

Pemetaan Konsumsi Energi Spesifik (*Specific Energy Consumption*) dan Neraca Massa Proses Pengolahan Teh Hijau di Pusat Penelitian Teh dan Kina (PPTK) Gambung

Akbar Fathurrachman¹, Reza Widyasaputra^{1*)}, M. Abdul Jabbar Filayati²

¹Program Studi Teknologi Hasil Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian,
Institut Pertanian STIPER, Yogyakarta

²Peneliti Bagian Department Post-Harvest and Engineering Pusat Penelitian Teh dan Kina
Gambung, Mekarsari, Pasirjambu, Kota Bandung, Jawa Barat

^{*)}Correspondence email: rezaws@instiperjogja.ac.id

ABSTRACT

Green tea processing is an energy-intensive agro-industrial activity, particularly during the enzyme inactivation and multi-stage drying phases. Efficient use of energy in such facilities is essential for operational sustainability yet baseline data at the unit-process level remain scarce for Indonesian factories. This study aimed to (i) determine the mass balance and process yield, (ii) quantify the electrical and thermal Specific Energy Consumption (SEC) at each processing stage, and (iii) identify the primary energy-waste hotspots within the gate-to-gate boundary of the green tea production system at the Research Institute for Tea and Cinchona (PPTK) Gambung, West Java. Data were collected through direct field measurement (clamp meter, moisture analyser, and logsheets) across 8 production batches during January–March 2026. The total production yield was 19.82%, reflecting the large moisture reduction from fresh shoots (>75% moisture content, wet basis) to the final packaged dry product (<4%). Total SEC of the system reached 34.56 MJ/kg of product, dominated by the thermal energy load of 32.65 MJ/kg (94.48%), with electrical energy contributing 1.91 MJ/kg (equivalent to 0.5302 kWh/kg). Hotspot analysis identified the final drying unit (Ball tea) as the largest single consumer, accounting for the highest share of thermal energy load and exhibiting a low thermal efficiency of only 16.75%. The Rotary Panner (enzyme inactivation) and the Endless Chain Pressure (ECP, first-stage drying) also constituted significant thermal contributors. These findings indicate that improvement priorities should focus on thermal insulation and combustion system modernisation at the main heating units to reduce specific energy consumption and operational energy waste.

Keywords: *Energy audit; green tea processing; mass balance; specific energy consumption; thermal efficiency*

PENDAHULUAN

Teh hijau (*Camellia sinensis*) merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis Indonesia yang produk olahannya memiliki permintaan tinggi di pasar ekspor. Dalam konteks agroindustri, pengolahan teh hijau di tingkat pabrik tergolong padat energi karena melibatkan serangkaian tahapan yang memerlukan suplai panas dan daya mekanis secara bersamaan dan berurutan (Lestari dkk., 2022). Karakteristik ini membedakan teh hijau dari banyak komoditas pertanian lain yang tidak memerlukan inaktivasi enzim secara termal sebagai syarat proses utamanya. Tahap inaktivasi enzim (*panning*) menggunakan mesin *Rotary Panner* harus mencapai suhu 80–100°C dalam waktu singkat untuk menginaktivasi enzim polifenol oksidase (PPO), yang bertanggung jawab atas oksidasi katekin dan perubahan warna hijau daun menjadi kecoklatan (Gupta dkk., 2014).

Kegagalan mencapai suhu inaktivasi yang efektif akan menurunkan mutu secara permanen, sehingga suplai energi panas yang memadai tidak dapat dikompromikan. Selain itu, tahapan pengeringan bertingkat meliputi pengeringan awal menggunakan *Endless Chain Pressure* (ECP) pada suhu 110–135°C dilanjutkan dengan pengeringan akhir menggunakan mesin *Ball tea* pada suhu 130–150°C selama 7–12 jam bertujuan menurunkan kadar air dari pucuk segar yang umumnya di atas 75% (basis basah) hingga kadar air produk akhir di bawah 4% sesuai SNI 3945:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016; Lestari dkk., 2022). Lamanya durasi operasi mesin *Ball tea* yang dapat mencapai lebih dari 10 jam per batch menjadikan tahap ini sebagai titik kritis konsumsi energi termal terbesar dalam sistem pengolahan. Studi kebutuhan energi terdahulu di PPTK Gambung melaporkan total kebutuhan energi pengolahan teh hijau sebesar 51,141 MJ/kg, dengan tahapan pelayuan dan pengeringan sebagai kontributor utama (Habsari dkk., 2022), yang mengkonfirmasi posisi agroindustri teh hijau sebagai sektor padat energi yang memerlukan perhatian khusus dalam pengelolaan konsumsi energi operasionalnya.

Tingginya intensitas konsumsi energi pada proses pengolahan teh hijau ini tidak hanya berdampak pada inefisiensi biaya operasional, tetapi juga berkaitan erat dengan peningkatan jejak karbon (*carbon footprint*) melalui emisi gas rumah kaca dari penggunaan bahan bakar (Pangestu & Ayuningsasi, 2024). Pemborosan energi termal, terutama pada tahap inaktivasi enzim dan pengeringan, akan berimplikasi langsung pada besarnya emisi yang dilepaskan ke lingkungan. Oleh karena itu, penurunan nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) menjadi sangat krusial. Langkah ini sejalan dengan strategi produksi bersih (*cleaner production*) yang tidak hanya berfungsi sebagai tindakan preventif untuk menekan pemborosan ekonomi, tetapi juga sebagai mitigasi emisi yang nyata untuk mewujudkan konsep Industri Hijau (*Green Industry*) yang berkelanjutan (Firdausi dkk., 2024; Isrofi, 2022).

Di tengah tuntutan efisiensi operasional dan daya saing industri yang semakin ketat, pemetaan konsumsi energi secara sistematis melalui audit energi menjadi instrumen yang

sangat penting bagi pabrik pengolahan perkebunan. Audit energi merupakan proses sistematis untuk memahami profil penggunaan energi suatu fasilitas, menetapkan indikator kinerja energi, dan mengidentifikasi peluang penghematan yang dapat diimplementasikan (International Organization for Standardization, 2014). Tanpa adanya *baseline* data konsumsi energi yang terukur pada tingkat unit proses, manajemen pabrik tidak memiliki acuan yang cukup untuk menentukan di mana intervensi teknis akan memberikan dampak penghematan terbesar. Indikator kinerja energi yang paling relevan untuk digunakan dalam konteks ini adalah *Specific Energy Consumption* (SEC), yaitu jumlah energi yang dikonsumsi per satuan produk yang dihasilkan, dinyatakan dalam satuan kWh/kg (untuk energi listrik) atau MJ/kg (untuk energi termal) (Lawrence dkk., 2019).

Nilai SEC yang rendah mengindikasikan proses yang lebih efisien, sedangkan nilai SEC yang tinggi pada unit proses tertentu menunjukkan adanya potensi pemborosan yang perlu ditangani. (Kibet & Letema, 2024), dalam studi audit energi pada pabrik teh di Kenya menemukan bahwa nilai SEC berkisar 15–28 MJ/kg dengan efisiensi mesin pengering ECP di bawah 40%, yang menegaskan bahwa unit pengeringan secara konsisten menjadi titik inefisiensi energi utama pada industri teh lintas negara. Namun demikian, di Indonesia khususnya pada pabrik teh hijau PPTK Gambung, data SEC termal dan listrik yang didasarkan pada pengukuran langsung di lapangan per unit proses belum banyak tersedia, sehingga terdapat kebutuhan mendesak untuk menyusun *baseline* tersebut melalui audit energi berbasis data operasional aktual (Habsari dkk., 2022; Putri dkk., 2023).

Berdasarkan uraian latar belakang dan urgensi di atas, penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk: (1) menyusun neraca massa sistem pengolahan teh hijau mulai dari pucuk masuk hingga menjadi teh hijau kering terkemas dengan menetapkan rendemen pada setiap unit proses mulai dari penerimaan pucuk segar hingga produk akhir terkemas; (2) menghitung nilai SEC listrik dan termal pada setiap tahapan proses pengolahan teh hijau berdasarkan data pengukuran lapangan aktual dari 8 batch produksi, sehingga diperoleh *baseline* kinerja energi yang representatif; dan (3) mengidentifikasi unit proses yang menjadi titik pemborosan energi utama (*hotspot*) berdasarkan nilai SEC dan efisiensi termal masing-masing unit pemanasan, sebagai dasar teknis bagi perumusan rekomendasi perbaikan yang terarah. Penelitian dilaksanakan di Pabrik Teh Hijau Pusat Penelitian Teh dan Kina (PPTK) Gambung, Kecamatan Pasirjambu, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, yang merupakan salah satu fasilitas penelitian dan pengolahan teh skala industri di Indonesia dengan rangkaian unit proses yang lengkap dan terukur. Dengan menyediakan profil konsumsi energi pada resolusi unit proses, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan teknis bagi manajemen pabrik dalam menetapkan prioritas investasi efisiensi energi, sekaligus berkontribusi pada pengayaan literatur audit energi agroindustri perkebunan di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Objek dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Pabrik Teh Hijau Pusat Penelitian Teh dan Kina (PPTK) Gambung, Kecamatan Pasirjambu, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Pengambilan data lapangan dilakukan pada periode Januari–Maret 2026 mencakup 8 sesi pengamatan pada hari produksi aktif yang merepresentasikan kondisi operasi nyata pabrik, data diambil mulai dari pucuk teh segar masuk hingga pucuk the kering terkemas.

Alat dan Bahan

Instrumen utama audit energi mengacu pada panduan ISO 50002 (International Organization for Standardization, 2014): (1) *clamp meter* tiga fasa, mengukur arus (A) dan tegangan (V) setiap unit proses bermotor; (2) *moisture analyser*, mengukur kadar air bahan pada titik kritis proses (Paiva et al., 2023); (3) timbangan platform 100–500 kg; (4) termometer inframerah (*thermogun*); (5) stopwatch; dan (6) *logsheet* penelitian terstruktur. Sumber energi yang diamati meliputi energi listrik, *wood pellet* (kg) untuk *Rotary Panner* dan *Ball tea*, serta LPG (kg) untuk ECP sebagai sumber panas utama pada kondisi operasi aktual periode penelitian, dan insidental pada *Ball tea*.

Prosedur Penelitian

Tahap 1, Observasi dan pengambilan data lapangan. Setiap batch mencakup pencatatan: massa pucuk segar masuk; massa produk akhir terkemas; kadar air pada empat titik kritis (sebelum *Rotary Panner*, sesudah *Rotary Panner*, sesudah ECP, sesudah *Ball tea*); konsumsi *wood pellet* dan LPG; serta konsumsi listrik per unit menggunakan *clamp meter* tiga fasa, atau pendekatan *nameplate power* dengan *load factor* 0,65–0,80 untuk peralatan pendukung yang tidak dapat diukur langsung (International Organization for Standardization, 2014). Tahap 2, Pengolahan data: rekonstruksi neraca massa, normalisasi inventori ke unit fungsional 1 kg produk, dan perhitungan SEC listrik dan termal per unit proses. Tahap 3, Interpretasi: identifikasi *hotspot* pemborosan energi berdasarkan nilai SEC dan efisiensi termal, sesuai kerangka audit energi yang direkomendasikan oleh (Lawrence dkk., 2019).

Analisis Data

1. Neraca Massa Berbasis Kadar Air

Neraca massa direkonstruksi berdasarkan prinsip konservasi massa dengan asumsi satu-satunya mekanisme kehilangan massa adalah penguapan air (Habsari dkk., 2022). Rendemen unit proses ke-*i* dan rendemen total sistem:

$$R_i (\%) = \left(\frac{m_{out,i}}{m_{in,i}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{\text{total}} (\%) = \left(\frac{m_{\text{produk jadi}}}{m_{\text{pucuk segar}}} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Estimasi massa bahan keluar setiap unit pemanasan berbasis kesetimbangan komponen kering (Paiva dkk., 2023):

$$m_{\text{out},i} = \frac{m_{\text{in},i} \times (1 - KA_{\text{in},i})}{(1 - KA_{\text{out},i})} \quad (3)$$

- $m_{\text{out},i}$ = massa bahan keluar unit proses ke-i (kg)
- $m_{\text{in},i}$ = massa bahan masuk unit proses ke-i (kg)
- $KA_{\text{in},i}$ = kadar air bahan masuk unit ke-i (fraksi, basis basah)
- $KA_{\text{out},i}$ = kadar air bahan keluar unit ke-i (fraksi, basis basah)
- m_{produk} = massa produk akhir teh hijau kering terkemas (kg)
- jadi
- m_{pucuk} = massa pucuk teh segar yang masuk sistem (kg)
- segar

2. Perhitungan Konsumsi Energi Listrik

Daya aktif motor tiga fasa dihitung dari pengukuran *clamp meter* sesuai ISO 50002 (International Organization for Standardization, 2014):

$$P(\text{kW}) = \frac{\sqrt{3} \times V_{LL} \times I \times \cos \phi}{1000} \quad (4)$$

$$E (\text{kWh}) = P (\text{kW}) \times t (\text{jam}) \times n \quad (5)$$

- P = daya aktif motor (kW)
- V_{LL} = tegangan line-to-line (V)
- I = arus rata-rata pengukuran *clamp meter* (A)
- cos = faktor daya; dari nameplate motor atau diasumsikan 0,85 jika tidak tersedia
- ϕ
- t = durasi operasi unit proses per batch (jam)

SEC listrik per unit proses dan total sistem (Lawrence dkk., 2019):

$$SEC_{\text{listrik}} = \frac{E_{\text{listrik}}}{m_{\text{produk}}} \quad (6)$$

$$SEC_{\text{listrik}} = \frac{\sum_{\text{listrik},i}}{m_{\text{produk batch}}} \quad (7)$$

- $E_{\text{listrik},i}$ = konsumsi energi listrik unit ke-i per batch (kWh)
- $m_{\text{produk, batch}}$ = massa produk akhir per batch (kg)

3. Perhitungan Konsumsi Energi Termal

Energi termal dari pembakaran bahan bakar dihitung berdasarkan nilai kalor bawah (LHV) masing-masing bahan bakar (IPCC, 2006):

$$Q_{\text{termal},i} \text{ (MJ)} = m_{\text{BB},i} \times \text{LHV}_{\text{BB}} \text{ (8)}$$

$Q_{\text{termal},i}$ = energi termal disuplai pada unit pemanasan ke-i per batch (MJ)

$m_{\text{BB},i}$ = massa bahan bakar dikonsumsi pada unit ke-i (kg)

LHV_{BB} = nilai kalor bawah: wood pellet = 15,6 MJ/kg; LPG = 47,3 MJ/kg (IPCC, 2006)

SEC termal per unit dan total sistem (Kibet & Letema, 2024):

$$SEC_{\text{termal},i} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = \frac{Q_{\text{termal},i}}{m_{\text{produk},\text{batch}}} \text{ (9)}$$

$$SEC_{\text{termal},\text{total}} \left(\frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right) = \frac{\sum \text{termal},i}{m_{\text{produk},\text{batch}}} \text{ (10)}$$

4. SEC Total Sistem

SEC total terpadu dalam satuan MJ/kg dengan faktor konversi 1 kWh = 3,6 MJ

(Lawrence dkk., 2019):

$$SEC_{\text{total}} = (SEC_{\text{listrik}} \times 3.6) + SEC_{\text{termal}} \text{ (11)}$$

5. Efisiensi Termal Unit Pemanasan

Efisiensi termal berbasis penguapan air mengukur proporsi energi yang dimanfaatkan untuk menguapkan air bahan dibandingkan total energi yang disuplai dari pembakaran (Kibet & Letema, 2024; Suprianti, 2020):

$$\eta_{\text{termal},i} (\%) = \frac{(m_{\text{air},i} \times h_{fg})}{Q_{\text{termal},i}} \times 100 \text{ (12)}$$

$\eta_{\text{termal},i}$ = efisiensi termal unit pemanasan ke-i (%)

$m_{\text{air},i}$ = massa air yang diuapkan pada unit ke-i per batch (kg) = $m_{\text{in},i} - m_{\text{out},i}$

h_{fg} = panas laten penguapan air = 2,257 MJ/kg (pada tekanan atmosfer)

$Q_{\text{termal},i}$ = energi termal yang disuplai dari bahan bakar pada unit ke-i (MJ)

Seluruh nilai SEC dan efisiensi termal dihitung per batch kemudian dirata-ratakan atas 8 batch. Variasi antar batch dilaporkan sebagai kisaran dan koefisien variasi (CV%) untuk menggambarkan stabilitas operasi (Lawrence dkk., 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

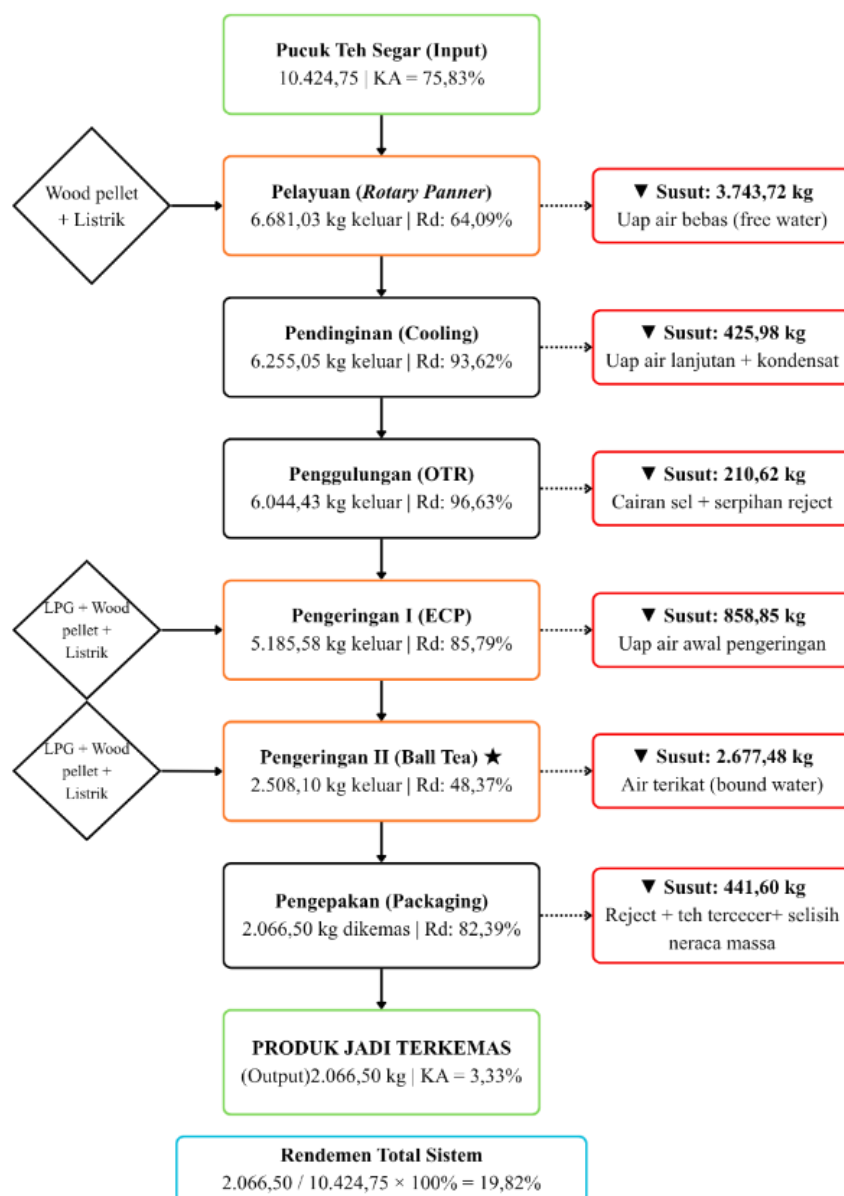
A. Neraca Massa dan Rendemen Proses

Berdasarkan pengamatan 8 batch produksi, rendemen total rata-rata sistem tercatat sebesar 19,82%, yang berarti diperlukan sekitar 5,05 kg pucuk segar untuk menghasilkan 1 kg teh hijau kering terkemas. Nilai rendemen ini terutama ditentukan oleh kadar air pucuk segar yang masuk ke sistem (>75% basis basah) (Paiva dkk., 2023), yang kemudian diturunkan secara bertahap melalui serangkaian tahapan pemanasan dan pengeringan hingga di bawah 4% sesuai persyaratan SNI 3945:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Nilai rendemen ini sejalan dengan laporan (Habsari dkk., 2022) yang mencatat bahwa

pengolahan teh hijau di PPTK Gambung memerlukan bahan baku yang tinggi per satuan produk karena tingginya kandungan air awal pucuk segar.

Tabel 1. Neraca massa dan rendemen setiap unit proses pengolahan teh hijau di PPTK Gambung (rata-rata 8 batch)

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		10.424,75	2.066,50	8.358,25	19,82



Gambar 1. Diagram neraca massa antar unit proses produksi teh hijau

Penurunan massa terbesar terjadi pada tahap inaktivasi enzim (*Rotary Panner*) dan pengeringan akhir (*Ball tea*). Perlu ditekankan bahwa susut massa bahan sepanjang alur proses ini mayoritas memang didominasi oleh penguapan air, baik air bebas (*free water*) akibat kejutan panas maupun air terikat (*bound water*) pada fase pengeringan lambat. Meskipun demikian, angka susut ini juga mencakup sebagian kecil kehilangan material non-air, seperti cairan sel yang terekstrusi dan serpihan daun yang terbang (*reject*) pada tahapan penggulungan (*Open Top Roller*), serta sisa teh yang tercecer pada stasiun pengepakan. Pada *Rotary Panner*, penurunan kadar air terjadi melalui kontak termal konduksi dan konveksi pada suhu 80–100°C (Lestari dkk., 2022). Pada tahap *Ball tea* yang beroperasi pada 130–150°C selama 7–12 jam, penguapan berlangsung lebih lambat namun dengan beban massa air yang masih signifikan. Pengendalian suhu dan waktu pada tahap pengeringan akhir sangat krusial karena panas berlebih dapat merusak senyawa sensitif seperti katekin dan aroma khas teh hijau (Prawira-Atmaja dkk., 2019). Besarnya massa air yang harus diuapkan pada setiap unit pemanasan secara langsung menentukan kebutuhan energi termal.

Tabel 2. Variasi statistik rendemen total sistem produksi teh hijau selama 8 batch produksi

Parameter	Rata-rata ± SD	Rentang (Min–Max)	CV (%)
Rendemen total (%)	19,66 ± 1,09	17,20 – 20,51	5,53

Variasi rendemen antar batch (Tabel 2) mencerminkan fluktuasi kondisi pucuk segar masuk, terutama kadar air awal dan homogenitas bahan baku per giliran panen. Koefisien variasi rendemen total yang relatif kecil menunjukkan sistem operasi yang cukup stabil, sehingga nilai SEC rata-rata dapat dijadikan *baseline* yang andal, sebagaimana disyaratkan ISO 50002 (International Organization for Standardization, 2014).

B. Kadar Air pada Titik Kritis Proses

Pengukuran kadar air dilakukan pada empat titik kritis menggunakan *moisture analyser*. Data ini merupakan masukan utama rekonstruksi neraca massa berbasis persamaan (3) dan estimasi massa air yang diuapkan pada setiap unit pemanasan (Paiva dkk., 2023).

Tabel 3. Kadar air pada titik kritis proses pengolahan teh hijau

Titik pengamatan	Kadar air (% bb)
Pucuk segar	75,83
Keluar <i>Rotary Panner</i>	62,90
Keluar <i>ECP</i>	52,63
Keluar <i>Ball tea</i> / produk akhir	3,33

Tabel 4. Variasi kadar air pada titik kritis proses selama 8 batch produksi teh hijau

Parameter	Rata-rata ± SD	Rentang (Min–Max)	CV (%)
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

Data kadar air (Tabel 3) memperlihatkan penurunan bertahap dari >75% pada pucuk segar menjadi <4% pada produk akhir sesuai ketentuan SNI 3945:2016 (Badan Standardisasi Nasional, 2016). Penurunan paling drastis terjadi pada *Rotary Panner* dan *Ball tea*, mengonfirmasi bahwa kedua unit ini merupakan kontributor utama beban penguapan dan konsumsi energi termal sistem. Hubungan antara kadar air awal yang tinggi dan intensitas energi pengeringan yang besar juga dilaporkan dalam studi pengeringan komoditas perkebunan tropis lainnya (Suprianti, 2020). Oleh karena itu, pengendalian kadar air pucuk segar menjadi strategi awal efisiensi energi dari sisi bahan baku yang perlu diperhatikan (Pangestu & Ayuningsasi, 2024).

C. Specific Energy Consumption (SEC) Listrik per Unit Proses

Hasil perhitungan berdasarkan persamaan (4)–(7) menghasilkan nilai SEC listrik total sistem rata-rata sebesar 0,5302 kWh/kg produk, setara dengan 1,91 MJ/kg. Distribusi SEC listrik per unit proses disajikan pada Tabel 4.

Tabel 5. Nilai Specific Energy Consumption (SEC) listrik setiap unit proses pengolahan teh hijau (rata-rata 8 batch)

Unit	Konsumsi Listrik Total (kWh)	Output Bahan Total (kg)	SEC Listrik (kWh/kg)
<i>Rotary Panner</i>	129,88	6.681,03	0,0628
Pendinginan (<i>Cooling</i>)	59,29	6.255,05	0,0287
Penggulungan (<i>OTR</i>)	132,83	6.044,43	0,0643
Pengeringan Awal (<i>ECP</i>)	237,12	5.185,58	0,1148
Pengeringan Akhir (<i>Ball tea</i>)	331,71	2.508,10	0,1605
Utilitas Pabrik (<i>Exhaust Fan</i>)	204,85	10.424,75	0,0991
Total Sistem	1.095,67	2.066,50	0,5302

Variasi SEC listrik antar batch (Tabel 5) berkaitan erat dengan fluktuasi massa produk akhir per batch. Semakin besar rendemen produk per batch, semakin kecil nilai SEC karena energi yang sama menghasilkan produk lebih banyak. Hal ini menegaskan pentingnya membaca nilai SEC bersama data rendemen dan kondisi operasi aktual agar kesimpulan efisiensi tidak bias (Lawrence dkk., 2019). Peningkatan kapasitas produksi per batch melalui optimasi bahan baku merupakan strategi tidak langsung yang dapat menurunkan SEC listrik tanpa intervensi pada sistem kelistrikan (Pangestu & Ayuningsasi, 2024).

Tabel 6. Variasi konsumsi energi listrik total sistem dan SEC listrik selama 8 batch produksi teh hijau

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

Variasi nilai SEC listrik antar batch yang tersaji pada Tabel 6 mencerminkan hubungan terbalik antara massa produk akhir per batch dengan nilai SEC yang dihasilkan. Batch dengan massa produk lebih besar, akibat kadar air pucuk segar yang lebih rendah atau kapasitas produksi yang lebih tinggi akan menghasilkan nilai SEC yang lebih kecil karena energi listrik yang relatif konstan (ditentukan oleh durasi operasi mesin) dibagi dengan massa produk yang lebih besar. Sebaliknya, batch dengan rendemen lebih kecil akan menghasilkan SEC listrik yang lebih tinggi. Fenomena ini menegaskan pentingnya membaca nilai SEC bersama konteks operasi aktual tiap batch, dan menunjukkan bahwa peningkatan rendemen melalui optimasi kadar air pucuk segar merupakan strategi tidak langsung yang efektif untuk menurunkan SEC listrik tanpa intervensi pada sistem kelistrikan (Lawrence dkk., 2019; Pangestu & Ayuningsasi, 2024).

D. Specific Energy Consumption (SEC) Termal per Unit Pemanasan

Beban energi termal mendominasi profil konsumsi energi sistem. Total SEC termal sistem mencapai 32,65 MJ/kg produk (94,48% dari total SEC sistem 34,56 MJ/kg), seluruhnya berasal dari pembakaran *wood pellet* (*Rotary Panner* dan *Ball tea*) dan LPG (*ECP* dan insidental *Ball tea*). Nilai LHV yang digunakan adalah 15,6 MJ/kg untuk *wood pellet* dan 47,3 MJ/kg untuk LPG (IPCC, 2006). Distribusi SEC termal per unit pemanasan disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kontribusi energi termal setiap unit pemanasan terhadap 1 kg produk akhir teh hijau

Unit proses	SEC termal (MJ/kg produk akhir)	Persentase Kontribusi (%)
<i>Rotary Panner</i>	11,05	33,84
<i>ECP</i>	4,36	13,35
<i>Ball tea</i>	17,24	52,80
Total	32,65	100

Tabel 7 menunjukkan *Ball tea* sebagai kontributor SEC termal terbesar, diikuti *Rotary Panner* dan *ECP*. Dominasi *Ball tea* disebabkan oleh: (1) tingginya konsumsi *wood pellet* akibat durasi operasi 7–12 jam; dan (2) rendahnya efisiensi pemanfaatan panas yang menyebabkan pemborosan besar. Sebagai pembanding internasional, He et al. (2023) pada

pabrik teh hijau skala kecil di Cina melaporkan bahwa tahap pengeringan menyumbang >57% dari total energi fase pengolahan, mengonfirmasi pola dominasi unit pengeringan sebagai kontributor energi terbesar lintas skala dan lokasi. Tingginya beban termal *Rotary Panner* juga signifikan: meski durasinya lebih singkat, kebutuhan mencapai suhu inaktivasi enzim (80–100°C) dalam waktu singkat memerlukan laju suplai panas yang tinggi (Gupta dkk., 2014; Lestari dkk., 2022).

E. Komposisi SEC Total Sistem

Tabel 8 menyajikan komposisi SEC total sistem berdasarkan persamaan (11).

Tabel 8. Komposisi Specific Energy Consumption (SEC) total sistem produksi teh hijau

Jenis Energi	SEC (MJ/kg)	SEC Listrik (kWh/kg)	Kontribusi (%)
Energi Termal (wood pellet + LPG)	32,65	—	94,48
Energi Listrik	1,91	0,5302	5,52
Total SEC Sistem	34,56	—	100,00

Nilai SEC total sistem sebesar 34,56 MJ/kg produk menempatkan pengolahan teh hijau di PPTK Gambung dalam kategori agroindustri padat energi. Dominasi energi termal (94,48%) secara tegas mengonfirmasi bahwa peningkatan efisiensi penggunaan bahan bakar pada unit-unit pemanasan merupakan prioritas intervensi yang paling berdampak. Sebagai perbandingan, (Kibet & Letema, 2024) melaporkan nilai SEC 15–28 MJ/kg pada pabrik teh konvensional di Kenya, perbedaan yang dapat dijelaskan oleh perbedaan jenis bahan bakar (gas alam vs. *wood pellet*/LPG) dan konfigurasi mesin. Studi (Habsari dkk., 2022) di PPTK Gambung sendiri melaporkan 51,141 MJ/kg dengan cakupan energi biologis bahan baku yang lebih luas, sehingga tidak dapat dibandingkan langsung dengan nilai SEC penelitian ini. Meskipun kontribusi listrik relatif kecil (5,52%), intervensi VFD pada penggerak konveyor tetap direkomendasikan sebagai langkah komplementer (Kibet & Letema, 2024; Muslim dkk., 2024).

F. Efisiensi Termal Unit Pemanasan

Efisiensi termal berbasis persamaan (12) dihitung untuk tiga unit pemanasan utama: *Rotary Panner*, ECP, dan *Ball tea* (Tabel 9).

Tabel 9. Efisiensi termal unit pemanasan pada sistem produksi teh hijau di PPTK Gambung (rata-rata 8 batch)

Unit proses	Massa air diuapkan (kg)	Energi masuk (MJ)	Energi berguna untuk evaporasi (MJ)	Efisiensi termal (%)
<i>Rotary Panner</i>	3.703,28	22.834,50	8.356,08	36,59
ECP	853,02	9.008,63	1.924,75	21,37
<i>Ball tea</i>	2.645,43	35.631,25	5.969,14	16,75

Temuan paling kritis dari Tabel 9 adalah rendahnya efisiensi termal mesin *Ball tea* yang hanya mencapai 16,75%, mengindikasikan bahwa >83% energi termal terbuang melalui radiasi permukaan mesin, udara buang bersuhu tinggi, dan konduksi ke lingkungan. Nilai ini jauh di bawah ambang batas efisiensi yang direkomendasikan untuk mesin pengering agroindustri (Suprianti, 2020). Rendahnya efisiensi diperburuk oleh desain mesin konvensional tanpa insulasi termal dan tanpa mekanisme pemanfaatan panas buang. Kondisi serupa dilaporkan (Kibet & Letema, 2024) dengan efisiensi pengering konvensional di bawah 40% pada industri teh Kenya menegaskan bahwa rendahnya efisiensi termal unit pengeringan akhir teh merupakan permasalahan yang bersifat lintas-lokasi.

Efisiensi termal *Rotary Panner* relatif lebih tinggi dibandingkan *Ball tea*, dikaitkan dengan durasi operasi yang lebih singkat sehingga akumulasi kerugian panas lebih kecil. Variasi efisiensi ECP cukup lebar antar batch, dipengaruhi oleh kondisi operasi menggunakan LPG dengan nilai kalor 47,3 MJ/kg sebagai sumber panas sementara (IPCC, 2006). Pada batch-batch tertentu, konsumsi LPG yang lebih banyak tidak diimbangi penguapan air yang proporsional, sehingga nilai SEC termal ECP pada batch tersebut meningkat signifikan.

G. Identifikasi Hotspot Pemborosan Energi dan Implikasi Perbaikan

Berdasarkan hasil audit energi secara komprehensif, dapat diidentifikasi tiga *hotspot* utama pemborosan energi: (1) *Ball tea* sebagai *hotspot* berprioritas tertinggi, kontribusi SEC termal terbesar dan efisiensi termal terendah (16,75%); (2) *Rotary Panner* sebagai prioritas kedua, kontribusi SEC termal signifikan dengan potensi kehilangan panas melalui radiasi silinder; dan (3) ECP sebagai prioritas ketiga, penggunaan LPG sementara dengan biaya energi per MJ lebih tinggi dari *wood pellet*, dan potensi penghematan signifikan jika sistem penukar panas dipulihkan.

Pola *hotspot* ini konsisten dengan berbagai studi sejenis. (Kibet & Letema, 2024) di Kenya merekomendasikan insulasi termal dan VFD sebagai intervensi utama. (Putri dkk., 2023) menyimpulkan bahwa energi merupakan komponen dampak lingkungan terbesar pada sistem produksi teh hijau di PPTK Gambung, menegaskan urgensi intervensi efisiensi energi. (Muslim dkk., 2024) menunjukkan bahwa sistem monitoring IoT pada unit pengeringan membantu operator mengoptimalkan profil suhu dan mencegah pemanasan berlebihan, berkontribusi pada efisiensi termal yang lebih baik sekaligus melindungi mutu produk dari kerusakan termal (Prawira-Atmaja dkk., 2019). (He dkk., 2023) pada studi kinerja energi pengolahan teh hijau di Cina memperkuat temuan bahwa pengeringan adalah tahap dengan konsumsi energi tertinggi yang perlu diprioritaskan dalam program efisiensi energi agroindustri teh.

Rekomendasi perbaikan yang teridentifikasi meliputi: (a) pemasangan insulasi termal pada dinding *Ball tea* dan *Rotary Panner*, yang secara estimasi kasar berpotensi menurunkan

Specific Energy Consumption (SEC) termal sekitar 15–25% pada unit terdampak dengan menekan kerugian panas (*forced convection*) yang saat ini terbuang hingga lebih dari 83%; (b) modernisasi sistem pembakaran atau integrasi mekanisme pemanfaatan kembali panas buang (*heat recovery*) pada Ball tea; (c) pemulihan dan optimasi sistem penukar panas pada ECP; dan (d) implementasi kendali suhu otomatis serta pemasangan *Inverter/Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor listrik pabrik, yang secara tekno-ekonomi diestimasi mampu memberikan penghematan energi listrik sekitar 5–15% dengan menyesuaikan tarikan daya terhadap beban putaran operasional aktual (Anoune dkk., 2024). Upaya ini sejalan dengan prinsip *cleaner production* yang menekankan pengurangan pemborosan sumber daya energi sebagai strategi preventif yang lebih efektif (Firdausi dkk., 2024; Isrofi, 2022), dan relevan dengan tujuan efisiensi energi industri nasional (Pangestu & Ayuningsasi, 2024).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil audit energi dan analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment*) pada sistem pengolahan teh hijau di PPTK Gambung, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Rendemen total sistem pengolahan teh hijau mencapai 19,82%, di mana penurunan massa terbesar terjadi pada tahapan inaktivasi enzim (Rotary Panner) dan pengeringan akhir (Ball tea) yang mayoritas disebabkan oleh proses penguapan air.
2. Nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) total sistem mencapai 34,56 MJ/kg produk. Pengolahan ini sangat didominasi oleh beban energi termal sebesar 32,65 MJ/kg (94,48%), sementara energi listrik hanya berkontribusi sebesar 1,91 MJ/kg atau setara 0,5302 kWh/kg (5,52%).
3. Mesin Ball tea teridentifikasi sebagai *hotspot* pemborosan energi utama dengan konsumsi termal tertinggi dan efisiensi termal terendah (16,75%), diikuti oleh unit ECP dan Rotary Panner. Prioritas perbaikan harus difokuskan pada pemasangan insulasi termal dan modernisasi sistem pembakaran pada ketiga unit tersebut untuk menurunkan SEC sekaligus menekan jejak karbon operasional pabrik.

DAFTAR PUSTAKA

- 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>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). Teh Hijau (SNI 3945:2016). Dalam *Badan Standardisasi Nasional: 3945: 2016*.
- 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.

- 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>
- International Organization for Standardization. (2014). *Energy audits—Requirements with guidance for use (ISO 50002:2014)* (First edit). ISO.
- IPCC. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. Chapter 1: Introduction. Dalam *Annals of Discrete Mathematics* (Vol. 2, Nomor 1). [https://doi.org/10.1016/S0167-5060\(08\)70670-8](https://doi.org/10.1016/S0167-5060(08)70670-8)
- Isrofi, N. (2022). Kajian Permasalahan Lingkungan dan Usulan Pengaplikasian Cleaner Production di Industri Kertas. *Juminten : Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi*, 03(01), 145–156.
- 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>
- 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>
- Muslim, R., Prasetyo, A., & Harsito, C. (2024). Pelatihan Penggunaan Teknologi Pengeringan Teh Berbasis IOT untuk Kelompok Tani semakin Berdikari. *BERBAKTI Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, 01(02), 65–70.
- Paiva, L. S., Dias, A. P., Marcone, 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/jtvol17n2.9>
- 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>