

EVALUASI KEBUTUHAN *STEAM* PADA PROSES *DYEING* INDUSTRI TEKSTIL

Mochamad Rizki Nuriyanto dan Arief Rahmatulloh

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141,
Indonesia

mrizkinuriyanto.1cd4.2021@gmail.com ; arief1289@polinema.ac.id

ABSTRAK

Energi merupakan komponen penting dalam industri tekstil, khususnya pada proses pencelupan (*Dyeing*) yang memerlukan energi panas dalam jumlah besar, umumnya dalam bentuk *steam*. Penggunaan energi yang tinggi pada proses ini berpengaruh terhadap efisiensi biaya produksi dan keberlanjutan industri. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kebutuhan *steam* pada proses *Dyeing* menggunakan mesin *Dyeing*, menghitung intensitas energi yang digunakan, serta menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan tingginya konsumsi energi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi sebagai dasar pengembangan proses yang lebih efisien dan berkelanjutan di industri tekstil. Metode yang digunakan adalah audit energi dengan pendekatan kuantitatif melalui pengukuran parameter operasional serta perhitungan entalpi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata intensitas energi sebesar 10.143,44 kJ/kg, yang berada di atas kisaran efisiensi proses *Dyeing* secara umum, yaitu sekitar 3500–8500 kJ/kg. Variasi konsumsi energi antar *batch* menunjukkan bahwa parameter operasional berpengaruh signifikan terhadap efisiensi energi. Faktor utama yang menyebabkan tingginya konsumsi energi meliputi kinerja *heat exchanger* yang kurang optimal, *rasio liquor* yang tinggi, tidak adanya sistem pemulihan kondensat, serta efisiensi *boiler* yang rendah. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimalisasi proses dan penerapan teknologi konservasi energi untuk meningkatkan efisiensi sistem.

Kata kunci: *dyeing*, efisiensi energi, *heat exchanger*, *steam*

ABSTRACT

Energy is an important component in the textile industry, especially in the dyeing process which requires large amounts of heat energy, generally in the form of steam. High energy use in this process has an impact on production cost efficiency and industrial sustainability. This research aims to evaluate steam requirements in the Dyeing process using a Dyeing machine, calculate the energy intensity used, and analyze the factors that cause high energy consumption. Apart from that, this research also aims to identify the potential for energy savings as a basis for developing more efficient and sustainable processes in the textile industry. The method used is an energy audit with a quantitative approach through measuring operational parameters and enthalpy calculations. The research results show that the average energy intensity is 10,143.44 kJ/kg, which is above the general Dyeing process efficiency range, which is around 3500–8500 kJ/kg. Variations in energy consumption between batches show that operational parameters have a significant effect on energy efficiency. The main factors causing high energy consumption include sub-optimal heat exchanger performance, high liquor ratios, no condensate recovery system, and low boiler efficiency. Therefore, efforts are needed to optimize processes and apply energy conservation technology to increase system efficiency.

Keywords: *dyeing*, energy efficiency, *heat exchanger*, *steam*

1. PENDAHULUAN

Industri tekstil merupakan salah satu sektor manufaktur yang memiliki kontribusi besar terhadap perekonomian nasional, khususnya dalam penyerapan tenaga kerja dan ekspor produk. Namun demikian, industri ini juga dikenal sebagai industri yang intensif energi, terutama pada proses basah (*wet processing*) seperti *desizing*, *scouring*, *bleaching*, dan *Dyeing* [1]. Proses *Dyeing* merupakan salah satu tahapan kritis dalam industri tekstil yang membutuhkan energi termal dalam jumlah besar, umumnya dalam bentuk uap (*steam*). Penggunaan *steam* pada mesin *Dyeing* berfungsi sebagai media pemanas melalui sistem *heat exchanger* untuk mencapai suhu operasi yang dibutuhkan dalam proses pencelupan [2].

Proses *Dyeing* konvensional membutuhkan energi yang besar karena melibatkan pemanasan air dalam jumlah tinggi sebagai media transport zat warna ke dalam serat. Studi menunjukkan bahwa konsumsi energi pada proses *Dyeing* dapat mencapai kisaran yang signifikan tergantung pada jenis proses dan kondisi operasional, sehingga berkontribusi besar terhadap biaya produksi dan emisi lingkungan [3]. Selain itu, penggunaan air dalam jumlah besar juga menghasilkan limbah cair yang memerlukan penanganan khusus, sehingga menambah beban lingkungan industri tekstil [4]. Konsumsi energi pada proses *Dyeing* dilaporkan berkisar antara 3500–8500 kJ/kg, tergantung pada jenis serat, kondisi operasi, serta efisiensi peralatan yang digunakan [3].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi energi dalam industri tekstil. Pendekatan yang banyak dikaji meliputi peningkatan efisiensi peralatan seperti *heat exchanger* [5], optimalisasi sistem *steam* [6], serta penerapan manajemen energi berbasis audit energi industri [7]. Selain itu, optimalisasi operasional juga berperan penting dalam menurunkan konsumsi energi pada proses *Dyeing*. Berdasarkan laporan dari Forbes Marshall (2023) peningkatan efisiensi sistem *steam*, termasuk optimasi distribusi *steam* dan pengendalian kehilangan panas, dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi pada industri tekstil [8]. Sementara itu, laporan dari *Bureau of Energy Efficiency* (BEE) (2019) menunjukkan bahwa pengurangan *liquor ratio* serta peningkatan efisiensi *boiler* merupakan langkah strategis dalam menekan konsumsi energi, karena keduanya berpengaruh langsung terhadap jumlah energi yang dibutuhkan untuk proses pemanasan [9]. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa penerapan teknologi dan strategi efisiensi energi dapat meningkatkan performa proses *Dyeing* serta menurunkan konsumsi energi hingga tingkat yang lebih optimal [10].

Meskipun berbagai upaya efisiensi telah dikembangkan, pada praktiknya masih banyak industri tekstil yang mengalami konsumsi energi tinggi akibat kondisi operasional yang belum optimal, khususnya pada efisiensi perpindahan panas dan konsumsi *steam* dalam proses *Dyeing*. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi kebutuhan energi, terutama *steam*, masih perlu dilakukan untuk mengidentifikasi sumber inefisiensi serta menentukan strategi konservasi energi yang tepat.

Berdasarkan hasil observasi awal, intensitas energi pada mesin *Dyeing* yang digunakan mencapai lebih dari 10.000 kJ/kg, yang menunjukkan adanya potensi *inefisiensi* dibandingkan dengan *benchmark* industri. Tingginya konsumsi energi pada proses *Dyeing* berdampak langsung terhadap biaya produksi dan emisi lingkungan. Oleh karena itu,

evaluasi kebutuhan energi, khususnya *steam*, menjadi sangat penting untuk mengidentifikasi potensi efisiensi energi. Studi terbaru menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi pada proses *dyeing* dapat dicapai melalui optimasi parameter operasi, pengurangan *liquor ratio*, peningkatan efektivitas perpindahan panas, serta pemanfaatan energi panas secara lebih efisien. Berbagai strategi tersebut terbukti mampu menurunkan konsumsi energi dan meningkatkan performa proses pencelupan [13]. Berdasarkan latar belakang dan penelitian terdahulu tersebut, maka diperlukan kajian lebih lanjut mengenai evaluasi kebutuhan *steam* dan intensitas energi pada proses *Dyeing* untuk mengetahui tingkat efisiensi energi serta faktor-faktor yang mempengaruhinya.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kebutuhan *steam* pada proses *Dyeing* menggunakan mesin *Dyeing*, menghitung intensitas energi yang digunakan, serta menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan tingginya konsumsi energi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi sebagai dasar pengembangan proses yang lebih efisien dan berkelanjutan di industri tekstil.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Studi ini dilakukan di Industri Tekstil sebagai bagian dari program praktik kerja industri. Studi ini berkonsentrasi pada evaluasi kebutuhan uap untuk proses pewarnaan yang dilakukan dengan mesin *Dyeing* berkapasitas 400 kg. Metodologi yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif melalui audit energi, yang umum digunakan dalam analisis efisiensi energi industri untuk mengidentifikasi potensi penghematan energi [7].

2.1. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan yang terkait dengan studi ini mencakup: Data Proses Produksi, Data operasional mesin *Dyeing*, termasuk durasi proses, suhu operasi, dan langkah-langkah pewarnaan. Data Energi: Volume konsumsi uap, tekanan dan suhu uap, serta jumlah kain yang diproses per *batch*. Data Pendukung: Jenis kain, *rasio liquor*, dan bahan kimia yang digunakan. Biaya Energi: Perkiraan biaya batu bara dan listrik untuk pembangkitan uap menggunakan *boiler*.

2.2. Perhitungan Kebutuhan Energi

Kebutuhan energi termal dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$Q = m_{steam} \times (H(steam) - h(air)) \quad (1)$$

Dimana :

Q = Energi Panas (kJ)

m_{steam} = massa uap yang digunakan (kg)

$H(steam)$ = Entalpi *steam* jenuh (kJ/kg)

$h(air)$ = Entalpi air sebelum pemanasan (kJ/kg)

Total Energi kemudian dibagi dengan massa kain untuk mendapatkan nilai intensitas energi per kg kain :

$$\text{Intensitas Energi (kJ/kg)} = \frac{Q \text{ (kJ)}}{m \text{ (kg)}} \quad (2)$$

Keterangan :

IE = Intensitas Energi (kJ/kg)

Q = Energi Panas (kJ)

m = Massa *Steam* (kg)

2.3. Analisis Konsumsi dan Biaya Energi

Perhitungan biaya energi dilakukan dengan mengalikan konsumsi *steam* dengan biaya produksi *steam* per kg. Biaya ini dihitung berdasarkan kebutuhan batubara dan efisiensi *boiler*, menggunakan data aktual dari operasional pabrik. Efisiensi *boiler* menjadi parameter penting dalam analisis ini karena sangat mempengaruhi konsumsi energi total sistem [8].

2.4. Evaluasi Potensi Efisiensi

Evaluasi efisiensi dilakukan dengan membandingkan kondisi aktual dengan standar efisiensi industri serta literatur terkait. Strategi efisiensi energi seperti optimasi proses dan peningkatan performa peralatan menjadi langkah penting dalam menurunkan konsumsi energi pada industri tekstil. Menurut Shah dan Sekulic (2017) peningkatan efisiensi *heat exchanger* sangat berpengaruh terhadap efektivitas perpindahan panas dalam sistem termal, sehingga dapat mengurangi kebutuhan energi pemanasan secara keseluruhan [5]. Selain itu, Yang, dkk. (2021) menyatakan bahwa optimasi parameter proses *Dyeing*, termasuk pengurangan *liquor ratio* dan peningkatan efisiensi penggunaan energi, dapat menurunkan konsumsi energi secara signifikan serta meningkatkan efisiensi proses secara keseluruhan [10].

2.5. Studi Kelayakan Pengembangan Prototipe Mandiri

Sebagai bagian dari kolaborasi dengan Departemen R&D, dilakukan kajian terhadap kemungkinan pengembangan proses *desizing*, *scouring*, dan *Dyeing* secara terpisah dari jalur produksi utama. Evaluasi ini mempertimbangkan kebutuhan energi, biaya, dan keterbatasan alat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perhitungan Kebutuhan Energi

Berdasarkan data hasil pengukuran dan perhitungan kebutuhan energi dari sembilan *batch* proses *Dyeing* menggunakan mesin *Dyeing* berkapasitas 400 kg, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 1. Kebutuhan *Steam* Pada Proses *Dyeing*

Data	m <i>steam</i> (kg)	Q (kJ)	IE (kJ/kg)
1	1937,08	20687375	10679,67
2	1901,92	19934271	10481,13
3	1937,87	20636300	10648,96
4	1894,23	19868560	10488,99
5	1857,74	19032193	10244,81
6	1573,55	13764282	8747,28
7	1864,21	19165048	10280,52
8	1813,93	18219712	10044,33

9	1937,72	20681847	10673,29
---	---------	----------	----------

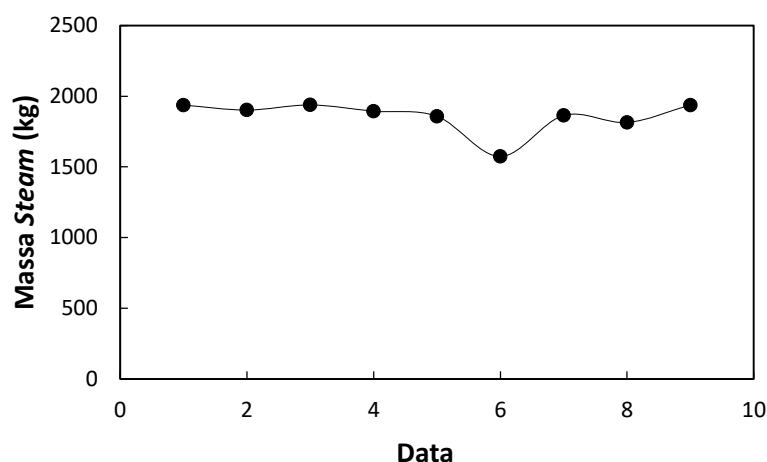
Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1 dari sembilan *batch* proses *Dyeing*, diperoleh rata-rata intensitas energi sebesar 10.143,44 kJ/kg kain. Nilai ini menunjukkan bahwa konsumsi energi pada proses masih relatif tinggi jika dibandingkan dengan praktik terbaik industri tekstil. Menurut penelitian sebelumnya, konsumsi energi pada proses *Dyeing* sangat dipengaruhi oleh parameter operasional seperti suhu, waktu proses, dan efisiensi perpindahan panas [3]. Nilai intensitas energi yang lebih tinggi dari standar menunjukkan bahwa sistem belum optimal, khususnya pada efisiensi perpindahan panas dan konsumsi *steam*. Dari perspektif neraca energi, kontribusi terbesar berasal dari pemanasan fluida proses (air + bahan kimia) hingga suhu operasi. Dengan *liquor ratio* yang tinggi, beban panas sensibel meningkat secara linier terhadap massa air, sehingga meningkatkan kebutuhan *steam*. Secara teoritis, kebutuhan panas dapat diperkirakan melalui $Q = m \times C_p \times \Delta T$; oleh karena itu, setiap penurunan *liquor ratio* akan menurunkan Q secara proporsional. Hal ini menjelaskan mengapa *batch* dengan kondisi operasi lebih efisien *batch* ke-6 menunjukkan intensitas energi yang mendekati batas atas *benchmark* 8747,28 kJ/kg.

Variasi antar *batch* pada *range* 8747–10679 kJ/kg mengindikasikan sensitivitas tinggi terhadap parameter operasi. Dalam literatur, variabilitas ini umumnya dikaitkan dengan fluktuasi suhu *set-point*, waktu *holding*, laju pemanasan, serta efisiensi perpindahan panas di *heat exchanger* [4]. Dengan kata lain, sistem belum beroperasi pada kondisi *steady optimal*, melainkan dipengaruhi oleh variasi kontrol proses dan kondisi aktual peralatan. Selanjutnya, penelitian oleh Yang, dkk. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi proses *Dyeing* dapat dicapai melalui optimasi kondisi operasi dan penggunaan energi yang lebih efektif [10]. Penelitian oleh Jones, dkk. (2025) juga menegaskan bahwa sistem *Dyeing* berbasis *steam* cenderung memiliki konsumsi energi yang tinggi dibandingkan teknologi pemanasan langsung [11]. Selain itu, Kim, dkk. (2024) menyatakan bahwa pengendalian proses berbasis teknologi digital seperti digital *twin* dapat meningkatkan efisiensi energi secara signifikan [12]. Terakhir, penelitian oleh Chowdhury, dkk. (2024) menunjukkan bahwa optimasi parameter proses seperti suhu, waktu, dan *liquor ratio* berperan penting dalam meningkatkan efisiensi energi pada proses *Dyeing* [13].

3.2. Analisis Konsumsi dan Biaya Energi

Pada Gambar 1 nilai intensitas energi yang tinggi menunjukkan bahwa sistem belum optimal dalam pemanfaatan energi. Studi menunjukkan bahwa proses *Dyeing* konvensional berbasis *steam* memiliki konsumsi energi tinggi akibat kebutuhan pemanasan air dalam jumlah besar [4]. Selain itu, kehilangan energi dalam sistem *steam* juga sering terjadi akibat distribusi yang tidak efisien dan tidak adanya pemanfaatan kembali energi panas [6].

Batch ke-6 menunjukkan performa terbaik dengan nilai intensitas energi sebesar 8747,28 kJ/kg, yang mendekati batas efisiensi industri. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi kondisi operasi sangat berpengaruh terhadap efisiensi energi [10].



Gambar 1. Grafik Konsumsi *Steam* Pada Proses *Dyeing*

Jika dibandingkan dengan studi literatur, intensitas energi pada penelitian ini berada pada kisaran menengah-atas dari rentang yang dilaporkan 3500–8500 kJ/kg [3]. Namun, nilai rata-rata yang mendekati 10.000 kJ/kg menunjukkan bahwa sistem masih belum mencapai *best available technology (BAT)*. Studi lain melaporkan bahwa dengan integrasi *heat recovery* dan optimasi proses, intensitas energi dapat ditekan hingga <8000 kJ/kg untuk proses *Dyeing* tertentu. Perbedaan ini menegaskan adanya *efficiency gap* yang masih dapat ditutup melalui intervensi teknis dan operasional.

3.3. Analisis Faktor Penyebab

Beberapa faktor utama yang menyebabkan tingginya konsumsi energi antara lain:

1. Kinerja *heat exchanger* yang belum optimal

Efisiensi perpindahan panas yang rendah meningkatkan kebutuhan *steam* karena koefisien perpindahan panas efektif (U) menurun akibat *fouling* atau desain yang tidak optimal. Secara teoritis, laju perpindahan panas $Q = U \times A \times \Delta T$; penurunan U akan menurunkan Q aktual sehingga dibutuhkan suplai energi tambahan untuk mencapai target suhu [5]. Kondisi ini memperbesar *specific energy consumption* pada sistem. Efisiensi perpindahan panas yang rendah menyebabkan kebutuhan *steam* meningkat. Menurut Shah dan Sekulic (2003), *fouling* pada permukaan *heat exchanger* meningkatkan tahanan termal dan menurunkan efektivitas perpindahan panas sehingga sistem memerlukan energi yang lebih besar untuk mencapai suhu operasi yang diinginkan [5].

2. *Liquor ratio* yang tinggi

Liquor ratio yang besar meningkatkan massa air yang harus dipanaskan, sehingga meningkatkan beban panas sensibel dan laten. Secara praktis, penurunan *liquor ratio* dari misalnya 1:15 menjadi 1:8 dapat menurunkan konsumsi energi hingga 15–25% tergantung jenis serat dan proses [4]. Hal ini menunjukkan bahwa optimasi parameter proses memiliki dampak langsung dan signifikan terhadap efisiensi energi.

3. Tidak adanya sistem pemulihan kondensat

Tidak adanya pemulihan panas menyebabkan *exergy loss* yang signifikan. Energi pada kondensat umumnya masih memiliki temperatur tinggi (60–90°C) dan dapat digunakan kembali sebagai *feedwater preheating*. Tidak adanya pemulihan

kondensat menyebabkan energi panas yang masih terkandung dalam kondensat terbuang ke lingkungan. U.S. Department of Energy menjelaskan bahwa pemanfaatan kembali kondensat sebagai air umpan *boiler* dapat mengurangi kebutuhan energi pemanasan awal serta meningkatkan efisiensi sistem *steam* secara keseluruhan. Pada penelitian ini, belum adanya sistem pemulihan kondensat menjadi salah satu faktor yang berkontribusi terhadap tingginya konsumsi energi proses [6]. Pada sistem ini, kehilangan panas dari kondensat dan limbah cair menjadi salah satu kontributor utama tingginya konsumsi energi.

4. Efisiensi *boiler* rendah ($\leq 75\%$)

Efisiensi *boiler* yang rendah meningkatkan *fuel-to-steam ratio*, sehingga lebih banyak bahan bakar dibutuhkan untuk menghasilkan jumlah *steam* yang sama. Dalam praktik terbaik industri, efisiensi *boiler* modern dapat mencapai 80–90% melalui optimasi pembakaran, *economizer*, dan kontrol udara berlebih [7]. Selisih efisiensi ini secara langsung tercermin pada tingginya konsumsi energi spesifik sistem.

Faktor-faktor tersebut sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa efisiensi sistem *steam* dan peralatan sangat mempengaruhi konsumsi energi pada industri tekstil. Berdasarkan laporan dari Forbes Marshall (2023) sistem *steam* yang tidak optimal, seperti adanya kehilangan panas pada distribusi dan tidak efisiennya pemanfaatan kondensat, dapat meningkatkan konsumsi energi secara signifikan [8]. Sementara itu, Bureau of Energy Efficiency (BEE) (2019) menyatakan bahwa kinerja peralatan seperti *boiler* dan sistem pemanas memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi energi, dimana peningkatan efisiensi peralatan dapat menurunkan konsumsi energi secara keseluruhan pada proses industri tekstil [9].

3.4. Evaluasi Potensi Pengembangan Prototipe Mandiri

Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata intensitas energi pada proses *dyeing* sebesar 10.143,44 kJ/kg masih berada di atas kisaran efisiensi yang umum dilaporkan dalam literatur. Kondisi ini menunjukkan bahwa masih terdapat peluang untuk meningkatkan efisiensi energi melalui perbaikan sistem maupun optimasi parameter operasi.

Hasanbeigi, dkk. (2017) menjelaskan bahwa peningkatan efisiensi energi pada industri tekstil dapat dicapai melalui penerapan teknologi hemat energi, peningkatan efisiensi peralatan proses, serta penerapan manajemen energi yang terintegrasi. Menurut penelitian tersebut, sektor tekstil memiliki potensi penghematan energi yang signifikan melalui optimalisasi penggunaan energi panas dan listrik pada setiap tahapan proses produksi [3].

Selanjutnya, Yang, dkk. (2021) melaporkan bahwa efisiensi energi pada proses *dyeing* dapat ditingkatkan melalui optimasi parameter operasi, seperti pengurangan *liquor ratio*, pengendalian suhu proses, serta peningkatan efektivitas pemanfaatan energi panas. Pendekatan tersebut terbukti mampu menurunkan konsumsi energi spesifik sekaligus meningkatkan performa proses pencelupan [10]. Temuan tersebut relevan dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan bahwa tingginya *liquor ratio* menjadi salah satu faktor penyebab tingginya kebutuhan energi pada proses *dyeing*.

Forbes Marshall (2023) menekankan bahwa optimasi sistem *steam* merupakan langkah penting dalam meningkatkan efisiensi energi industri tekstil. Beberapa strategi yang direkomendasikan meliputi pengurangan kehilangan panas pada jaringan distribusi *steam*, pemeliharaan *steam trap* secara berkala, peningkatan kualitas insulasi perpipaan, serta pemanfaatan kembali kondensat untuk mengurangi kebutuhan energi pembangkitan *steam* [8]. Kondisi aktual pada penelitian ini menunjukkan bahwa belum adanya sistem pemulihan kondensat berpotensi menyebabkan terbuangnya energi panas yang masih dapat dimanfaatkan kembali.

Sementara itu, Bureau of Energy Efficiency (BEE) (2019) menyatakan bahwa peningkatan efisiensi *boiler* dan pengurangan *liquor ratio* merupakan faktor penting dalam menurunkan konsumsi energi pada proses tekstil. Laporan tersebut juga menunjukkan bahwa penerapan *benchmarking* energi secara berkala dapat membantu industri mengidentifikasi potensi inefisiensi dan menentukan strategi perbaikan yang tepat [9]. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi *boiler* yang relatif rendah turut berkontribusi terhadap tingginya kebutuhan energi pada proses *dyeing*.

Selain pendekatan konvensional, perkembangan teknologi terbaru juga menawarkan peluang peningkatan efisiensi energi. Jones, dkk. (2025) melaporkan bahwa teknologi pemanasan langsung memiliki potensi untuk menurunkan konsumsi energi dibandingkan sistem pemanasan berbasis *steam* pada proses tekstil tertentu [11]. Di sisi lain, Kim, dkk. (2024) menunjukkan bahwa penerapan teknologi *digital twin* memungkinkan optimasi proses secara *real-time* sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi gas rumah kaca [12].

Chowdhury, dkk. (2024) juga menegaskan bahwa optimasi parameter operasi seperti suhu proses, waktu proses, dan *liquor ratio* merupakan faktor penting dalam meningkatkan efisiensi energi dan keberlanjutan proses *dyeing* [13]. Oleh karena itu, upaya perbaikan pada penelitian ini dapat difokuskan pada peningkatan efisiensi *heat exchanger*, penerapan sistem pemulihan kondensat, optimasi *liquor ratio*, serta peningkatan efisiensi *boiler* sebagai langkah awal menuju proses yang lebih hemat energi dan berkelanjutan.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, pengembangan prototipe mandiri untuk proses *desizing*, *scouring*, dan *dyeing* dapat menjadi sarana penelitian lanjutan guna menguji berbagai strategi konservasi energi secara lebih terkontrol sebelum diterapkan pada skala industri.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dapat disimpulkan dari hasil penelitian, diperoleh bahwa intensitas energi pada proses *Dyeing* menggunakan mesin *Dyeing* mencapai 10.143,44 kJ/kg menunjukkan bahwa sistem belum efisien dibandingkan standar industri 3500–8500 kJ/kg. Tingginya nilai ini sejalan dengan teori bahwa proses *Dyeing* merupakan proses basah (*wet processing*) yang paling banyak mengonsumsi energi dalam industri tekstil, terutama karena kebutuhan pemanasan air dalam jumlah besar menggunakan *steam*. Kebutuhan energi yang tinggi pada penelitian ini terutama disebabkan oleh penggunaan *steam* sebagai media pemanas air proses. Literatur menyatakan bahwa konsumsi energi terbesar pada proses *Dyeing* berasal

dari tahap pemanasan air, sehingga semakin besar volume air yang digunakan maka semakin tinggi pula energi yang dibutuhkan. Selain itu, variasi konsumsi energi antar *batch* menunjukkan adanya ketidakkonsistenan kondisi operasi. Kondisi operasional sangat mempengaruhi konsumsi energi, dimana batch terbaik memiliki intensitas energi sebesar 8747,28 kJ/kg. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter operasional seperti suhu, waktu proses, dan kondisi perpindahan panas memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi energi. Temuan ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa optimasi parameter proses dapat menurunkan. Faktor utama yang menyebabkan tingginya konsumsi energi meliputi efisiensi *heat exchanger* yang rendah, *liquor ratio* yang tinggi, tidak adanya sistem pemulihan kondensat, serta kondisi operasional mesin yang belum optimal.

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan untuk penelitian selanjutnya melakukan optimasi parameter proses seperti suhu operasi, waktu proses, dan *liquor ratio* untuk mendapatkan kondisi operasi yang lebih efisien. Selain itu, perlu dilakukan kajian penerapan teknologi konservasi energi seperti *condensate recovery system*, peningkatan efisiensi *heat exchanger*, serta penggunaan sistem kontrol berbasis digital atau *digital twin* untuk meningkatkan efisiensi proses. Penelitian selanjutnya juga dapat membandingkan dengan teknologi alternatif seperti pemanasan langsung untuk memperoleh efisiensi energi yang lebih tinggi serta mendukung keberlanjutan industri tekstil.

REFERENSI

- [1] Kementrian Perindustrian Republik Indonesia, "Perkembangan Industri Tekstil Nasional," 2019.
- [2] M. L. Gulrajani, "Advances in Textile Dyeing Technology," *Woodhead Publishing*, hal. 1-152, 2018.
- [3] A. Hasanbeigi, L. Price, dan E. Lin, "Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for the textile industry.," *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, hal. 297–310, 2017.
- [4] C. R. Holkar, A. J. Jadhav, D. V. Pinjari, N. M. Mahamuni, dan A. B. Pandit, "A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches.," *Journal of Environmental Management*, vol. 182, hal. 351–366., 2016.
- [5] R. K. Shah, dan D. P. Sekulic, "Fundamentals of Heat Exchanger Design.," *John Wiley & Sons*, hal. 1–941, 2017.
- [6] U.S. Department of Energy, "Steam System Best Practices," *U.S. DOE*, hal. 1–120, 2018.
- [7] International Energy Agency (IEA), "Energy Efficiency in Industry," *IEA*, hal. 1–400. 2020.
- [8] Forbes Marshall Pvt. Ltd, "Steam Optimization in Textile Industry," *Forbes Marshall Pvt. Ltd*, hal. 1-50, 2023.
- [9] Bureau of Energy Efficiency (BEE), "Energy Performance Benchmarking for Textile Sector," *Government of India*, hal. 1-150, 2019.
- [10] L. Yang, T. Xua, J. Yuana, S. Yang, C. Wang, L. Ma, D. Wu, S. Liu, dan Z. Lin, "Energy efficiency improvement in textile Dyeing processes.," *Energy Reports*, vol. 7, hal. 1234–1242, 2021.

- [11] C. R. Jones , F. Wheeler, T. Williams, J. J. Robus, E. Roberts, dan D. Lewis, "From Steam Power to Laser Power: Resource Analysis of Direct Surface Heating for Textile Dyeing," *Procedia CIRP*, vol. 135, hal. 462–467, 2025.
- [12] M. Kim, J. Y. Shim, S. Lim, H. Lee, S. C. Kwon, S. Hong, dan R. Sujin, "Reduction of greenhouse gas emissions by optimizing the textile Dyeing process using digital twin technology.," *Fashion and Textiles*, hal. 1–15, 2024.
- [13] M. Chowdhury, M. S. Babu, S. Hossain, R. Mia, dan S. Md. M. Kabir, "Optimizing textile Dyeing and finishing for improved energy efficiency and sustainability.," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 17, hal. 100-650, 2024.
- [14] A. Vade, S. Tari, dan A. Athalye, "Assessing Energy Emissions and Environmental Impact of Wool Processing : A Case Study of an Indian Textile Mill.," *Sustainable Polymer & Energy*, hal. 1–12, 2024.
- [15] N. Damayanti, dan N. Hendrawati, "Studi Perhitungan Heat Exchanger Tipe Double Pipe pada Proses Pembuatan Sabun Mandi Padat.," *Distilat*, vol. 8, no. 2, hal. 85–92, 2022.
- [16] T. Ihsan, D. D. Rochman, dan R. Ferdian, "Fuzzy-FMECA: Right Solution for Jet Dyeing Machine Damage Prevention.," *Spektrum Industri*, vol. 22, no. 1, hal. 45–53, 2024.