

**PENGARUH TEKANAN *CRADLE WINDING* TERHADAP
DENSITAS GULUNGAN BENANG CAMPURAN
*EFFECT OF CRADLE WINDING PRESSURE ON DENSITY OF
BLENDED YARN***

Fahmi Fawzy Rusman*, Nurfadilah Ikhsani, Andrian Wijayono, Reffli Ghandara
Akademi Komunitas Industri Tekstil dan Produk Tekstil Surakarta Surakarta, 57126,
Indonesia

*Penulis Korespondensi:

Alamat Email : fahmifawzr@ak-tekstilsolo.ac.id

Tanggal diterima: 11 Juni 2026, direvisi: 24 Juni 2026,
disetujui terbit: 08 September 2026

Abstrak

Meningkatnya pemanfaatan serat daun nanas (*pineapple leaf fiber* atau PALF) sebagai serat alam berkelanjutan mendorong pengembangan benang campuran dengan karakteristik yang berbeda dari benang kapas konvensional. Perbedaan sifat serat tersebut diperkirakan memengaruhi pembentukan struktur gulungan selama proses *winding*, khususnya densitas gulungan yang berperan penting terhadap stabilitas gulungan, proses *unwinding*, dan pencelupan. Namun, penelitian mengenai pengaruh tekanan *cradle winding* terhadap densitas gulungan benang campuran kapas–PALF serta penerapan *digital image processing* sebagai metode pengukuran dimensi masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi tekanan *cradle* pada proses *winding* terhadap densitas gulungan benang campuran kapas-serat daun nanas (PALF). Densitas gulungan merupakan parameter penting yang memengaruhi stabilitas struktur dan performa proses lanjutan, seperti pencelupan dan *unwinding*. Penelitian menggunakan rancangan eksperimen terkontrol dengan tiga variasi tekanan, yaitu 1,3 Bar, 2,1 Bar, dan 3,5 Bar. Pengukuran densitas dilakukan menggunakan pendekatan massa-volume, di mana volume ditentukan melalui metode *image processing* berbasis citra digital, sedangkan massa diukur secara langsung. Data dianalisis menggunakan statistik deskriptif, uji analisis varians satu arah (ANOVA), uji lanjut *Student–Newman–Keuls* SNK, serta regresi linier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan *cradle* secara signifikan meningkatkan densitas gulungan benang ($p < 0,05$). Nilai densitas rata-rata meningkat dari 0,3912 g/cm³ pada tekanan 1,3 Bar menjadi 0,5466 g/cm³ pada 3,5 Bar. Analisis regresi menunjukkan hubungan linier positif dengan koefisien determinasi sebesar 0,7598. Telah diperoleh kesimpulan bahwa tekanan *cradle* berperan penting dalam meningkatkan kekompakan struktur gulungan benang. Metode *image processing* juga terbukti efektif sebagai alternatif pengukuran dimensi gulungan secara non-kontak dan konsisten.

Kata kunci: Tekanan *cradle*, *Winding*, Densitas Gulungan Benang, Benang campuran, *Image processing*.

Abstract

The increasing use of pineapple leaf fiber (PALF) as a sustainable natural fiber has encouraged the development of blended yarns with characteristics that differ from those of conventional cotton yarns. These differences are expected to influence yarn package formation during the winding process, particularly package density, which plays a crucial role in package stability, unwinding performance, and package dyeing. However, studies investigating the effect of cradle pressure on the package density of cotton–PALF blended yarns and the application of digital image processing for dimensional measurement remain limited. Therefore, this study investigated the effect of cradle pressure variation in the winding process on the density of cotton–pineapple leaf fiber (PALF) blended yarn packages. Yarn package density is a critical parameter affecting package stability and downstream processes, including dyeing and unwinding. A controlled experimental design was applied using three pressure levels: 1.3 Bar, 2.1 Bar, and 3.5 Bar. Yarn Package density was determined using the mass to volume method, where mass was measured directly and volume was calculated through digital image processing. The experimental data were analyzed using descriptive statistics, one-way analysis of variance (ANOVA), Student–Newman–Keuls (SNK) post hoc test, and linear regression analysis. The results show that increasing cradle pressure significantly increases yarn package density ($p < 0.05$). The average density increased from 0.3912 g/cm^3 at 1.3 Bar to 0.5466 g/cm^3 at 3.5 Bar. Linear regression analysis revealed a strong positive linear relationship with a coefficient of determination (R^2) of 0.7598. It can be concluded that cradle pressure plays a significant role in improving yarn package compactness. The image processing method is also proven to be an effective non-contact approach for dimensional measurement with high consistency.

Keywords: Pressure cradle, Winding Process, Yarn Package Density, Blended Yarn, Image Processing.

PENDAHULUAN

Benang merupakan komponen utama dalam industri tekstil yang berperan penting dalam menentukan kualitas, performa, dan efisiensi dalam proses produksi produk akhir^{1,2}. Selain sifat mekanis benang, karakteristik gulungan benang (*yarn package*) dan diameter gulungan bobbin juga menjadi faktor krusial dalam mendukung kelancaran proses lanjutan, seperti *warping* dan *weaving*^{3–6}. Kualitas gulungan benang dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, salah satunya adalah kondisi pada tahap *winding*, yang berfungsi untuk membentuk gulungan dengan struktur yang stabil, *compact*, dan mudah diurai kembali (*unwinding*)^{7,8}. Salah satu parameter penting dalam proses

winding adalah tekanan *cradle*, yang terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik permukaan dan pembentukan struktur gulungan benang⁹. Tekanan ini menentukan tingkat kepadatan lapisan benang dalam gulungan, yang pada akhirnya memengaruhi densitas volume, kestabilan bentuk, serta efisiensi penyimpanan. Densitas gulungan merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kualitas *yarn package*, karena berkaitan dengan jumlah benang yang dapat dikemas dalam volume tertentu serta performa gulungan saat digunakan pada proses berikutnya^{1,3,4,8}.

Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa pengaturan parameter pada proses *winding*, khususnya tekanan *cradle* dan

tegangan benang, berperan krusial dalam meningkatkan densitas serta kepadatan gulungan⁹. Struktur gulungan yang stabil dan *compact* ini sangat penting untuk memastikan performa penguraian benang (*unwinding*) yang konsisten serta meminimalkan fluktuasi tegangan melalui pengendalian gaya kohesif pada gulungan benang⁷. Namun demikian, pengaturan parameter tersebut harus dilakukan secara optimal karena peningkatan tekanan dan kecepatan yang berlebih dapat memicu masalah pelepasan serat (*fibre-shedding*) akibat kerusakan pada bulu benang yang panjang⁹. Oleh karena itu, optimasi tekanan *cradle* menjadi faktor kunci dalam menghasilkan gulungan dengan stabilitas struktur yang baik tanpa merusak integritas serat benang.

Dalam konteks pemrosesan basah, densitas gulungan menjadi parameter kritis yang menentukan keberhasilan pencelupan yang merata (*levelness*). Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa densitas gulungan yang terlalu tinggi atau tidak seragam dapat menyebabkan fenomena *channelling*, di mana larutan celup hanya melewati jalur dengan hambatan terendah dan mengabaikan bagian gulungan yang lebih padat¹⁰. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa pada densitas tinggi (sekitar 0,4–0,5 kg/l) larutan celup lebih sulit untuk mengalir pada celah antar benang pada sebuah gulungan¹⁰. Pada densitas gulungan benang yang lebih rendah (sekitar 0,2 kg/l) akan menghasilkan celah yang cukup untuk larutan dapat mengalir di ruang antar benang¹⁰. Hasil tersebut secara signifikan menunjukkan bahwa permeabilitas gulungan benang pada proses pencelupan sangat dipengaruhi oleh densitas gulungan benang.

Di sisi lain, perhatian terhadap serat daun nanas (*pineapple leaf fiber* atau PALF) sebagai material tekstil

berkelanjutan semakin meningkat karena kandungan selulosanya yang tinggi dan kekuatan tarik (*tensile strength*) yang melampaui serat alami tradisional seperti linen¹¹. Sebagai limbah pertanian dengan ketersediaan melimpah, PALF menawarkan fungsionalitas unik berupa sifat antibakteri alami dan stabilitas termal yang baik¹¹. Penggunaan PALF dalam benang campuran bersama kapas diharapkan mampu mengoptimalkan performa mekanik sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular. Namun, struktur anatomi PALF yang kompleks dan keberadaan residu non-selulosa seperti lignin dan pektin menciptakan karakteristik permukaan yang berbeda dibandingkan serat kapas konvensional. Perbedaan morfologi ini, terutama dalam hal *hairiness* dan gaya kohesif antar serat, berpotensi memberikan respon yang berbeda terhadap parameter proses *winding* seperti *tekanan cradle* dan tegangan gulung, yang secara langsung memengaruhi pelepasan serat (*fibre-shedding*) serta stabilitas penguraian benang^{9,12}.

Meskipun telah banyak penelitian yang mengkaji parameter *winding* terhadap kualitas gulungan benang, sebagian besar studi masih berfokus pada benang konvensional berbasis kapas atau serat sintetis^{3,4}. Kajian yang secara khusus membahas pengaruh tekanan *cradle winding* terhadap densitas gulungan pada benang campuran berbasis serat daun nanas dan serat kapas masih sangat terbatas. Selain itu, kajian yang mengintegrasikan pendekatan pengukuran berbasis *image processing* untuk analisis dimensi gulungan benang dalam konteks variasi tekanan *cradle* juga belum banyak dilaporkan. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian terkait integrasi antara inovasi material serat alam,

parameter proses *winding*, dan metode pengukuran berbasis digital.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi tekanan *cradle winding* terhadap densitas gulungan benang campuran kapas-daun nanas, serta memberikan dasar dalam penentuan rentang tekanan *cradle* yang sesuai sebagai parameter proses untuk meningkatkan kualitas gulungan benang. Penelitian ini juga mengadopsi pendekatan pengukuran dimensi berbasis *image processing* untuk memperoleh estimasi densitas volume gulungan benang. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami hubungan antara parameter proses dan karakteristik gulungan pada benang campuran, serta menjadi dasar dalam optimasi proses *winding* untuk mendukung pengembangan produk tekstil berbasis material ramah lingkungan.

BAHAN DAN METODA

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi nilai tekanan *cradle* pada mesin *winding* terhadap densitas volume gulungan benang yang dihasilkan. Pendekatan yang digunakan adalah eksperimen terkontrol, di mana variabel bebas dimanipulasi secara langsung, sementara variabel lain dijaga konstan untuk meminimalkan pengaruh faktor luar terhadap hasil penelitian. Penelitian ini dilaksanakan di Workshop Pemintalan Akademi Komunitas Industri Tekstil dan Produk Tekstil Surakarta.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah nilai tekanan *cradle* yang diatur pada mesin *winding* dengan tiga variasi, yaitu 1,3 Bar, 2,1 Bar, dan 3,5 Bar. Ketiga nilai tekanan tersebut dipilih

karena menyesuaikan rentang yang tersedia pada mesin *winding* Savio Polar, yaitu pada rentang 0-4 Bar. Pemilihan tiga tingkat perlakuan dimaksudkan untuk memperoleh kecenderungan perubahan densitas gulungan akibat peningkatan tekanan *cradle* secara bertahap, sehingga hubungan antara tekanan dan densitas dapat dianalisis secara representatif tanpa meningkatkan kompleksitas eksperimen. Hasil yang diperoleh diharapkan menjadi dasar dalam penyusunan rentang tekanan *cradle* yang direkomendasikan untuk proses *winding*. Tekanan 1,3 Bar mewakili keadaan tekanan rendah, tekanan 2,1 Bar mewakili tekanan sedang, dan tekanan 3,5 Bar mewakili tekanan tinggi. Variabel terikat yang diamati adalah densitas volume gulungan benang yang dinyatakan dalam satuan gram/cm³. Sementara itu, variabel kontrol meliputi jenis benang yang digunakan, kondisi mesin *winding*, kecepatan proses penggulungan, serta kondisi lingkungan selama proses pengujian berlangsung. Spesifikasi benang yang digunakan dalam penelitian ini adalah Benang Campuran (65% *cotton fiber*-35% *pineapple leaf fiber*), bernomor benang Ne₁₆ dan berantihan 24,60 twist per inch, yang dibuat menggunakan sistem pemintalan *Open-End Spinning* dengan RPM rotor sebesar 55.000 putaran per menit. Penggunaan benang campuran kapas-daun nanas (*cotton-pineapple leaf fiber blended yarn*) dalam penelitian ini didasarkan pada potensi keberlanjutan material, mengingat serat daun nanas merupakan limbah pertanian yang belum dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, sistem pemintalan *open-end spinning* dipilih karena kemampuannya dalam

mengolah serat dengan variasi panjang dan sifat fisik yang heterogen. Penelitian dilakukan dengan menggunakan mesin *winding* Savio Polar yang dilengkapi dengan fitur pengaturan tekanan *cradle*. Pengukuran densitas gulungan benang dalam penelitian ini mengacu pada metode penentuan densitas berdasarkan rasio massa terhadap volume, di mana massa gulungan diukur secara langsung, sedangkan volume gulungan ditentukan berdasarkan pengukuran dimensi geometris. Mesin *winding* yang digunakan dilengkapi dengan sistem penekan *cradle* berbasis pneumatik yang memungkinkan pengaturan tekanan secara presisi melalui mekanisme *valve pressure*, sehingga variasi tekanan dapat dikontrol secara konsisten selama proses penggulungan berlangsung. Pengaturan tekanan *cradle* dilakukan dengan mengatur keran *pressure* sesuai pada Gambar 1. Gambar 2 menunjukkan ilustrasi dari pengaruh perubahan tekanan *cradle* terhadap tekanan pada cones pada proses penggulungan berdasarkan manual mesin Savio Polar.

Berbeda dengan metode konvensional yang menggunakan alat ukur manual seperti jangka sorong, penelitian ini menerapkan metode pengolahan citra digital (*digital image processing*) untuk menentukan dimensi geometris gulungan benang. Metode ini mengacu pada prosedur yang dikembangkan pada penelitian sebelumnya^{3,4}, di mana dimensi gulungan diperoleh melalui analisis citra digital dan selanjutnya digunakan untuk menghitung volume gulungan. Penggunaan metode ini memungkinkan pengukuran dilakukan secara non-kontak sehingga tidak memerlukan

kontak langsung antara alat ukur dan objek selama proses pengukuran. Pengambilan citra dilakukan dengan menggunakan webcam dengan posisi kamera tetap terhadap objek dan pencahayaan yang terkontrol. Citra digital diambil dari arah samping untuk memperoleh parameter tinggi gulungan (L) serta diameter luar (D1 dan D2) dan diameter dalam (d1 dan d2). Selanjutnya, citra dianalisis menggunakan perangkat lunak *AW Digital Image Processing* berbasis JAVA untuk menentukan dimensi gulungan dalam satuan piksel. Data citra yang diperoleh merepresentasikan penampang gulungan benang yang selanjutnya digunakan untuk menentukan dimensi geometris secara akurat.

Untuk memperoleh ukuran gulungan benang dalam satuan metrik (cm), dilakukan proses kalibrasi citra dengan menggunakan objek referensi yang telah diketahui dimensinya, sehingga diperoleh konstanta kalibrasi dalam satuan piksel/cm. Jarak antara objek dan kamera dibuat konstan yaitu pada jarak 40 cm untuk memperoleh variabel *perspective of depth* yang konstan untuk semua akuisisi citra digital. Nilai konstanta kalibrasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebesar $69,70 \pm 1,7$ piksel/cm (diperoleh dari 3 kali pengukuran). Dimensi dalam satuan piksel pada citra digital kemudian dikonversi menjadi satuan sentimeter menggunakan konstanta tersebut. Dimensi gulungan benang selanjutnya digunakan untuk menentukan volume gulungan pada sampel yang telah dibuat pada penelitian ini.

Sementara itu, massa gulungan benang diukur menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,01

gram. Massa netto benang diperoleh dengan mengurangi massa total gulungan dengan massa bobbin kosong. Kombinasi antara data dimensi hasil pengolahan citra digital dan massa hasil penimbangan digunakan untuk menghitung densitas gulungan benang berdasarkan pendekatan massa-volume sesuai dengan persamaan (2). Dengan pendekatan ini, densitas volume merepresentasikan tingkat kekompakan struktur gulungan benang sebagai hasil interaksi antara parameter proses dan karakteristik material.

Semua gulungan benang hasil proses winding tidak dikondisikan pada kondisi lingkungan terkontrol selama proses produksi. Namun, sebelum dilakukan pengukuran densitas, seluruh sampel terlebih dahulu menjalani proses pengondisian di ruang laboratorium pada suhu 27 ± 3 °C dan kelembaban relatif $80 \pm 5\%$ selama 6 jam. Proses pengondisian ini bertujuan untuk menyamakan kondisi kelembaban dan suhu pada seluruh sampel, sehingga meminimalkan pengaruh variasi lingkungan terhadap sifat fisik benang, khususnya massa dan dimensi gulungan. Dengan demikian, variasi densitas yang diamati diharapkan lebih merepresentasikan pengaruh tekanan *cradle* selama proses *winding*. Proses ini juga bertujuan untuk mencapai kondisi kesetimbangan kelembaban (*moisture equilibrium*) pada material benang sebelum dilakukan pengukuran.

Proses penelitian diawali dengan pengaturan tekanan *cradle* sesuai variasi yang telah ditentukan, kemudian dilakukan proses penggulungan benang hingga terbentuk gulungan berbentuk cones. Setiap variasi tekanan dilakukan pengulangan

sebanyak empat kali untuk memperoleh data yang lebih representatif. Selama proses *winding* berlangsung, parameter operasional lain dijaga konstan untuk meminimalkan pengaruh faktor dari luar.

Setelah proses penggulungan selesai, dilakukan pengukuran dimensi gulungan yang meliputi tinggi gulungan (L), diameter luar bagian atas (D1), diameter luar bagian bawah (D2), diameter dalam bagian atas (d1), serta diameter dalam bagian bawah (d2). Selain itu, berat netto benang pada setiap gulungan diukur menggunakan timbangan digital, di mana berat cones telah dikurangi terlebih dahulu.

Volume benang pada gulungan dihitung menggunakan pendekatan geometri kerucut terpancung berlubang (*hollow frustum*), yaitu dengan menghitung selisih antara volume bagian luar dan bagian dalam gulungan. Nilai volume yang diperoleh kemudian digunakan untuk menghitung densitas gulungan benang, yaitu dengan membagi berat netto benang terhadap volume gulungan. Dengan demikian, densitas mencerminkan tingkat kepadatan susunan benang dalam gulungan yang dipengaruhi oleh tekanan *cradle* selama proses *winding*. Perhitungan volume ini mengacu pada model matematis yang ditunjukkan pada persamaan (1) serta ilustrasi dimensi gulungan pada Gambar 3.

Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui kecenderungan nilai densitas pada setiap variasi tekanan, meliputi nilai rata-rata, simpangan baku, serta rentang data. Selain itu, analisis inferensial menggunakan uji ANOVA satu arah dilakukan untuk mengetahui signifikansi pengaruh variasi tekanan terhadap densitas

gulungan benang pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Sebelum dilakukan analisis ANOVA, dilakukan uji normalitas menggunakan metode Shapiro–Wilk dan uji homogenitas varians menggunakan metode Bartlett pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan dari hasil ANOVA, maka dilanjutkan dengan uji lanjut (*post-hoc test*) menggunakan metode *Student Newman Keuls* (SNK) untuk mengidentifikasi perbedaan antar perlakuan. Hasil analisis kemudian

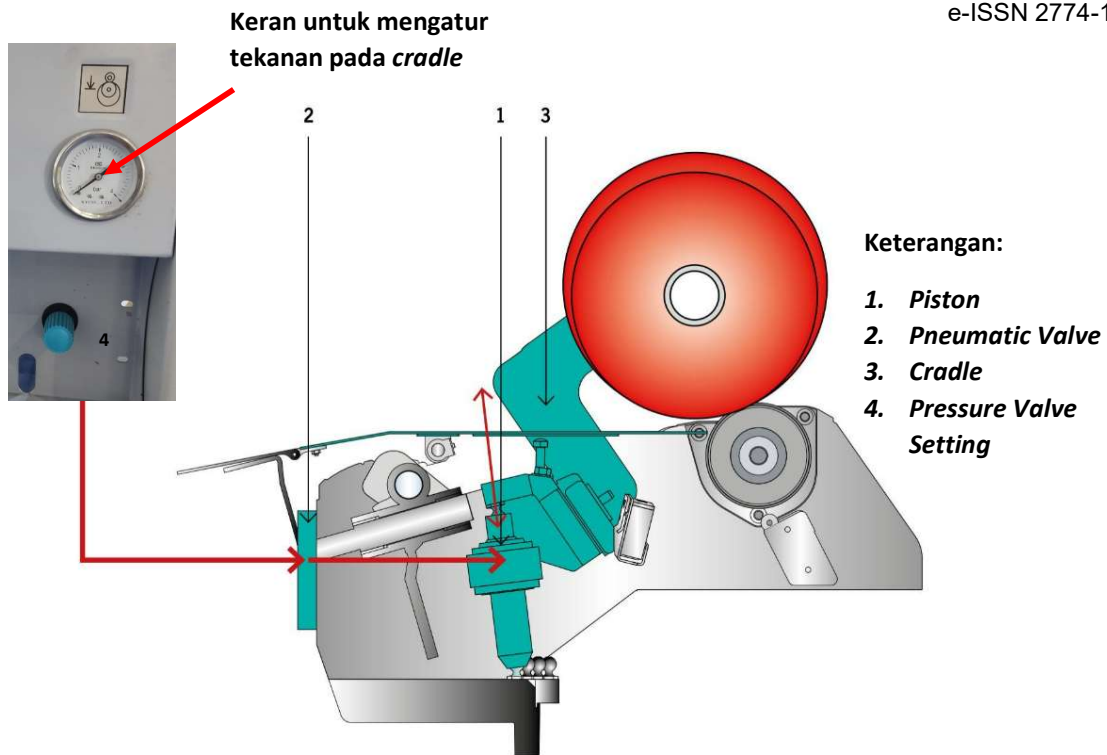
disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi hubungan antara tekanan *cradle* dan densitas gulungan benang. Analisis regresi dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari variabel bebas tekanan *cradle* terhadap variabel terikat densitas volume gulungan benang. Analisis digunakan untuk mengevaluasi kecenderungan perubahan densitas yang dipengaruhi oleh *pressure cradle*.

$$V = \frac{L\pi}{3} \left(\left(\frac{D1^2}{4} + \frac{D2^2}{4} + \frac{D1D2}{4} \right) - \left(\frac{d1^2}{4} + \frac{d2^2}{4} + \frac{d1d2}{4} \right) \right) \dots\dots\dots(1)$$

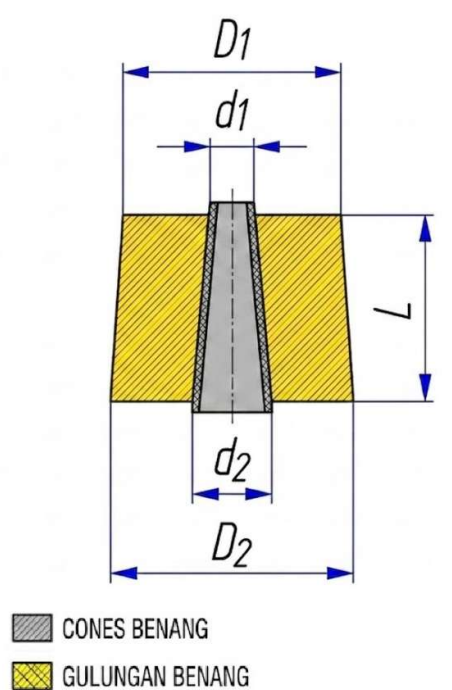
$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(2)$$



Gambar 1. Pengaturan tekanan *cradle* pada mesin *winding* Savio Polar



Gambar 2. Ilustrasi dari pengaruh perubahan tekanan *cradle* terhadap tekanan pada cones pada proses penggulungan berdasarkan manual mesin Savio Polar



Gambar 3. Ilustrasi Dimensi Gulungan Benang yang Digunakan Pada Perhitungan Densitas

HASIL

Pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran densitas volume gulungan benang pada tiga variasi tekanan *cradle*, yaitu 1,3 Bar, 2,1 Bar, dan 3,5 Bar. Setiap variasi tekanan menghasilkan sebanyak empat gulungan sampel benang sebagai bentuk dari pengulangan setiap tingkat taraf perlakuan. Pengukuran volume gulungan benang dilakukan melalui perhitungan pada persamaan (1). Dimensi geometris gulungan diperoleh menggunakan metode *image processing*, sedangkan massa netto benang diperoleh melalui penimbangan langsung. Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran dimensi ukuran dan volume dari sampel gulungan benang yang dihasilkan pada penelitian ini.

Nilai volume gulungan benang setiap sampel pada Tabel 1 digunakan sebagai dasar dari nilai perhitungan densitas gulungan benang. Tabel 2 memperlihatkan nilai massa netto dari setiap gulungan benang dan densitas volumenya berdasarkan perhitungan sesuai rumusan persamaan (2). Hasil rata-rata, nilai standar deviasi, nilai maksimum, dan nilai minimum densitas gulungan benang yang diperoleh untuk seluruh sampel gulungan benang yang dihasilkan pada penelitian ini dapat dilihat sesuai dengan Tabel 3. Dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan nilai rata-rata yang cenderung berubah naik seiring dengan kenaikan dari tekanan *cradle* pada mesin *winding*. Grafik pada Gambar 4 memperlihatkan perbandingan densitas volume untuk seluruh variasi tekanan *cradle* yang dihasilkan pada penelitian ini.

Sebelum dilakukan analisis ANOVA, dilakukan pengujian asumsi normalitas dan homogenitas varians. Hasil uji Shapiro–Wilk menunjukkan bahwa seluruh kelompok data memiliki distribusi normal ($p > 0,05$). Selanjutnya, hasil uji Bartlett menunjukkan bahwa varians antar

kelompok bersifat homogen ($p = 0,2711 > 0,05$). Hasil uji asumsi ANOVA dengan uji Shapiro–Wilk dan uji Bartlett dapat dilihat pada Tabel 4.

Untuk menguji signifikansi perbedaan tersebut, dilakukan analisis varians (ANOVA) satu arah terhadap data densitas gulungan benang. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa variasi tekanan *cradle* memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap densitas gulungan benang, dengan nilai F-hitung sebesar 23,36 dan nilai signifikansi (p-value) sebesar 0,00029 ($p < 0,05$). Nilai ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan rata-rata densitas yang nyata secara statistik di antara ketiga variasi tekanan yang diuji. Hasil analisis ANOVA nilai densitas gulungan benang antar variasi tekanan *cradle* dapat dilihat pada Tabel 5.

Analisis lebih lanjut menggunakan uji lanjut *Student-Newman-Keuls* (SNK) menunjukkan bahwa seluruh pasangan perlakuan memiliki perbedaan yang signifikan. Tekanan 1,3 Bar menghasilkan nilai densitas rata-rata terendah sebesar 0,3912 g/cm³, diikuti oleh tekanan 2,1 Bar sebesar 0,4896 g/cm³, dan tekanan 3,5 Bar menghasilkan densitas tertinggi sebesar 0,5466 g/cm³. Seluruh perbandingan antar kelompok (3,5 Bar dan 1,3 Bar; 2,1 Bar dan 1,3 Bar; dan 3,5 Bar vs 2,1 Bar) menunjukkan selisih rata-rata yang lebih besar dibandingkan nilai kritis, sehingga dinyatakan berbeda nyata secara statistik. Hasil analisis SNK nilai densitas gulungan benang antar variasi tekanan *cradle* dapat dilihat pada Tabel 6.

Selain itu, hubungan antara tekanan *cradle* dan densitas gulungan benang dianalisis menggunakan regresi linier sederhana. Hasil analisis menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel dapat dinyatakan sesuai dengan persamaan (3). dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,7598.

$$Y = 0,3221 + 0,0673X \dots\dots\dots(3)$$

Nilai ini menunjukkan bahwa sebesar 75,98% variasi densitas gulungan benang dapat dijelaskan oleh perubahan tekanan *cradle*, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Koefisien regresi sebesar 0,0673 menunjukkan bahwa setiap kenaikan tekanan sebesar 1 Bar diikuti oleh peningkatan densitas gulungan benang sebesar 0,0673 g/cm³.

Hasil regresi ini juga didukung oleh pola grafik hubungan antara

tekanan dan densitas (Gambar 5), yang menunjukkan kecenderungan peningkatan densitas secara konsisten seiring dengan bertambahnya tekanan *cradle*. Pengukuran dimensi ukuran dan volume dari sampel gulungan benang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil pengukuran dimensi ukuran dan volume dari sampel gulungan benang

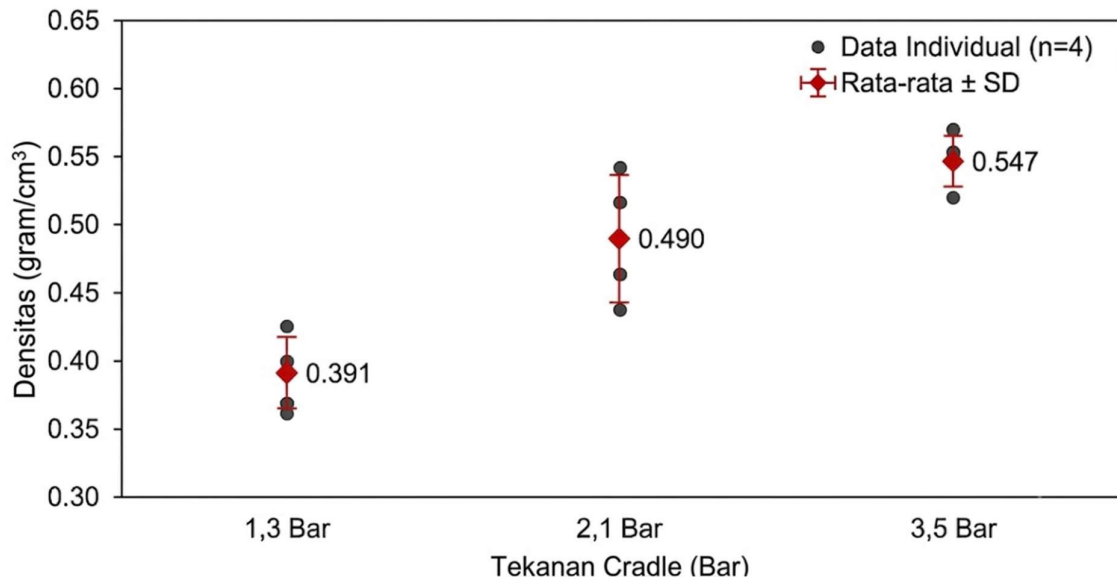
Tekanan <i>cradle</i>	Sampel	L (cm)	D1 (cm)	d1 (cm)	D2 (cm)	d2 (cm)	V (cm ³)
1,3 Bar	1	15,08	8,32	5,31	5,42	2,41	290,33
	2	15,12	8,43	5,42	5,43	2,44	289,67
	3	15,05	8,34	5,32	5,52	2,52	295,79
	4	15,03	8,32	5,34	5,41	2,45	290,33
2,1 Bar	5	15,01	7,98	5,31	5,02	2,42	227,69
	6	15,08	8,02	5,42	5,04	2,43	226,55
	7	15,13	7,91	5,35	5,12	2,57	232,67
	8	15,06	7,92	5,32	5,01	2,43	227,69
3,5 Bar	9	15,11	7,93	5,31	5,06	2,42	235,31
	10	15,02	7,92	5,32	5,17	2,54	240,36
	11	15,12	8,06	5,43	5,06	2,42	234,23
	12	15,03	7,90	5,31	5,19	2,53	240,36

Tabel 2 Nilai densitas gulungan benang setiap sampel berdasarkan nilai volume gulungan benang dan massa netto gulungan benang

Tekanan <i>cradle</i>	Sampel	V (cm³)	m (gram)	ρ (gram/cm³)
1,3 Bar	1	290,33	115,1	0,396
	2	289,67	108,2	0,374
	3	295,79	125,9	0,426
	4	290,33	107,2	0,369
2,1 Bar	5	227,69	105,5	0,463
	6	226,55	122,6	0,541
	7	232,67	101,9	0,438
	8	227,69	117,5	0,516
3,5 Bar	9	235,31	133,7	0,568
	10	240,36	132,9	0,553
	11	234,23	124,9	0,533
	12	240,36	127,9	0,532

Tabel 3 Hasil rata-rata, nilai standar deviasi, nilai maksimum, dan nilai minimum densitas gulungan benang yang diperoleh untuk seluruh sampel gulungan benang

Tekanan <i>cradle</i>	Densitas gulungan benang (gram/cm³)			
	$\bar{x}$	s	max	min
1,3 Bar	0,3912	0,0259	0,4256	0,3692
2,1 Bar	0,4896	0,0473	0,5412	0,438
3,5 Bar	0,5466	0,0173	0,5682	0,5321



Gambar 4. Grafik perbandingan densitas volume gulungan benang yang dihasilkan pada variasi tekanan *cradle winding*

Tabel 4 Hasil uji asumsi ANOVA

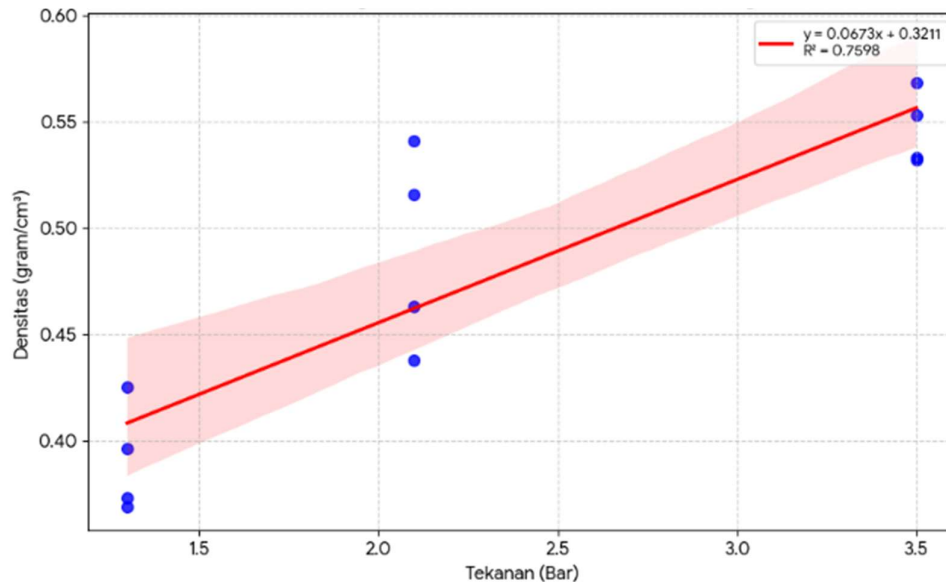
Pengujian	Statistik	p-value	Kesimpulan
Shapiro-Wilk	W = 0,9070	0,4668	Normal
Shapiro-Wilk	W = 0,9445	0,6821	Normal
Shapiro-Wilk	W = 0,8783	0,3314	Normal
Barlett	$\chi^2 = 2,611$	0,2711	Homogen

Tabel 5 Hasil analisis ANOVA nilai densitas gulungan benang antar variasi tekanan *cradle*

Sumber Variasi	Derajat Bebas (df)	Jumlah Kuadrat (SS)	Kuadrat Tengah (MS)	F-Hitung	P-Value
Antar Kelompok (Tekanan)	2	0,05041	0,02521	23,36	0,00029
Dalam Kelompok (Residu)	9	0,00971	0,00108	-	-
Total	11	0,06012	-	-	-

Tabel 6 Hasil analisis SNK nilai densitas gulungan benang antar variasi tekanan *cradle*

Perbandingan	Selisih Rata-rata	Nilai Kritis (W)	Hasil
3,5 Bar dan 1,3 Bar	0,1554	0,0648	Signifikan
2,1 Bar dan 1,3 Bar	0,0984	0,0525	Signifikan
3,5 Bar dan 2,1 Bar	0,057	0,0525	Signifikan



Gambar 5 Grafik analisis regresi linear untuk hubungan tekanan *cradle* terhadap densitas gulungan

PEMBAHASAN

Nilai densitas gulungan yang diperoleh pada penelitian ini berada pada rentang 0,3912–0,5466 g/cm³ (391–547 kg/m³). Rentang tersebut masih sebanding dengan densitas package benang yang dilaporkan pada penelitian sebelumnya. Koranne et al.⁸ melaporkan bahwa variasi parameter *winding* menghasilkan perubahan *package density* yang berkaitan dengan tingkat pemadatan lapisan benang dan geometri *package*. Selain itu, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *package density* sekitar 0,2–0,5 kg/L merupakan rentang yang umum dijumpai pada proses *package dyeing*¹⁰. Dengan demikian, densitas yang diperoleh pada penelitian ini

masih berada pada kisaran yang relevan untuk aplikasi industri, meskipun sebagian sampel pada tekanan 3,5 Bar telah melampaui batas atas rentang yang direkomendasikan untuk menjaga permeabilitas larutan pencelupan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan tekanan *cradle* dari 1,3 Bar menjadi 3,5 Bar menyebabkan peningkatan densitas gulungan benang secara konsisten. Hal ini mengindikasikan bahwa tekanan *cradle* berperan langsung dalam proses pemadatan struktur gulungan selama *winding*. Kecenderungan ini juga menunjukkan adanya hubungan fungsional antara tekanan dan tingkat kekompakan struktur benang, di mana

tekanan yang lebih tinggi menghasilkan susunan benang yang lebih rapat. Kecenderungan peningkatan ini diperoleh dari data hasil pengukuran yang dilakukan melalui pendekatan massa-volume, di mana volume dihitung berdasarkan dimensi geometris gulungan hasil pengolahan citra digital dan massa diperoleh melalui penimbangan langsung, sehingga hubungan yang diamati merepresentasikan kondisi fisik aktual dari gulungan benang yang dihasilkan. Temuan ini diperkuat oleh hasil analisis ANOVA yang menunjukkan bahwa variasi tekanan memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap densitas ($p < 0,05$), sehingga perbedaan yang diamati bukan sekadar variasi acak, melainkan benar-benar disebabkan oleh perlakuan tekanan yang diberikan.

Clark et al.⁷ menjelaskan bahwa peningkatan tekanan kontak selama proses *winding* menghasilkan gaya radial yang lebih besar pada lapisan benang, sehingga meningkatkan tingkat pemadatan (*package compaction*) dan mengurangi ruang kosong (*void space*) di dalam gulungan. Mekanisme tersebut menyebabkan struktur gulungan menjadi lebih rapat dan stabil. Hasil penelitian ini menunjukkan kecenderungan yang sejalan, di mana peningkatan tekanan *cradle* diikuti oleh peningkatan densitas gulungan benang. Oleh karena itu, peningkatan densitas pada penelitian ini diduga berkaitan dengan meningkatnya gaya radial yang memperbesar pemadatan lapisan benang selama proses *winding*, meskipun mekanisme tersebut tidak diamati secara langsung dalam penelitian ini.

Penurunan volume gulungan dari 291,53 cm³ pada tekanan 1,3 Bar menjadi sekitar 228–240 cm³ pada tekanan yang lebih tinggi menunjukkan adanya proses pemadatan gulungan

benang yang signifikan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa perubahan densitas tidak hanya dipengaruhi oleh penambahan massa, tetapi juga oleh perubahan geometri gulungan akibat tekanan. Pada tekanan rendah, struktur gulungan cenderung lebih “bulky” dengan distribusi benang yang kurang rapat, sedangkan pada tekanan tinggi terjadi redistribusi posisi benang ke arah yang lebih padat. Namun demikian, pada tekanan 3,5 Bar terjadi peningkatan massa netto benang yang cukup signifikan, yang menunjukkan bahwa kapasitas penggulungan juga meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa tekanan tidak hanya memadatkan struktur, tetapi juga memungkinkan lebih banyak benang terakumulasi dalam volume yang relatif terbatas. Perubahan geometri ini dihitung menggunakan rumusan pada persamaan (1) berdasarkan parameter dimensi L, D1, D2, d1, dan d2 yang diperoleh dari citra digital gulungan benang, sehingga analisis volume yang dihasilkan memiliki dasar geometris yang jelas dan konsisten antar sampel. Pendekatan pengukuran berbasis *image processing* yang digunakan juga memberikan keunggulan dalam konsistensi pengukuran dimensi, sehingga perubahan volume yang diamati lebih merepresentasikan perubahan aktual akibat perlakuan tekanan dibandingkan kesalahan pengukuran manual.

Nilai simpangan baku yang relatif kecil pada tekanan 3,5 Bar menunjukkan bahwa proses penggulungan menjadi lebih stabil dan konsisten pada tekanan tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh meningkatnya gaya kontak antara gulungan dan elemen penekan, sehingga posisi benang selama proses penggulungan menjadi lebih terkendali. Sebaliknya, variasi yang lebih besar pada tekanan 2,1 Bar mengindikasikan adanya kondisi transisi, di mana tekanan yang

diberikan belum cukup tinggi untuk menghasilkan struktur yang benar-benar stabil, namun sudah cukup memengaruhi distribusi benang. Kondisi ini menyebabkan sensitivitas terhadap gangguan kecil dalam proses, seperti fluktuasi tegangan benang atau ketidakseragaman suplai benang. Selain itu, meskipun parameter proses utama telah dikontrol, variasi antar sampel masih mungkin terjadi akibat distribusi massa benang yang tidak sepenuhnya homogen selama proses *winding*, yang merupakan karakteristik umum pada proses penggulungan benang secara industri. Hal ini juga selaras dengan hasil uji lanjut SNK yang menunjukkan bahwa setiap tingkat tekanan memiliki perbedaan yang signifikan satu sama lain, sehingga setiap level tekanan menghasilkan karakteristik densitas yang benar-benar berbeda dan tidak saling tumpang tindih secara statistik. Nilai densitas tertinggi pada kelompok 2,1 Bar diperoleh pada Sampel 6 ($0,541 \text{ g/cm}^3$). Meskipun nilainya mendekati rentang densitas pada kelompok 3,5 Bar, pemeriksaan terhadap distribusi data menunjukkan bahwa nilai tersebut masih berada dalam rentang variasi yang wajar dan tidak memenuhi kriteria sebagai outlier statistik. Temuan ini memperkuat indikasi bahwa tekanan 2,1 Bar merupakan zona transisi yang menghasilkan variasi pemadatan gulungan lebih besar dibandingkan tekanan rendah maupun tekanan tinggi. Selain faktor-faktor proses yang telah disebutkan, variasi antar sampel juga mungkin dipengaruhi oleh kondisi lingkungan selama proses *winding*, mengingat benang campuran kapas-PALF memiliki sifat higroskopis yang sensitif terhadap perubahan suhu dan kelembapan udara. Meskipun seluruh sampel telah dikondisikan pada suhu $27 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ dan kelembapan relatif $80 \pm 5\%$ selama 6 jam sebelum pengukuran, proses pengondisian tersebut terutama

bertujuan untuk menyeragamkan kondisi pengukuran dan belum tentu sepenuhnya menghilangkan pengaruh lingkungan yang terjadi selama pembentukan gulungan. Oleh karena itu, variasi suhu dan kelembapan selama proses produksi merupakan salah satu keterbatasan penelitian yang berpotensi berkontribusi terhadap variasi densitas yang diamati antar sampel.

Dari sudut pandang proses, fenomena ini menunjukkan bahwa terdapat rentang tekanan optimum dalam proses *winding*. Tekanan yang terlalu rendah menghasilkan gulungan dengan struktur longgar dan kurang stabil, yang berpotensi menyebabkan deformasi selama penyimpanan atau transportasi. Sebaliknya, tekanan yang terlalu tinggi dapat menghasilkan struktur yang terlalu padat, yang berpotensi menurunkan permeabilitas fluida pada proses lanjutan seperti pencelupan (*yarn dyeing*) atau *finishing*. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian Heane et al.¹⁰, densitas gulungan yang diperoleh pada tekanan 2,1 Bar sebesar $0,4896 \text{ g/cm}^3$ ($0,4896 \text{ kg/L}$) berada tepat pada batas atas rentang densitas $0,4\text{--}0,5 \text{ kg/L}$ yang dilaporkan masih memungkinkan aliran larutan pencelupan berlangsung secara efektif. Sementara itu, densitas pada tekanan 3,5 Bar sebesar $0,5466 \text{ g/cm}^3$ ($0,5466 \text{ kg/L}$) telah melampaui rentang tersebut. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan *cradle* memang mampu meningkatkan kekompakan gulungan, tetapi pada saat yang sama berpotensi menurunkan permeabilitas terhadap larutan pencelupan akibat berkurangnya ruang antar benang. Oleh karena itu, apabila gulungan benang akan digunakan untuk proses *package dyeing*, tekanan 2,1 Bar dapat dipertimbangkan sebagai kompromi antara peningkatan densitas dan pemeliharaan permeabilitas gulungan.

Sebaliknya, tekanan 3,5 Bar lebih sesuai apabila prioritas utama adalah stabilitas mekanik dan kapasitas pengemasan, meskipun diperlukan pengujian lanjutan terhadap performa pencelupan untuk memastikan tidak terjadi fenomena *channelling* maupun ketidakrataan warna. Oleh karena itu, pemilihan tekanan *cradle* harus mempertimbangkan keseimbangan antara kekompakan struktur dan kebutuhan proses selanjutnya. Hal ini menjadi penting dalam konteks industri, karena densitas gulungan berpengaruh langsung terhadap efisiensi proses lanjutan, kualitas penetrasi zat warna, serta kestabilan bentuk gulungan selama penanganan material. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan dasar kuantitatif bagi penentuan parameter proses yang optimal dalam industri winding, khususnya dalam mengontrol kualitas gulungan berbasis densitas.

Selain itu, karakteristik material benang juga berperan penting dalam menentukan respon terhadap tekanan. Benang campuran kapas–daun nanas memiliki kecenderungan struktur yang lebih kaku dibandingkan benang kapas murni, akibat kontribusi serat daun nanas yang memiliki modulus lebih tinggi¹². Sifat ini menyebabkan benang memiliki resistensi yang lebih besar terhadap deformasi, sehingga memerlukan tekanan yang lebih tinggi untuk mencapai tingkat kompaksi yang sama. Di sisi lain, kekakuan ini juga dapat meningkatkan stabilitas struktur gulungan pada tekanan tinggi, sehingga densitas yang dihasilkan menjadi lebih konsisten. Selain itu, penggunaan sistem pemintalan *open-end spinning* dengan karakteristik distribusi serat yang relatif heterogen juga dapat memengaruhi cara benang merespons tekanan selama proses penggulungan, terutama dalam hal distribusi tegangan dan kemampuan deformasi antar lapisan benang.

Karakteristik ini juga dapat menjelaskan mengapa respons densitas terhadap tekanan tidak sepenuhnya linier, karena interaksi antar serat dalam benang campuran memiliki kompleksitas yang lebih tinggi dibandingkan benang homogen.

Lebih lanjut, hubungan antara tekanan dan densitas yang menunjukkan tren meningkat namun tidak sepenuhnya linier mengindikasikan bahwa terdapat faktor lain yang turut memengaruhi hasil, seperti distribusi massa benang dalam gulungan, variasi kecil pada dimensi geometris, serta interaksi antar serat dalam benang campuran. Hal ini sejalan dengan nilai koefisien determinasi yang tidak mencapai 1, yang menunjukkan bahwa meskipun tekanan merupakan faktor dominan, masih terdapat kontribusi faktor lain dalam menentukan densitas gulungan. Faktor-faktor tersebut dapat mencakup kondisi lingkungan selama proses produksi sebelum pengondisian, variasi mikro pada hasil pengukuran dimensi berbasis citra digital, serta karakteristik kontak antara benang dan permukaan gulungan selama proses winding yang bersifat dinamis. Nilai koefisien determinasi sebesar 0,7598 menunjukkan bahwa sekitar 75,98% variasi densitas dapat dijelaskan oleh tekanan *cradle*, sementara 24,02% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dimasukkan ke dalam model. Pada proses *winding*, densitas gulungan tidak hanya dipengaruhi oleh tekanan *cradle*, tetapi juga oleh karakteristik benang, seperti variasi diameter, ketidakrataan benang (*yarn unevenness*), kekakuan benang, distribusi tegangan benang selama penggulungan, serta variasi pembentukan lapisan gulungan (*package build*) yang secara alami terjadi selama proses *winding*. Oleh karena itu, meskipun tekanan *cradle* merupakan faktor dominan, masih

terdapat variasi yang berasal dari karakteristik material dan proses yang tidak dikendalikan secara eksplisit dalam model regresi. Selain itu, meskipun hubungan antara tekanan *cradle* dan densitas menunjukkan kecenderungan positif, penelitian ini menggunakan model regresi linier karena tujuan utama analisis adalah mengevaluasi arah dan besarnya pengaruh tekanan *cradle*, bukan mengembangkan model prediksi yang paling optimum. Nilai koefisien regresi sebesar $0,0673 \text{ g/cm}^3$ per Bar menunjukkan sensitivitas densitas terhadap perubahan tekanan, yang memberikan indikasi kuantitatif mengenai seberapa besar peningkatan densitas yang dapat diharapkan untuk setiap kenaikan tekanan dalam proses *winding*.

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada jumlah ulangan yang digunakan, yaitu empat sampel untuk setiap tingkat tekanan *cradle*. Jumlah ulangan tersebut ditentukan berdasarkan ketersediaan benang campuran kapas–PALF yang terbatas selama pelaksanaan eksperimen. Meskipun hasil analisis menunjukkan perbedaan yang signifikan antar perlakuan, jumlah sampel yang relatif kecil dapat membatasi generalisasi hasil penelitian terhadap kondisi proses yang lebih luas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah ulangan yang lebih besar untuk meningkatkan kekuatan statistik serta memperoleh estimasi variabilitas proses yang lebih representatif.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan *cradle* merupakan parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap pembentukan densitas gulungan benang campuran

kapas–PALF. Peningkatan tekanan *cradle* menghasilkan gulungan yang semakin *compact*, yang berpotensi meningkatkan stabilitas gulungan pada proses penanganan berikutnya. Dalam rentang tekanan yang diuji, yaitu 1,3–3,5 bar, tekanan 3,5 bar menghasilkan densitas gulungan tertinggi sehingga dapat dijadikan acuan awal dalam pengaturan tekanan *cradle* pada proses *winding*. Selain itu, penelitian ini menunjukkan bahwa metode *digital image processing* dapat diterapkan sebagai teknik non-kontak untuk memperoleh dimensi gulungan dalam perhitungan densitas. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan pemahaman mengenai pengaruh parameter proses *winding* terhadap densitas gulungan, tetapi juga menunjukkan potensi penerapan metode digital dalam analisis karakteristik gulungan benang.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat mengkaji lebih lanjut rentang tekanan *cradle* yang lebih luas untuk menentukan nilai tekanan optimum yang tidak hanya menghasilkan densitas tinggi, tetapi juga tetap mempertahankan permeabilitas gulungan yang baik untuk proses lanjutan seperti pencelupan dan *finishing*. Hal tersebut juga dapat ditujukan untuk membuktikan konsistensi hubungan antara tekanan *cradle* dan densitas gulungan benang yang memiliki hubungan saling memengaruhi ke arah positif. Penelitian lanjutan juga disarankan untuk mengeksplorasi variasi komposisi campuran serat, khususnya perbandingan antara kapas dan serat daun nanas, guna mengetahui pengaruh karakteristik material terhadap respons terhadap tekanan selama proses penggulungan. Hal ini penting mengingat sifat mekanik dan

morfologi serat sangat berperan dalam menentukan perilaku benang selama proses winding. Di sisi metodologi, pengembangan sistem *image processing* yang lebih terintegrasi dan otomatis juga perlu dilakukan, misalnya dengan penerapan *computer vision* berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi pengukuran dimensi gulungan secara *real-time*. Selain itu, validasi metode ini terhadap standar pengukuran industri juga menjadi langkah penting untuk

meningkatkan tingkat kepercayaan dan penerapannya dalam skala industri. Disarankan agar penelitian selanjutnya tidak hanya berfokus pada parameter densitas, tetapi juga mengkaji hubungan antara densitas gulungan dengan performa aktual pada proses lanjutan, seperti kestabilan tegangan benang pada proses *unwinding*, kualitas pencelupan, dan tingkat cacat produksi, sehingga hasil penelitian dapat memberikan kontribusi yang lebih aplikatif bagi industri tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Rusman, F. F. et al. Analisis Pengaruh Jumlah Rangkaian dan Pemberian Twist terhadap Sifat Mekanis Benang Kapas Murni: Analisis Menggunakan Anova. *Jurnal Penelitian Inovatif* 5, 889–900 (2025).
2. Hossain, M. A. et al. Investigations of the spinning consistency index (SCI) and its impact on yarn quality. *Research Journal of Textile and Apparel* 30, 102–115 (2026).
3. Wijayono, A. et al. PENGARUH KECEPATAN DELIVERY ROLL TERHADAP NILAI DENSITAS VOLUME GULUNGAN BENANG RANGKAP PADA PROSES DOUBLING. *CENDEKIA: Jurnal Ilmu Pengetahuan* 5, 833–845 (2025).
4. Pradifta, R. A. et al. STUDI PENGUKURAN DENSITAS GULUNGAN BENANG DENGAN METODE PENGOLAHAN CITRA DIGITAL. *Jurnal Teknik SILITEK* 5, 363–373 (2025).
5. Celik, O. & Eren, R. Experimental Investigation of the Relationship Between the Yarn Tension and Bobbin Diameter in the Warping Process. *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 27, 23–31 (2019).
6. Cooray, T. M. J. A. & Fernando, S. The non-linear dynamics of over-end unwinding yarn package: theory and experiment. *J. Natl. Sci. Found.* 35, 219 (2007).
7. Clark, J. D. et al. Modelling of tension in yarn package unwinding. *J. Eng. Math.* 40, 59–75 (2001).
8. Koranne, M. V. et al. Influence of winding parameters on yarn content and package geometry of wound packages. *Indian J. Fibre Text. Res.* 44, 492–496 (2019).
9. Ghosh, S. & Bhowmick, N. Contribution of cone-winding operation to the fibre-shedding behaviour of cotton yarn during knitting. *Journal of the Textile Institute* 100, 64–75 (2009).
10. HEANE, D. G. et al. Package Dyeing of Acrylic Fibre Yarn: Important Parameters which Influence Level Dyeing. *Journal of the Society of Dyers and Colourists* 95, 125–142 (1979).
11. Liao, S. et al. An Update on Pineapple Leaf Fibers. *Journal of Natural Fibers* 22, (2025). Jose, S. et al. (2016). An Overview on Production, Properties, and Value Addition of Pineapple Leaf Fibers (PALF). *Journal of Natural Fibers*, 13(3), 362–373. <https://doi.org/10.1080/15440478.2015.1029194>.