

OPTIMALISASI TEKNIK LESS WATER DYEING PROGRAM PADA KAIN POLYESTER DENGAN PENDEKATAN METODE TAGUCHI UNTUK PENGHEMATAN AIR DALAM INDUSTRI TEKSTIL

Yohan Wahyudi¹, Christian Harito²

^{1,2}Bina Nusantara University, Jakarta, Indonesia

Email: yohanwahyudi44@yahoo.co.id

Abstrak

Industri tekstil, sebagai penyumbang limbah cair terbesar kedua di dunia setelah industri minyak dan gas, menghadapi tantangan serius terkait penggunaan air dan bahan kimia dalam proses pencelupan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan teknik Less Water Dyeing Program pada kain polyester dengan menggunakan metode Taguchi, dengan fokus utama pada efisiensi penggunaan air dalam proses pencelupan, penghematan biaya produksi, dan pengurangan dampak negatif lingkungan akibat proses pencelupan. Metode penelitian terdiri dari dua tahap utama. Pertama, menerapkan teknik Less Water Dyeing dengan mengubah tahap *rinsing* menjadi *cooling*, sebuah modifikasi pada proses pencelupan tradisional untuk mengoptimalkan penghematan air. Kedua, menggunakan metode Taguchi untuk melakukan pengoptimalan parameter-proses, termasuk tipe mesin, volume air, berat kain, dan tingkat reduksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Less Water Teknik berhasil menghemat air hingga 60% dengan metode cooling, meningkat menjadi 72.4% melalui optimalisasi metode Taguchi. Kombinasi kedua teknik ini memberikan penghematan yang signifikan, mengurangi biaya proses pencelupan tanpa mengorbankan kualitas hasil, dengan nilai penghematan mencapai 666,717,120 per tahun. Teknik Less Water Dyeing Program dengan metode Taguchi, khususnya dengan peningkatan pada tahap cooling, terbukti sebagai solusi efektif untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam proses pencelupan, menghemat biaya produksi pencelupan, dan mengurangi dampak negatif lingkungan akibat proses pencelupan tekstil.

Kata Kunci: *Less Water Dyeing Program, Metode Taguchi, Less Water Dyeing, Penghematan Air, Industri Tekstil.*

Abstract

The textile industry, as the second largest contributor of liquid waste in the world after the oil and gas industry, faces serious challenges related to the use of water and chemicals in the dyeing process. The aim of this research is to optimize the Less Water Dyeing Program technique on polyester fabric using the Taguchi method, with the main focus on efficient use of water in the dyeing process, saving production costs, and reducing negative environmental impacts due to the dyeing process. The research method consists of two main stages. First, applying the Less Water Dyeing technique by changing the rinsing stage to cooling, a modification to the traditional dyeing process to optimize water savings. Second, using the Taguchi method to optimize process parameters, including machine type, water volume, fabric weight, and reduction level. The research results show that the Less Water Technique succeeded in saving up to 60% water using the cooling method, increasing to 72.4% through optimizing the Taguchi method. The combination of these two techniques provides significant savings, reducing the cost of the dyeing process without sacrificing the quality of the results, with savings reaching 666,717,120 per year. The Less Water Dyeing Program technique using the Taguchi method, especially with an increase in the cooling stage, has proven to be an

effective solution for increasing the efficiency of water use in the dyeing process, saving dyeing production costs, and reducing negative environmental impacts due to the textile dyeing process.

Keywords: *Less Water Dyeing Program, Taguchi Method, Less Water Dyeing, Water Saving, Textile Industry.*

A. PENDAHULUAN

Industri tekstil merupakan salah satu pencemar air terbesar di dunia. Proses pencelupan merupakan salah satu proses yang paling intensif menggunakan air dan bahan kimia dalam industri tekstil. Proses pencelupan konvensional menggunakan banyak air dan bahan kimia, yang dapat menyebabkan pencemaran air dan gangguan ekosistem. Telah ada sejumlah penelitian tentang pengembangan proses Dyeing waterless yang dapat menghilangkan konsumsi air dan mengganti dengan CO₂, teknologi tersebut masih terus dalam pengembangan sehingga biaya investasi tinggi dan belum dapat diaplikasikan dalam industri tekstil. Pengembangan teknik pencelupan konvensional adalah Program Less Water Dyeing. Program Less Water Dyeing adalah proses pencelupan baru yang menggunakan lebih sedikit air dan bahan kimia daripada proses pencelupan konvensional umumnya. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan Program Less Water Dyeing untuk kain poliester menggunakan metode Taguchi untuk mengurangi konsumsi air dan biaya produksi di industri tekstil.

Tujuan spesifik penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi perubahan metode less water dyeing Teknik dan optimalisasi Program Less Water Dyeing untuk kain poliester juga mengembangkan rekomendasi untuk penerapan Program Less Water Dyeing di industri tekstil. Penelitian ini penting karena memiliki potensi untuk mengurangi dampak lingkungan industri tekstil dan mengoptimalkan penggunaan air. Program Less Water Dyeing memiliki potensi untuk mengurangi konsumsi air 72.4 %. Mengoptimalkan Program Less Water Dyeing untuk kain poliester juga mengembangkan rekomendasi untuk penerapannya, penelitian ini dapat membantu industri tekstil untuk mengadopsi teknologi ini dan mengurangi dampaknya terhadap lingkungan.

Literature review

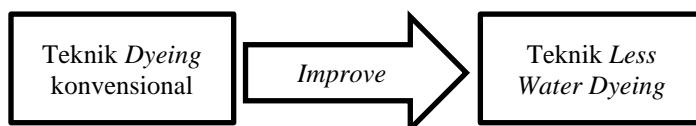
Para peneliti telah menginvestigasi metode pencelupan tekstil tanpa air yang inovatif dalam beberapa penelitian terbaru. Zaidy et al. (2019) mengembangkan pendekatan menggunakan plasma atmosfer untuk pencelupan tekstil, mengurangi konsumsi air dan produksi air limbah. Huang et al. (2019) menciptakan proses pencelupan tanpa air pita resleting dengan menggunakan karbon dioksida superkritis (SC-CO₂), yang menghasilkan pita resleting berkualitas tinggi. Mahmud dan Kaiser (2020) juga menggunakan SC-CO₂ dalam pencelupan tekstil, mencatat hasil berkualitas tinggi. De Oliveira et al. (2023) mengeksplorasi penggunaan fluida superkritis sebagai metode alternatif yang memenuhi persyaratan kualitas industri tekstil. Namun, penggunaan SC-CO₂ dalam pencelupan masih dalam tahap pengembangan dengan biaya investasi yang tinggi (Abou Elmaaty, 2021; Banchero, 2020; Schulz, 2019). Selain itu, Zheng et al. (2018) menyelidiki penggunaan SC-CO₂ dalam mlarutkan pewarna Disperse Red 167 dalam superkritis fluid, sedangkan Abou Elmaaty dan Abd El-Aziz (2018) menunjukkan bahwa tekstil yang diwarnai menggunakan SC-CO₂ memiliki ketahanan warna yang lebih baik. Bai et al. (2019) menemukan bahwa pencelupan menggunakan SC-CO₂ pada bahan seperti nylon, acrylic, dan polyester dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah, mengurangi kerusakan kain. Meskipun potensialnya besar untuk mengurangi konsumsi air dalam industri tekstil, perlu diingat bahwa teknologi SC-CO₂ masih dalam tahap pengembangan dan memiliki biaya investasi yang tinggi.

Tabel 1 Perbandingan Waterless Dyeing VS konvensional Dyeing

Proses Pencelupan	Penggunaan Air	Output Warna	Dapat di Implementasikan
Waterless Dyeing	Tidak pakai air	OK	Tidak dapat
Konvensional Dyeing	Pakai air	OK	Dapat
Improve Konvensional Dyeing (Teknik Less Water Dyeing)	<i>Better than</i> konvensional Dyeing	OK	Dapat

Kelebihan dari metode pencelupan tanpa air (Waterless Dyeing) mencakup pengurangan limbah air. Pada proses pencelupan tekstil konvensional, air digunakan sebagai pelarut, yang menghasilkan limbah air yang tinggi. Metode SC-CO₂ tidak memerlukan air, sehingga dapat mengurangi limbah air dan dampak lingkungan. Kelebihan lainnya adalah penghematan energi. Proses pencelupan tekstil tradisional membutuhkan energi yang signifikan untuk memanaskan air dan bahan kimia. Metode SC-CO₂ tidak memerlukan energi untuk memanaskan air, sehingga dapat mengurangi konsumsi energi. Selain itu, hasil pencelupan lebih baik karena pewarna dapat terikat lebih kuat ke substrat tekstil dengan metode SC-CO₂. Kelebihan lainnya adalah kecepatan proses pencelupan yang lebih tinggi. Proses pencelupan tekstil dengan metode SC-CO₂ dapat dilakukan pada suhu lebih rendah, mengurangi waktu proses pencelupan.

Salah satu kekurangan dari metode SC-CO₂ adalah biaya investasi yang tinggi. Metode ini masih dalam tahap pengembangan, sehingga biayanya masih tinggi. Perlu adanya pengembangan teknologi metode SC-CO₂ untuk aplikasi pencelupan tekstil lainnya, seperti pencelupan serat alami dan pencelupan benang. Secara umum, metode SC-CO₂ memiliki potensi untuk menjadi metode pencelupan tekstil yang lebih berkelanjutan dan efisien. Namun, masih terdapat beberapa tantangan yang perlu diatasi dalam pengembangannya, seperti biaya investasi yang tinggi, stabilitas pewarna, dan pengembangan aplikasi. Melihat kekurangan ini, terdapat celah (gap) untuk diteliti, khususnya dalam upaya mengidentifikasi cara bagaimana proses pencelupan konvensional dapat mengurangi pemakaian airnya. Penerapan metode teknik less water adalah salah satu solusi yang dapat dijelajahi untuk mengurangi konsumsi air dalam proses pencelupan konvensional.



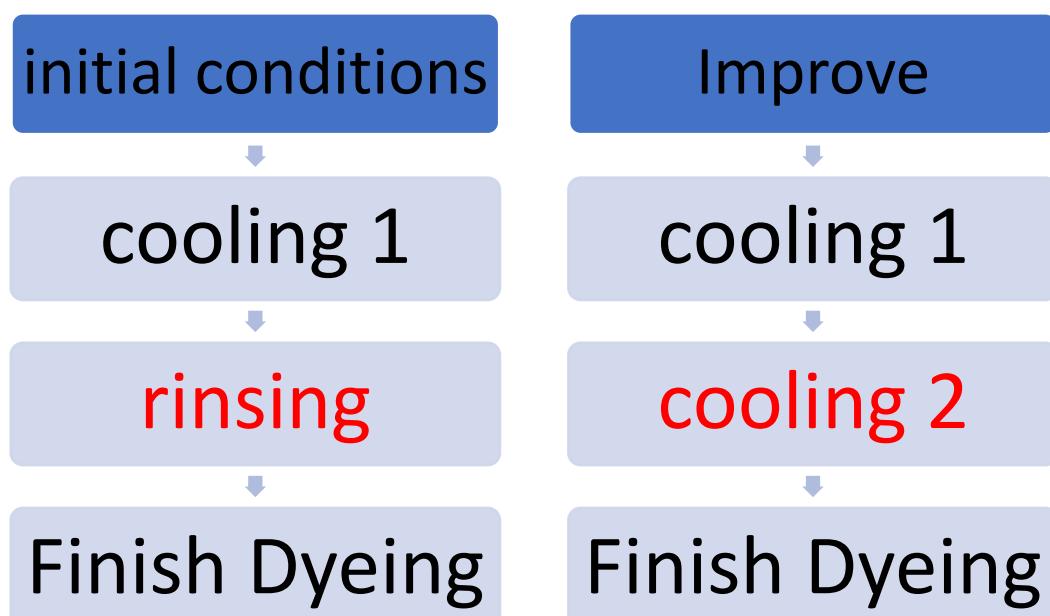
Program Less Water Dyeing adalah inovasi dalam proses pencelupan tekstil konvensional yang berfokus pada penggunaan lebih sedikit air dan bahan kimia daripada metode pencelupan konvensional biasa. Penelitian ini menggambarkan upaya untuk mengurangi konsumsi sumber daya air yang tinggi dalam industri tekstil. Dengan mengadopsi pendekatan ini, penelitian berhasil menciptakan proses pencelupan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Ini merupakan langkah yang positif menuju solusi yang lebih ramah lingkungan dalam industri tekstil, terutama ketika teknologi pencelupan tanpa air seperti penggunaan CO₂ masih dalam tahap pengembangan dan memerlukan investasi yang tinggi untuk diterapkan.

Program Less water Dyeing adalah program merubah step Dyeing pattern pencelupan dari step rinsing dyeing yang memerlukan air dalam proses menurunkan suhu dalam mesin jet dengan menggantinya menjadi cooling yang tidak memerlukan air dalam proses menurunkan suhu dalam mesin jet.

Tabel 2 Perbedaan Metode *Rinsing* dan *Cooling*

Karakteristik	<i>Rinsing</i>	<i>Cooling</i>
Tujuan	Menurunkan temperatur mesin jet dengan mempergunakan air	Menurunkan temperatur mesin jet tanpa mempergunakan air
Metode	Memasukkan air dingin dan mengeluarkan air panas secara bertahap dan terus menerus sampai suhu dingin tercapai.	Mempergunakan part mesin yaitu heat exchanger untuk mendinginkan suhu
Suhu awal	Dari suhu 80 °C menuju suhu 40 °C	Dari suhu 135 °C menuju suhu 80 °C
Derajat Penurunan Suhu	2.67 °C / min	2.0 °C / min
Waktu	15 menit	27,5 menit

Metode teknik less water Dyeing adalah metode untuk menghilang proses rinsing dengan cara menggantinya dengan proses cooling lanjutan, jadi proses cooling yang saat ini dilakukan hanya pada suhu 135 °C menuju suhu 80 °C diperbaiki sehingga mengalami 2 step proses cooling mengalami 2 step proses yaitu step awal pada suhu 135 °C menuju suhu 80 °C lalu dilanjutkan dari suhu 80 °C menuju 40 °C, proses cooling ke 2 ini menghilangkan proses rinsing yang mempergunakan air dalam menurunkan suhu pada mesin, dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Teknik waterless Dyeing menghilangkan proses rinsing dengan menggantikan dengan proses cooling. Proses cooling ke 2 menggantikan proses rinsing, sehingga tidak ada tambahan air atau membuang air dalam upaya menurunkan suhu dalam mesin jet. Proses cooling ke 2 mempergunakan bantuan part mesin yaitu heat exchanger yaitu part mesin yang berfungsi untuk menurunkan suhu atau penukar suhu,

Alat penukar panas (heat exchanger) adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan panas antara dua buah fluida atau lebih yang memiliki perbedaan temperatur yaitu fluida yang bertemperatur tinggi kefluida yang bertemperatur rendah. Dalam pelaksanaannya di mesin fungsi fungsi step tersebut sudah tersedia dan ada dalam fasilitas mesin, jadi kita hanya tinggal merubah nya saja, merubah pola pencelupan, menggantikan dengan pola pencelupan yang kita inginkan.

B. TINJAUAN PUSTAKA

Metode optimalisasi Taguchi adalah suatu pendekatan statistik yang sangat berguna dalam merancang dan mengoptimalkan proses atau produk dengan tujuan meningkatkan kualitas, dan keandalan. Metode ini dinamai setelah ahli statistik Jepang, Genichi Taguchi, yang mengembangkan pendekatan ini pada tahun 1980-an. Prinsip utama di balik metode Taguchi adalah mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi suatu proses atau produk, serta merancang eksperimen yang efisien untuk menguji pengaruh faktor-faktor tersebut dan menemukan pengaturan optimal yang menghasilkan performa terbaik.

Metode Taguchi, pada dasarnya, melibatkan langkah-langkah kunci yang dimulai dengan identifikasi faktor-faktor yang potensial memengaruhi proses atau produk yang akan dioptimalkan, seperti suhu, waktu pencelupan, Liquor Ratio (LR), berat kain, dan tipe mesin. Setiap faktor kemudian memiliki level atau tingkatan yang dapat diatur, dengan pemilihan variabel dan variasi yang diharapkan sejalan dalam proses. Perancangan eksperimen dilakukan menggunakan matriks eksperimen orthogonal, yang secara efisien mengatur kombinasi faktor-faktor dalam jumlah eksperimen yang relatif sedikit untuk mendapatkan informasi maksimal. Pelaksanaan eksperimen mengacu pada matriks eksperimen yang dirancang, di mana setiap kombinasi faktor dijalankan sesuai rencana eksperimen pada proses pencelupan. Setelah eksperimen selesai, dilakukan analisis hasil untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil dan kualitas produk atau proses. Hasil analisis ini kemudian digunakan untuk mengidentifikasi pengaturan optimal dari faktor-faktor tersebut, yang disebut sebagai kombinasi faktor optimal atau pengaturan pengoptimalan. Melalui langkah-langkah ini, metode Taguchi memungkinkan pengoptimalan proses atau produk dengan efisien.

Metode Taguchi memungkinkan peneliti untuk merancang eksperimen yang mencakup semua faktor yang mempengaruhi proses pencelupan. Hal ini akan membantu mengidentifikasi pengaturan optimal dari faktor-faktor tersebut untuk mencapai hasil optimal. pengurangan variabel, efisiensi penggunaan eksperimen.

Identifikasi faktor-faktor kritis yaitu metode ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap hasil pencelupan, Dengan demikian, upaya dapat difokuskan pada pengaturan faktor-faktor tersebut untuk mengoptimalkan hasil. Pengurangan Variabel yaitu dalam metode Taguchi membantu dalam merancang pengaturan yang tahan terhadap variasi dalam proses. Ini berarti bahwa hasil pewarnaan akan lebih konsisten meskipun ada variasi dalam faktor-faktor tertentu.

Efisiensi penggunaan eksperimen dalam metode ini memungkinkan peneliti untuk mendapatkan informasi yang signifikan dengan jumlah eksperimen yang relatif sedikit. Ini menghemat waktu dan biaya dalam penelitian dan pengembangan. Dalam keseluruhan, metode optimalisasi Taguchi sangat selaras dalam penelitian ini karena membantu mengarahkan pendekatan Less Water Dyeing untuk mencapai hasil yang optimal.

C. METODE

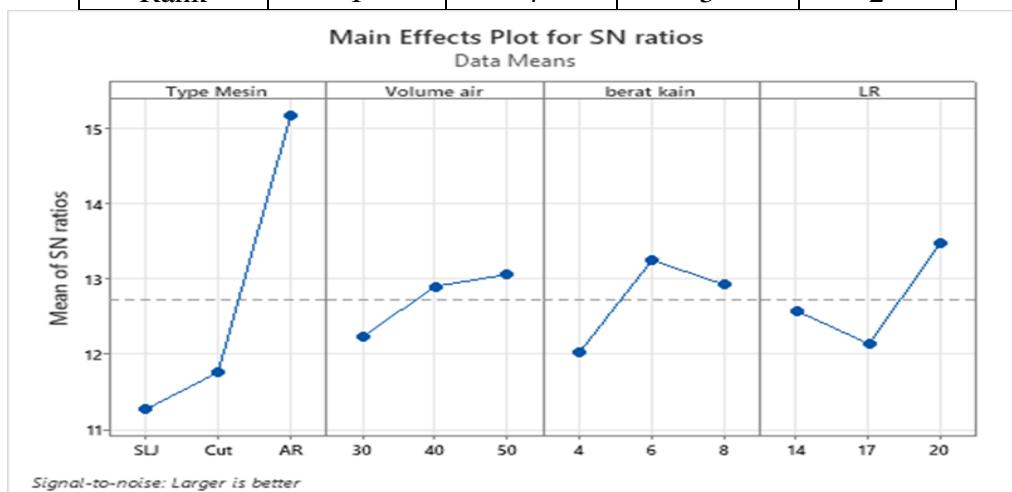
Dalam penelitian ini, pendekatan Taguchi yang digunakan adalah metode eksperimental dengan mengumpulkan data melalui observasi di laboratorium PT. AMI. Observasi ini dilakukan dari tanggal 1 September hingga 9 September dengan mengamati pekerjaan staff laboratorium. Data dikumpulkan dengan mengukur penghematan air dalam proses pencelupan dengan berbagai variabel bebas, seperti tipe mesin, volume air, berat kain, dan liquor ratio (LR). Untuk mengukur penghematan air, digunakan alat seperti pipet untuk sample warna secara presisi, catalog bank resep, dan beaker glass untuk proses pencelupan. Selain itu variabel terkait diukur adalah dampak warna yang muncul dari pengamatan, pengamatan warna dilakukan dengan menggunakan alat spektrofotometri untuk mengukur nilai delta E (ΔE) sebagai standar. Delta E adalah alat untuk menilai perbedaan warna antara sample dengan standar, dan nilai $\Delta E \leq 1$ dianggap sebagai hasil yang baik. Analisis data dilakukan dengan menggunakan metode Taguchi, jumlah pengamatan sebanyak total 27 pengamatan terdiri dari dengan 4 variabel bebas dan 3 varian masing masing variabelnya, maka didapat 9 desain experiment atau 9 desain running.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen metode Taguchi sebagai berikut untuk respon *Table Signal Noise Ratios*.

Table 1 Signal to Noise Ratios

Level	Tipe Mesin	Volume Air	Berat Kain	LR
1	11.26	12.23	12.02	12.57
2	11.75	12.90	13.24	12.13
3	15.16	13.05	12.92	13.47
Delta	3.89	0.83	1.23	1.34
Rank	1	4	3	2



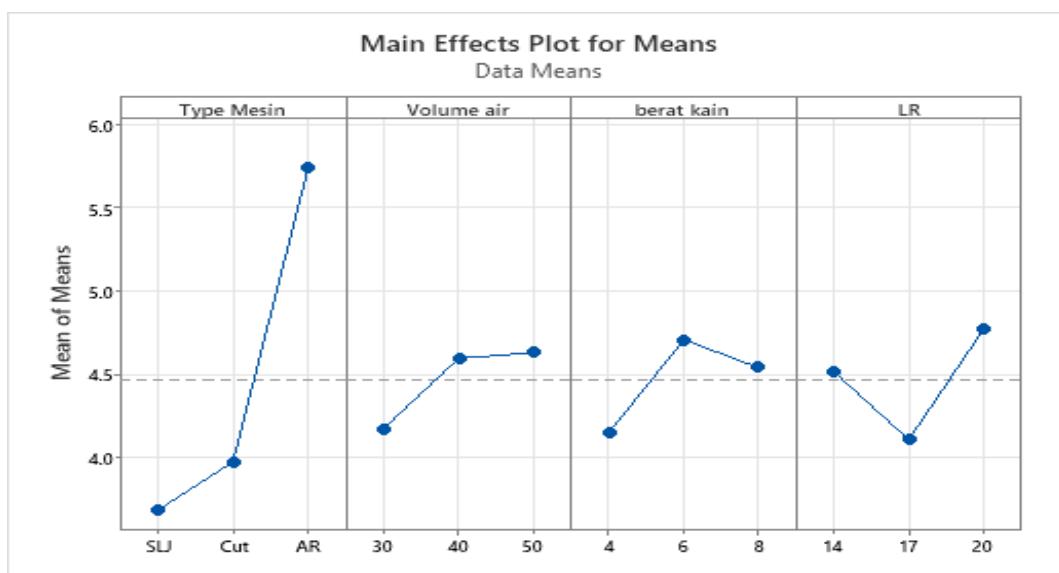
Gambar 1 SNR

Pada hasil SNR kolom delta menunjukkan perbedaan antara rasio sinyal, mulai tertinggi dan terendah untuk setiap faktor. Kolom peringkat menunjukkan faktor-faktor yang diurutkan berdasarkan peningkatan delta, dengan faktor mesin dengan delta tertinggi diurutkan pertama. Faktor tipe mesin memiliki delta tertinggi, diikuti oleh faktor LR, faktor berat kain, dan faktor volume air. Ini berarti bahwa faktor tipe mesin adalah faktor terpenting dalam menentukan rasio sinyal-lalu diikuti oleh faktor LR, faktor berat kain, dan faktor volume air. Pada kolom rank adalah peringkat dari masing-masing jenis mesin berdasarkan nilai SNR terbaik hingga terburuk. Dalam contoh ini, jenis mesin dengan nilai SNR tertinggi adalah yang terbaik (peringkat 1), dan yang dengan nilai SNR terendah adalah yang terburuk

(peringkat 4). Hasil Taguchi untuk sinyal SN ratio semangkin besar sinyal semangkin baik, dari data pengamatan yang sudah dimasukkan bisa dilihat pada Gambar 4.8 hasil maka didapat tipe mesin AR,dengan volume air 50 ml, berat kain 6 gram, dan LR adalah 20.

Table 2 Means

Level	Tipe Mesin	Volume Air	Berat Kain	LR
1	3.689	4.178	4.156	4.522
2	3.978	4.600	4.711	4.111
3	5.744	4.633	4.544	4.778
Delta	2.056	0.456	0.556	0.667
Rank	1	4	3	2

**Gambar 2 Main Effect Plot for Means**

Delta mengukur perbedaan antara nilai rata-rata terendah dan tertinggi untuk setiap jenis mesin dan variabel yang diukur. Ini memberi tahu kita seberapa besar variasi nilai rata-rata dalam pengujian untuk masing-masing jenis mesin dan variabel. Dalam contoh ini, variasi nilai rata-rata adalah 2.056 untuk volume air 0.456 untuk berat kain 0.556 untuk LR yang menunjukkan perbedaan antara nilai rata-rata terendah dan tertinggi dalam pengukuran.

Peringkat dari masing-masing jenis mesin berdasarkan nilai rata-rata terbaik hingga terburuk. Dalam contoh ini, jenis mesin dengan nilai rata-rata tertinggi adalah yang terbaik (peringkat 1), dan yang dengan nilai rata-rata terendah adalah yang terburuk (peringkat 4) untuk masing-masing variabel yang diukur (volume air, berat kain, dan LR).

Hasil Taguchi untuk nilai rata rata semangkin besar sinyal semangkin baik, dari data pengamatan yang sudah dimasukkan, maka didapat tipe mesin AR,dengan volume air 50 ml,berat kain 6 gram, dan LR adalah 20.

Tabel 3 Perbandingan Pemakaian Air Rinsing, Cooling dan Taguchi

No	Dyeing	Pemakaian Air/Tahun (M ³)	% Penghematan Air
1	<i>Konvensional (rinsing)</i>	180,000	0
2	<i>Less Water (cooling)</i>	72,000	60
3	<i>Less Water (cooling)</i> Optimalisasi Taguchi	49,680	72,4

Pada perbandingan pemakaian air rinsing,cooling dan Taguchi maka dapat dihitung penghematan biaya dari pengurangan air bila mempergunakan metode less water dan less water dengan Taguchi. Dengan harga jumlah air 1 m³ sebesar 5116 rupiah maka akan di dapat besaran rupiah penghematan air yang didapat:

Tabel 4 Penghematan biaya Pencelupan Konvensional dengan Pencelupan Less Water

No	Dyeing	Pemakaian Air/Tahun (M ³)	1 M ³ (Rp)	Total (Rp)
1	<i>Konvensional</i>	180,000	5116	920,880,000
2	Taguchi	49,680	5116	254,162,880
Penghematan Biaya				666,717,120

Hasil eksperimen ini memberikan kontribusi yang signifikan dalam menjawab permasalahan penelitian terkait penghematan air dalam industri pencelupan tekstil. Selain itu, kesimpulan ini juga memberikan rekomendasi praktis bagi industri pencelupan tekstil dalam upaya mengurangi dampak lingkungan dan biaya produksi. Dengan menggunakan mesin tipe AR yg adalah tipe mesin terbaru, pengaturan volume air yang lebih besar, penggunaan berat kain yang sesuai dengan jenis kain yang akan dicelup, dan pemikiran tentang LR yang lebih tinggi, industri dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam proses pencelupan mereka. Hasil ini juga mempertimbangkan strategi pengelolaan air yang bijak sebagai solusi untuk mengurangi dampak lingkungan yang disebabkan oleh penggunaan air dalam industri pencelupan tekstil.

E. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan teknik Less Water Dyeing mampu menghemat air hingga 60%, dengan peningkatan hingga 72.4% ketika diterapkan metode optimalisasi Taguchi dibandingkan dengan pencelupan konvensional. Penghematan ini tidak hanya berdampak pada efisiensi biaya produksi pencelupan, tetapi juga memberikan solusi untuk mengurangi dampak negatif lingkungan akibat proses pencelupan.

Penerapan Less Water Dyeing dan metode Taguchi tidak hanya memberikan penghematan air yang signifikan, tetapi juga mampu mengurangi biaya proses pencelupan tanpa mengorbankan kualitas hasil. Total penghematan air mencapai 666,717,120 rupiah per tahun, memberikan dampak positif pada sisi ekonomi produksi.

Proses pencelupan dalam industri tekstil dikenali dengan dampak lingkungan yang signifikan, dan hasil penelitian ini menyoroti bahwa teknik Less Water Dyeing dan optimalisasi metode Taguchi dapat meminimalkan dampak tersebut. Faktor-faktor seperti tipe mesin AR, Liquor Ratio (LR) 20, volume air 50 ml, dan berat kain 6 gram muncul sebagai pilihan terbaik untuk mencapai optimalisasi penggunaan air.

Berdasarkan temuan penelitian, disarankan kepada manajemen untuk menerapkan hasil Less Water Dyeing dan metode Taguchi dalam pengelolaan produksi guna meningkatkan efisiensi biaya. Bagi pelaku industri tekstil, disarankan untuk mengimplementasikan teknik Less Water Dyeing sebagai solusi penggunaan air yang lebih efisien dalam proses pencelupan, sehingga dapat bersaing lebih baik di dunia industri. Masyarakat, pemerintah, dan lembaga lingkungan juga diminta untuk terus mendukung dan mendorong pengembangan teknologi Less Water Dyeing sebagai upaya kolektif dalam menciptakan proses pencelupan yang lebih ramah lingkungan. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk melibatkan bahan selain polyester dan eksplorasi metode optimalisasi lainnya guna mendapatkan hasil penghematan air yang paling optimal pada proses pencelupan.

DAFTAR PUSTAKA

Bai, T., Kobayashi, K., Tamura, K., Jun, Y., & Zheng, L. (2019). Supercritical CO₂ dyeing for nylon, acrylic, polyester, and casein buttons and their optimum dyeing conditions by design of experiments. *Journal of CO₂ Utilization*, 33, 253-261.

Banchero, M. (2020). Recent advances in supercritical fluid dyeing. *Coloration technology*, 136(4), 317-335.

de Oliveira, C. R. S., de Oliveira, P. V., Pellenz, L., de Aguiar, C. R. L., & da Silva Júnior, A. H. (2023). Supercritical fluid technology as a sustainable alternative method for textile dyeing: An approach on waste, energy, and CO₂ emission reduction. *Journal of Environmental Sciences*.

Elmaaty, T. A. (2021). Recent advances in textile wet processing using supercritical carbon dioxide. *Green Chemistry for Sustainable Textiles*, 279-299.

Elmaaty, T. A., & El-Aziz, E. A. (2018). Supercritical carbon dioxide as a green media in textile dyeing: a review. *Textile Research Journal*, 88(10), 1184-1212.

Huang, T., Kong, X., Cui, H., Zhang, T., Li, W., Yu, P., & Lin, J. (2019). Waterless dyeing of zipper tape using pilot-scale horizontal supercritical carbon dioxide equipment and its green and efficient production. *Journal of cleaner production*, 233, 1097-1105.

Mahmud, I., & Kaiser, S. (2020). Recent progress in waterless textile dyeing. *J. Text. Sci. Eng*, 10(6), 1-3.

Schulz, A. (2019). Supercritical carbon dioxide as a green media for simultaneous dyeing and functionalisation: A study on disperse dyeing and silicone functionalisation for water repellency of polyester fabric.

Xu, B., Tao, Y., & L. Yang, L. (2017). Research on a platform of quality traceability for the textile industry based on RFID and Internet of Things. IEEE International Conference on Smart.

Zaidy, S. S., Vacchi, F. I., Umbuzeiro, G. A., & Freeman, H. S. (2019). Approach to waterless dyeing of textile substrates—use of atmospheric plasma. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(40), 18478-18487.

Zheng, H., Zhong, Y., Mao, Z., & Zheng, L. (2018). CO₂ utilization for the waterless dyeing: Characterization and properties of Disperse Red 167 in supercritical fluid. *Journal of CO₂ Utilization*, 24, 266-273.