

Pengaruh Penggunaan *Pin Spacer* Pada Pemintalan *Compact Ring Spinning* Terhadap Kualitas Benang Cotton Ne 30

Fahad^{1*}, Andrian Wijayono², Fahmi Abdillah³

^{1,3} Program Studi Teknik Pembuatan Benang, Akademi Komunitas Industri Tekstil dan Produk Tekstil
Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

² Program Studi Teknik Pembuatan Kain Tenun, Akademi Komunitas Industri Tekstil dan Produk Tekstil
Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

fahad@ak-tekstilsolo.ac.id^{1*}, andrianw@kemenperin.go.id²

ABSTRAK

Salah satu metode teknik pembuatan benang dari bahan baku berupa serat tekstil yang banyak digunakan adalah *ring-spinning* karena efisiensi produksi yang stabil dan kemampuannya menghasilkan berbagai jenis benang. Kualitas benang sangat dipengaruhi oleh pengaturan parameter dan komponen pada mesin *ring frame*, termasuk penggunaan *pin spacer* di area *drafting*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penggunaan *pin spacer* terhadap kualitas benang kapas Ne 30 yang diproduksi dengan mesin *compact ring-spinning*. Pada penelitian ini telah diamati kualitas benang yang dihasilkan dari sistem pemintalan *ring frame* yang menggunakan *spacer* dan tanpa menggunakan *spacer*. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan *spacer* memiliki pengaruh pada parameter kualitas ketidakrataaan (*unevenness*) benang, kekuatan benang (*strength & tenacity*) dan jumlah bulu pada benang (*hairiness*), meskipun *Imperfection index* (IPI) tidak terpengaruh oleh penggunaan *spacer* pada mesin. Penelitian ini telah menunjukkan bahwa terdapat dampak signifikan dari penggunaan *spacer* terhadap kualitas benang.

Kata Kunci: *compact ring-spinning*, kualitas benang, *spacer*.

ABSTRACT

One of the most widely used yarn manufacturing techniques from textile fiber raw materials is ring spinning, due to its stable production efficiency and its ability to produce a wide variety of yarn types. Yarn quality is highly influenced by the setting of parameters and components on the ring frame machine, including the use of pin spacers in the drafting zone. This study aims to examine the effect of using pin spacers on the quality of Ne 30 cotton yarn produced by a compact ring-spinning machine. The research observed the yarn quality produced from a ring frame spinning system with and without the use of spacers. The results show that the use of spacers affects yarn quality parameters such as unevenness, strength and tenacity, and hairiness, although the Imperfection Index (IPI) was not affected by the use of spacers on the machine. This study demonstrates that the use of spacers has a significant impact on yarn quality.

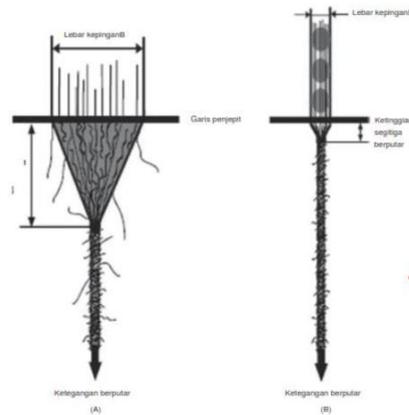
Keywords: *compact ring-spinning*, *spacer*, yarn quality,

1. Pendahuluan

Pemintalan benang adalah teknik membuat benang dari bahan baku berupa serat tekstil. Berbagai jenis serat alami (seperti kapas, rami, dan wol) serta serat sintetis (seperti poliester) dapat diolah menjadi benang (Arafat & Uddin, 2022; Zuo et al., 2022; Yin et al., 2021; Amiri Savadroodbari et al., 2024). Secara umum terdapat banyak teknik pemintalan yang dapat digunakan untuk membuat benang, beberapa diantaranya yaitu dengan teknik *open-end spinning* dan *ring-spinning* (Basu, 2025; Chen et al., 2024). Pemintalan *ring-spinning* adalah salah satu teknik yang populer karena efisiensi produksinya yang stabil dan kemampuannya menghasilkan berbagai jenis produk (Abdkader & Hossain, 2023; Chen et al., 2024). Proses pemintalan *ring-spinning* dapat menghasilkan benang dari kapas dan serat staple lainnya (Arafat & Uddin, 2022; Zuo et al., 2022; Yin et al., 2021; Amiri Savadroodbari et al., 2024). Teknik ini dinamai sesuai dengan mesin utamanya, yaitu *ring frame* (mesin *ring*), yang terdiri dari berbagai bagian atau daerah untuk mengubah *roving* menjadi benang.

Bagian *drafting* (*drafting zone*) adalah salah satu daerah terpenting pada *ring frame*. Bagian ini menggunakan pasangan rol atas dan bawah yang berputar dengan kecepatan berbeda untuk menipiskan helai serat *roving* menjadi struktur yang lebih tipis dan seragam (Amiri Savadroodbari et al., 2024; Shen et al., 2023).

Pemintalan *compact ring-spinning* merupakan modifikasi dari sistem *ring-spinning* konvensional pada area peregangan yang sudah ada (Ugli, Tokhirovich & Abdujabborovich, 2021). Ide penambahan *compact* adalah untuk meminimalkan perubahan lebar untaian dan pengurangan substansial (hampir menghilangkan) segitiga pemintalan (*spinning triangle*) (Islam & Uddin, 2022). Perangkat *compact* terdiri dari penahan yang menahan *front roll* dan *delivery roll*. Di antara dua *roller* teratas terdapat *compact* dengan saluran y dan *pin spacer*. *Compact* ditekan pada *roller* bawah oleh pegas *compact* (*spring*) dengan gaya pegas, menyebabkan serat yang melalui pin dan saluran y akan tertekan sehingga memungkinkan terjadinya pemadatan bahan pada area *drafting* dan pengecilan ukuran segitiga pemintalan (*spinning triangle*) sesuai dengan ilustrasi El-Sayed & Sanad (2010) pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi pengecilan ukuran *spinning triangle* pada peralatan *compact ring-spinning* (El-Sayed & Sanad, 2010)

Pin spacer adalah salah satu komponen penting dari daerah *drafting* (Raian et al., 2023; Uddin et al., 2023; Purwito 2023). Komponen ini berupa bahan plastik yang terletak di antara apron atas dan bawah pada area *drafting* dari *ring frame*. *Spacer* berfungsi mengontrol pergerakan serat dan tekanan pada bahan di area *drafting* (Raian et al., 2023). *Spacer* berfungsi untuk mengatur jarak antara *top apron* dengan *bottom apron* dan juga dapat menentukan titik jepit serat yang akan melewati antara *top* dan *bottom apron* (Raian et al., 2023).

Pin spacer membuat serat yang melewati apron akan tertekan besi yang melintang atau disebut pin. Hal tersebut akan menghasilkan bahan serat akan menjadi lebih padat ketika dilakukan peregangan bahan. Prinsip kerja *pin spacer* ini meniru dari *compact* yang terdapat pada peralatan *compact* konvensional. Menurut hasil penelitian Putra et al. (2019) dan Sahroni et al. (2019) menunjukkan bahwa pengaturan kecepatan *delivery* dan nomor benang dapat berpengaruh pada kekuatan benang yang diperoleh. Purwito (2023) juga menjelaskan bahwa *spacer* akan mempengaruhi pergerakan serat pada benang dan kualitas hasil akhir pada produksi benang cotton Ne 28. Hal tersebut menunjukkan bahwa adanya kebutuhan untuk melakukan optimisasi dan pengamatan agar dapat menghasilkan benang dengan kualitas yang baik. Pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan pada pengaruh penggunaan *pin spacer* pada kualitas benang yang dihasilkan di mesin *ring-spinning*. Ketidakrataan benang, *imperfection index* (IPI), jumlah bulu (*hairiness*) dan kekuatan benang akan diamati pada benang yang dihasilkan dari mesin tanpa *spacer* dan dengan tambahan *spacer*.

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini telah dilakukan pembuatan benang dengan teknik *ring-spinning* menggunakan mesin *ring-frame*. Benang dibuat dengan menggunakan bahan baku serat kapas 100% dengan nomor Lot T.102 dan mesin *compact ring-spinning* di PT Tantra Textile Industry. Untuk mengamati pengaruh penggunaan *pin spacer* terhadap kualitas benang yang dihasilkan pada mesin *compact*, pada penelitian ini telah dibuat benang *compact* konvensional (tanpa *spacer*) dan benang *compact* dengan tambahan *pin spacer*. Gambar 2 menunjukkan peralatan *compact* yang digunakan pada penelitian ini. Ukuran *pin spacer* yang digunakan pada penelitian ini adalah pin dengan ukuran 2,75 mm. Gambar 3 menunjukkan contoh jenis *pin spacer* dengan berbagai jenis ukuran. Tabel 1 dan Tabel 2 masing-masing menunjukkan parameter proses *compact* konvensional (tanpa *spacer*) dan benang *compact* dengan tambahan *pin spacer* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 2. Peralatan *compact* pada mesin *ring-spinning* (dokumentasi di PT Tantra Textile Industry)



Gambar 3. Perangkat *pin spacer* pada peralatan *compact ring-spinning* dengan berbagai ukuran (dokumentasi di PT Tantra Textile Industry)

Tabel 1. Parameter proses *compact* konvensional (tanpa *spacer*)

No	Item	Keterangan
1	Ne benang <i>output</i> (hank/lbs)	30s Compact
2	Kode lot bahan baku serat	T.102 C-C1
3	TPI (<i>twist</i> /inci)	18,0
4	RPM mesin (putaran/menit)	16,100
5	Ne <i>roving</i> (hank/lbs)	1,00
6	Jenis <i>traveller</i>	2/0 U1 UL
7	Jenis <i>compact</i>	C5P1

Tabel 2. Parameter proses *compact* dengan tambahan *pin spacer*

No	Item	Keterangan
1	Ne benang <i>output</i> (hank/lbs)	30s
2	Kode lot bahan baku serat	T.102
3	TPI (<i>twist</i> /inci)	19,0
4	RPM mesin (putaran/menit)	16,000
5	Ne <i>roving</i> (hank/lbs)	1,00
6	Jenis <i>traveller</i>	2/0 NFC
7	<i>Pin Spacer</i>	2,75 mm (warna putih)

Benang yang telah dihasilkan dari dua jenis proses pemintalan tersebut diambil sebagian sebagai sampel uji menggunakan standar pengambilan contoh untuk pengujian benang (SNI 08-0267-1989). Sampel uji dari kedua proses tersebut diuji kualitasnya pada parameter ketidakrataan (*unevenness*), *imperfection index* (IPI), jumlah bulu (*hairiness*) dan kekuatan benang. Pengujian ketidakrataan dan *imperfection index* (SNI ISO 16549:2010) dilakukan dengan menggunakan alat uji ketidakrataan Uster Tester 3. *Imperfection index* (IPI) yang diukur meliputi nilai jumlah *thin* (-50%), jumlah *thick* (+50%) dan jumlah *neps* (+200%). Kekuatan benang diuji dengan menggunakan alat uji Tensolab dengan metode uji SNI 7650:2010. Pengujian jumlah bulu (*hairiness*) dilakukan menggunakan alat Uster Tester 3.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini telah dibuat benang dengan nomor yang sama, yaitu pada nilai Ne_1 30. Bahan baku *roving* yang digunakan juga memiliki nomor yang sama, yaitu pada nilai Ne_1 1,00. Selain faktor nomor benang, faktor kecepatan mesin (RPM *Spindle*) juga diatur pada kecepatan yang relatif sama, yaitu pada nilai 16.000 putaran per menit (untuk mesin *compact spinning* tanpa *pin spacer*) dan 16.100 putaran per menit (untuk mesin *compact spinning* dengan tambahan *pin spacer*). Jumlah *twist* atau antihan pada benang juga diatur pada nilai yang relatif hampir sama, yaitu pada nilai 18,00 puntiran per inci (untuk mesin *compact spinning* tanpa *pin spacer*) dan pada nilai 19,00 puntiran per inci (untuk mesin *compact spinning* dengan tambahan *pin spacer*). Parameter tersebut diatur sedemikian rupa agar hal yang berpengaruh hanya dari penggunaan *pin spacer* pada daerah peregang (*drafting zone*).

Pada penelitian ini telah berhasil diamati kualitas benang kapas dengan teknik *ring spinning* menggunakan metode *compact ring-spinning* tanpa spacer dan *compact ring spinning* dengan tambahan *spacer*. Masing-masing benang telah diuji pada parameter kualitas pengujian ketidakrataan benang (*unevenness*), *imperfection index* (IPI), kekuatan tarik benang dan jumlah bulu benang. Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukkan perbandingan nilai hasil pengujian parameter kualitas yang telah dilakukan pada penelitian ini.

Tabel 3. Hasil pengujian benang *compact spinning* dan *pin spacer*

Parameter Kualitas Benang	Satuan	Nilai	
		<i>Compact Spinning</i>	<i>Pin Spacer</i>
Ketidakrataan (<i>unevenness</i>) – U%	%	9,12	9,38
		9,42	9,30
		8,76	9,33
		8,83	9,67
		8,79	9,33
<i>Neps</i> +200%	Jumlah/1000 meter	2	1
		2	0
		0	1
		1	0
		1	0
<i>Thick</i> +50%	Jumlah/1000 meter	6	10
		11	7
		5	14
		7	16
		12	9
<i>Thin</i> -50%	Jumlah/1000 meter	2	1
		2	0
		0	1
		1	0
		1	0
<i>Hairiness</i>	Jumlah/1000 meter	3,61	4,69
		3,65	4,38
		3,62	4,39
		3,59	4,38
		3,59	4,16
<i>Strength</i>	cN	380,14	363,88
		385,73	329,32
		363,03	350,27
		405,53	376,98
		390,35	361,83
<i>Tenacity</i>	cN/Tex	19,31	18,48
		19,59	16,73
		18,44	17,79
		20,60	19,15
		19,82	18,38

Berdasarkan hasil pengamatan telah ditemukan bahwa ketidakrataan (*unevenness*) benang yang dihasilkan dari mesin *compact spinning* dengan tambahan *pin spacer* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan benang tanpa *pin spacer*. Hasil uji *independent sample* T-test atau uji beda juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode tersebut, yang ditunjukkan dengan nilai hasil nilai Sig. < 0,05 (hasil uji statistik *independent sample* T-test dapat dilihat pada Tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa dalam parameter ketidakrataan, mesin *compact spinning* tanpa tambahan *pin spacer* masih lebih unggul daripada mesin dengan tambahan *spacer*.

Tabel 4. Kualitas benang *compact spinning* dan *pin spacer*

No	Parameter Kualitas Benang	Satuan	Nilai	
			<i>Compact Spinning</i>	<i>Pin Spacer</i>
1	Nomor Benang – Ne ₁	Hank/pound	30,00	30,00
2	Nomor Benang – Tex	gram/1000 meter	19,69	19,69
3	Nomor <i>Roving</i> – Ne ₁	Hank/pound	1,00	1,00
4	RPM <i>Spindle</i>	Putaran per menit	16.100,00	16.000,00
5	<i>Twist</i>	Antihan per inci	18,00	19,00
6	Ketidakrataan (<i>unevenness</i>) – U%	%	8,98 ± 0,28	9,40 ± 0,15
7	<i>Neps</i> +200%	Jumlah/1000 meter	1 ± 0,84	0,4 ± 0,55
8	<i>Thick</i> +50%	Jumlah/1000 meter	8 ± 3,11	11 ± 3,70
9	<i>Thin</i> -50%	Jumlah/1000 meter	1 ± 0,84	0,4 ± 0,55
10	<i>Hairiness</i>	Jumlah/1000 meter	3,61 ± 0,02	4,40 ± 0,19
11	<i>Strength</i>	cN	384,96 ± 15,47	356,46 ± 17,89
12	<i>Tenacity</i>	cN/Tex	19,55 ± 0,79	18,10 ± 0,91

Dari segi parameter kualitas *imperfection index* (IPI) diperoleh data bahwa kedua benang yang dihasilkan dengan *spacer* dan tanpa *spacer* memiliki nilai yang relatif sama (baik dalam segi *Neps* +200%, *Thick* +50%, dan *Thin* -50%). Hasil uji *independent sample* T-test atau uji beda juga menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode tersebut, yang ditunjukkan dari hasil nilai Sig. > 0,05 (hasil uji statistik *independent sample* T-test dapat dilihat pada Tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa *spacer* tidak berpengaruh terhadap kualitas *imperfection index* benang.

Hasil pengamatan jumlah bulu benang menunjukkan bahwa metode pembuatan benang dengan menggunakan *pin spacer* relatif lebih tinggi dibandingkan dengan benang yang dihasilkan dari metode tanpa *spacer*. Hasil uji *independent sample* T-test atau uji beda juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode tersebut, yang ditunjukkan dengan hasil nilai Sig. < 0,05 (hasil uji statistik *independent sample* T-test dapat dilihat pada Tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa dalam parameter ketidakrataan, mesin *compact spinning* tanpa tambahan *pin spacer* masih lebih unggul daripada mesin dengan tambahan *spacer*.

Kekuatan benang yang dihasilkan tanpa menggunakan *spacer* memiliki nilai yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan benang yang dihasilkan dengan *spacer*. Hasil uji *independent sample* T-test atau uji beda juga menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua metode tersebut, yang ditunjukkan dengan nilai Sig. < 0,05 (hasil uji statistik *independent sample* T-test dapat dilihat pada Tabel 5). Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan *spacer* tidak berpengaruh terhadap kekuatan benang secara signifikan.

Tabel 5. Nilai signifikansi dari hasil uji statistik kesamaan varians dan *independent sample* T-test pada kualitas benang tanpa *spacer* dan menggunakan *spacer*

Parameter Kualitas Benang	Uji kesamaan varians	Hasil uji <i>independent sample</i> T-test		Kesimpulan
		Dengan asumsi varians sama	Dengan asumsi varians berbeda	
Ketidakrataan (<i>unevenness</i>) – U%	Sig. 0,100	Sig. 0,016	Sig. 0,023	Berbeda signifikan
<i>Neps</i> +200%	Sig. 0,447	Sig. 0,111	Sig. 0,117	Tidak berbeda signifikan
<i>Thick</i> +50%	Sig. 0,627	Sig. 0,203	Sig. 0,204	Tidak berbeda signifikan
<i>Thin</i> -50%	Sig. 0,447	Sig. 0,111	Sig. 0,117	Tidak berbeda signifikan
<i>Hairiness</i>	Sig. 0,152	Sig. 0,000	Sig. 0,001	Berbeda signifikan
<i>Strength</i>	Sig. 0,684	Sig. 0,027	Sig. 0,028	Berbeda signifikan
<i>Tenacity</i>	Sig. 0,681	Sig. 0,027	Sig. 0,028	Berbeda signifikan

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini telah ditemukan bahwa penggunaan *pin spacer* pada mesin *ring frame* untuk produksi benang kapas 100% dengan nomor Ne 30 berpengaruh terhadap kualitas benang yang dihasilkan. Telah ditemukan bahwa penggunaan *spacer* akan berpengaruh pada parameter kualitas ketidakrataan benang (*unevenness*), jumlah bulu (*hairiness*), kekuatan benang (*strength*) dan *tenacity*. Hasil pengujian secara statistik menggunakan metode uji beda atau *independent sample* T-test menunjukkan bahwa penggunaan *spacer* berpengaruh pada ketidakrataan benang (*unevenness*), jumlah bulu (*hairiness*), kekuatan benang (*strength*) dan *tenacity*. Pada penelitian ini ditemukan bahwa parameter *imperfection index* tidak terpengaruh pada penggunaan *spacer*. Hasil pengujian secara statistik menggunakan metode uji beda atau *independent sample* T-test menunjukkan bahwa penggunaan *spacer* tidak berpengaruh pada parameter *imperfection index* benang. Penelitian ini telah menunjukkan bahwa terdapat dampak signifikan dari penggunaan *spacer* terhadap kualitas

benang. Pengaruh penggunaan *spacer* terhadap kualitas benang dengan ukuran nomor benang yang berbeda dapat ditinjau lebih lanjut. Kualitas benang yang diproduksi dengan menggunakan *spacer* dengan ukuran selain 2,75 mm juga masih dapat diamati lebih lanjut.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis selama kegiatan penelitian ini.

6. Daftar Pustaka

- Abdkader, A., & Hossain, M. (2023). A critical review on recent developments and solutions in the high-speed ring spinning process. *Textile Research Journal*, 93(23-24), 5485-5504.
- Amiri Savadoodbari, H., Razbin, M., Reza Hasani, M., & Safar Johari, M. (2024). Tuning drafting zone parameters for polyester yarn within a ring spinning system: modeling and optimization. *The Journal of The Textile Institute*, 1-14.
- Arafat, Y., & Uddin, A. J. (2022). Recycled fibers from pre-and post-consumer textile waste as blend constituents in manufacturing 100% cotton yarns in ring spinning: A sustainable and eco-friendly approach. *Heliyon*, 8(11).
- Basu, A. (2025). Developments in worsted spinning systems. In *Developments in Yarn Spinning Technologies* (pp. 209-230). Elsevier Science Ltd.
- Chen, L., Mei, S., Fu, K., & Zhou, J. (2024). Spinning the Future: The Convergence of Nanofiber Technologies and Yarn Fabrication. *ACS nano*.
- El-Sayed, M. A. M., & Sanad, S. H. (2010). Compact spinning technology. In *Advances in yarn spinning technology* (pp. 237-260). Woodhead Publishing.
- Islam, M. I., & Uddin, A. J. (2022). Enhancing the quality of elastane-cotton core yarn by compact spinning. *Heliyon*, 8(6).
- Purwito, D. D. (2023). Pengambilan Keputusan Memilih 'spacer' terbaik Pada Proses Pemintalan Pembuatan Benang Cotton Ne1 28s 100% Menggunakan Analisa Statistik 't'test Dan 'f'test. Knowledge: *Jurnal Inovasi Hasil Penelitian dan Pengembangan*, 3(1), 76-83.
- Putra, V. G. V., Sahroni, R., Wijayono, A., & Kusumaatmadja, D. (2019). Modelling of Yarn Count and Speed of Delivery Roll to Yarn Strength in Spinning Machines Based On Analytical Mechanics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1381, 012052. doi:10.1088/1742-6596/1381/1/012052
- Raian, S., Saha, S.K., Hossen, J., Baral, L.M., Begum, H.A., Islam, M.R., Hossain, M.M. (2023) Assessing the Impact of Spacer Size Variations on the Ring-Spun Yarn Quality Ranking. *Textile & Leather Review*. 6. 582-609. <https://doi.org/10.31881/TLR.2023.102>
- Sahroni, R., Wijayono, A., Putra, V.G.V. (2019). A Modeling Study Of Viscoelastic Material of Wool-Lycra 36 Tex Yarn. *The Science and Science Education International Seminar Proceedings*.
- Shen, Y., Yu, C., Shang, S., Qian, L., & Qian, X. (2023). Study on the influence of drafting forms in front drafting zone of ring spinning frame on fiber motion and yarn quality. *Textile Research Journal*, 93(13-14), 3202-3216.
- Uddin, M. N., Hawlader, M. R., Islam, M. N., Hossain, M. M., Bristy, S. A., & Faysal, G. M. (2023). Influence of Optimal Spacer Size on CVC Blended Yarn Properties at Ring Frame. *Journal of Natural Science and Textile Technology*, 2(1), 1.
- Ugli, Y. A. A., Tokhirovič, B. H., & Abdjabborovich, Y. S. (2021). Research into the effect of stretching couples on the quality of thread in a ring spinning machine. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, 11(3), 164-171.
- Yin, R., Ling, Y. L., Fisher, R., Chen, Y., Li, M. J., Mu, W. L., & Huang, X. X. (2021). Viable approaches to increase the throughput of ring spinning: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129116.
- Zuo, Q., Salleh, K. M., Wang, C., Liu, S., Lu, C., Wang, L., ... & Zakaria, S. (2022). Prediction and analysis of properties of ramie fiber staple yarn reinforced unsaturated polyester composite based on fiber packing density. *Composites Part B: Engineering*, 237, 109869