155	0,3742	202,538	0,1808	930,731	0,8310
6	28/02/2026	3502	205,926	0,0588	94,850	0,0271	204,253	0,0583	392,641	0,1121	478,119	0,1365	300,540	0,0858	1676,329	0,4787
7	02/03/2026	882	83,466	0,0946	38,308	0,0434	88,967	0,1009	156,660	0,1776	180,178	0,2043	130,669	0,1482	678,249	0,7690
8	04/03/2026	2800	168,485	0,0602	75,719	0,0270	162,954	0,0582	273,093	0,0975	390,239	0,1394	250,454	0,0894	1320,944	0,4718

Tabel 28. Rekap material kemasan dan limbah padat per batch beserta rasionya

Batch	Produk (kg)	PP (kg)	Rasio PP	LDPE (kg)	Rasio LDPE	Bottom ash (kg)	Rasio Bottom ash	Teh tercecer (kg)	Rasio Teh tercecer
1	2423	0,8077	0,0003333	0,4675	0,0001930	21,00	0,008667	11,11	0,004585
2	1812	0,6040	0,0003333	0,3495	0,0001930	18,00	0,009934	9,29	0,005127
3	1273	0,4243	0,0003333	0,2457	0,0001930	12,00	0,009426	6,63	0,005208
4	2720	0,9067	0,0003333	0,5250	0,0001930	27,00	0,009926	13,85	0,005092
5	1120	0,3733	0,0003333	0,2162	0,0001930	15,00	0,013393	6,21	0,005545
6	3502	1,1673	0,0003333	0,6759	0,0001930	42,00	0,011994	17,29	0,004936
7	882	0,2940	0,0003333	0,1702	0,0001930	9,00	0,010204	4,17	0,004728
8	2800	0,9333	0,0003333	0,5404	0,0001930	24,00	0,008571	11,54	0,004121

Tabel 29. Rekap rendemen proses per batch

Batch	Tanggal	Pucuk segar masuk (kg)	Produk (kg)	Rendemen RP (%)	Rendemen Cooling (%)	Rendemen OTR (%)	Rendemen ECP (%)	Rendemen BT (%)	Rendemen Packing (%)	Rendemen total (%)
1	20/02/2026	12250	2423	37,17	102,55	96,79	72,20	44,45	167,03	19,78
2	21/02/2026	9150	1812	72,52	92,07	100,00	96,78	42,25	72,53	19,80
3	23/02/2026	7400	1273	67,11	92,68	94,97	89,01	50,47	64,83	17,20
4	25/02/2026	13375	2720	75,88	100,00	92,68	97,23	39,02	76,21	20,34
5	26/02/2026	5843	1120	60,95	95,64	98,00	83,83	52,90	75,67	19,17
6	28/02/2026	17135	3502	62,38	91,06	93,51	82,89	51,85	89,53	20,44
7	02/03/2026	4300	882	69,66	102,30	88,78	91,59	55,61	63,65	20,51
8	04/03/2026	13945	2800	70,99	91,41	100,00	89,42	47,03	73,57	20,08

Lampiran 3. Perhitungan konsumsi energi listrik menggunakan metode *Clamp meter* (3 fasa) dan *Load factor*

Tanggal Pengamatan: 3 Februari 2026 | Batch ke-: 7

Dasar Rumus:

Metode *Clamp meter* (motor terukur langsung):

$$P \text{ (kW)} = (\sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{avg} \times \cos \Phi) / 1000$$

$$E \text{ (kWh)} = P \text{ (kW)} \times t \text{ (jam)} \times n$$

Metode *Load factor* (motor tidak dapat diakses saat operasi):

$$E \text{ (kWh)} = (\text{HP} \times 0,746) \times \text{LF} \times t \times n$$

Keterangan:

V_{LL} = tegangan antar-fasa (Volt)

I_{avg} = arus rata-rata 3 fasa (Ampere)

$\cos \Phi$ = faktor daya

t = durasi operasi (jam)

n = jumlah unit

Nilai *Load factor* (U.S. Department of Energy, 2014):

Jenis motor	<i>Load factor</i> (LF)	Dasar penetapan
<i>Conveyor</i> (sabuk berjalan)	0,70	Beban konstan, jarang penuh 100% kapasitas
Fan / Blower (pendinginan)	0,80	Beban sentrifugal, mendekati daya maksimal
Silinder pendingin (drum)	0,65	Drum berputar, beban ringan setelah start awal

A. Stasiun Pelayuan (*Rotary Panner*) | t = 8,917 jam

Motor utama (Metode *Clamp meter*):

Diketahui (dari *logsheet* Batch 7):

- $V_{RS} = 231,9 \text{ V}$ | $V_{ST} = 235,3 \text{ V}$ | $V_{TR} = 232,8 \text{ V}$
- $I_R = 13,32 \text{ A}$ | $I_S = 13,33 \text{ A}$ | $I_T = 11,77 \text{ A}$

- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 8,917 \text{ jam} \mid n = 1 \text{ unit}$

$$V_{LL} = (231,9 + 235,3 + 232,8) / 3 = 233,333 \text{ V}$$

$$I_{\text{avg}} = (13,32 + 13,33 + 11,77) / 3 = 12,807 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P &= (\sqrt{3} \times 233,333 \times 12,807 \times 0,85) / 1000 \\ &= (1,7321 \times 233,333 \times 12,807 \times 0,85) / 1000 \\ &= 4,399 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$E = 4,399 \times 8,917 \times 1 = 39,229 \text{ kWh}$$

Konveyor pendukung (Metode *Load factor*) (LF = 0,70 \mid t = 8,917 jam):

- *Conveyor Input A* (2 HP): $E = 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917$
 $= 1,492 \times 0,70 \times 8,917 = 9,313 \text{ kWh}$
- *Conveyor Input B* (2 HP): $E = 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917 = 9,313 \text{ kWh}$
- *Conveyor Input C* (1 HP): $E = 1 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917$
 $= 0,746 \times 0,70 \times 8,917 = 4,656 \text{ kWh}$
- *Conveyor Input D* (1 HP): $E = 1 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917 = 4,656 \text{ kWh}$
- *Conveyor Output A* (2 HP): $E = 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917 = 9,313$
 kWh
- *Conveyor Output B* (1 HP): $E = 1 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917 = 4,656$
 kWh
- *Conveyor Output C* (0,5 HP): $E = 0,5 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,917$
 $= 0,373 \times 0,70 \times 8,917 = 2,328 \text{ kWh}$
- ΣE konveyor $= 44,236 \text{ kWh}$

Total Stasiun Pelayuan Batch 7 = 39,229 + 44,236 = 83,466 kWh

B. Stasiun Pendinginan (Cooling) \mid t = 7,083 jam

(Durasi dihitung dari laju waktu spesifik \times massa masuk = 2.995,51 kg, semua mesin menggunakan *Load factor*)

$$\begin{aligned} \text{Blower fan (3 HP, LF=0,80): } E &= 3 \times 0,746 \times 0,80 \times 7,083 \\ &= 2,238 \times 0,80 \times 7,083 = 12,681 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Silinder (1 HP, LF=0,65): } E &= 1 \times 0,746 \times 0,65 \times 7,083 \\ &= 0,746 \times 0,65 \times 7,083 = 3,435 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Conveyor Output A (2 HP, LF=0,70): } E &= 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 7,083 \\ &= 1,492 \times 0,70 \times 7,083 = 7,397 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Conveyor Output B (2 HP, LF=0,70): } E = 1,492 \times 0,70 \times 7,083 = 7,397 \text{ kWh}$$

$$\text{Conveyor Output C (2 HP, LF=0,70): } E = 1,492 \times 0,70 \times 7,083 = 7,397 \text{ kWh}$$

Total Stasiun Pendinginan Batch 7 = 38,308 kWh

C. Stasiun Penggulungan (OTR) | $t_{\text{motor}} = 7,167 \text{ jam}$ | $t_{\text{konveyor}} = 6,750 \text{ jam}$

Motor OTR (Metode *Clamp meter*):

Diketahui (dari *logsheet* Batch 7):

- $V_{RS} = 235,0 \text{ V}$ | $V_{ST} = 232,4 \text{ V}$ | $V_{TR} = 232,8 \text{ V}$
- $I_R = 7,60 \text{ A}$ | $I_S = 8,00 \text{ A}$ | $I_T = 7,20 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85$ | $t = 7,167 \text{ jam}$ | $n = 4 \text{ unit}$

$$V_{LL} = (235,0 + 232,4 + 232,8) / 3 = 233,400 \text{ V}$$

$$I_{\text{avg}} = (7,60 + 8,00 + 7,20) / 3 = 7,600 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} P (1 \text{ unit}) &= (\sqrt{3} \times 233,400 \times 7,600 \times 0,85) / 1000 \\ &= (1,7321 \times 233,400 \times 7,600 \times 0,85) / 1000 \\ &= 2,612 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$E (4 \text{ unit}) = 2,612 \times 7,167 \times 4 = 74,867 \text{ kWh}$$

Konveyor pendukung (Metode *Load factor*) (LF = 0,70 | $t = 6,750 \text{ jam}$):

$$\begin{aligned} \text{Conveyor Input A (1 HP): } E &= 1 \times 0,746 \times 0,70 \times 6,750 \\ &= 0,746 \times 0,70 \times 6,750 = 3,525 \text{ kWh} \end{aligned}$$

$$\text{Conveyor Input B (1 HP): } E = 1 \times 0,746 \times 0,70 \times 6,750 = 3,525 \text{ kWh}$$

$$\text{Conveyor Output (2 HP): } E = 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 6,750$$

$$= 1,492 \times 0,70 \times 6,750 = 7,050 \text{ kWh}$$

$$\Sigma E \text{ konveyor} = 14,099 \text{ kWh}$$

$$\text{Total Stasiun Penggulangan Batch 7} = 74,867 + 14,099 = 88,967 \text{ kWh}$$

D. Stasiun Pengeringan I (*ECP*) | Campuran *Clamp meter* & *Load factor*

Catatan: Setiap komponen memiliki durasi operasi yang berbeda sesuai pencatatan *logsheet* Batch 7.

ECP chain/drive motor (*Clamp meter*) (2 unit | t = 8,167 jam):

Diketahui:

- $V_{RS} = 234,8 \text{ V} \mid V_{ST} = 234,9 \text{ V} \mid V_{TR} = 232,5 \text{ V} \rightarrow V_{LL} = 234,067 \text{ V}$
- $I_R = 11,07 \text{ A} \mid I_S = 11,77 \text{ A} \mid I_T = 10,91 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 11,250 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 8,167 \text{ jam} \mid n = 2 \text{ unit}$

$$P (1 \text{ unit}) = (\sqrt{3} \times 234,067 \times 11,250 \times 0,85) / 1000 = 3,877 \text{ kW}$$

$$E (2 \text{ unit}) = 3,877 \times 8,167 \times 2 = 63,323 \text{ kWh}$$

Blower udara panas & Fan (*Clamp meter*) (1 unit | t = 11,250 jam):

Diketahui:

- $V_{LL} = 234,067 \text{ V} \mid I_R = 6,30 \text{ A} \mid I_S = 7,40 \text{ A} \mid I_T = 5,63 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 6,443 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 11,250 \text{ jam} \leftarrow$ durasi berbeda dari *ECP* chain

$$P = (\sqrt{3} \times 234,067 \times 6,443 \times 0,85) / 1000 = 2,220 \text{ kW}$$

$$E = 2,220 \times 11,250 = 24,979 \text{ kWh}$$

Conveyor Input A, B, C (*Clamp meter*) (masing-masing 1 unit | t = 8,833 jam):

Diketahui:

- $V_{LL} = (233,3 + 231,9 + 235,7) / 3 = 233,633 \text{ V}$
- $I_R = 4,53 \text{ A} \mid I_S = 4,63 \text{ A} \mid I_T = 4,23 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 4,463 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 8,833 \text{ jam}$

$$P = (\sqrt{3} \times 233,633 \times 4,463 \times 0,85) / 1000 = 1,535 \text{ kW}$$

$$E (\text{Conveyor Input A}) = 1,535 \times 8,833 = 13,561 \text{ kWh}$$

$$E (\text{Conveyor Input B}) = 1,535 \times 8,833 = 13,561 \text{ kWh (I sama dengan Input A)}$$

$$E (\text{Conveyor Input C}) = 1,535 \times 8,833 = 13,561 \text{ kWh (I sama dengan Input A)}$$

$$\Sigma E \text{ Conveyor Input A+B+C} = 40,682 \text{ kWh}$$

Conveyor Input D, Output A, Output B (Load factor) (LF = 0,70 | t = 8,833 jam):

$$\text{Conveyor Input D (2 HP): } E = 2 \times 0,746 \times 0,70 \times 8,833$$

$$= 1,492 \times 0,70 \times 8,833 = 9,225 \text{ kWh}$$

$$\text{Conveyor Output A (2 HP): } E = 1,492 \times 0,70 \times 8,833 = 9,225 \text{ kWh}$$

$$\text{Conveyor Output B (2 HP): } E = 1,492 \times 0,70 \times 8,833 = 9,225 \text{ kWh}$$

$$\Sigma E \text{ konveyor LF} = 27,675 \text{ kWh}$$

$$\text{Total Stasiun ECP Batch 7} = 63,323 + 24,979 + 40,682 + 27,675 = 156,660 \text{ kWh}$$

E. Stasiun Pengeringan II (*Ball tea*) | Seluruh komponen *Clamp meter*

Heat Exchanger *Ball tea (Clamp meter)* (1 unit | t = 10,000 jam):

Diketahui:

- $V_{LL} = 234,067 \text{ V} \mid I_R = 16,60 \text{ A} \mid I_S = 19,00 \text{ A} \mid I_T = 15,90 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 17,167 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 10,000 \text{ jam}$

$$P = (\sqrt{3} \times 234,067 \times 17,167 \times 0,85) / 1000 = 5,916 \text{ kW}$$

$$E = 5,916 \times 10,000 = 59,157 \text{ kWh}$$

Motor & Burner HE (*Clamp meter*) (1 unit | t = 10,000 jam):

Diketahui:

- $V_{LL} = 233,333 \text{ V} \mid I_R = 3,80 \text{ A} \mid I_S = 3,60 \text{ A} \mid I_T = 3,90 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 3,767 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85 \mid t = 10,000 \text{ jam}$

$$P = (\sqrt{3} \times 233,333 \times 3,767 \times 0,85) / 1000 = 1,294 \text{ kW}$$

$$E = 1,294 \times 10,000 = 12,939 \text{ kWh}$$

Ball tea drum motor & fan (*Clamp meter*) (5 unit | t = 12,917 jam):

Diketahui (Baris 68):

- $V_{LL} = (232,8 + 235,2 + 232,7) / 3 = 233,567 \text{ V}$
- $I_R = (4,40 + 3,90 + 4,20) / 3 = 4,167 \text{ A}$
- $I_S = (4,70 + 5,00 + 4,70) / 3 = 4,800 \text{ A}$
- $I_T = (5,70 + 5,90 + 5,30) / 3 = 5,633 \text{ A}$
- $I_{avg} = (4,167 + 4,800 + 5,633) / 3 = 4,867 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85$ | t = 12,917 jam | n = 5 unit (sesuai mesin aktif Batch 7)

$$P (1 \text{ unit}) = (\sqrt{3} \times 233,567 \times 4,867 \times 0,85) / 1000 = 1,673 \text{ kW}$$

$$E (5 \text{ unit}) = 1,673 \times 12,917 \times 5 = 108,083 \text{ kWh}$$

Total Stasiun *Ball tea* Batch 7 = 59,157 + 12,939 + 108,083 = 180,179 kWh

F. Utilitas Pabrik (Exhaust Fan) | *Clamp meter* (10 unit | t = 10,000 jam)

Diketahui:

- $V_{LL} = (232,8 + 235,2 + 232,7) / 3 = 233,567 \text{ V}$
- $I_R = 3,70 \text{ A}$ | $I_S = 3,90 \text{ A}$ | $I_T = 3,80 \text{ A} \rightarrow I_{avg} = 3,800 \text{ A}$
- $\cos \Phi = 0,85$ | t = 10,000 jam | n = 10 unit

$$P (1 \text{ unit}) = (\sqrt{3} \times 233,567 \times 3,800 \times 0,85) / 1000 = 1,307 \text{ kW}$$

$$P (10 \text{ unit}) = 1,307 \times 10 = 13,067 \text{ kW}$$

$$E = 13,067 \times 10,000 = 130,669 \text{ kWh}$$

Total Stasiun Utilitas Batch 7 = 130,669 kWh

Tabel 30. Lampiran Rekapitulasi Total Energi Listrik Batch 7

No	Stasiun	E Batch 7 (kWh)	Metode Perhitungan
----	---------	-----------------	--------------------

1	Pelayuan (<i>Rotary Panner</i>)	83,466	<i>Clamp meter</i> (motor utama) + <i>Load factor</i> (7 konveyor)
2	Pendinginan (<i>Cooling</i>)	38,308	<i>Load factor</i> seluruh mesin (t = 7,083 jam)
3	Penggulungan (OTR)	88,967	<i>Clamp meter</i> (4 motor OTR) + <i>Load factor</i> (3 konveyor)
4	Pengeringan I (<i>ECP</i>)	156,660	<i>Clamp meter</i> (chain + blower + 3 konveyor) + <i>Load factor</i> (3 konveyor)
5	Pengeringan II (<i>Ball tea</i>)	180,179	<i>Clamp meter</i> seluruh komponen (HE + Motor + 5 drum)
6	Utilitas (<i>Exhaust Fan</i>)	130,669	<i>Clamp meter</i> (10 unit, t = 10 jam)
Total		678,249 kWh	

Catatan: Tabel 26 disajikan sebagai contoh rinci perhitungan konsumsi energi listrik pada satu batch pengamatan, yaitu Batch 7. Nilai ini tidak digunakan sebagai total sistem 8 batch, melainkan sebagai ilustrasi metode perhitungan berbasis *Clamp meter* dan *load factor*.

Lampiran 4. Perhitungan konsumsi energi termal (*wood pellet* dan *lpg*)

Dasar Rumus:

$$Q_{in} = m_{bb} \times LHV$$

Keterangan:

m_{bb} = massa bahan bakar (kg),

LHV = Lower Heating Value / nilai kalor bawah (MJ/kg)

Parameter tetap:

- LHV *Wood pellet* = 15,6 MJ/kg (IPCC 2006, Vol.2, Tabel 1.2)

- LHV LPG = 47,3 MJ/kg (IPCC 2006, Vol.2, Tabel 1.2)

A. Energi Termal *Rotary Panner* (*Wood pellet*)

Diketahui:

- Konsumsi *wood pellet* (WP) *Rotary Panner* rata-rata 8 batch:
 $m_{WP\ RP} = 1.463,75\text{ kg}$
- $LHV_{WP} = 15,6\text{ MJ/kg}$

Ditanya: Q_{in} *Rotary Panner*

Jawab:

$$\begin{aligned} Q_{in\ RP} &= m_{WP\ RP} \times LHV_{WP} \\ &= 1.463,75 \times 15,6 \\ &= 22.834,50\text{ MJ} \end{aligned}$$

Per unit fungsional (1 kg produk):

$$Q_{in\ RP\ per\ FU} = 22.834,50 / 2.066,50 = 11,05\text{ MJ/kg produk}$$

B. Energi Termal *ECP* (LPG Pendukung + *Wood pellet* Utama)

Diketahui:

- LPG: $m_{LPG\ total} = 18,75\text{ kg}$
- WP *ECP*: $m_{WP\ ECP} = 520,625\text{ kg}$
- $LHV_{LPG} = 47,3\text{ MJ/kg}$ | $LHV_{WP} = 15,6\text{ MJ/kg}$

Jawab:

$$\begin{aligned} Q_{LPG\ ECP} &= m_{LPG\ ECP} \times LHV_{LPG} \\ &\approx 18,75 \times 47,3 \\ &= 886,875\text{ MJ (estimasi proporsi LPG untuk ECP)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{WP\ ECP} &= m_{WP\ ECP} \times LHV_{WP} \\ &= 520,625 \times 15,6 \\ &= 8.121,75\text{ MJ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{in\ ECP} &= Q_{LPG\ ECP} + Q_{WP\ ECP} \\ &= 886,875 + 8.121,75 \\ &= 9.008,625\text{ MJ} \end{aligned}$$

Per unit fungsional:

$$Q_{in\ ECP\ per\ FU} = 9.008,625 / 2.066,50 = 4,36\ MJ/kg\ produk$$

C. Stasiun Pengeringan II *Ball tea*

Diketahui:

- Bahan bakar: *Wood pellet* + LPG
- Konsumsi WP = 2.018,75 kg | $LHV_{WP} = 15,6\ MJ/kg$
- Konsumsi LPG = 87,5 kg | $LHV_{LPG} = 47,3\ MJ/kg$

Jawab:

$$\begin{aligned} Q_{in\ BT} &= (m_{WP} \times LHV_{WP}) + (m_{LPG} \times LHV_{LPG}) \\ &= (2.018,75 \times 15,6) + (87,5 \times 47,3) \\ &= 31.492,5 + 4.138,75 \\ &= 35.631,25\ MJ \end{aligned}$$

Per unit fungsional:

$$Q_{in\ BT\ per\ FU} = 35.631,25 / 2.066,50 = 17,24\ MJ/kg\ produk$$

Lampiran 5. Perhitungan efisiensi termal dan *forced convection*

Dasar Rumus:

$$m_{air\ uap} = (m_{in} \times KA_{in}) - (m_{out} \times KA_{out})$$

$$Q_{useful} = m_{air\ uap} \times h_{fg}$$

$$\eta = (Q_{useful} / Q_{in}) \times 100\%$$

$$Q_{loss} = Q_{in} - Q_{useful}$$

Konstanta: h_{fg} (panas laten penguapan air, 100°C) = 2,2564 MJ/kg

A. Efisiensi Termal (*Rotary Panner*)

Diketahui:

- $m_{in} = 10.424,75\ kg$ | $KA_{in} = 75,83\%$
- $m_{out} = 6.681,03\ kg$ | $KA_{out} = 62,90\%$
- $Q_{in\ RP} = 22.834,50\ MJ$

Jawab:

Langkah 1 Massa air yang diuapkan:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{air uap RP}} &= (m_{\text{in}} \times KA_{\text{in}}) - (m_{\text{out}} \times KA_{\text{out}}) \\
 &= (10.424,75 \times 0,7583) - (6.681,03 \times 0,629) \\
 &= 7.905,08792 - 4.202,36787 \\
 &= 3.702,72005 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Langkah 2 Energi berguna:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{useful RP}} &= m_{\text{air uap}} \times h_{\text{fg}} \\
 &= 3.702,72005 \times 2,2564 \\
 &= 8.354,81752 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Langkah 3 Efisiensi termal:

$$\begin{aligned}
 \eta_{\text{RP}} &= (Q_{\text{useful}} / Q_{\text{in}}) \times 100\% \\
 &= (8.354,81752 / 22.834,50) \times 100\% \\
 &= 36,588\%
 \end{aligned}$$

Langkah 4 Kerugian panas (*Forced convection*):

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{loss RP}} &= Q_{\text{in}} - Q_{\text{useful}} \\
 &= 22.834,50 - 8.354,81752 \\
 &= 14.479,6825 \text{ MJ (63,41\% dari } Q_{\text{in}})
 \end{aligned}$$

B. Efisiensi Termal *ECP*

Diketahui:

- $m_{\text{in}} = 6.044,426787 \text{ kg} \mid KA_{\text{in}} = 59,24\%$
- $m_{\text{out}} = 5.185,575214 \text{ kg} \mid KA_{\text{out}} = 52,63\%$
- $Q_{\text{in ECP}} = 9.008,625 \text{ MJ}$

Jawab:

Langkah 1:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{air uap ECP}} &= (6.044,426787 \times 0,5924) - (5.185,575214 \times 0,5263) \\
 &= 3.580,7184 - 2.729,1682 \\
 &= 851,5502 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Langkah 2:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{useful ECP}} &= 851,5502 \times 2,2564 \\
 &= 1.921,43787 \text{ MJ}
 \end{aligned}$$

Langkah 3:

$$\eta_{ECP} = (1.921,43787 / 9.008,625) \times 100\% = 21,328\%$$

Langkah 4:

$$\begin{aligned} Q_{\text{loss } ECP} &= 9.008,625 - 1.921,43787 \\ &= 7.087,18713 \text{ MJ (78,67\% dari } Q_{\text{in}}) \end{aligned}$$

C. Efisiensi Termal *Ball tea (Hotspot Utama)*

Diketahui:

- $m_{\text{in}} = 5.185,575214 \text{ kg} \mid KA_{\text{in}} = 52,63\%$
- $m_{\text{out}} = 2.508,101897 \text{ kg} \mid KA_{\text{out}} = 3,33\%$
- $Q_{\text{in } BT} = 35.631,25 \text{ MJ}$

Jawab:

Langkah 1:

$$\begin{aligned} m_{\text{air uap } BT} &= (5.185,575214 \times 0,5263) - (2.508,101897 \times 0,0333) \\ &= 2.729,1682 - 83,5197 \\ &= 2.645,6485 \text{ kg} \end{aligned}$$

Langkah 2:

$$\begin{aligned} Q_{\text{useful } BT} &= 2.645,6485 \times 2,2564 \\ &= 5.969,64128 \text{ MJ} \end{aligned}$$

Langkah 3:

$$\eta_{BT} = (5.969,64128 / 35.631,25) \times 100\% = 16,7539\%$$

Langkah 4:

$$\begin{aligned} Q_{\text{loss } BT} &= 35.631,25 - 5.969,64128 \\ &= 29.661,6087 \text{ MJ (83,246\% dari } Q_{\text{in}}) \end{aligned}$$

Lampiran 6. Perhitungan *Specific Energy Consumption (SEC)*

Dasar Rumus:

$$\text{SEC Termal (MJ/kg)} = Q_{\text{in stasiun (MJ)}} / m_{\text{produk jadi (kg)}}$$

$$\text{SEC Listrik (kWh/kg)} = E_{\text{listrik stasiun (kWh)}} / m_{\text{produk jadi (kg)}}$$

$$\text{SEC Total (MJ/kg)} = \text{SEC}_{\text{Termal}} + (\text{SEC}_{\text{Listrik}} \times 3,6)$$

Data: Massa produk jadi = 2.066,5 kg

A. SEC Termal per Unit Proses

$$\begin{aligned} \text{SEC}_{\text{termal RP}} &= Q_{\text{in RP}} / m_{\text{produk}} \\ &= 22.834,50 / 2.066,5 \\ &= 11,05 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SEC}_{\text{termal ECP}} &= Q_{\text{in ECP}} / m_{\text{produk}} \\ &= 9.008,625 / 2.066,5 \\ &= 4,36 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{SEC}_{\text{termal BT}} &= Q_{\text{in BT}} / m_{\text{produk}} \\ &= 35.631,25 / 2.066,5 \\ &= 17,24 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{TOTAL SEC Termal} &= 67.474,375 / 2.066,5 \\ &= 32,65 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

B. SEC Listrik per Unit Proses

$$\text{SEC}_{\text{Listrik Pelayuan}} = 129,88 / 2.066,5 = 0,0628 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{SEC}_{\text{Listrik Pendinginan}} = 59,29 / 2.066,5 = 0,0287 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{SEC}_{\text{Listrik OTR}} = 132,83 / 2.066,5 = 0,0643 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{SEC}_{\text{Listrik ECP}} = 237,12 / 2.066,5 = 0,1147 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{SEC}_{\text{Listrik BallTea}} = 331,71 / 2.066,5 = 0,1605 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{SEC}_{\text{Listrik Utilitas}} = 204,85 / 2.066,5 = 0,0991 \text{ kWh/kg}$$

$$\text{TOTAL SEC Listrik} = 1.095,68 / 2.066,5 = 0,5302 \text{ kWh/kg}$$

C. SEC Total Sistem

Konversi SEC listrik ke MJ:

$$\text{SEC}_{\text{Listrik MJ}} = 0,5302 \times 3,6 = 1,909 \text{ MJ/kg}$$

$$\text{SEC Total} = \text{SEC}_{\text{termal}} + \text{SEC}_{\text{Listrik}} \text{ (dalam MJ ekuivalen)}$$

$$= 32,6520 + 1,909$$

$$= 34,5607 \text{ MJ/kg}$$

Lampiran 7. *Logsheet* pengamatan lapangan seluruh batch produksi

Lampiran ini menyajikan format *logsheet* dan rekap data lapangan yang digunakan selama 8 batch pengamatan pada proses produksi teh hijau di PPTK Gambung. Data yang dicatat meliputi massa bahan masuk dan keluar berbasis

neraca massa, kadar air pada titik kritis, konsumsi listrik, konsumsi bahan bakar, material kemasan, dan limbah padat. Lampiran ini disertakan untuk menunjukkan keterlacakan (*traceability*) data primer yang menjadi dasar perhitungan neraca massa, audit energi, dan penyusunan *Life Cycle Inventory* (LCI).

Tabel 31. *Logsheet* Batch 1

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	20/02/2026
Nomor batch	-	1
Massa pucuk segar masuk	kg	12.250
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	4.553,17
Massa keluar Cooling	kg	4.669,37
Massa keluar OTR	kg	4.519,57
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	3.263,26
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	1.450,67
Massa produk terkemas	kg	2.423
KA pucuk segar	% bb	88,5
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	69,06
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	56,83
KA produk akhir	% bb	2,89
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	191,886
Konsumsi listrik Cooling	kWh	40,405
Konsumsi listrik OTR	kWh	97,984
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	369,012
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	389,983
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	283,121

Tabel 32. *Logsheets* batch 2

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	21/02/2026
Nomor batch	-	2
Massa pucuk segar masuk	kg	9.150
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	6.635,80
Massa keluar Cooling	kg	6.109,91
Massa keluar OTR	kg	6.109,91
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	5.913,29
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	2.498,43
Massa produk terkemas	kg	1.812
KA pucuk segar	% bb	73,29
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	64,17
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	58,67
KA produk akhir	% bb	2,18
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	74,105
Konsumsi listrik Cooling	kWh	58,885
Konsumsi listrik OTR	kWh	128,213
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	141,703
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	236,013
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	118,687

Tabel 33. *Logsheets* batch 3

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	23/02/2026
Nomor batch	-	3
Massa pucuk segar masuk	kg	7.400

Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	4.965,79
Massa keluar Cooling	kg	4.602,44
Massa keluar OTR	kg	4.371,09
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	3.890,72
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	1.963,58
Massa produk terkemas	kg	1.273
KA pucuk segar	% bb	74,5
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	62
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	51,5
KA produk akhir	% bb	3,9
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	63,182
Konsumsi listrik Cooling	kWh	44,066
Konsumsi listrik OTR	kWh	91,725
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	122,520
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	169,156
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	104,535

Tabel 34. *Logsheet* batch 4

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	25/02/2026
Nomor batch	-	4
Massa pucuk segar masuk	kg	13.375
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	10.148,87
Massa keluar Cooling	kg	10.148,87
Massa keluar OTR	kg	9.406,47
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	9.145,88
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	3.568,98

Massa produk terkemas	kg	2.720
KA pucuk segar	% bb	74,33
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	66,17
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	54,17
KA produk akhir	% bb	3,8
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	170,048
Konsumsi listrik Cooling	kWh	90,06
Konsumsi listrik OTR	kWh	212,968
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	321,789
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	390,837
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	248,272

Tabel 35. *Logsheet* batch 5

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	26/02/2026
Nomor batch	-	5
Massa pucuk segar masuk	kg	5.843
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	3.561,14
Massa keluar Cooling	kg	3.405,76
Massa keluar OTR	kg	3.337,69
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	2.797,99
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	1.480,02
Massa produk terkemas	kg	1.120
KA pucuk segar	% bb	75,42
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	59,67
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	48,67
KA produk akhir	% bb	2,96

Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	81,902
Konsumsi listrik Cooling	kWh	32,002
Konsumsi listrik OTR	kWh	75,558
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	119,575
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	419,154
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	202,538

Tabel 36. *Logsheet* batch 6

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	28/02/2026
Nomor batch	-	6
Massa pucuk segar masuk	kg	17.135
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	10.688,60
Massa keluar Cooling	kg	9.733,57
Massa keluar OTR	kg	9.102,32
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	7.544,64
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	3.911,72
Massa produk terkemas	kg	3.502
KA pucuk segar	% bb	78,13
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	64,94
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	50,33
KA produk akhir	% bb	4,2
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	205,926
Konsumsi listrik Cooling	kWh	94,85
Konsumsi listrik OTR	kWh	204,253
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	392,641
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	478,118

Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	300,54
----------------------------------	-----	--------

Tabel 37. *Logsheets* batch 7

Parameter	Satuan	Nilai
Tanggal pengamatan	-	2/03/2026
Nomor batch	-	7
Massa pucuk segar masuk	kg	4.300
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	2.995,51
Massa keluar Cooling	kg	3.064,37
Massa keluar OTR	kg	2.720,41
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	2.491,59
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	1.385,62
Massa produk terkemas	kg	882
KA pucuk segar	% bb	69
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	55,5
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	46,5
KA produk akhir	% bb	3,8
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	83,466
Konsumsi listrik Cooling	kWh	38,308
Konsumsi listrik OTR	kWh	88,966
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	156,660
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	180,178
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	130,669

Tabel 38. *Logsheets* batch 8

Parameter	Satuan	Nilai
-----------	--------	-------

Tanggal pengamatan	-	4/03/2026
Nomor batch	-	8
Massa pucuk segar masuk	kg	13.945
Massa keluar <i>Rotary Panner</i>	kg	9.899,34
Massa keluar Cooling	kg	9.048,54
Massa keluar OTR	kg	9.048,54
Massa keluar <i>ECP</i>	kg	8.091,58
Massa keluar <i>Ball tea</i>	kg	3.805,79
Massa produk terkemas	kg	2.800
KA pucuk segar	% bb	73,5
KA keluar <i>Rotary Panner</i>	% bb	62,67
KA keluar <i>ECP</i>	% bb	54,33
KA produk akhir	% bb	2,9
Konsumsi listrik <i>Rotary Panner</i>	kWh	168,485
Konsumsi listrik Cooling	kWh	75,719
Konsumsi listrik OTR	kWh	162,954
Konsumsi listrik <i>ECP</i>	kWh	273,093
Konsumsi listrik <i>Ball tea</i>	kWh	390,239
Konsumsi listrik utilitas pabrik	kWh	250,454

Lampiran 8. Rekapitulasi Hasil Estimasi Neraca Massa Sistem 8 Batch dan Normalisasi ke Unit Fungsional

Lampiran ini menyajikan rekapitulasi hasil estimasi neraca massa sistem produksi teh hijau selama 8 batch pengamatan beserta hasil normalisasinya ke unit fungsional, yaitu 1 kg teh hijau kering terkemas. Perlu ditegaskan bahwa massa bahan antar unit proses pada lampiran ini bukan merupakan hasil penimbangan langsung pada setiap stasiun, melainkan hasil estimasi neraca massa berbasis kadar air pada titik kritis proses dan rekonstruksi aliran massa sistem. Dengan demikian,

lampiran ini berfungsi untuk menunjukkan keterlacakan proses konversi dari data lapangan menuju inventori yang digunakan dalam audit energi dan pemodelan OpenLCA.

A. Dasar penyusunan lampiran

Data dasar yang digunakan dalam penyusunan lampiran ini meliputi:

1. massa pucuk teh segar yang masuk ke sistem,
2. massa produk akhir teh hijau kering terkemas,
3. kadar air pada titik kritis proses, yaitu pucuk segar, keluaran *Rotary Panner*, keluaran *ECP*, dan produk akhir,
4. konsumsi energi listrik, bahan bakar, material kemasan, serta limbah padat,
5. hasil rekonstruksi neraca massa tahap demi tahap sebagaimana telah dihitung pada Lampiran 1.

Dengan dasar tersebut, massa keluaran pada titik-titik antara proses direpresentasikan sebagai **hasil estimasi neraca massa sistem**, bukan sebagai hasil penimbangan langsung di seluruh stasiun. Pendekatan ini dipandang memadai untuk penelitian karena tujuan utamanya adalah menyusun *baseline* inventori, audit energi, dan jejak karbon pada tingkat sistem produksi.

B. Rekapitulasi hasil estimasi neraca massa sistem 8 batch

Tabel 39. Rekapitulasi hasil estimasi neraca massa sistem 8 batch

No.	Tahap proses	Massa masuk (kg)	Massa keluar estimasi (kg)	Susut massa (kg)	Rendemen tahap (%)
1	<i>Rotary Panner</i>	10.424,75	6.681,03	3.743,72	64,09
2	Cooling	6.681,03	6.255,05	425,98	93,62
3	Open Top Roller (OTR)	6.255,05	6.044,43	210,62	96,63
4	Pengeringan I (<i>ECP</i>)	6.044,43	5.185,58	858,85	85,79

5	Pengeringan II (<i>Ball tea</i>)	5.185,58	2.508,10	2.677,48	48,37
6	Pengepakan	2.508,10	2.066,50	441,60	82,39
Total gate-to-gate		10.424,75	2.066,50	8.358,25	19,82

Berdasarkan Tabel Lampiran 35, sistem produksi menghasilkan rendemen total sebesar 19,82%, yang berarti sekitar 5,0446 kg pucuk teh segar dibutuhkan untuk menghasilkan 1 kg teh hijau kering terkemas. Susut massa terbesar terjadi pada *Rotary Panner* dan *Ball tea*, yang menunjukkan bahwa kedua unit tersebut merupakan titik utama pengurangan massa bahan akibat penguapan air dan penyusutan proses. Nilai-nilai pada tabel ini merupakan hasil estimasi neraca massa sistem yang telah direkonstruksi secara kuantitatif dari data dasar dan kadar air titik kritis proses.

C. Rekapitulasi kadar air titik kritis proses

Titik pengamatan	Kadar air (% basis basah)
Pucuk segar	75,83375
Keluar <i>Rotary Panner</i>	62,89750
Keluar <i>ECP</i>	52,62500
Keluar <i>Ball tea</i> / produk akhir	3,32844

Kadar air pada tabel di atas menjadi dasar untuk menghitung massa air yang diuapkan dan mendukung proses rekonstruksi neraca massa pada unit pemanasan. Penurunan kadar air yang sangat tajam dari pucuk segar hingga produk akhir menjelaskan besarnya beban energi termal pada sistem, terutama pada unit *Rotary Panner*, *ECP*, dan *Ball tea*.

D. Normalisasi hasil estimasi neraca massa ke unit fungsional

Normalisasi dilakukan terhadap unit fungsional 1 kg teh hijau kering terkemas dengan rumus umum:

$$\text{Nilai per FU} = \frac{\text{massa atau input total sistem}}{\text{massa produk akhir total}}$$

dengan massa produk akhir total sebesar:

$$m_{\text{produk}} = 2.066,50 \text{ kg}$$

Hasil normalisasi aliran massa utama disajikan pada Tabel Lampiran 36.

Tabel 40. Normalisasi hasil estimasi neraca massa ke unit fungsional

Aliran massa sistem	Nilai total sistem	Perhitungan	Nilai per FU
Pucuk teh segar masuk	10.424,75 kg	10.424,75 / 2.066,50	5,0446 kg/kg produk
Keluaran <i>Rotary Panner</i> (estimasi)	6.681,03 kg	6.681,03 / 2.066,50	3,2330 kg/kg produk
Keluaran Cooling (estimasi)	6.255,05 kg	6.255,05 / 2.066,50	3,0269 kg/kg produk
Keluaran OTR (estimasi)	6.044,43 kg	6.044,43 / 2.066,50	2,9250 kg/kg produk
Keluaran <i>ECP</i> (estimasi)	5.185,58 kg	5.185,58 / 2.066,50	2,5094 kg/kg produk
Keluaran <i>Ball tea</i> (estimasi)	2.508,10 kg	2.508,10 / 2.066,50	1,2137 kg/kg produk
Produk akhir terkemas	2.066,50 kg	2.066,50 / 2.066,50	1,0000 kg/kg produk
Susut massa total	8.358,25 kg	8.358,25 / 2.066,50	4,0446 kg/kg produk

Tabel Lampiran 36 menunjukkan bahwa untuk menghasilkan 1 kg produk akhir, sistem harus memproses sekitar 3,2330 kg bahan setelah *Rotary Panner*, 2,5094 kg bahan setelah *ECP*, dan 1,2137 kg bahan setelah *Ball tea* sebelum mencapai titik keluaran pengepakan. Nilai-nilai ini menegaskan bahwa sebagian

besar reduksi massa sistem berlangsung pada tahap pemanasan dan pengeringan. Karena massa antar unit proses tersebut merupakan hasil estimasi neraca massa, maka nilainya harus dibaca sebagai hasil rekonstruksi sistem, bukan sebagai data timbang langsung per stasiun.

E. Normalisasi inventori utama ke unit fungsional

Selain aliran massa bahan, normalisasi juga dilakukan terhadap *input* energi, material kemasan, dan limbah padat. Hasil normalisasi inventori utama sistem disajikan pada Tabel Lampiran 8D.

Tabel 41. Normalisasi inventori utama sistem ke unit fungsional

Komponen inventori	Nilai total sistem	Perhitungan	Nilai per FU
Pucuk teh segar	10.424,75 kg	10.424,75 / 2.066,50	5,0446 kg
Electricity	1.095,67 kWh	1.095,67 / 2.066,50	0,5302 kWh
<i>Wood pellet</i>	4.003,13 kg	4.003,13 / 2.066,50	1,9371 kg
LPG	106,25 kg	106,25 / 2.066,50	0,0514 kg
Karung PP	4,77 kg	4,77 / 2.066,50	0,0023075 kg
Plastik inner PE	2,76 kg	2,76 / 2.066,50	0,0013375 kg
<i>Bottom ash</i>	21,88 kg	21,88 / 2.066,50	0,0106 kg
Reject/teh tercecer	10,09 kg	10,09 / 2.066,50	0,0049 kg
Produk teh hijau terkemas	2.066,50 kg	2.066,50 / 2.066,50	1,0000 kg

Tabel Lampiran 37 merupakan dasar langsung penyusunan Life Cycle Inventory (LCI) final yang dimasukkan ke dalam model OpenLCA. Dengan normalisasi ini, seluruh *input* dan *output* sistem berada pada basis pembanding yang seragam, yaitu per 1 kg teh hijau kering terkemas, sehingga hasil SEC dan jejak karbon dapat diinterpretasikan secara konsisten.

F. Keluaran residual untuk keseimbangan neraca massa model

Dalam konteks pemodelan sistem di OpenLCA, terdapat keluaran residual yang dicatat sebagai selisih massa sebesar 0,20882 kg/FU. Nilai ini merepresentasikan bagian aliran massa yang tidak dapat diidentifikasi secara eksplisit sebagai produk jadi, *bottom ash*, maupun reject tercatat. Secara teknis, keluaran residual ini mencerminkan akumulasi penguapan residual yang tidak terukur langsung, fragmen bahan yang tercecer, dan ketidakpresisian neraca massa lapangan. Nilai ini dimasukkan ke dalam model semata-mata untuk menjaga keseimbangan neraca massa sistem secara komputasional dan tidak membawa beban emisi gas rumah kaca pada hasil LCIA.

Lampiran 9. Turunan Faktor Emisi, Faktor Konversi, dan Perhitungan Provider OpenLCA

Lampiran ini menyajikan turunan faktor emisi dan faktor konversi yang digunakan untuk membangun *provider* proksi berbasis *emission factor* pada OpenLCA. Penyajian ini dimaksudkan untuk memperjelas hubungan antara data sekunder pada Tabel 3 dan konfigurasi model yang digunakan dalam penelitian. Dengan lampiran ini, proses translasi dari faktor emisi literatur ke *provider* OpenLCA dapat ditelusuri secara lebih sistematis.

A. Faktor konversi energi yang digunakan

Faktor konversi energi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. 1 kWh = 3,6 MJ
2. NCV/LHV *wood pellet* = 15,6 MJ/kg
3. NCV/LHV LPG = 47,3 MJ/kg

Faktor konversi tersebut digunakan untuk:

- mengonversi energi listrik ke dalam satuan MJ pada perhitungan SEC total,
- menghitung energi termal masuk dari pembakaran bahan bakar,

- serta menurunkan faktor emisi berbasis energi menjadi faktor emisi berbasis massa.

B. Turunan faktor emisi pembakaran LPG berbasis massa

Perhitungan dilakukan dari faktor emisi IPCC berbasis energi dengan rumus:

$$EF_{massa} = EF_{energi} \times NCV$$

dengan konversi:

$$1 \text{ TJ} = 10^6 \text{ MJ}$$

1. Emisi CO₂ dari pembakaran LPG

$$EF_{CO_2} = 63.100 \text{ kg CO}_2/\text{TJ} \times 47,3 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{CO_2} = 2,98463 \text{ kg CO}_2/\text{kg LPG}$$

2. Emisi CH₄ dari pembakaran LPG

$$EF_{CH_4} = 0,9 \text{ kg CH}_4/\text{TJ} \times 47,3 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{CH_4} = 0,00004257 \text{ kg CH}_4/\text{kg LPG}$$

3. Emisi N₂O dari pembakaran LPG

$$EF_{N_2O} = 4 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{TJ} \times 47,3 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{N_2O} = 0,0001892 \text{ kg N}_2\text{O}/\text{kg LPG}$$

C. Turunan faktor emisi pembakaran *wood pellet* berbasis massa

1. Emisi CO₂ biogenik dari pembakaran *wood pellet*

$$EF_{CO_2,biogenic} = 112.000 \text{ kg CO}_2/\text{TJ} \times 15,6 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{CO_2,biogenic} = 1,7472 \text{ kg CO}_2/\text{kg biomassa}$$

2. Emisi CH₄ dari pembakaran *wood pellet*

$$EF_{CH_4} = 11 \text{ kg CH}_4/\text{TJ} \times 15,6 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{CH_4} = 0,0001716 \text{ kg CH}_4/\text{kg biomassa}$$

3. Emisi N₂O dari pembakaran *wood pellet*

$$EF_{N_2O} = 7 \text{ kg N}_2\text{O/TJ} \times 15,6 \text{ MJ/kg} \times \frac{1 \text{ TJ}}{10^6 \text{ MJ}}$$

$$EF_{N_2O} = 0,0001092 \text{ kg N}_2\text{O/kg biomassa}$$

D. Faktor emisi listrik grid dan material kemasan

Faktor emisi listrik grid JAMALI yang digunakan pada penelitian ini adalah:

$$0,87 \text{ kg CO}_2\text{e/kWh}$$

Faktor emisi material kemasan yang digunakan adalah:

- Polypropylene (PP) = 3,0908179 kg CO₂eq/kg material
- LDPE = 2,5867273 kg CO₂eq/kg material

E. Rekap provider proksi yang digunakan pada OpenLCA

Provider proksi	Reference flow	Basis unit	Elementary flow / faktor emisi yang dimasukkan
Electricity grid JAMALI	1 kWh	kWh	0,87 kg CO ₂ eq/kWh
LPG combustion	1 kg LPG	kg	2,98463 kg CO ₂ ; 0,00004257 kg CH ₄ ; 0,0001892 kg N ₂ O
<i>Wood pellet</i> combustion	1 kg biomassa	kg	1,7472 kg CO ₂ non-fossil; 0,0001716 kg CH ₄ non-fossil; 0,0001092 kg N ₂ O
Karung PP	1 kg material	kg	3,0908179 kg CO ₂ eq/kg
Plastik inner PE	1 kg material	kg	2,5867273 kg CO ₂ eq/kg

F. Catatan interpretasi

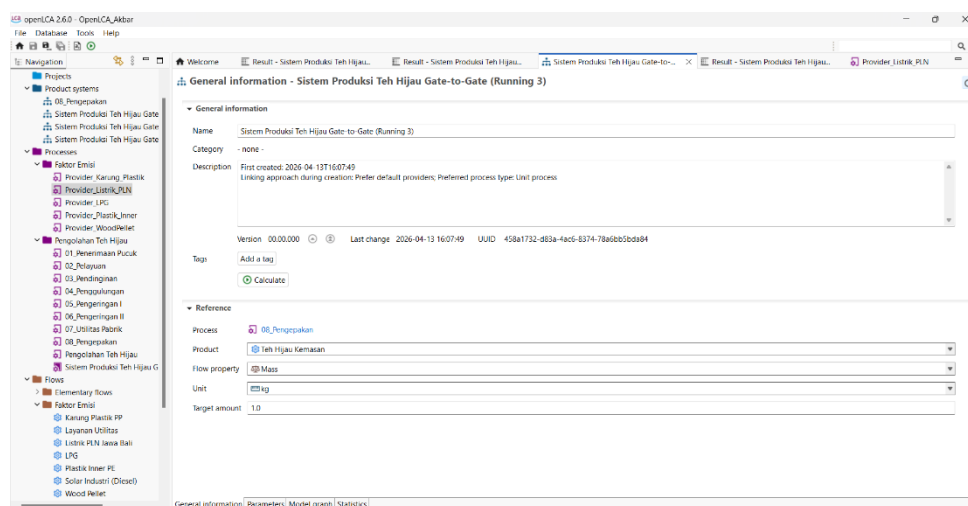
Seluruh nilai pada lampiran ini digunakan untuk menyusun *provider* proksi berbasis faktor emisi pada OpenLCA, sesuai dengan pendekatan *screening gate-to-gate*

carbon footprint berbasis *emission factor* yang digunakan dalam penelitian. Dengan demikian, data aktivitas berupa konsumsi listrik, bahan bakar, dan material kemasan dapat langsung dikonversi menjadi beban emisi pada tahap LCIA kategori *Climate Change – GWP100*.

Lampiran 10. Bukti Setup Model OpenLCA dan Hasil Karakterisasi Utama

Lampiran ini berisi dokumentasi visual model OpenLCA yang digunakan dalam penelitian, meliputi *product system*, *reference flow*, daftar *provider* proksi berbasis faktor emisi, hasil karakterisasi LCIA kategori *Climate Change – GWP100*, serta tampilan analisis kontribusi. Lampiran ini bertujuan untuk memperlihatkan keterlacakan antara inventori yang disusun pada penelitian dengan hasil jejak karbon yang diperoleh. Struktur model yang digunakan pada penelitian ini merujuk pada batas sistem *gate-to-gate*, unit fungsional 1 kg teh hijau kering terkemas, metode LCIA CML-IA *Baseline*, serta hasil total GWP100 sebesar 4,0613 kg CO₂eq/kg produk.

A. Dokumentasi setup model



Gambar 22. Tampilan *product system* produksi teh hijau pada OpenLCA

openlca 2.6.0 - OpenLCA_Akbar

File Database Tools Help

Navigation

Product systems

- 08_Pengepakan
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Processes

- Faktor Emisi
 - Provider_Kantung_Plastik
 - Provider_Listrik_PLN
 - Provider_LPG
 - Provider_Plastik_Inner
 - Provider_WoodPellet
- Pengolahan Teh Hijau
 - 01_Penerimaan Pucuk
 - 02_Pelayuan
 - 03_Pendinginan
 - 04_Pemaglungan
 - 05_Pengeringan I
 - 06_Pengeringan II
 - 07_Ublitas Pakrik
 - 08_Pengepakan
- Pengolahan Teh Hijau
 - Sistem Produksi Teh Hijau G

Flows

- Elementary flows
- Faktor Emisi
 - Kantung Plastik PP
 - Layanan Utilitas
 - Listrik PLN Jawa Bali
 - LPG
 - Plastik Inner PE
 - Solar Industri (Diesel)
 - Wood Pellet

Inputs/Outputs - 08. Pengepakan

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e..	Location	Description
Kantung Plastik PP	Faktor Emisi	0.0031	kg	none	none		Provider_K...			
Layanan Utilitas	Faktor Emisi	1.00000	kg	none	none		07_Jalir...			
Plastik Inner PE	Faktor Emisi	0.00114	kg	none	none		Provider_P...			
Teh Hijau Kering	Product flows/Product	1.21370	kg	none	none		08_Penge...			

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e..	Location	Description
Teh Hijau Kemasan	Product Flows/Product	1.00000	kg	none	none					
Selah Massa	Product Flows/Waste	0.20882	kg	none	none					
Teh & Gulma Tercecer	Product Flows/Waste	0.00468	kg	none	none					

General information | Inputs/Outputs | Documentation | Parameters | Allocation | Social aspects | Direct impacts

Gambar 23. Tampilan daftar *input-output foreground* pada OpenLCA

openlca 2.6.0 - OpenLCA_Akbar

File Database Tools Help

Navigation

Product systems

- 08_Pengepakan
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate
- Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Processes

- Faktor Emisi
 - Provider_Kantung_Plastik
 - Provider_Listrik_PLN
 - Provider_LPG
 - Provider_Plastik_Inner
 - Provider_WoodPellet
- Pengolahan Teh Hijau
 - 01_Penerimaan Pucuk
 - 02_Pelayuan
 - 03_Pendinginan
 - 04_Pemaglungan
 - 05_Pengeringan I
 - 06_Pengeringan II
 - 07_Ublitas Pakrik
 - 08_Pengepakan
- Pengolahan Teh Hijau
 - Sistem Produksi Teh Hijau G

Flows

- Elementary flows
- Faktor Emisi
 - Kantung Plastik PP
 - Layanan Utilitas
 - Listrik PLN Jawa Bali
 - LPG
 - Plastik Inner PE
 - Solar Industri (Diesel)
 - Wood Pellet

Inputs/Outputs - Provider Listrik PLN

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e..	Location	Description
------	----------	--------	------	----------------	-------------	---------------	----------	------------------	----------	-------------

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod...	Provider	Data quality e..	Location	Description
Listrik PLN Jawa Bali	Faktor Emisi	1.00000	kWh	none	none					
Carbon dioxide fossil	..Emission to air/unseped	0.87000	kg	none	none					ESDM 2022

General information | Inputs/Outputs | Documentation | Parameters | Allocation | Social aspects | Direct impacts

Gambar 24. Tampilan provider listrik grid JAMALI pada OpenLCA

openlca 2.6.0 - OpenLCA_Akbar

File Database Tools Help

Navigation

Projects

Product systems

08_Pemrosakan

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Processes

Faktor Emisi

Provider_Karung_Plastik

Provider_Listrik_PLN

Provider_LPG

Provider_Plastik_Inner

Provider_WoodPellet

Pengolahan Teh Hijau

01_Penerimaan Putuk

02_Pelnyuan

03_Pendinginan

04_Pengalungan

05_Pengeringan I

06_Pengeringan II

07_Litias Pakrik

08_Pemrosakan

Pengolahan Teh Hijau

Sistem Produksi Teh Hijau G

Flows

Elementary flows

Faktor Emisi

Karung Plastik PP

Layanan Utilitas

Listrik PLN Jawa Bali

LPG

Plastik Inner PE

Solar Industri (Diesel)

Wood Pellet

Inputs/Outputs - Provider_Karung_Plastik

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e.	Location	Description

Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod.	Provider	Data quality e.	Location	Description
Karung Plastik PP	Faktor Emisi	1.00000	kg		none					
Carbon dioxide fossil	_Emission to air/unspecified	3.09082	kg		none					

General Information Inputs/Outputs Documentation Parameters Allocation Social aspects Direct Impacts

Gambar 27. Tampilan provider pembakaran karung plastik pada OpenLCA

openlca 2.6.0 - OpenLCA_Akbar

File Database Tools Help

Navigation

Projects

Product systems

08_Pemrosakan

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Sistem Produksi Teh Hijau Gate

Processes

Faktor Emisi

Provider_Karung_Plastik

Provider_Listrik_PLN

Provider_LPG

Provider_Plastik_Inner

Provider_WoodPellet

Pengolahan Teh Hijau

01_Penerimaan Putuk

02_Pelnyuan

03_Pendinginan

04_Pengalungan

05_Pengeringan I

06_Pengeringan II

07_Litias Pakrik

08_Pemrosakan

Pengolahan Teh Hijau

Sistem Produksi Teh Hijau G

Flows

Elementary flows

Faktor Emisi

Karung Plastik PP

Layanan Utilitas

Listrik PLN Jawa Bali

LPG

Plastik Inner PE

Solar Industri (Diesel)

Wood Pellet

Inputs/Outputs - Provider_Plastik_Inner

Inputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided waste	Provider	Data quality e.	Location	Description

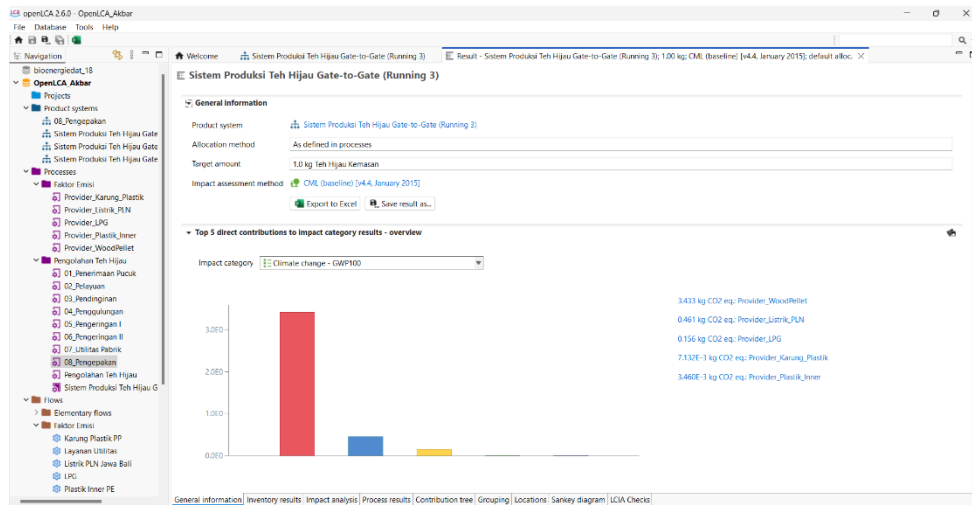
Outputs

Flow	Category	Amount	Unit	Costs/Revenues	Uncertainty	Avoided prod.	Provider	Data quality e.	Location	Description
Plastik Inner PE	Faktor Emisi	1.00000	kg		none					
Carbon dioxide fossil	_Emission to air/unspecified	2.58673	kg		none					

General Information Inputs/Outputs Documentation Parameters Allocation Social aspects Direct Impacts

Gambar 28. Tampilan provider pembakaran plastik inner pada OpenLCA

B. Dokumentasi hasil karakterisasi

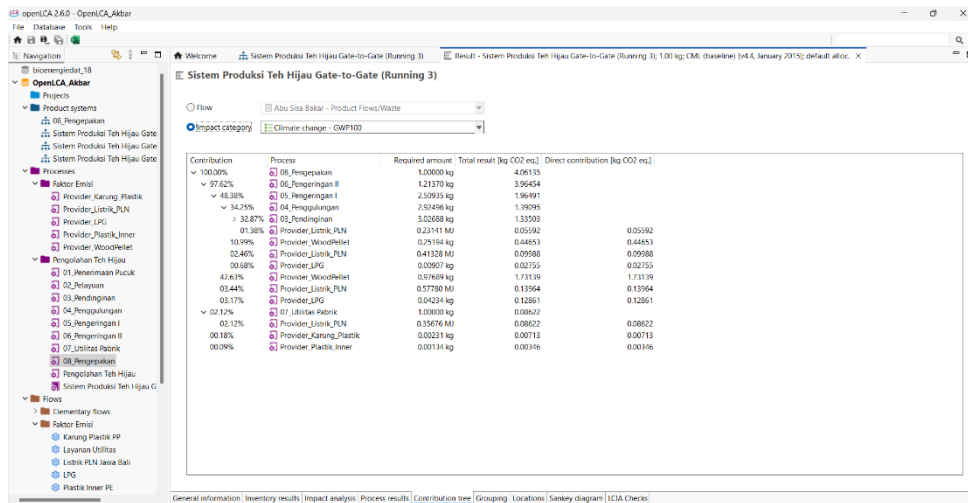


Gambar 29. Hasil LCIA total kategori Climate Change – GWP100 pada OpenLCA

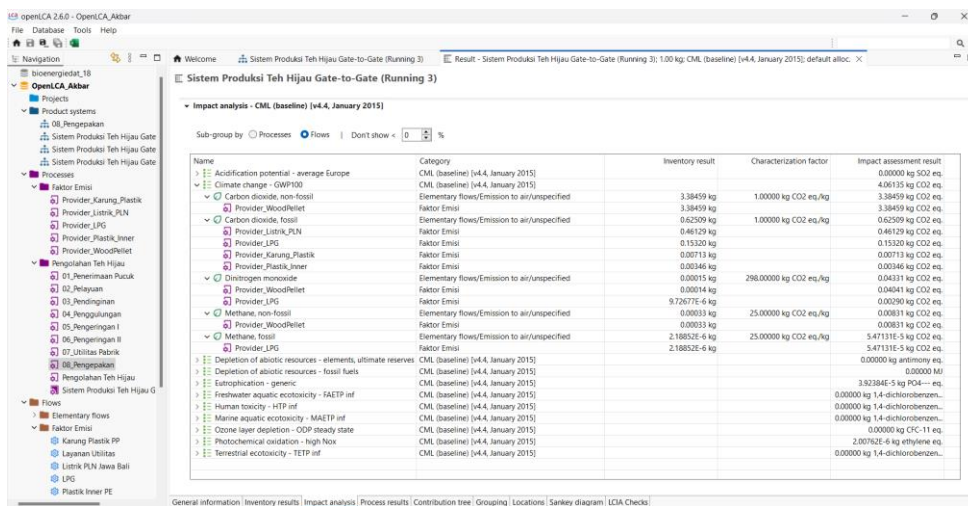
Impact analysis - CML (baseline) [v4.4, January 2015]

Name	Category	Inventory result	Characterization factor	Impact assessment result
Acidification potential - average Europe	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg SO2 eq.
Climate change - GWP100	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			4.06135 kg CO2 eq.
Provider_WoodPellet	Faktor Emisi			3.43331 kg CO2 eq.
Carbon dioxide, non-fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	3.38459 kg	1.00000 kg CO2 eq./kg	3.38459 kg CO2 eq.
Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00014 kg	298.00000 kg CO2 eq./kg	0.040414 kg CO2 eq.
Methane, non-fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00033 kg	25.00000 kg CO2 eq./kg	0.00831 kg CO2 eq.
Provider_Listrik_PLN	Faktor Emisi			0.46129 kg CO2 eq.
Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.46129 kg	1.00000 kg CO2 eq./kg	0.46129 kg CO2 eq.
Provider_LPG	Faktor Emisi			0.15616 kg CO2 eq.
Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.15320 kg	1.00000 kg CO2 eq./kg	0.15320 kg CO2 eq.
Dinitrogen monoxide	Elementary flows/Emission to air/unspecified	9.72675E-6 kg	298.00000 kg CO2 eq./kg	0.00290 kg CO2 eq.
Methane, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	2.18623E-6 kg	25.00000 kg CO2 eq./kg	5.47131E-5 kg CO2 eq.
Provider_Karung_Plastik	Faktor Emisi			0.00713 kg CO2 eq.
Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00713 kg	1.00000 kg CO2 eq./kg	0.00713 kg CO2 eq.
Provider_Plastik_Inner	Faktor Emisi			0.00346 kg CO2 eq.
Carbon dioxide, fossil	Elementary flows/Emission to air/unspecified	0.00346 kg	1.00000 kg CO2 eq./kg	0.00346 kg CO2 eq.
Depletion of abiotic resources - elements, ultimate reserve	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg antimony eq.
Depletion of abiotic resources - fossil fuels	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 MJ
Eutrophication - generic	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			3.92384E-5 kg PO4-- eq.
Freshwater aquatic ecotoxicity - FAETP inf	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg 1,4-dichlorobenzene...
Human toxicity - HTP inf	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg 1,4-dichlorobenzene...
Marine aquatic ecotoxicity - MAETP inf	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg 1,4-dichlorobenzene...
Ozone layer depletion - ODP steady state	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg CFC-11 eq.
Photochemical oxidation - high Nox	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			2.00762E-6 kg ethylene eq.
Terrestrial ecotoxicity - TEIP inf	CML (baseline) [v4.4, January 2015]			0.00000 kg 1,4-dichlorobenzene...

Gambar 30. Tampilan analisis kontribusi berdasarkan sumber input pada OpenLCA



Gambar 31. Tampilan analisis kontribusi berdasarkan unit process pada OpenLCA



Gambar 32. Tampilan analisis kontribusi berdasarkan flow emisi GRK pada OpenLCA

C. Ringkasan hasil utama model OpenLCA

Tabel 42. Ringkasan hasil utama model OpenLCA

Komponen hasil OpenLCA	Nilai
Total GWP100 sistem	4,0613 kg CO ₂ eq/kg produk
Wood pellet	3,4333 kg CO ₂ eq/FU (84,54%)
Electricity	0,4613 kg CO ₂ eq/FU (11,36%)
LPG	0,1562 kg CO ₂ eq/FU (3,84%)

Komponen hasil OpenLCA	Nilai
Karung PP	0,0071 kg CO ₂ eq/FU (0,18%)
Plastik inner PE	0,0035 kg CO ₂ eq/FU (0,09%)
<i>Rotary Panner</i>	1,3101 kg CO ₂ eq (32,26%)
<i>ECP</i>	0,5740 kg CO ₂ eq (14,13%)
<i>Ball tea</i>	1,9996 kg CO ₂ eq (49,24%)

Lampiran 11. Rekap Perhitungan Statistik Variasi 8 Batch

Lampiran ini menyajikan ringkasan statistik deskriptif dari 8 batch pengamatan yang digunakan dalam penelitian. Statistik yang ditampilkan meliputi rata-rata, standar deviasi, rentang nilai minimum–maksimum, dan *coefficient of variation* (CV). Penyajian ini bertujuan untuk menunjukkan bahwa hasil penelitian tidak hanya dibaca sebagai satu angka tunggal, tetapi juga sebagai distribusi data yang memiliki tingkat variasi antar batch. Selain itu, lampiran ini juga menyertakan contoh satu perhitungan manual dan rumus Excel yang digunakan untuk memperoleh hasil statistik tersebut.

A. Tabel hasil lengkap

Tabel 43. Rekap statistik rendemen dan kadar air

Parameter	Rata-rata ± SD	Rentang (Min–Max)	CV (%)
Rendemen total (%)	19,66 ± 1,09	17,20 – 20,51	5,53
Kadar air pucuk segar (%)	75,83 ± 5,71	69,00 – 88,50	7,53
Kadar air keluar <i>Rotary Panner</i> (%)	63,02 ± 4,15	55,50 – 69,06	6,58
Kadar air keluar <i>ECP</i> (%)	52,63 ± 4,13	46,50 – 58,67	7,84
Kadar air produk akhir (%)	3,33 ± 0,69	2,18 – 4,20	20,81

Tabel 44. Rekap statistik inventori material dan limbah per unit fungsional

Parameter	Rata-rata ± SD	Rentang (Min– Max)	CV (%)
Pucuk teh segar per FU (kg/kg produk)	5,1048 ± 0,2875	4,8754 – 5,8139	5,63
<i>Wood pellet</i> total per FU (kg/kg produk)	2,0691 ± 0,5012	1,5889 – 2,9249	24,22
LPG total per FU (kg/kg produk)	0,0554 ± 0,0413	0,0000 – 0,1178	74,56
PP per FU (kg/kg produk)	0,0023 ± 0,0000	0,0023 – 0,0023	0,00
LDPE per FU (kg/kg produk)	0,0013 ± 0,0000	0,0013 – 0,0013	0,00
<i>Bottom ash</i> per FU (kg/kg produk)	0,0113 ± 0,0027	0,0087 – 0,0160	24,22
Teh tercecer per FU (kg/kg produk)	0,0049 ± 0,0003	0,0046 – 0,0057	6,64

Tabel 45. Rekap statistik konsumsi energi dan Specific Energy Consumption (SEC)

Parameter	Rata-rata ± SD	Rentang (Min– Max)	CV (%)
Listrik total sistem per FU (kWh/kg produk)	0,5548 ± 0,1583	0,4181 – 0,8310	28,53
SEC listrik setara termal (MJ/kg produk)	1,9973 ± 0,5699	1,5052 – 2,9916	28,53
SEC termal total (MJ/kg produk)	34,90 ± 9,18	25,76 – 50,85	26,30
SEC total sistem (MJ/kg produk)	36,89 ± 9,18	27,80 – 52,36	24,89

Keterangan:

SD = standar deviasi

CV = *coefficient of variation*

FU = *functional unit* 1 kg teh hijau kering terkemas.

B. Contoh satu perhitungan manual

Contoh perhitungan statistik variasi untuk parameter rendemen total (%)

Sebagai contoh, perhitungan statistik variasi antar batch ditunjukkan pada parameter rendemen total (%). Parameter ini dipilih karena merupakan indikator utama efisiensi konversi bahan baku menjadi produk akhir dan hasilnya digunakan dalam pembahasan neraca massa pada Bab IV.

Tabel 46. Data rendemen total dari 8 batch pengamatan

Batch	Rendemen total (%)
1	19,78
2	19,80
3	17,20
4	20,34
5	19,17
6	20,44
7	20,51
8	20,08

1. Rata-rata

Rata-rata dihitung dengan rumus:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{19,78 + 19,80 + 17,20 + 20,34 + 19,17 + 20,44 + 20,51 + 20,08}{8}$$

$$\bar{x} = \frac{157,32}{8} = 19,665$$

$$\bar{x} \approx 19,66\%$$

2. Standar deviasi sampel

Standar deviasi sampel dihitung dengan rumus:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Dengan $\bar{x} = 19,665$, maka jumlah kuadrat selisih data terhadap rata-rata adalah:

$$\sum(x_i - \bar{x})^2 = 8,2952$$

Sehingga:

$$SD = \sqrt{\frac{8,2952}{8 - 1}}$$

$$SD = \sqrt{\frac{8,2952}{7}} = \sqrt{1,1850} = 1,0886$$

$$SD \approx 1,09$$

3. Nilai minimum dan maksimum

$$\text{Min} = 17,20$$

$$\text{Max} = 20,51$$

Sehingga rentang data adalah:

$$17,20 - 20,51$$

4. Coefficient of Variation (CV)

Koefisien variasi dihitung dengan rumus:

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\%$$

$$CV = \frac{1,0886}{19,665} \times 100\%$$

$$CV = 5,54\%$$

Nilai ini dapat dibulatkan menjadi 5,53% sesuai penyajian tabel.

5. Interpretasi

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rendemen total memiliki rata-rata 19,66%, standar deviasi 1,09, dan CV sebesar 5,53%. Nilai CV yang relatif rendah menunjukkan bahwa variasi rendemen antar batch tergolong kecil, sehingga rendemen total sistem dapat dianggap cukup stabil selama periode pengamatan.

Catatan: Perhitungan statistik untuk parameter lain dilakukan dengan prosedur yang sama, hanya berbeda pada data batch yang digunakan.

Lampiran 12. Rubrik dasar penentuan skor evaluasi alternatif perbaikan matriks prioritas berbasis Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)

A. Dasar Metodologis

Pemetaan rekomendasi perbaikan ke dalam Matriks Prioritas dilakukan menggunakan pendekatan *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) berbasis *Heuristic Scoring* dengan skala normalisasi 0–100. Setiap alternatif tindakan dinilai berdasarkan dua dimensi utama: (1) Tingkat Dampak (sumbu Y), yang mencerminkan potensi penurunan jejak karbon dan peningkatan efisiensi energi berdasarkan hasil LCA dan audit energi; dan (2) Tingkat Usaha (sumbu X), yang mencerminkan besaran investasi, kompleksitas teknis, dan waktu implementasi yang dibutuhkan. Skor akhir setiap dimensi diperoleh dari rata-rata tertimbang (*weighted average*) dari sub-kriteria yang dirinci pada Tabel L.1 dan L.2 di bawah ini. Penempatan titik koordinat (x,y) pada matriks menggunakan skala 0–100, di mana nilai tinggi pada sumbu Y (Dampak Tinggi) dan nilai rendah pada sumbu X (Usaha Rendah) merupakan kondisi ideal untuk penetapan prioritas *Quick Wins*.

B. Rubrik Kriteria Tingkat Dampak (Sumbu Y)

Skor	Rentang Skor	Kriteria: Potensi Penurunan GWP100 (% dari total emisi hotspot)	Kriteria: Potensi Penurunan SEC Termal (% dari baseline unit proses)	Kriteria: Cakupan Unit Proses yang Terdampak
Sangat Tinggi	81 – 100	Berpotensi menurunkan >30% total GWP100 sistem	Berpotensi menurunkan SEC termal >25% pada unit terdampak	Berdampak pada ≥ 2 unit proses hotspot utama
Tinggi	61 – 80	Berpotensi menurunkan 15–30% total GWP100 sistem	Berpotensi menurunkan SEC termal 15–25%	Berdampak pada 1 unit proses hotspot utama
Sedang	41 – 60	Berpotensi menurunkan 5–15% total GWP100 sistem	Berpotensi menurunkan SEC termal 5–15%	Berdampak pada unit proses pendukung (non-hotspot)
Rendah	21 – 40	Berpotensi menurunkan 1–5% total GWP100 sistem	Berpotensi menurunkan SEC termal 1–5%	Berdampak hanya pada utilitas atau kemasan
Sangat Rendah	0 – 20	Potensi penurunan GWP100 <1% dari total sistem	Potensi penurunan SEC termal <1%	Dampak terbatas atau tidak langsung

C. Rubrik Kriteria Tingkat Usaha (Sumbu X)

Skor	Rentang Skor	Kriteria: Estimasi Biaya Investasi (CAPEX)	Kriteria: Kompleksitas Teknis	Kriteria: Waktu Implementasi & Downtime Pabrik
Sangat Rendah	0 – 20	Tanpa biaya investasi; hanya perubahan prosedur/SOP operasional	Dapat dilakukan oleh operator tanpa keahlian teknik khusus	Implementasi < 1 minggu; tanpa <i>downtime</i> pabrik
Rendah	21 – 40	Biaya <Rp 50 juta; material tersedia di pasar lokal	Mebutuhkan teknisi lapangan; tidak perlu rekayasa ulang mesin	Implementasi 1–4 minggu; <i>downtime</i> < 2 hari
Sedang	41 – 60	Biaya Rp 50–500 juta; perlu tender pengadaan	Mebutuhkan teknisi spesialis atau konsultan eksternal	Implementasi 1–3 bulan; <i>downtime</i> 1–2 minggu
Tinggi	61 – 80	Biaya Rp 500 juta – Rp 2 miliar; perlu persetujuan anggaran manajemen	Mebutuhkan rekayasa ulang sistem permesinan atau instalasi baru	Implementasi 3–12 bulan; <i>downtime</i> 2–4 minggu
Sangat Tinggi	81 – 100	Biaya >Rp 2 miliar; perlu pendanaan proyek khusus atau mitra investor	Mebutuhkan penggantian mesin total atau rekonstruksi instalasi	Implementasi >12 bulan; <i>downtime</i> >1 bulan

D. Bobot Kriteria dan Contoh Perhitungan Skor

Dimensi	Sub-Kriteria	Bobot (%)	Kode A (Insulasi Termal)	Kode B (Modernisasi Tungku)	Kode C (Inverter /VFD)	Kode D (Optimasi Batch)
Dampak (Y)	Potensi penurunan GWP100	50	75	90	55	45
	Potensi penurunan SEC	30	70	85	50	50
	Cakupan unit terdampak	20	80	70	40	60
Skor Y (0–100)			74,5	86,5	51	49
Usaha (X)	Estimasi biaya (CAPEX)	40	20	75	45	5
	Kompleksitas teknis	35	25	80	50	10
	Waktu & <i>downtime</i>	25	20	70	40	5
Skor X (0–100)			22	75,25	45,25	7
Kuadran Matriks			<i>Quick Wins</i>	<i>Major Project</i>	<i>Fill-Ins</i>	<i>Quick Wins</i>

Catatan: Skor merupakan penilaian semi-kuantitatif berbasis data konsumsi energi aktual, efisiensi termal terukur, dan estimasi biaya berdasarkan referensi audit energi industri agroindustri (Anoune et al., 2024). Skor akhir Y dan X dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari sub-kriteria masing-masing dimensi.

Lampiran 13. Dokumentasi Visual Kegiatan Pengambilan Data Lapangan

Lampiran ini berisi dokumentasi visual kegiatan pengambilan data primer di area proses produksi teh hijau PPTK Gambung. Dokumentasi disertakan untuk memperlihatkan bahwa data penelitian diperoleh melalui pengamatan langsung di lapangan, meliputi pengukuran listrik, penimbangan bahan, pengukuran kadar air, serta pengamatan unit proses utama. Dokumentasi ini juga berfungsi sebagai pendukung visual terhadap metodologi pengumpulan data yang dijelaskan pada Bab III.



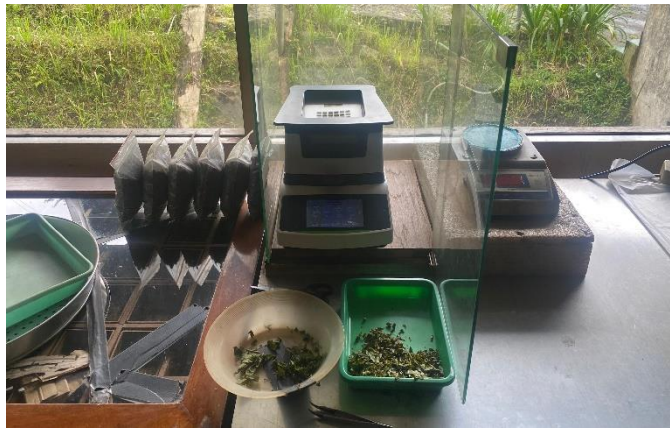
Gambar 33. Pengukuran arus dan tegangan menggunakan clamp meter



Gambar 34. Dokumentasi penggunaan *wood pellet* pada unit pemanasan



Gambar 35. Dokumentasi penggunaan LPG pada unit pemanasan



Gambar 36. Pengukuran kadar air menggunakan moisture analyzer



Gambar 37. Dokumentasi unit *Rotary Panner* saat proses operasi



Gambar 38. Dokumentasi unit Cooling dan Open Top Roller (OTR) saat proses operasi



Gambar 39. Dokumentasi unit Endless Chain Pressure (*ECP*) saat proses operasi



Gambar 40. Dokumentasi unit *Ball tea* saat proses operasi



Gambar 41. Dokumentasi tahap pengepakan produk akhir



Gambar 42. Dokumentasi material kemasan dan limbah padat

Lampiran 14. Dokumentasi Visual Motor/Peralatan yang Dihitung Menggunakan Pendekatan *Nameplate power* dan *Load factor*

Lampiran ini menyajikan dokumentasi visual motor/peralatan pada beberapa unit proses yang konsumsi listriknya dihitung menggunakan pendekatan *nameplate power* dan *load factor*. Pendekatan ini diterapkan pada komponen yang kabel dayanya tidak dapat diukur secara langsung menggunakan clamp meter karena ruang akses yang sangat sempit dan memiliki risiko keselamatan yang tinggi apabila dilakukan pengukuran langsung saat mesin beroperasi. Oleh karena itu, pada komponen-komponen tersebut digunakan data daya terpasang motor yang diidentifikasi melalui dokumentasi visual unit/peralatan, kemudian dikombinasikan dengan asumsi *load factor* sesuai kondisi operasional.

Sebaliknya, untuk unit atau motor yang kabel dayanya masih dapat diakses secara aman, konsumsi listrik dihitung berdasarkan pengukuran langsung menggunakan clamp meter. Dengan demikian, lampiran ini tidak dimaksudkan untuk mendokumentasikan seluruh motor pada sistem produksi, melainkan hanya bagian-bagian tertentu yang memang memerlukan pendekatan perhitungan tidak langsung karena keterbatasan akses lapangan.

A. Komponen yang dihitung menggunakan pendekatan *nameplate power* dan *load factor*

1. Unit Pelayuan

- *Conveyor Input A*
- *Conveyor Input B*
- *Conveyor Input C*
- *Conveyor Input D*
- *Conveyor Output A*
- *Conveyor Output B*
- *Conveyor Output C*

2. Unit Pendinginan

- *Blower fan*
- Silinder
- *Conveyor Output A*
- *Conveyor Output B*
- *Conveyor Output C*

3. Unit Penggulangan

- *Conveyor Input A*
- *Conveyor Input B*
- *Conveyor Output*

4. Unit Pengeringan Tahap 1

- *Conveyor Input D*
- *Conveyor Output A*
- *Conveyor Output B*

B. Dokumentasi nameplate yang digunakan untuk pendekatan *nameplate power* dan *load factor*



Gambar 43. Pengambilan data nameplate untuk perhitungan *load factor*