

**ANALISIS RASIO *Twist* TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN
MULUR BENANG GINTIR**
*ANALYSIS OF TWIST RATIO ON THE TENSILE STRENGTH AND
ELONGATION OF PLY YARN*

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

*Penulis Korespondensi:

Alamat Email : refflighandara@kemenperin.go.id

Tanggal diterima: 21 Mei 2026, direvisi: 23 Juni 2026,
disetujui terbit: 08 September 2026

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio *twist* terhadap sifat mekanik benang gintir yang meliputi kekuatan tarik, *tenacity*, dan mulur. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif terkontrol dengan benang *staple* campuran 65% *pineapple leaf fiber* (PALF) dan 35% kapas pada dua variasi nomor benang, yaitu Ne 14,56 dan Ne 19,50, dengan variasi rasio *twist* 0,34–0,76. Pengujian tarik dilakukan dengan 25 ulangan untuk setiap variasi, dan data dianalisis menggunakan ANOVA dua arah serta regresi linier. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio *twist* secara signifikan meningkatkan kekuatan tarik, *tenacity*, dan mulur pada kedua jenis benang. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa rasio *twist* dan interaksinya dengan nomor benang berpengaruh sangat signifikan terhadap *tenacity* dan mulur ($p < 0,0001$), sedangkan nomor benang tidak berpengaruh signifikan terhadap mulur secara independen. Analisis regresi menunjukkan hubungan linier positif dengan koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 > 0,79$). Tidak ditemukan kondisi *over-twist* dalam rentang pengujian, yang menunjukkan bahwa rasio hingga 0,75 masih berada dalam kondisi efektif untuk meningkatkan sifat mekanik benang. Temuan ini memperkuat peran rasio *twist* tidak hanya sebagai parameter proses, tetapi juga sebagai variabel desain struktural dalam optimasi performa mekanik benang gintir berbasis serat alam.

Kata kunci : rasio *twist*, benang gintir, *tenacity*, mulur, *pineapple leaf fiber*.

Abstract

This study aims to analyze the effect of twist ratio on the mechanical properties of ply yarn, including tensile strength, tenacity, and elongation at break. A controlled quantitative experimental approach was employed using staple yarn composed of 65% pineapple leaf fiber (PALF) and 35% cotton, with two yarn counts (Ne 14.56 and Ne 19.50) and twist ratio variations ranging from 0.34 to 0.76. Tensile testing was conducted with 25 repetitions for each variation, and the data were analyzed using two-way ANOVA and linear regression. The results indicate that increasing the twist ratio significantly improves tensile strength, tenacity, and elongation at break for both

yarn types. ANOVA results show that twist ratio and its interaction with yarn count have a highly significant effect on tenacity and elongation ($p < 0.0001$), while yarn count does not significantly affect elongation independently. Linear regression analysis reveals a strong positive relationship with high coefficients of determination ($R^2 > 0.79$). No over-twist condition was observed within the studied range, indicating that a twist ratio up to 0.75 remains effective in enhancing mechanical properties. These findings highlight that twist ratio functions not only as a process parameter but also as a structural design variable for optimizing the mechanical performance of natural fiber-based ply yarns.

Keywords: *twist ratio, ply yarn, tenacity, elongation at break, pineapple leaf fiber.*

PENDAHULUAN

Benang merupakan elemen fundamental dalam struktur tekstil yang sangat menentukan kualitas dan performa produk akhir, khususnya dalam kaitannya dengan sifat mekanik seperti kekuatan tarik dan elastisitas¹. Salah satu parameter utama yang mempengaruhi sifat tersebut adalah *twist* atau puntiran, yang berfungsi meningkatkan kohesi antarserat sehingga benang mampu menahan beban tarik secara optimal^{2,3}. Secara struktural, kinerja mekanik benang sangat dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu kohesi antarserat dan orientasi serat terhadap sumbu benang, di mana peningkatan *twist* cenderung meningkatkan kohesi namun dapat mengurangi kesejajaran serat². Tingkat *twist* yang diberikan pada benang akan mempengaruhi orientasi serat⁴, tingkat keterikatan antarserat, serta stabilitas struktur benang secara keseluruhan^{5,6}. Dalam praktik industri tekstil, *single yarn* sering kali belum mampu memenuhi kebutuhan kekuatan dan kestabilan tertentu, sehingga dilakukan proses lanjutan berupa *plying*, yaitu penggabungan dua atau lebih *single yarn* menjadi satu benang gintir^{5,7}. Proses ini tidak hanya bertujuan meningkatkan kekuatan tarik, tetapi juga memperbaiki keseragaman struktur, kestabilan dimensi, serta karakteristik deformasi benang⁸. Pada benang gintir, struktur serat mengalami redistribusi orientasi akibat adanya

puntiran berlawanan, sehingga sebagian serat menjadi lebih sejajar terhadap sumbu benang dan menghasilkan kombinasi kohesi dan orientasi yang lebih seimbang dibandingkan *single yarn*^{3,7,8}. Namun demikian, keberhasilan proses *plying* sangat dipengaruhi oleh parameter proses yang digunakan, salah satunya adalah rasio *twist*⁸.

Rasio *twist* merupakan perbandingan antara jumlah *twist* pada benang gintir terhadap *twist* pada benang *single*, yang berperan penting dalam menentukan tingkat kekompakan struktur dan interaksi antarstrand dalam benang gintir⁸. Secara teoritis, perilaku ini dapat dijelaskan melalui pendekatan geometri heliks, di mana serat membentuk lintasan spiral terhadap sumbu benang. Dalam pendekatan ini, kondisi optimum terjadi ketika orientasi serat mendekati sejajar dengan sumbu benang gintir, yang secara matematis dicapai ketika *twist* benang gintir mendekati setengah dari *twist* benang *single* (rasio sekitar 0,5)⁸. Rasio *twist* yang terlalu rendah dapat menyebabkan ikatan antarbenang *single* kurang optimal sehingga menurunkan kekuatan benang gintir, sedangkan rasio yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan kekakuan serta mengubah orientasi serat menjadi kurang efektif dalam menahan beban tarik⁸. Oleh karena itu, pemilihan rasio *twist* yang tepat menjadi

kunci dalam optimasi sifat mekanik benang gintir⁸.

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa peningkatan *twist* cenderung meningkatkan kekuatan tarik akibat meningkatnya kohesi antarserat (*wrapping*)^{2,3,7}. Namun demikian, peningkatan *twist* yang berlebihan juga dapat menyebabkan penurunan efisiensi orientasi serat terhadap arah beban (*fiber obliquity*), sehingga terdapat kecenderungan adanya batas optimum *twist*³. Pada tingkat *twist* yang tinggi, orientasi serat terhadap sumbu benang dapat menurun sehingga menyebabkan penurunan kekuatan tarik benang³.

Dalam beberapa studi, peningkatan rasio antara jumlah *twist* benang *single* dan benang gintir dalam rentang tertentu, seperti antara 1/3 hingga 3/4 dari *twist* benang *single*, menunjukkan hubungan linier positif terhadap peningkatan kekuatan tarik⁸. Peningkatan *twist* tidak selalu menghasilkan kenaikan kekuatan benang³.

Di sisi lain, perhatian terhadap penggunaan *pineapple leaf fiber* (PALF) sebagai material tekstil berkelanjutan terus meningkat karena serat ini memiliki kandungan selulosa tinggi, kekuatan tarik yang baik, serta karakteristik fungsional seperti sifat antibakteri alami dan stabilitas termal yang baik⁹. Selain berasal dari limbah pertanian yang melimpah, PALF juga dilaporkan memiliki kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan beberapa serat alam konvensional, sehingga berpotensi digunakan sebagai material penguat pada struktur benang campuran⁹. Penelitian sebelumnya sudah ada yang mengamati pengaruh respons dari nilai rasio *twist* benang *single* benang gintir pada material katun dan filamen poliester, namun pengamatan rasio *twist* pada material PALF belum banyak dikaji secara komprehensif, terutama dalam

mengevaluasi hubungan antara rasio *twist* dengan sifat mekanik, kualitas benang, dan potensi pemanfaatannya sebagai material tekstil berkelanjutan.^{3,8} Peneliti sebelumnya sudah ada yang mengamati pengaruh campuran dari benang bambu, kapas dan poliester, serta efek dari *twist* pada benangnya, namun belum membahas pengaruh dari jumlah *twist* saat dibentuk menjadi benang gintir¹⁰. Pengaruh dari kombinasi PALF dan kapas masih relatif terbatas, padahal karakteristik heterogen serat alam berpotensi menghasilkan respons mekanik yang berbeda terhadap variasi *twist*¹⁰. Khairunnisa et al (2024) pada penelitiannya menunjukan bahwa benang campuran PALF–kapas komposisi 2 : 4 memperoleh *tenacity* tertinggi dengan nilai 11,17 cN/tex. Hal itu kemungkinan disebabkan oleh perbedaan komposisi campuran serat, panjang serat, dan metode pemintalan yang digunakan. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam memahami bagaimana rasio *twist* berinteraksi dengan struktur benang campuran dalam menentukan performa mekanik secara menyeluruh.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh rasio *twist* terhadap sifat mekanik benang gintir yang meliputi kekuatan tarik, *tenacity*, dan mulur, menggunakan pendekatan eksperimen terkontrol. Penelitian ini menggunakan benang *staple* campuran 65% *pineapple leaf fiber* (PALF) dan 35% kapas dengan dua variasi nomor benang, yaitu Ne 14,56 dan Ne 19,50, untuk mengkaji pengaruh struktur benang terhadap respons mekanik akibat variasi rasio *twist*. Analisis dilakukan secara deskriptif dan inferensial menggunakan ANOVA dua arah serta regresi linier untuk mengevaluasi signifikansi pengaruh rasio *twist*, nomor benang, dan interaksi

keduanya terhadap sifat mekanik benang.

Melalui pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara rasio twist dan performa mekanik benang gintir, serta menjadi dasar dalam penentuan parameter proses yang optimal, khususnya dalam pembuatan benang gintir berbasis campuran serat alam seperti PALF-kapas. Selain itu, penelitian ini juga menempatkan rasio twist tidak hanya sebagai parameter proses, tetapi sebagai variabel desain dalam rekayasa struktur benang untuk mencapai performa mekanik yang diinginkan.

BAHAN DAN METODA

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen kuantitatif yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh rasio twist terhadap sifat mekanik benang gintir, khususnya kekuatan tarik dan mulur. 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 rasio twist, yaitu perbandingan antara twist benang gintir terhadap twist benang *single*. Variasi rasio twist yang digunakan adalah 0,35; 0,51; dan 0,76. Ketiga variasi tersebut dipilih untuk merepresentasikan kondisi twist rendah, sedang, dan tinggi dalam proses pembuatan benang gintir. Rasio twist dapat dihitung berdasarkan rumusan pada persamaan (1).

Variabel terikat yang diamati adalah sifat mekanik benang gintir yang meliputi kekuatan tarik (cN), *tenacity* (g/Tex), dan mulur (%). Sementara itu, variabel kontrol dalam penelitian ini meliputi jenis benang, nomor benang, arah twist, jumlah gintir (dua helai), serta parameter proses *plying* seperti tegangan benang dan kecepatan mesin yang dijaga konstan selama proses berlangsung untuk semua variasi keadaan. Nilai *tenacity* diperoleh melalui perhitungan sesuai dengan persamaan (2).

$$a = \frac{T_p}{T_s} \dots\dots\dots(1)$$

$$R_{yarn} = \frac{F}{tex} \dots\dots\dots(2)$$

dimana :

- a = rasio *twist* pada benang gintir
- T_p = jumlah *twist* yang terdapat pada benang gintir (TPM) .
- T_s = *twist* yang terdapat pada benang *single* (TPM).
- R_{yarn} = *tenacity* pada benang gintir (cN/Tex)
- F = merupakan hasil kekuatan tarik benang gintir (cN) dan

tex = merupakan densitas linear benang gintir dalam sistem Tex (gram/1000 meter).

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah benang *staple* hasil pemintalan dengan dua variasi nomor benang, yaitu Ne 19,50 dan Ne 14,56. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi dari bahan baku benang *staple* yang

digunakan pada penelitian ini. Bahan baku benang staple merupakan hasil produksi dari mesin *Open-End Spinning* Rieter R 60. Selanjutnya, benang *single* diproses menjadi *two-ply yarn* dengan arah *twist* berlawanan terhadap *twist* awal. Pemilihan dua nomor benang ini bertujuan untuk mengamati pengaruh struktur benang terhadap respon mekanik akibat variasi rasio *twist*.

Tahap pertama yang dilakukan adalah proses *doubling* untuk merangkap benang *single* menjadi ke

dalam bentuk benang rangkap. Proses *doubling* dilakukan dengan menggunakan mesin *doubling* tipe L-202SDI dengan pengaturan kecepatan dan pengaturan beban tegangan benang dibuat sama untuk semua variasi. Pada penelitian ini telah digunakan pengaturan kecepatan penggulungan sebesar 450 meter/menit dan besar *ring tension* pembebanan 10 gram. Benang dari hasil proses *doubling* dapat diproses lebih lanjut pada mesin twisting untuk diberi antihan.

Tabel 1 Spesifikasi bahan baku benang *staple* (benang *single*)

Parameter	Detail Spesifikasi	
Komposisi serat	65% <i>pineapple leaf fiber</i> (PALF) - 35% katun	
Sistem Pemintalan	Open-End Spinning (Rieter R 60)	
Nomor Benang (Ne_1)	$14,56 \pm 0,248$	$19,50 \pm 0,154$
Antihan Benang (TPM)	$521,50 \pm 9,11$	$615,40 \pm 11,77$
Arah Twist	Z	Z
Kecepatan Rotor (RPM)	55.000	55.000
Kecepatan Delivery (meter/menit)	105	90

Proses pembuatan benang gintir dilakukan menggunakan mesin *Two for One Twister* tipe LW-5E1SA dengan pengaturan *twist* arah S (berlawanan dengan arah *twist* benang *single*) dan jumlah *twist* sesuai rasio yang telah ditentukan. Selama proses *plying*, parameter operasional seperti tegangan benang, kecepatan putaran, dan kondisi mesin dijaga konstan untuk semua variasi keadaan. Pengaturan *twist* dilakukan dengan mengontrol jumlah puntiran per satuan panjang pada benang gintir sehingga sesuai dengan rasio yang diinginkan terhadap *twist* benang *single*.

Setelah proses pembuatan seluruh sampel benang gintir selesai, sampel dikondisikan di ruang laboratorium pada suhu 27 ± 3 °C dan

kelembaban relatif $80 \pm 5\%$ selama 5 jam hingga mencapai kondisi kesetimbangan kelembaban. Proses ini bertujuan untuk meminimalkan pengaruh variasi lingkungan terhadap sifat mekanik benang, sehingga hasil pengujian lebih merepresentasikan pengaruh rasio *twist*.

Pengujian sifat mekanik benang dilakukan menggunakan metode uji tarik benang sesuai standar pengujian tekstil. Parameter yang diukur meliputi kekuatan tarik maksimum, *tenacity*, dan mulur. Pengujian jumlah antihan benang dilakukan dengan menggunakan standar SNI ISO 17202:2010. Pengujian kekuatan tarik, *tenacity* dan mulur dilakukan dengan menggunakan standar SNI 7650:2010. Pengujian antihan dilakukan sebanyak

10 kali ulangan untuk setiap variasi, sedangkan pengujian kekuatan tarik dan mulur dilakukan sebanyak 25 kali ulangan untuk setiap variasi. Hal ini dilakukan untuk memperoleh data yang representatif dan mengurangi pengaruh variasi acak. Seluruh pengujian dilakukan dengan prosedur yang seragam untuk memastikan konsistensi hasil.

Data hasil pengujian kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui kecenderungan perubahan sifat mekanik benang terhadap variasi rasio *twist*. Analisis meliputi perhitungan nilai rata-rata, simpangan baku, serta rentang data pada masing-masing variasi. Selain itu, dilakukan analisis inferensial menggunakan ANOVA dua arah (*two-way ANOVA*) untuk mengetahui pengaruh rasio *twist*, nomor benang, serta interaksi keduanya terhadap sifat mekanik benang pada tingkat kepercayaan 95% ($\alpha = 0,05$). Sebelum uji ANOVA dilakukan, terlebih dahulu dilakukan uji asumsi berupa uji normalitas dan homogenitas varians. Apabila hasil ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok sampel, maka dilanjutkan dengan uji lanjut (*post-hoc test*) untuk mengetahui perbedaan antar variasi rasio *twist*. Apabila hasil ANOVA menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan ($p < 0,05$), maka dilakukan uji lanjut (*post-hoc test*) menggunakan metode *Student Newman Keuls* (SNK) pada taraf kepercayaan 95% untuk mengidentifikasi perbedaan nyata antar kelompok perlakuan. Metode SNK dipilih karena mampu membandingkan rerata antar kelompok secara bertahap (*stepwise comparison*) sehingga dapat mengelompokkan perlakuan yang

memiliki perbedaan signifikan maupun yang tidak berbeda nyata.

Selain itu, analisis regresi linier sederhana digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara rasio *twist* sebagai variabel bebas dan kekuatan tarik sebagai variabel terikat. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kecenderungan perubahan kekuatan tarik terhadap peningkatan rasio *twist* serta untuk menggambarkan hubungan fungsional antara kedua variabel tersebut. Hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi hubungan antara rasio *twist* dan sifat mekanik benang gintir.

HASIL

Ringkasan hasil pengujian dalam bentuk statistik deskriptif dapat dilihat pada Tabel 2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan tarik benang gintir meningkat seiring dengan kenaikan rasio *twist* pada benang Ne1 14,56 maupun benang Ne1 19,50. Rentang nilai kekuatan tarik pada masing-masing variasi rasio *twist* dapat dilihat pada Tabel 2. Pada benang Ne 19,50, kekuatan tarik berada pada kisaran 170,22-198,15 cN pada rasio *twist* 0,35, meningkat menjadi 250,79-287,81 Cn pada rasio 0,51, dan mencapai 374,24-419,12 cN pada rasio 0,76. Pola yang sama juga terlihat pada benang Ne 14,56, dengan kisaran kekuatan tarik 200,10-237,42 cN pada rasio 0,34, meningkat menjadi 301,01-329,22 cN pada rasio 0,51, dan mencapai 400,31-439,00 cN pada rasio 0,75.

Selain sifat kekuatan tarik, nilai *tenacity* juga menunjukkan tren peningkatan yang konsisten terhadap kenaikan rasio *twist*. Nilai *tenacity* untuk masing-masing variasi rasio *twist* juga dirangkum pada Tabel 2. Pada benang Ne 19,50, nilai *tenacity* meningkat dari

kisaran 2,10-2,44 g/Tex pada rasio 0,35 menjadi 3,09-3,55 g/Tex pada rasio 0,51, dan mencapai 4,63-5,17 g/Tex pada rasio 0,76. Sementara itu, pada benang Ne 14,56, *tenacity* meningkat dari 3,30-3,92 g/Tex pada rasio 0,34 menjadi 4,97-5,44 g/Tex pada rasio 0,51, dan mencapai 6,61-7,25 g/Tex pada rasio 0,75.

Untuk mempermudah perbandingan pengaruh rasio twist antar nomor benang, peningkatan *tenacity* juga disajikan dalam bentuk persentase berdasarkan nilai rata-rata pada setiap perlakuan, yang dapat dilihat pada Tabel 2. Pada benang Ne 14,56, peningkatan rasio twist dari 0,34 menjadi 0,51 menghasilkan kenaikan *tenacity* sebesar 44,72%, sedangkan peningkatan hingga rasio twist 0,75 menghasilkan kenaikan sebesar

91,94% dibandingkan rasio *twist* terendah. Sementara itu, pada benang Ne 19,50, peningkatan *tenacity* mencapai 48,66% pada rasio twist 0,51 dan meningkat menjadi 117,86% pada rasio twist 0,76 dibandingkan rasio twist terendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa benang Ne 19,50 memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap peningkatan rasio twist dibandingkan benang Ne 14,56. Meskipun demikian, secara absolut benang Ne 14,56 tetap menghasilkan nilai *tenacity* yang lebih tinggi pada seluruh variasi rasio twist. Temuan ini mengindikasikan bahwa rasio twist berperan penting dalam meningkatkan efisiensi struktur benang gintir melalui peningkatan kohesi antarserat dan interaksi antarstrand penyusun benang

Tabel 2 Statistik deskriptif sifat mekanik benang gintir pada berbagai rasio *twist*

Nomor Benang <i>Single</i> (Ne1)	Antihan Benang <i>Single</i> (TPM)	Antihan Benang Gintir (TPM)	Rasio <i>Twist</i>	Jumlah <i>Ply</i>	Sifat Mekanik Benang Gintir			
					Kekuatan Tarik (cN)	<i>Tenacity</i> (cN/Tex)	Mulur (%)	Persentase peningkatan <i>tenacity</i> (%)
14,56	615,40	207,50	0,34	2	217,97 ± 12,07	3,60 ± 0,20	5,05 ± 0,17	-
		311,60	0,51	2	315,64 ± 8,62	5,21 ± 0,14	5,88 ± 0,20	44,72
		464,30	0,75	2	418,47 ± 11,30	6,91 ± 0,19	6,53 ± 0,23	91,94
19,50	521,50	181,40	0,35	2	181,29 ± 8,82	2,24 ± 0,11	5,37 ± 0,19	-
		266,40	0,51	2	270,16 ± 11,57	3,33 ± 0,14	5,80 ± 0,23	48,66
		395,10	0,76	2	395,69 ± 13,42	4,88 ± 0,17	6,35 ± 0,21	117,86

Selain sifat kekuatan tarik, nilai *tenacity* juga menunjukkan tren peningkatan yang konsisten terhadap kenaikan rasio

twist. Nilai *tenacity* untuk masing-masing variasi rasio *twist* juga dirangkum pada Tabel 2. Pada benang

Ne 19,50, nilai *tenacity* meningkat dari kisaran 2,10-2,44 g/Tex pada rasio 0,35 menjadi 3,09-3,55 g/Tex pada rasio 0,51, dan mencapai 4,63-5,17 g/Tex pada rasio 0,76. Sementara itu, pada benang Ne 14,56, *tenacity* meningkat dari 3,30-3,92 g/Tex pada rasio 0,34 menjadi 4,97-5,44 g/Tex pada rasio 0,51, dan mencapai 6,61-7,25 g/Tex pada rasio 0,75.

Nilai mulur juga menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan bertambahnya rasio *twist*. Data mulur pada setiap variasi rasio *twist* dapat dilihat pada Tabel 2. Pada benang Ne 19,50, mulur berada pada kisaran sekitar 5,00-5,65% pada rasio rendah, meningkat menjadi sekitar 5,50-6,17% pada rasio sedang, dan mencapai sekitar 6,02-6,69% pada rasio tertinggi. Pada benang Ne 14,56,

mulur berkisar antara 4,80-5,36% pada rasio rendah, meningkat menjadi sekitar 5,54-6,20% pada rasio sedang, dan mencapai kisaran 6,23-6,94% pada rasio tertinggi.

Perbandingan antara kedua jenis benang menunjukkan bahwa benang dengan nomor lebih kecil (Ne₁ 14,56) secara konsisten memiliki kekuatan tarik dan *tenacity* yang lebih tinggi dibandingkan benang Ne₁ 19,50 pada setiap variasi rasio *twist*. Perbedaan ini juga tercermin pada nilai rata-rata yang disajikan pada Tabel 2. Hal ini juga diikuti oleh kecenderungan nilai mulur yang sedikit lebih tinggi pada benang Ne 14,56. Analisis varians (ANOVA) menunjukkan bahwa rasio *twist* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap *tenacity* dan mulur.

Tabel 3. Hasil uji ANOVA pengaruh rasio *twist* terhadap sifat *tenacity* benang

Sumber Keragaman	df	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Nomor Benang (Ne)	1	114,83	114,83	10.155,27	< 0,0001***
Rasio Twist	2	129,54	64,77	5.727,87	< 0,0001***
Interaksi (Ne * Rasio Twist)	2	4,37	2,18	193,42	< 0,0001***
Residual (Error)	144	1,63	0,011		

Hasil uji ANOVA untuk parameter *tenacity* yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa faktor nomor benang (Ne₁), rasio *twist*, serta interaksi antara keduanya memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap nilai *tenacity* ($p < 0,0001$). Hal ini menunjukkan bahwa baik variasi nomor benang maupun rasio *twist* secara independen maupun secara simultan berkontribusi terhadap perubahan nilai *tenacity* benang gintir. Secara lebih rinci, pengaruh nomor benang (Ne) menunjukkan nilai F yang sangat tinggi ($F = 10.155,27$), yang mengindikasikan adanya perbedaan yang nyata antara benang Ne 14,56 dan Ne₁ 19,50. Rata-rata nilai *tenacity* yang lebih tinggi pada benang Ne 14,56

sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 menguatkan hasil tersebut.

Pengaruh rasio *twist* juga menunjukkan signifikansi yang sangat tinggi ($F = 5.727,87$; $p < 0,0001$), yang berarti perubahan rasio *twist* memberikan kontribusi besar terhadap peningkatan *tenacity*. Tren peningkatan ini dapat diamati secara konsisten pada setiap level rasio *twist*, di mana nilai *tenacity* meningkat seiring dengan bertambahnya rasio *twist*.

Selain itu, interaksi antara nomor benang dan rasio *twist* juga terbukti signifikan ($F = 193,42$; $p < 0,0001$). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh rasio *twist* terhadap *tenacity* tidak bersifat seragam untuk setiap jenis benang. Dengan kata lain, respons peningkatan

tenacity akibat perubahan rasio *twist* bergantung pada nomor benang yang digunakan.

Hasil uji ANOVA untuk parameter mulur yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa rasio *twist* dan interaksi antara nomor benang dengan rasio *twist* memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap nilai mulur ($p < 0,0001$), sedangkan faktor nomor benang (Ne_1) secara independen tidak memberikan pengaruh yang signifikan ($p = 0,494$). Tidak signifikannya pengaruh nomor benang menunjukkan bahwa secara

umum perbedaan nilai mulur antara benang $Ne_{14,56}$ dan $Ne_{19,50}$ tidak cukup besar untuk dinyatakan berbeda secara statistik jika tidak mempertimbangkan faktor lain. Hal ini juga terlihat pada nilai rata-rata mulur pada Tabel 2 yang relatif berdekatan antar kedua jenis benang. Sebaliknya, rasio *twist* menunjukkan pengaruh yang sangat dominan terhadap mulur ($F = 449,70$; $p < 0,0001$). Peningkatan rasio *twist* secara konsisten diikuti oleh peningkatan nilai mulur pada kedua jenis benang.

Tabel 4. Hasil uji ANOVA pengaruh rasio *twist* terhadap sifat mulur benang

Sumber Keragaman	df	Sum of Squares	Mean Square	F-Value	P-Value
Nomor Benang (Ne)	1	0,02	0,02	0,47	0,494
Rasio Twist	2	37,756	18,878	449,7	$< 0,0001^*$
Interaksi ($Ne * Rasio Twist$)	2	1,652	0,826	19,67	$< 0,0001^*$
Residual (Error)	144	6,045	0,042		

Interaksi antara nomor benang dan rasio *twist* juga signifikan ($F = 19,67$; $p < 0,0001$), yang menunjukkan bahwa pola perubahan mulur akibat variasi *twist* berbeda untuk masing-masing nomor benang. Hal ini dapat diamati dari perbedaan kecenderungan nilai mulur pada setiap kombinasi perlakuan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Hasil analisis varians menunjukkan bahwa rasio *twist* memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap sifat mekanik benang gintir, khususnya pada parameter *tenacity* dan mulur ($p < 0,0001$). Selain itu, interaksi antara nomor benang dan rasio *twist* juga menunjukkan pengaruh yang signifikan, yang mengindikasikan bahwa respons perubahan sifat mekanik tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, tetapi oleh kombinasi keduanya.

Hasil uji lanjut menggunakan metode *Student Newman Keuls* (SNK)

untuk parameter *tenacity* yang disajikan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa seluruh kelompok perlakuan memiliki perbedaan yang signifikan satu sama lain. Setiap kombinasi nomor benang dan rasio *twist* berada pada kelompok yang berbeda, yang mengindikasikan bahwa peningkatan rasio *twist* memberikan perubahan nilai *tenacity* yang nyata pada setiap level perlakuan. Nilai rata-rata *tenacity* terendah terdapat pada kelompok $Ne_{19,50} - 0,34$, sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kelompok $Ne_{14,56} - 0,75$. Urutan kelompok yang terbentuk menunjukkan adanya peningkatan bertahap seiring dengan kenaikan rasio *twist*, baik pada benang $Ne_{19,50}$ maupun $Ne_{14,56}$. Selain itu, pada rasio *twist* yang sama, benang $Ne_{14,56}$ cenderung memiliki nilai *tenacity* yang lebih tinggi dibandingkan benang $Ne_{19,50}$.

Hasil uji lanjut SNK untuk parameter mulur yang disajikan pada Tabel 5 menunjukkan bahwa sebagian besar

kelompok perlakuan memiliki perbedaan yang signifikan, meskipun terdapat beberapa kelompok yang tidak berbeda nyata. Hal ini ditunjukkan oleh nilai signifikansi pada kelompok rasio *twist* 0,51 yang tidak berbeda signifikan antara benang Ne 19,50 dan Ne 14,56. Secara umum, nilai mulur menunjukkan kecenderungan peningkatan seiring

dengan kenaikan rasio *twist*. Nilai mulur terendah terdapat pada kelompok Ne₁ 14,56 - 0,34, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada kelompok Ne₁ 14,56 - 0,75. Pada rasio *twist* yang lebih tinggi, perbedaan antar kelompok menjadi lebih jelas, terutama antara rasio rendah dan rasio tinggi.

Tabel 5. Hasil analisis *post-hoc student newman keuls* (SNK) pengaruh rasio *twist* terhadap sifat *tenacity* benang

Kelompok (Ne_RasioTwist)	N	Pengelompokan nilai <i>Tenacity</i> benang					
		1	2	3	4	5	6
Ne 19.50 - 0.34	25	2,235					
Ne 19.50 - 0.51	25		3,331				
Ne 14.56 - 0.34	25			3,599			
Ne 19.50 - 0.75	25				4,878		
Ne 14.56 - 0.51	25					5,211	
Ne 14.56 - 0.75	25						6,91
Sig.		1	1	1	1	1	1

Tabel 6. Hasil analisis *post-hoc student newman keuls* (SNK) pengaruh rasio *twist* terhadap sifat mulur benang

Kelompok (Ne_RasioTwist)	N	Pengelompokan nilai Mulur benang				
		1	2	3	4	5
Ne 14.56 - 0.34	25	5,054				
Ne 19.50 - 0.34	25		5,368			
Ne 19.50 - 0.51	25			5,805		
Ne 14.56 - 0.51	25			5,875		
Ne 19.50 - 0.75	25				6,353	
Ne 14.56 - 0.75	25					6,527
Sig.		1	1	0,183	1	1

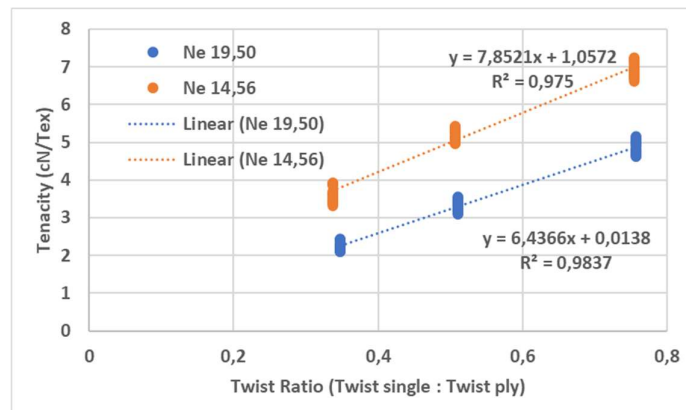
Hasil analisis regresi linier antara rasio *twist* dan *tenacity* yang disajikan pada Gambar 1 menunjukkan adanya hubungan linier positif pada kedua jenis benang. Pada benang Ne 14,56 diperoleh persamaan regresi $y=7,8521x+1,0572$, sedangkan pada benang Ne 19,50 diperoleh persamaan $y=6,4366x+0,0138$. Nilai *slope* yang positif pada sampel benang Ne 14,56 dan Ne 19,50 menunjukkan bahwa peningkatan rasio *twist* diikuti oleh peningkatan nilai *tenacity*. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi pada kedua benang, yaitu sebesar

0,975 untuk Ne 14,56 dan 0,9837 untuk Ne 19,50, menunjukkan bahwa sebagian besar variasi nilai *tenacity* dapat dijelaskan oleh variasi rasio *twist*. Hal ini mengindikasikan bahwa model regresi yang digunakan memiliki tingkat kecocokan yang sangat baik terhadap data.

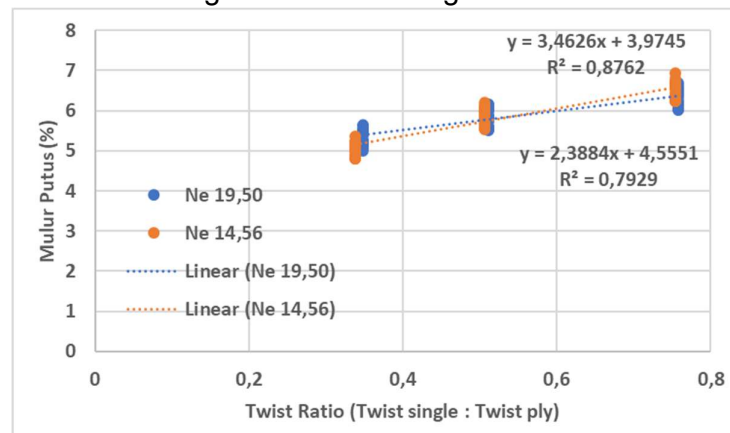
Hasil analisis regresi linier antara rasio *twist* dan mulur yang disajikan pada Gambar 2 juga menunjukkan hubungan linier positif pada kedua jenis benang. Pada benang Ne 14,56 diperoleh persamaan regresi $y=3,4626x+3,9745$, sedangkan pada

benang Ne 19,50 diperoleh persamaan $y=2,3884x+4,5551$. Nilai *slope* yang positif pada sampel benang Ne 14,56 dan Ne 19,50 menunjukkan bahwa peningkatan rasio *twist* diikuti oleh peningkatan nilai mulur. Nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,8762 pada

benang Ne 14,56 dan 0,7929 pada benang Ne 19,50 menunjukkan bahwa sebagian besar variasi mulur dapat dijelaskan oleh variasi rasio *twist*, meskipun terdapat kemungkinan faktor lain yang turut mempengaruhi nilai mulur.



Gambar 1 Hasil analisis regresi linear hubungan Rasio *Twist* terhadap *Tenacity*



Gambar 2 Hasil analisis regresi linear hubungan Rasio *Twist* terhadap Mulur

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan rasio *twist* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan tarik dan mulur benang gintir pada kedua jenis benang yang diuji. Temuan ini menegaskan bahwa *twist* merupakan parameter penting dalam menentukan performa mekanik benang gintir. Secara umum, peningkatan rasio *twist* tidak hanya meningkatkan kekuatan, tetapi juga kemuluran hingga batas tertentu sebelum mencapai kondisi optimum. Hasil ini sejalan dengan analisis ANOVA yang menunjukkan bahwa rasio *twist* berpengaruh sangat signifikan terhadap *tenacity* dan mulur ($p < 0,0001$), sebagaimana disajikan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Secara mekanisme, peningkatan kekuatan tarik berkaitan dengan meningkatnya kohesi antarserat dan interaksi antar*strand* penyusun benang. Dengan bertambahnya *twist*, keterikatan mekanis antarserat meningkat sehingga kemampuan benang dalam menahan beban tarik menjadi lebih baik^{2,3}. Palaniswamy (2005) menunjukan bahwa kekuatan benang ditentukan oleh kombinasi antara *fiber-to-fiber cohesion* dan orientasi serat terhadap sumbu benang⁸. Selain itu, peningkatan *twist* juga meningkatkan efek *wrapping* antar helai benang *single* yang berkontribusi terhadap kestabilan struktur benang gintir^{7,8}.

Dalam rentang rasio *twist* yang digunakan pada penelitian ini, belum terlihat adanya penurunan kekuatan akibat *over-twist*. Kondisi ini menunjukkan bahwa variasi *twist* yang digunakan masih berada dalam rentang efektif. Ömeroğlu (2013) melaporkan bahwa peningkatan kekuatan akan berlangsung hingga mendekati 130-140% dari *twist* normal, setelah itu peningkatan kekuatan cenderung menurun akibat meningkatnya kemiringan serat terhadap sumbu

benang (*fiber obliquity*)³. Fenomena tersebut berkaitan dengan berkurangnya orientasi serat terhadap arah pembebanan sehingga efisiensi transfer gaya tarik menurun^{2,3}.

Pada penelitian ini telah ditemukan bahwa terdapat peningkatan *tenacity* yang sejalan dengan peningkatan rasio *twist*. Fenomena ini juga berkaitan dengan meningkatnya efek *wrapping* antar helai benang *single* pada struktur, yaitu kontribusi serat pada lapisan luar benang menjadi lebih signifikan dalam menahan beban tarik, sebagaimana dijelaskan dalam penelitian sebelumnya⁸. Selain itu, hasil ANOVA menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara nomor benang dan rasio *twist*. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan *twist* tidak memberikan efek yang sama pada setiap jenis benang. Pada benang Ne 14,56, peningkatan *tenacity* akibat penambahan *twist* terjadi lebih tajam dibandingkan benang Ne 19,50, yang juga didukung oleh nilai slope regresi yang lebih tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa struktur benang yang lebih kasar memiliki kemampuan lebih besar dalam memanfaatkan peningkatan kohesi akibat *twist* karena jumlah serat pada penampang benang lebih banyak^{5,8}.

Jika dikaitkan dengan variasi rasio *twist*, benang dengan rasio *twist* yang lebih tinggi cenderung menunjukkan kekuatan yang lebih baik. Hasil ini konsisten dengan temuan bahwa rasio sekitar 3/4 dari *twist* benang tunggal sering menghasilkan kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan rasio yang lebih rendah⁸. Pada saat yang sama, secara teoritis rasio 1/2 merupakan kondisi di mana serat permukaan relatif sejajar dengan sumbu benang gintir⁸. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi kekuatan optimum tidak hanya ditentukan oleh orientasi serat, tetapi juga oleh interaksi antar helai benang *single* dalam struktur benang^{3,8}.

Dari sisi sifat benang terhadap deformasi tarikan, hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai mulur meningkat seiring dengan peningkatan rasio *twist*. Hal ini diperkuat oleh hasil ANOVA yang menunjukkan bahwa rasio *twist* merupakan faktor yang sangat dominan ($p < 0,0001$), sedangkan nomor benang tidak berpengaruh signifikan secara independen ($p = 0,494$). Benang dengan rasio *twist* yang lebih tinggi menunjukkan nilai mulur yang lebih besar dibandingkan rasio yang lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan laporan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan rasio *twist*, khususnya hingga 3/4, menghasilkan nilai kemuluran yang lebih tinggi⁸. Kondisi ini dikaitkan dengan meningkatnya efek *wrapping* antar helai benang *single* pada tingkat *twist* yang lebih tinggi sehingga benang memiliki kemampuan deformasi yang lebih besar sebelum putus^{5,8}.

Perbedaan sifat mekanik antara benang Ne 19,50 dan Ne 14,56 menunjukkan bahwa nomor benang juga berpengaruh terhadap performa benang gintir. Benang dengan nomor lebih kecil (Ne 14,56) memiliki diameter lebih besar dan jumlah serat dalam penampang yang lebih banyak, sehingga mampu menahan beban yang lebih besar⁵. Hal ini menyebabkan nilai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan benang dengan nomor lebih besar. Selain itu, jumlah serat yang lebih banyak juga memungkinkan terbentuknya kontak dan kohesi antarserat yang lebih baik ketika *twist* ditingkatkan^{2,8}.

Hasil analisis regresi yang menunjukkan hubungan linier positif antara rasio *twist* dan kekuatan tarik memperkuat bahwa dalam rentang penelitian ini, peningkatan *twist* masih berada pada kondisi efektif. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi menunjukkan bahwa variasi rasio *twist* memberikan kontribusi yang besar terhadap variasi kekuatan tarik benang

gintir. Hasil ini mendukung teori bahwa *twist* merupakan parameter dominan yang menentukan orientasi serat, kohesi antarserat, dan stabilitas struktur benang^{2,3,6}.

Hasil ANOVA yang menunjukkan perbedaan signifikan antar variasi juga mendukung analisis deskriptif. Dengan jumlah pengulangan yang cukup besar ($n = 25$), variasi data relatif terkendali sehingga meningkatkan tingkat kepercayaan terhadap hasil penelitian. Secara statistik, hal ini menunjukkan bahwa perubahan sifat mekanik yang terjadi dipengaruhi oleh variasi rasio *twist* yang diberikan. Hasil uji lanjut SNK juga menunjukkan bahwa sebagian besar kelompok perlakuan memiliki perbedaan yang nyata, khususnya pada parameter *tenacity*, di mana seluruh kombinasi perlakuan berada pada kelompok yang berbeda. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan rasio *twist* memberikan efek yang konsisten dan terukur terhadap peningkatan sifat mekanik benang.

Hasil analisis regresi yang menunjukkan hubungan linier positif antara rasio *twist* dan sifat mekanik memperkuat bahwa dalam rentang penelitian ini, peningkatan *twist* masih berada pada kondisi efektif. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi pada parameter *tenacity* ($>0,97$) menunjukkan bahwa variasi rasio *twist* hampir sepenuhnya menjelaskan perubahan kekuatan benang. Sementara itu, nilai R^2 yang lebih rendah pada mulur menunjukkan adanya kemungkinan faktor lain yang turut mempengaruhi sifat elastisitas benang, seperti distribusi orientasi serat, ketidakseragaman struktur benang, dan heterogenitas campuran serat alam PALF-kapas^{9,10}.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa rasio *twist* merupakan parameter kunci dalam menentukan sifat mekanik benang gintir. Peningkatan rasio *twist* dalam rentang tertentu terbukti dapat meningkatkan *tenacity* dan mulur tanpa menunjukkan

gejala penurunan akibat *over-twist*. Selain itu, hasil penelitian juga mengindikasikan bahwa pengaruh *twist* terhadap kekuatan benang dipengaruhi oleh interaksi antara kohesi antarserat, orientasi serat, serta interaksi antar helai benang *single* dalam struktur benang gintir^{2,3,8}. Oleh karena itu, parameter ini dapat dijadikan acuan dalam optimasi proses pemintalan untuk menghasilkan benang dengan performa mekanik yang optimal, khususnya pada benang campuran serat alam seperti PALF-kapas.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa variasi rasio *twist* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik benang gintir dari *staple* campuran 65% *pineapple leaf fiber* (PALF) dan 35% kapas, khususnya pada parameter kekuatan tarik, *tenacity*, dan mulur. Peningkatan rasio *twist* dari kondisi rendah hingga tinggi terbukti mampu meningkatkan nilai kekuatan tarik dan *tenacity* secara konsisten pada kedua jenis benang yang diuji, yaitu Ne 14,56 dan Ne 19,50. Hal ini menunjukkan bahwa rasio *twist* merupakan parameter penting dalam menentukan performa mekanik benang gintir. Hasil analisis statistik menggunakan ANOVA mengonfirmasi bahwa rasio *twist* berpengaruh sangat signifikan terhadap *tenacity* dan mulur, serta menunjukkan adanya interaksi yang signifikan antara rasio *twist* dan nomor benang, sehingga respons perubahan sifat mekanik tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor, tetapi juga oleh kombinasi keduanya.

Selain itu, hubungan antara rasio *twist* dan sifat mekanik benang menunjukkan kecenderungan linier positif, yang diperkuat oleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang tinggi pada analisis regresi. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar variasi nilai

tenacity dan mulur dapat dijelaskan oleh perubahan rasio *twist*. Secara komparatif, benang dengan nomor lebih kecil (Ne 14,56) menunjukkan performa mekanik yang lebih baik dibandingkan benang Ne 19,50, yang ditunjukkan oleh nilai kekuatan tarik dan *tenacity* yang lebih tinggi pada setiap variasi rasio *twist*. Di sisi lain, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa dalam rentang rasio *twist* yang digunakan, belum ditemukan adanya penurunan sifat mekanik akibat kondisi *over-twist*. Hal ini menunjukkan bahwa variasi rasio *twist* hingga sekitar 0,75 masih berada dalam rentang efektif untuk meningkatkan sifat mekanik benang gintir. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa rasio *twist* memiliki peran yang sangat penting dalam meningkatkan kohesi antar-serat dan interaksi antar-*strand*, sehingga mampu meningkatkan performa mekanik benang secara signifikan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat mengkaji variasi rasio *twist* dalam rentang yang lebih luas, khususnya pada nilai yang lebih tinggi, untuk menentukan titik optimum serta batas terjadinya kondisi *over-twist* yang berpotensi menurunkan sifat mekanik benang. Selain itu, penelitian lanjutan juga perlu mempertimbangkan pengaruh parameter proses lainnya, seperti tegangan benang, kecepatan mesin, serta kondisi lingkungan proses, guna memahami interaksi antar variabel yang memengaruhi sifat mekanik benang gintir secara lebih komprehensif.

Pengembangan penelitian juga dapat dilakukan dengan menggunakan benang *single* dari variasi jenis serat atau sistem pemintalan yang berbeda, seperti *ring spinning* atau *compact spinning*, sehingga dapat diperoleh perbandingan karakteristik struktur dan performa benang yang lebih luas. Di sisi lain,

pengujian terhadap sifat fisik lainnya, seperti kekakuan, ketahanan abrasi, dan *hairiness*, juga perlu dilakukan untuk memberikan gambaran performa benang secara lebih menyeluruh. Hal ini penting agar hasil penelitian tidak hanya terbatas pada sifat mekanik dasar, tetapi juga mencakup aspek performa benang dalam aplikasi nyata.

Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai acuan dalam pengaturan parameter proses di industri, khususnya dalam menentukan rasio *twist* yang optimal untuk menghasilkan benang gintir dengan kombinasi kekuatan dan elastisitas yang baik. Oleh karena itu, penelitian lanjutan yang menghubungkan parameter rasio *twist* dengan performa benang pada proses lanjutan, seperti pertenunan atau perajutan, juga sangat disarankan agar hasil penelitian dapat memberikan kontribusi yang lebih aplikatif dan relevan bagi industri tekstil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Fahad, Wijayono, A. & Abdillah, F. Pengaruh Penggunaan Pin Spacer Pada Pemintalan Compact Ring Spinning Terhadap Kualitas Benang Cotton Ne 30. *Jurnal Tekstil: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Bidang Tekstil dan Manajemen Industri* 8, 29–34 (2025).
2. Zhou, X., Fang, S., Leng, X., Liu, Z. & Baughman, R. H. The Power of Fiber Twist. *Acc. Chem. Res.* 54, 2624–2636 (2021).
3. Ömeroğlu, S. An Investigation On The Effects Of Ply And Single Twists On Strength, Hairiness And Abrasion Resistance Properties Of Two-Ply Cotton Ring-Spun Yarns. *Textile and Apparel* 23, 204–212 (2013).
4. Shah, D. U., Schubel, P. J. & Clifford, M. J. Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites. *J. Compos. Mater.* 47, 425–436 (2013).
5. 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).
6. Chudoba, R., Vořechovský, M., Eckers, V. & Gries, T. Effect of Twist, Fineness, Loading Rate and Length on Tensile Behavior of Multifilament Yarns (A Multivariate Study). *Textile Research Journal* 77, 880–891 (2007).
7. Nurazizah, V. et al. Effect of Twist per meter (TPM) and Ply Number on the Mechanical Performance of Plied Yarns. *Metode : Jurnal Teknik Industri* 11, 171–180 (2025).
8. Palaniswamy, N. K. & Mohamed, A. P. Effect of single yarn twist and ply to single yarn twist ratio on strength and elongation of ply yarns. *J. Appl. Polym. Sci.* 98, 2245–2252 (2005).
9. Liao, S., Chen, J. & Wang, X. An Update on Pineapple Leaf Fibers. *Journal of Natural Fibers* 22, (2025).
10. Sowmya, R., Vasugi Raaja, N. & Prakash, C. Investigation of Relationship Between Blend Ratio and Yarn Twist on Yarn Properties of Bamboo, Cotton, Polyester, and its Blends. *Journal of Natural Fibers* 14, 228–238 (2017).
11. Khairunnisa, H., Rusman, F. F. ., Aribowo, I., Yulianto, B. and Mahmudi, R. A. (2024) “Pengembangan Benang Berkelanjutan Berbasis Serat Nanas dengan Teknik Pemintalan Open-End Rotor”, *Jurnal Sains dan Aplikasi Keilmuan Teknik Industri (SAKTI)*, 5(1), pp. 01–14. doi: 10.33479/sakti.v5i1.144.