



# Pengaruh Viskositas Viscose dan Temperatur Acid Bath terhadap Sifat Mekanis Serat Rayon Regenerasi

Dicky Setiawan Tanjung\*, Yogi Wibisono Budhi

Fakultas Teknologi Industri, Program Studi Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Email: <sup>1,\*</sup>setiawantanjung07@gmail.com, <sup>2</sup>y.wibisono@itb.ac.id

Email Penulis Korespondensi: setiawantanjung07@gmail.com

**Abstrak**—Serat rayon viscose merupakan serat regenerasi selulosa yang sifat mekanisnya dipengaruhi oleh kondisi proses selama tahap pemintalan dan regenerasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh viskositas larutan viscose dan temperatur regeneration bath terhadap kekuatan tarik (tenacity) dan kemampuan mulur (elongation) serat rayon, serta menentukan rentang kondisi operasi yang memberikan kualitas serat paling stabil. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis data historis operasional pabrik selama satu tahun. Data diseleksi pada kondisi proses yang relatif konstan untuk meminimalkan pengaruh variabel pengganggu, kemudian dianalisis menggunakan ANOVA dan analisis deskriptif statistik. Viskositas viscose diamati pada rentang BF 35–69 detik, sedangkan temperatur regeneration bath berada pada rentang 48–68 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua parameter berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanis serat rayon. Tenacity mencapai nilai optimum pada BF menengah-rendah, sedangkan elongation meningkat pada BF menengah-tinggi. Peningkatan temperatur regeneration bath meningkatkan elongation, namun temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan tenacity. Berdasarkan evaluasi nilai rata-rata dan kestabilan proses (coefficient of variation), kondisi operasi optimum diperoleh pada BF 50–54 detik dan temperatur regeneration bath 60–64 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian terintegrasi viskositas viscose dan temperatur regeneration bath berperan penting dalam menghasilkan serat rayon dengan kualitas mekanis yang konsisten dan stabil..

**Kata Kunci:** Rayon Viscose; Viskositas Viscose; Regeneration Bath; Tenacity; Elongation; Pemintalan Basah

**Abstract**—Viscose rayon fiber is a regenerated cellulose fiber whose mechanical properties are strongly influenced by processing conditions during spinning and regeneration stages. This study aimed to analyze the effects of viscose solution viscosity and regeneration bath temperature on the tensile strength (tenacity) and elongation of rayon fibers, as well as to determine the operating conditions that provide the most stable fiber quality. The research employed a quantitative approach based on the analysis of historical operational data collected from an industrial plant over a one-year period. The data were selected under relatively constant process conditions to minimize the influence of confounding variables and were subsequently analyzed using ANOVA and descriptive statistical methods. Viscose viscosity was evaluated within a BF range of 35–69 seconds, while regeneration bath temperature was varied between 48–68 °C. The results demonstrated that both parameters significantly affected the mechanical properties of rayon fibers. Tenacity reached its optimum value at medium-low BF levels, whereas elongation increased at medium-high BF levels. Increasing regeneration bath temperature enhanced elongation; however, excessively high temperatures resulted in reduced tenacity. Based on the evaluation of average values and process stability using the coefficient of variation (CV), the optimum operating conditions were identified at a viscose viscosity of BF 50–54 seconds and a regeneration bath temperature of 60–64 °C. These findings indicate that integrated control of viscose viscosity and regeneration bath temperature plays a critical role in producing rayon fibers with consistent and stable mechanical properties.

**Keywords:** Viscose Rayon; Viscose Viscosity; Regeneration Bath; Tenacity; Elongation; Wet Spinning

## 1. PENDAHULUAN

Serat rayon *viscose* adalah serat regenerasi selulosa alam yang diperoleh dari batang kayu lunak seperti akasia, cemara, dan bambu. Lalu diproses menjadi pulp sebagai bahan bakunya dengan kadar selulosa yang tinggi (Permata & Erwin, 2023). Rayon *viscose* disebut juga sebagai serat semi-sintetis karena tidak bisa dikategorikan serat alam atau serat buatan secara penuh (Susilo et al., 2020), namun sifat rayon *viscose* lebih mirip dengan serat alami yang terbuat dari selulosa, seperti katun atau linen, dibandingkan dengan serat sintetis berbasis minyak bumi seperti nilon atau polyester. Serat alam lebih nyaman digunakan, namun rendahnya produksi dan ketersediaan serta permintaan dan kebutuhan yang sangat tinggi menjadikan serat alam sangat mahal (seperti sutera). Sementara serat buatan memiliki harga yang murah, produksi yang tinggi, dan lebih tahan lama dibandingkan serat alam. Serat alam juga lebih ramah lingkungan karena mudah diuraikan oleh mikroba, serta diketahui serat ini memiliki ikatan kimia yang dapat dengan mudah dihidrolisis oleh mikroorganisme (Hidayat & Syahtaria, 2023).

Rayon *viscose* sebagai serat tekstil dapat diperoleh melalui proses pembuatan selulosa *xanthat* maupun selulosa karbamat (Paminto et al., 2020). Selain itu ada beberapa metode lain pembuatan serat rayon tekstil dari selulosa seperti menggunakan asam nitrat, asetat, cuproammonium, *lyocell*, larutan ionik, dan modal (Ramadhani et al., 2022). Dalam penelitian ini yang dibahas adalah rayon dengan proses *xanthat*. Proses produksi serat rayon diawali dengan *treatment* yang dilakukan terhadap bahan baku berupa pulp berbentuk lembaran-lembaran untuk kemudian diproses dan dijadikan larutan *viscose* yang kental dan siap dipintal pada proses *spinning*. Larutan *viscose* adalah larutan kental berwarna orange yang terbuat dari bubur kayu (pulp) yang direaksikan dengan larutan kaustik dan CS<sub>2</sub> (alkali selulosa xantat) (Santi et al., 2021).

Lembaran pulp diperoleh dari kayu yang telah dimurnikan. Dalam proses produksi serat rayon, pulp direaksikan dengan natrium hidroksida sehingga terbentuk selulosa alkali, lalu direaksikan dengan karbon disulfida untuk menghasilkan natrium selulosa xantat. Senyawa ini kemudian dilarutkan dalam larutan natrium hidroksida encer. Setelah melalui proses pemeraman, larutan dipintal dengan metode pemintalan basah menggunakan larutan asam.

Filamen hasil pemintalan masih belum murni sehingga perlu dimurnikan dengan cara dicuci menggunakan air. Setelah itu, digunakan larutan natrium sulfida untuk menghilangkan belerang maupun senyawa-senyawa yang mengandung belerang. Selanjutnya, filamen diputihkan dengan natrium hipoklorit, kemudian dicuci kembali dengan air, dan akhirnya dikeringkan (Boby et al., 2021).

Dari keseluruhan tahapan utama dalam proses produksi rayon, terdapat dua faktor krusial yang sangat menentukan kualitas serat yang dihasilkan, yaitu kekentalan larutan *viscose* serta temperatur larutan *2ndbath* pada tahap pemintalan. Kekentalan larutan *viscose* dipengaruhi oleh proses *Ageing* di departemen *viscose*, dan diketahui bahwa pengendalian waktu dan kondisi *Ageing* berperan penting dalam menentukan tingkat polimerisasi dan kestabilan viskositas larutan. Kekentalan (viskositas) larutan *viscose* akan menentukan kemampuan larutan tersebut mengalir melalui *spinneret* pada proses pemintalan basah (*wet spinning*). Tingkat kekentalan larutan diduga sangat memengaruhi kesempurnaan proses pemintalan, yang pada akhirnya berdampak pada struktur serta sifat mekanis serat rayon yang dihasilkan. Kekentalan yang tidak sesuai akan mengganggu proses alir larutan melalui *spinneret* sehingga berdampak pada terbentuknya serat yang kurang seragam (Henggu et al., 2024).

Sementara itu, temperatur larutan *2ndbath* sangat dipengaruhi oleh sistem *steam* dan sirkulasi aliran yang bekerja menjaga kestabilan kondisi operasional di departemen *spinning*. Temperatur larutan *2ndbath* memegang peranan penting dalam proses *stretching* atau peregangan serat, temperatur larutan *2ndbath* menentukan kelancaran proses *Stretching*, yaitu peregangan serat yang baru terbentuk, mengatur orientasi molekul selulosa yang berimplikasi langsung pada struktur internal serat. Orientasi molekul yang baik akan menghasilkan serat dengan sifat mekanik unggul, khususnya dalam hal kekuatan tarik dan kemampuan mulur, sedangkan ketidakstabilan temperatur dapat menurunkan kualitas mekanik serat yang dihasilkan (Ban et al., 2022).

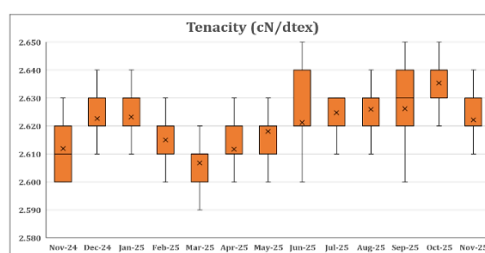
Dengan demikian, keterkaitan antara pengendalian proses *Ageing* di departemen *viscose* serta pengaturan temperatur *2ndbath* melalui sistem *steam* dan sirkulasi di departemen *spinning* menjadi kunci penting untuk menghasilkan serat rayon unggul, dengan struktur terkontrol, sifat mekanis optimal, serta kualitas produk yang konsisten sehingga diperlukan penelitian untuk menentukan kondisi optimum kekentalan larutan *viscose* dan temperatur larutan *2ndbath* guna menghasilkan serat rayon dengan sifat mekanis terbaik, khususnya kekuatan tarik (*tenacity*) dan kemampuan mulur (*elongation*). Hal ini penting, mengingat kualitas serat rayon sangat ditentukan oleh kedua sifat mekanis tersebut. Studi mengenai kondisi optimum kekentalan *viscose* dan temperatur larutan *2ndbath* untuk menghasilkan serat rayon dengan sifat mekanis terbaik belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi keterbatasan tersebut dengan menentukan kondisi optimum kekentalan larutan *viscose* sehingga diperoleh serat rayon dengan kualitas sifat mekanis terbaik, khususnya kekuatan tarik dan kemampuan mulur.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

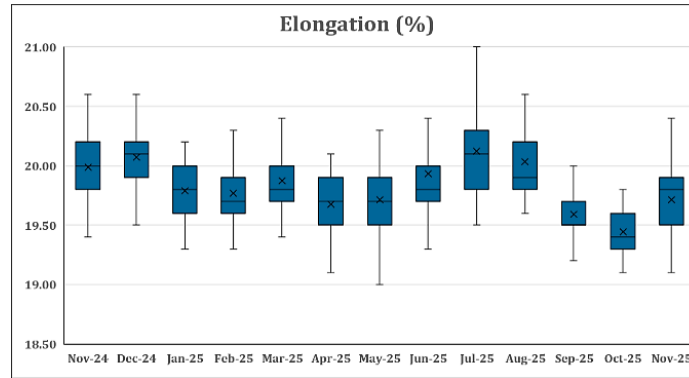
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis data historis operasional pabrik rayon viscose selama periode Januari–Desember 2024. Data diperoleh dari unit spinning dan laboratorium quality control pabrik melalui teknik purposive sampling, yaitu hanya data dengan kondisi operasi stabil yang digunakan dalam penelitian. Data yang mengalami gangguan proses, shutdown, perubahan grade produk, dan anomali operasional dieliminasi untuk menjaga validitas analisis. Total data valid yang dianalisis sebanyak 312 data produksi. Variabel bebas dalam penelitian ini meliputi viskositas larutan viscose pada rentang BF 35–69 detik dan temperatur regeneration bath pada rentang 48–68 °C. Variabel terikat yang diamati adalah kekuatan tarik (*tenacity*) dan kemampuan mulur (*elongation*) serat rayon. Untuk meminimalkan pengaruh variabel luar, beberapa parameter proses dijaga tetap berada pada rentang operasi normal, meliputi kecepatan spinning, titer serat, panjang serat, stretch ratio, relaxation ratio, dan ukuran spinneret. Pengujian sifat mekanis serat dilakukan menggunakan metode tensile testing berdasarkan standar ASTM D2256. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan analisis deskriptif dan ANOVA dua faktor pada tingkat kepercayaan 95% untuk mengevaluasi pengaruh viskositas viscose dan temperatur regeneration bath terhadap sifat mekanis serat rayon.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data yang dianalisis dalam penelitian ini merupakan data sifat mekanis serat rayon yang dihasilkan dari proses pemintalan menggunakan larutan *viscose*, yaitu kekuatan tarik (*tenacity*) dan kemampuan mulur (*elongation*). Data dikumpulkan secara periodik selama satu tahun penuh.

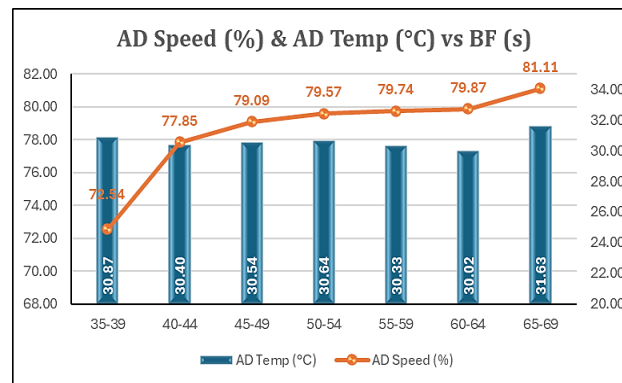


Gambar 1. Boxplot *Tenacity*.



**Gambar 2.** Boxplot *Elongation*.

Pada proses *ageing*, pengaturan kecepatan mesin *Ageing Drum* (*AD speed*) menentukan waktu tinggal alkali selulosa di dalam *Ageing Drum*. Semakin tinggi kecepatan *Drum*, semakin singkat waktu tinggal material di dalam *Drum*. Padahal, fungsi utama *Ageing Drum* adalah memberikan waktu yang cukup bagi terjadinya proses oksidasi alkali selulosa, yang berperan dalam pemutusan rantai molekul selulosa secara terkontrol. Pemutusan rantai ini menyebabkan penurunan derajat polimerisasi, yang pada tahap selanjutnya berdampak pada penurunan kekentalan larutan *viscose* (Yu & Budtova, 2024).



**Gambar 3.** Grafik kecepatan dan temperatur *Ageing Drum* terhadap *BF*.

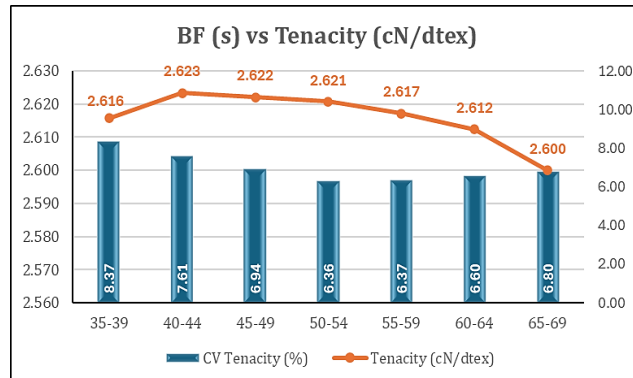
Selain waktu tinggal, temperatur *Ageing Drum* (*AD Temp*) juga berperan penting dalam proses oksidasi alkali selulosa. Secara kinetika reaksi, peningkatan temperatur akan mempercepat laju reaksi oksidasi sehingga mempercepat pemutusan rantai selulosa dan menurunkan derajat polimerisasi. Dengan demikian, pada kondisi lain yang sama, temperatur *ageing* yang lebih tinggi secara teoritis akan menghasilkan kekentalan *viscose* yang lebih rendah. Namun, pengaruh temperatur ini tidak dapat dipisahkan dari pengaruh waktu tinggal, karena kedua parameter tersebut bekerja secara simultan selama proses *ageing* (Wu et al., 2023).

Berdasarkan data operasional selama satu tahun yang telah difilter pada kondisi proses konstan, peningkatan kecepatan *Ageing Drum* pada kisaran rendah hingga menengah cenderung diikuti oleh peningkatan nilai *BF*, namun tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pada rentang tersebut, meskipun kecepatan *Ageing Drum* meningkat, waktu tinggal alkali selulosa masih cukup untuk memungkinkan proses oksidasi berlangsung efektif, terutama dengan dukungan temperatur *Ageing* yang relatif sama. Namun, pada kondisi kecepatan *Ageing Drum* yang lebih tinggi, nilai *BF* justru meningkat signifikan meskipun temperatur *Ageing* berada pada level yang lebih tinggi. Fenomena ini mengindikasikan bahwa pengaruh temperatur terhadap percepatan reaksi oksidasi menjadi tidak signifikan secara praktis karena waktu tinggal alkali selulosa di dalam *Ageing Drum* telah menjadi terlalu singkat. Dengan kata lain, berkurangnya waktu *Ageing* menjadi faktor yang lebih dominan dibandingkan peningkatan temperatur sehingga pemutusan rantai selulosa tidak berlangsung secara optimal dan derajat polimerisasi yang dihasilkan relatif lebih tinggi.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun temperatur berperan dalam mempercepat penurunan derajat polimerisasi, waktu tinggal alkali selulosa di dalam *Ageing Drum* merupakan faktor yang paling signifikan dalam menentukan kekentalan *viscose*. Pengaruh temperatur pada grafik tidak tampak dominan karena variasi waktu tinggal yang diakibatkan oleh perubahan kecepatan *Ageing Drum* lebih besar dibandingkan efek kinetika temperatur itu sendiri. Oleh karena itu, pengendalian kecepatan *Ageing Drum* menjadi kunci utama dalam pengaturan kekentalan *viscose*, sedangkan temperatur *Ageing* berperan sebagai faktor pendukung yang memperkuat atau melemahkan efek tersebut.

Berdasarkan grafik *BF* terhadap *tenacity*, terlihat bahwa peningkatan *BF* dari rentang 35–39 ke 40–44 detik diikuti oleh peningkatan *tenacity* dari 2,616 menjadi sekitar 2,623 cN/dtex. Hal ini menunjukkan bahwa pada *BF* rendah hingga menengah, peningkatan kekentalan *viscose* memberikan kondisi pemintalan yang lebih stabil sehingga orientasi

molekul selulosa selama proses penarikan dapat berlangsung lebih efektif. Kondisi ini menghasilkan serat dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Namun, setelah mencapai nilai yang maksimum pada *BF* sekitar 40–44 detik, peningkatan *BF* selanjutnya justru diikuti oleh penurunan nilai *tenacity* secara bertahap hingga mencapai nilai terendah yaitu sekitar 2,600 cN/dtex pada *BF* 65–69 detik.

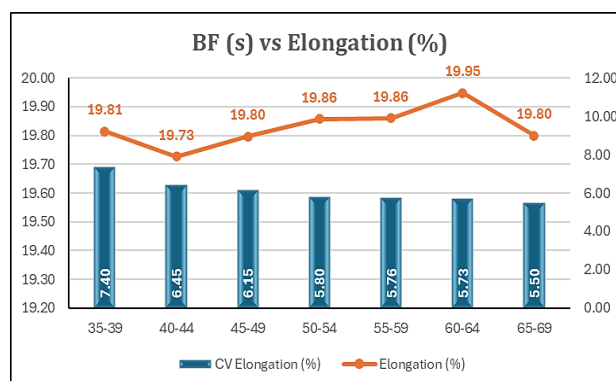


**Gambar 4.** Grafik *BF* terhadap *Tenacity*.

Penurunan *tenacity* pada *BF* yang lebih tinggi dapat dijelaskan oleh meningkatnya hambatan aliran dan menurunnya kemampuan deformasi *viscose* selama proses pemintalan. Kekentalan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan aliran filamen menjadi kurang homogen dan mengurangi efisiensi orientasi molekul selulosa sehingga struktur serat yang terbentuk menjadi kurang optimal untuk menahan beban tarik. Dengan demikian, hubungan antara *BF* dan *tenacity* bersifat tidak linier dan menunjukkan adanya nilai *BF* optimum untuk memperoleh *tenacity* maksimum (Acharya et al., 2021).

Selain nilai rata-rata *tenacity*, grafik juga menampilkan nilai *CV tenacity* yang menggambarkan tingkat variasi atau kestabilan kekuatan tarik serat. Terlihat bahwa pada *BF* rendah (35–39 detik) nilai *CV tenacity* relatif tinggi, yaitu sekitar 8,37%, yang mengindikasikan variasi kualitas serat yang cukup besar. Seiring dengan peningkatan *BF* hingga rentang menengah (45–54 detik), nilai *CV tenacity* menurun hingga sekitar 6,36–6,94%, menunjukkan bahwa proses pemintalan menjadi lebih stabil dan menghasilkan kualitas serat yang lebih seragam. Namun, pada *BF* yang lebih tinggi, nilai *CV tenacity* kembali meningkat hingga sekitar 6,80% pada *BF* 65–69 detik. Peningkatan *CV* ini mengindikasikan bahwa kekentalan *viscose* yang terlalu tinggi tidak hanya menurunkan nilai rata-rata *tenacity*, tetapi juga meningkatkan ketidakstabilan proses dan variasi kualitas serat. Kondisi ini berpotensi meningkatkan risiko produk tidak memenuhi spesifikasi, meskipun nilai *tenacity* rata-rata masih berada dalam batas yang dapat diterima.

Secara keseluruhan, grafik *BF* terhadap nilai *tenacity* menunjukkan bahwa pada rentang *BF* menengah, khususnya sekitar 50–54 detik, memberikan kombinasi terbaik antara nilai *tenacity* yang tinggi dan *CV tenacity* yang rendah. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian kekentalan *viscose* pada rentang tersebut penting untuk mencapai kekuatan tarik rayon yang optimal dan konsisten. Temuan ini memperkuat peran *BF* sebagai parameter kunci dalam pengendalian kualitas serat rayon, tidak hanya dari sisi nilai rata-rata sifat mekanis tetapi juga dari sisi kestabilan proses produksi.



**Gambar 5.** Grafik *BF* terhadap *Elongation*.

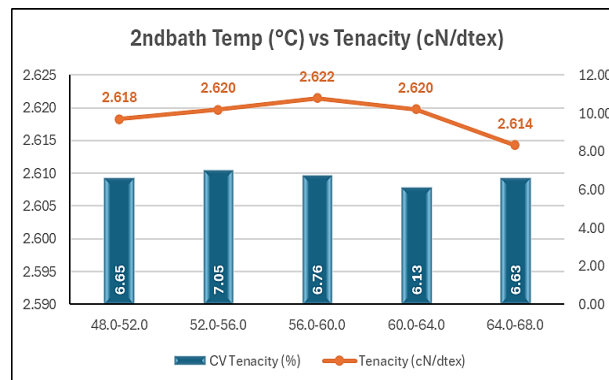
Berdasarkan grafik *BF* terhadap *elongation*, terlihat bahwa nilai *elongation* berada pada rentang relatif sempit, yaitu sekitar 19,73–19,95%. Pada *BF* rendah (35–39 detik), *elongation* berada pada nilai sekitar 19,81%, kemudian sedikit menurun pada *BF* 40–44 detik menjadi sekitar 19,73%. Selanjutnya, seiring dengan peningkatan *BF* hingga rentang 60–64 detik, nilai *elongation* cenderung meningkat dan mencapai nilai maksimum sekitar 19,95%. Pada *BF* tertinggi (65–69 detik), *elongation* kembali menurun menjadi sekitar 19,80%. Pola ini menunjukkan bahwa pengaruh *BF* terhadap *elongation* tidak bersifat linier dan relatif lebih moderat dibandingkan pengaruhnya terhadap *tenacity*.

Peningkatan *elongation* pada *BF* menengah hingga tinggi dapat dikaitkan dengan meningkatnya fleksibilitas struktur serat akibat berkurangnya orientasi molekul yang terlalu kaku selama proses pemintalan. Kekentalan *viscose* yang lebih tinggi dapat mengurangi derajat orientasi molekul selulosa saat penarikan sehingga serat yang dihasilkan memiliki kemampuan regang yang lebih besar. Namun, pada *BF* yang terlalu tinggi, aliran *viscose* menjadi kurang stabil dan pembentukan struktur serat menjadi tidak optimal sehingga *elongation* tidak lagi meningkat dan cenderung menurun (Dias et al., 2020).

Selain nilai rata-rata *elongation*, grafik juga menunjukkan perubahan nilai *CV elongation*. Pada *BF* rendah (35–39 detik), nilai *CV elongation* relatif tinggi, yaitu sekitar 7,40%, yang menunjukkan variasi sifat regangan yang cukup besar antar serat. Seiring dengan meningkatnya *BF*, nilai *CV elongation* menurun secara bertahap hingga mencapai sekitar 5,50% pada *BF* 65–69 detik, relatif stabil pada *BF* yang lebih tinggi. Penurunan *CV elongation* ini mengindikasikan bahwa peningkatan *BF* hingga rentang tertentu dapat meningkatkan keseragaman sifat regangan serat. Namun, meskipun nilai *CV elongation* relatif rendah pada *BF* tinggi, hal ini tidak selalu diikuti oleh peningkatan nilai *elongation* rata-rata yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa kekentalan *viscose* yang terlalu tinggi cenderung menstabilkan proses dari sisi variasi *elongation*, tetapi tidak memberikan keuntungan tambahan terhadap nilai *elongation* itu sendiri. Dengan demikian, pengendalian *BF* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara nilai *elongation* dan kestabilan proses (Chen et al., 2020).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa *BF* menengah hingga tinggi, khususnya pada rentang sekitar 50–64 detik, memberikan kombinasi *elongation* yang relatif tinggi dengan *CV elongation* yang sangat rendah. Temuan ini menunjukkan bahwa kekentalan *viscose* berperan dalam mengendalikan sifat elastis serat rayon, meskipun pengaruhnya terhadap *elongation* tidak sekuat pengaruhnya terhadap *tenacity*. Oleh karena itu, optimasi *BF* sebaiknya dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan keseimbangan antara kekuatan tarik dan kemampuan regang serat.

Dalam proses produksi rayon *viscose*, regenerasi utama selulosa terjadi pada tahap *spinbath* yang memiliki konsentrasi asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) tinggi. Sementara itu, larutan *2ndbath* berfungsi sebagai tahap pendukung, bukan sebagai media regenerasi utama. Peran utama *2ndbath* adalah menyempurnakan reaksi regenerasi yang telah dimulai di *spinbath*, menyediakan kondisi yang sesuai untuk proses *stretching* lanjutan, meningkatkan orientasi molekul selulosa, serta membantu penguapan dan penghilangan sisa pelarut volatil seperti karbon disulfida ( $CS_2$ ).



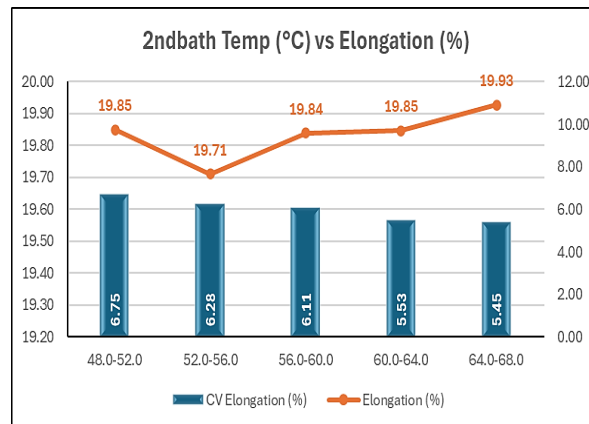
**Gambar 6.** Grafik temperatur *2ndbath* terhadap *Tenacity*.

Berdasarkan grafik hubungan antara temperatur *2ndbath* dan *tenacity*, terlihat bahwa peningkatan temperatur *2ndbath* dari rentang 48–52 °C hingga 56–60 °C diikuti oleh peningkatan nilai *tenacity*, yang menunjukkan adanya temperatur optimum. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada temperatur tersebut, *2ndbath* mampu mendukung proses penarikan serat secara lebih efektif sehingga orientasi rantai selulosa meningkat dan struktur serat menjadi lebih kompak. Orientasi molekul yang lebih baik ini berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan tarik serat rayon. Namun, pada temperatur *2ndbath* yang lebih tinggi, di atas 60 °C, nilai *tenacity* cenderung menurun. Penurunan ini diduga disebabkan oleh laju penyempurnaan regenerasi dan pepadatan struktur yang berlangsung terlalu cepat sehingga waktu yang tersedia untuk proses orientasi molekul selama *stretching* menjadi terbatas. Selain itu, penguapan  $CS_2$  yang terlalu cepat pada temperatur tinggi dapat menyebabkan ketidakseimbangan struktur internal serat, yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap kekuatan Tarik (Zhang et al., 2021).

Selain nilai rata-rata *tenacity*, grafik juga menunjukkan variasi *Coefficient of Variation (CV) tenacity* pada berbagai temperatur *2ndbath*. Terlihat bahwa *CV tenacity* cenderung menurun pada rentang temperatur menengah, khususnya pada temperatur 56–60 °C dan 60–64 °C yang menghasilkan nilai *tenacity* tertinggi 2,622 dan 2,620 cN/dtex dan *CV* yang rendah 6,76% dan 6,13%. Penurunan *CV* ini menunjukkan bahwa kualitas serat menjadi lebih seragam dan proses berlangsung lebih stabil. Sebaliknya, pada temperatur *2ndbath* yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, nilai *tenacity* menurun dan nilai *CV* cenderung meningkat, yang mengindikasikan kekuatan serat melemah, serta ketidakstabilan proses dan variasi kualitas serat yang lebih besar.

Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa pengendalian temperatur *2ndbath* tidak hanya berpengaruh terhadap pencapaian nilai *tenacity* yang tinggi, tetapi juga terhadap kestabilan dan konsistensi mutu serat rayon. Dari sudut pandang operasional pabrik, temperatur *2ndbath* yang optimal harus ditetapkan dengan mempertimbangkan dua aspek utama, yaitu peningkatan kekuatan tarik dan penurunan variasi kualitas (*CV*). Dengan demikian, pengaturan

temperatur *2ndbath* yang tepat dapat berkontribusi signifikan terhadap peningkatan performa produk sekaligus efisiensi dan kestabilan proses produksi (Kannan & Thangaraju, 2022).



**Gambar 7.** Grafik temperatur *2ndbath* terhadap *Elongation*.

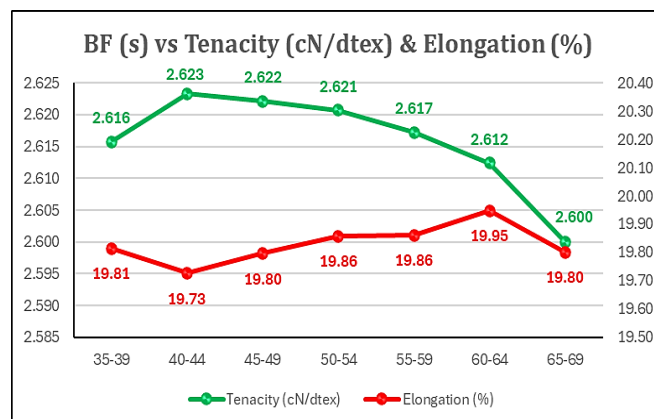
Berdasarkan grafik, *elongation* menunjukkan kecenderungan meningkat seiring kenaikan temperatur *2ndbath*. Nilai *elongation* relatif lebih rendah pada temperatur 48–56 °C, kemudian meningkat pada rentang 56–60 °C dan terus meningkat hingga mencapai nilai tertinggi pada temperatur 64–68 °C. Pola ini mengindikasikan bahwa temperatur *2ndbath* yang lebih tinggi mampu mendukung kemampuan mulur serat rayon, meskipun perubahannya tidak bersifat linier sempurna. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh temperatur yang bersifat gradual dan saling terkait dengan kondisi proses lainnya.

Secara konseptual, peningkatan *elongation* pada temperatur *2ndbath* yang lebih tinggi dapat dikaitkan dengan peran *2ndbath* sebagai tahap pendukung proses *Stretching* dan penyempurnaan regenerasi. Pada temperatur yang lebih tinggi, serat yang telah terbentuk di *spinbath* memiliki fleksibilitas yang lebih baik selama proses penarikan lanjutan sehingga mampu mengalami deformasi lebih besar sebelum terjadinya putus. Selain itu, temperatur yang lebih tinggi membantu penguapan sisa CS<sub>2</sub> secara lebih efektif, yang dapat mengurangi kekakuan lokal pada struktur serat dan mendukung peningkatan *elongation* (Singh et al., 2023).

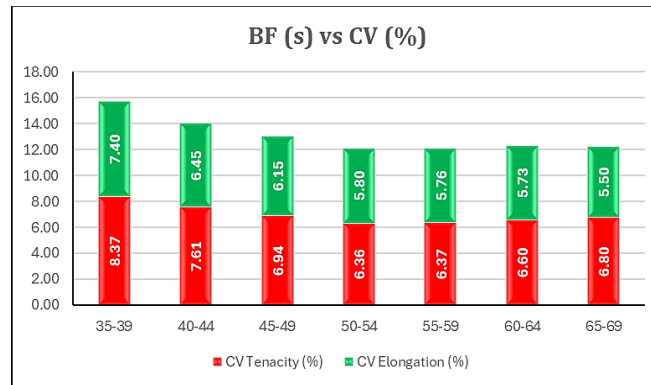
Nilai *CV elongation* pada grafik menunjukkan kecenderungan menurun seiring peningkatan temperatur *2ndbath*. Penurunan *CV* ini menandakan bahwa distribusi nilai *elongation* menjadi lebih sempit dan proses berlangsung lebih stabil pada temperatur yang lebih tinggi. Dengan kata lain, selain meningkatkan nilai rata-rata *elongation*, pengaturan temperatur *2ndbath* yang tepat juga berkontribusi terhadap keseragaman kualitas serat yang dihasilkan (Shaker & Nawab, 2022).

Dari sudut pandang operasional pabrik, hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian temperatur *2ndbath* memiliki peran penting dalam mencapai *elongation* yang tinggi dan stabil. Temperatur yang terlalu rendah berpotensi menghasilkan serat dengan kemampuan mulur yang terbatas dan variasi kualitas yang lebih besar, sedangkan temperatur yang lebih tinggi dalam rentang operasi yang aman dapat meningkatkan *elongation* sekaligus menurunkan *CV*. Oleh karena itu, penentuan temperatur *2ndbath* perlu dilakukan secara hati-hati dengan mempertimbangkan keseimbangan antara *elongation*, *tenacity*, dan kestabilan proses secara keseluruhan (Xu et al., 2021).

Penentuan kondisi optimum kekentalan *viscose (BF)* pada penelitian ini dilakukan berdasarkan analisis deskriptif terhadap data operasional selama satu tahun yang telah difilter pada kondisi proses yang relatif konstan (kecepatan mesin *spinning*, *Titer*, panjang serat, diameter roller, *stretch ratio*, *relaxation ratio*, temperatur *2ndbath*). Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kecenderungan perubahan nilai rata-rata *tenacity* dan *elongation* pada setiap rentang *BF*, serta mempertimbangkan kestabilan proses yang ditunjukkan oleh nilai *Coefficient of Variation (CV)*.



**Gambar 8.** Grafik kondisi optimum *BF* untuk *Tenacity* dan *Elongation*.

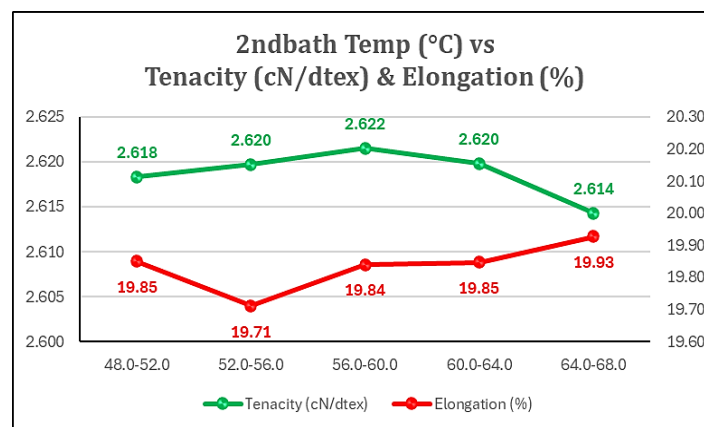


**Gambar 9.** Grafik *BF* terhadap *CV Tenacity* dan *Elongation*.

Berdasarkan grafik hubungan *BF* terhadap *tenacity* dan *elongation*, terlihat bahwa nilai *tenacity* meningkat dari *BF* 35–39 detik dan mencapai nilai maksimum pada rentang *BF* 40–44 detik, kemudian menurun secara bertahap seiring dengan peningkatan *BF* hingga 65–69 detik. Penurunan *tenacity* pada *BF* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa larutan *viscose* dengan kekentalan tinggi cenderung menghambat orientasi molekul selulosa selama proses pemintalan sehingga kekuatan tarik serat menurun. Sebaliknya, *elongation* menunjukkan kecenderungan meningkat pada *BF* menengah hingga tinggi. Nilai *elongation* relatif lebih rendah pada *BF* rendah, kemudian meningkat secara bertahap dan mencapai nilai tertinggi pada rentang *BF* 60–64 detik, sebelum kembali menurun pada *BF* 65–69 detik. Pola ini menunjukkan bahwa *viscose* dengan kekentalan menengah-tinggi memberikan fleksibilitas struktur serat yang lebih baik sehingga serat mampu mengalami deformasi yang lebih besar sebelum putus (Basu et al., 2025).

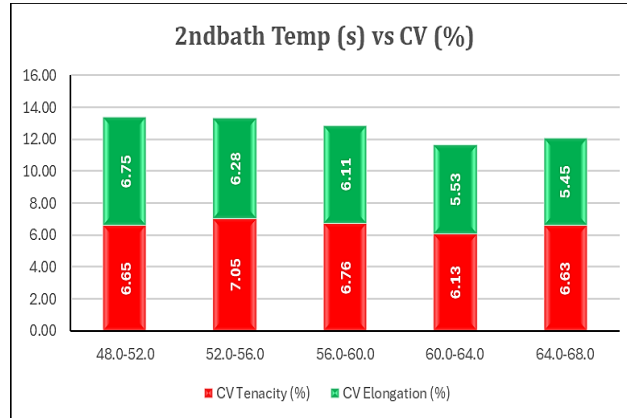
Perbedaan kecenderungan antara *tenacity* dan *elongation* tersebut menunjukkan adanya hubungan berlawanan terhadap kekentalan *viscose*. *BF* yang terlalu rendah menghasilkan *tenacity* tinggi tetapi *elongation* relatif rendah, sedangkan *BF* yang terlalu tinggi meningkatkan *elongation* namun menurunkan *tenacity*. Oleh karena itu, penentuan kondisi optimum *BF* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kedua sifat mekanis tersebut, serta kestabilan proses yang tercermin dari nilai *CV*. Dengan mempertimbangkan nilai rata-rata *tenacity*, *elongation*, dan *CV* secara bersamaan, rentang *BF* 50–54 detik dapat ditetapkan sebagai kondisi operasi yang paling seimbang (Nikmatin et al., 2022). Pada rentang ini, nilai *tenacity* masih relatif tinggi 2,621 cN/dtex, *elongation* berada pada tingkat yang baik 19,86%, dan variasi kualitas (*CV*) terkendali 12,16%. Dari sudut pandang operasional pabrik, rentang *BF* ini memberikan kompromi terbaik antara kekuatan tarik, kemampuan mulur, dan kestabilan proses sehingga layak direkomendasikan sebagai kondisi operasi optimum untuk menghasilkan serat rayon dengan kualitas mekanis yang konsisten (Anggarini et al., 2025).

Penentuan kondisi temperatur *2ndbath* pada penelitian ini dilakukan berdasarkan analisis deskriptif terhadap data operasional selama satu tahun yang telah difilter pada kondisi proses yang seragam (kecepatan mesin *spinning*, *Titer*, panjang serat, diameter roller, *stretch ratio*, *relaxation ratio*, kekentalan *viscose*). Evaluasi dilakukan dengan cara membandingkan kecenderungan perubahan nilai rata-rata *tenacity* dan *elongation* pada setiap rentang temperatur *2ndbath*, serta mempertimbangkan kestabilan proses yang ditunjukkan oleh nilai *Coefficient of Variation (CV)* (Thakur et al., 2021).



**Gambar 10.** Grafik kondisi optimum temperatur *2ndbath* untuk *Tenacity* dan *Elongation*.

Berdasarkan grafik, nilai *tenacity* meningkat seiring kenaikan temperatur *2ndbath* dari 48–52 °C hingga mencapai nilai maksimum pada rentang 56–60 °C. Pada temperatur yang lebih tinggi, yaitu 60–64 °C dan 64–68 °C, *tenacity* cenderung menurun meskipun penurunannya relatif kecil. Pola ini menunjukkan bahwa terdapat temperatur optimum *2ndbath* untuk pencapaian kekuatan tarik serat rayon yang maksimal.



**Gambar 11.** Grafik temperatur *2ndbath* terhadap *CV Tenacity* dan *Elongation*.

Sebaliknya, *elongation* menunjukkan kecenderungan yang meningkat pada temperatur larutan *2ndbath* yang lebih tinggi. Nilai *elongation* relatif lebih rendah pada temperatur 48–56 °C, kemudian meningkat pada rentang 56–60 °C dan mencapai nilai tertinggi pada temperatur 64–68 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa temperatur *2ndbath* yang lebih tinggi mendukung kemampuan mulur serat, yang berkaitan dengan peran *2ndbath* sebagai tahap penyempurna proses *Stretching* dan relaksasi struktur serat yang telah terbentuk di *spinbath*.

Perbedaan kecenderungan antara *tenacity* dan *elongation* menunjukkan adanya *trade-off* (hubungan berlawanan) terhadap pengaturan temperatur *2ndbath*. Temperatur yang terlalu rendah menghasilkan orientasi molekul yang kurang optimal sehingga *tenacity* dan *elongation* relatif rendah, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi cenderung meningkatkan *elongation* namun dapat menurunkan *tenacity*. Oleh karena itu, penentuan temperatur *2ndbath* optimum perlu mempertimbangkan keseimbangan kedua sifat mekanis tersebut, bukan hanya mengejar nilai maksimum salah satu parameter (Sanders et al., 2021).

Dengan mempertimbangkan nilai rata-rata *tenacity*, *elongation*, dan kestabilan proses (*CV*), rentang temperatur 60–64 °C dapat ditetapkan sebagai kondisi operasi yang paling seimbang. Pada rentang ini, nilai *tenacity* masih mendekati maksimum 2,620 cN/dtex, *elongation* telah meningkat secara signifikan 19,85%, dan variasi kualitas relatif lebih terkendali dibandingkan temperatur yang lebih rendah. Dari sudut pandang operasional pabrik, rentang temperatur ini memberikan kompromi terbaik antara kekuatan tarik, kemampuan mulur, dan kestabilan proses sehingga direkomendasikan sebagai kondisi temperatur *2ndbath* yang optimum (Čuk et al., 2024).

Hasil analisis pada bab-bab sebelumnya menunjukkan bahwa pengendalian kekentalan *viscose* (*BF*), temperatur *2ndbath*, dan parameter pendukung lainnya memiliki pengaruh yang saling terkait terhadap sifat mekanis serat rayon, khususnya *tenacity* dan *elongation*. Meskipun penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif berbasis data operasional historis, temuan yang diperoleh memberikan dasar yang kuat untuk perbaikan pengendalian proses di tingkat pabrik.

Dari sisi kekentalan *viscose*, hasil penelitian menunjukkan adanya *trade-off* antara *tenacity* dan *elongation*. *BF* yang terlalu rendah cenderung menghasilkan *tenacity* tinggi namun *elongation* relatif rendah dan variasi kualitas lebih besar, sedangkan *BF* yang terlalu tinggi meningkatkan *elongation* tetapi menurunkan *tenacity*. Berdasarkan keseimbangan kedua sifat mekanis dan kestabilan proses, rentang *BF* 50–54 detik direkomendasikan sebagai kondisi operasi yang paling optimal. Rentang ini memberikan kombinasi kekuatan tarik yang baik, kemampuan mulur yang memadai, serta variasi kualitas yang lebih terkendali (Mondal et al., 2025).

Temperatur *2ndbath* juga terbukti berperan penting sebagai tahap penyempurna proses, terutama dalam mendukung *stretching* lanjutan, orientasi molekul, dan penghilangan sisa CS<sub>2</sub>. Temperatur yang terlalu rendah menyebabkan proses penyempurnaan kurang optimal, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan *tenacity* meskipun *elongation* meningkat. Berdasarkan hasil analisis, rentang temperatur 60–64 °C direkomendasikan sebagai kondisi operasi yang seimbang untuk mencapai *tenacity* dan *elongation* yang baik sekaligus menjaga kestabilan produksi (Hemmatian et al., 2021).

Secara operasional, implementasi rekomendasi ini memerlukan pengendalian parameter proses yang konsisten, terutama pada tahap *ageing*, pelarutan *viscose*, *spinbath*, dan *2ndbath*. Penyesuaian *BF* harus diikuti dengan pengaturan waktu *ageing* dan kondisi pelarutan yang stabil, sedangkan pengendalian temperatur *2ndbath* perlu dikombinasikan dengan pengaturan waktu tinggal, level larutan dan pemanasan untuk memastikan proses berjalan seragam. Monitoring rutin terhadap nilai rata-rata dan *CV* sifat mekanis disarankan sebagai indikator kestabilan proses harian.

Sebagai rekomendasi lanjutan, pabrik disarankan melakukan uji produksi terkontrol dalam skala terbatas dengan menerapkan rentang *BF* dan temperatur *2ndbath* yang direkomendasikan, sambil menjaga parameter lain tetap konstan. Evaluasi hasil uji difokuskan pada pencapaian spesifikasi produk, konsistensi kualitas, serta dampaknya terhadap efisiensi proses dan tingkat reject. Dengan pendekatan ini, hasil penelitian dapat diintegrasikan secara bertahap ke dalam praktik operasional pabrik dan berkontribusi pada peningkatan kualitas dan stabilitas produksi serat rayon secara berkelanjutan.



#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa viskositas larutan viscose dan temperatur regeneration bath memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat mekanis serat rayon, khususnya kekuatan tarik (tenacity) dan kemampuan mulur (elongation). Peningkatan viskositas viscose pada rentang tertentu mampu meningkatkan orientasi molekul selulosa sehingga tenacity meningkat, namun viskositas yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan homogenitas aliran dan menurunkan kekuatan serat. Sebaliknya, elongation cenderung meningkat pada viskositas menengah hingga tinggi akibat meningkatnya fleksibilitas struktur serat. Temperatur regeneration bath juga berperan penting dalam proses stretching dan penyempurnaan regenerasi selulosa. Temperatur yang meningkat hingga kondisi optimum mampu memperbaiki orientasi molekul dan meningkatkan kualitas mekanis serat, sedangkan temperatur yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan tenacity akibat regenerasi dan penguapan komponen volatil yang berlangsung terlalu cepat. Berdasarkan evaluasi sifat mekanis dan kestabilan proses, kondisi operasi optimum diperoleh pada rentang viskositas BF 50–54 detik dan temperatur regeneration bath 60–64 °C. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian parameter proses secara terintegrasi menjadi faktor penting dalam menghasilkan kualitas serat rayon yang konsisten. Penelitian ini juga memperlihatkan bahwa hubungan antara parameter proses dan sifat mekanis serat tidak bersifat linier, melainkan menunjukkan adanya trade-off antara tenacity dan elongation. Meskipun penelitian dilakukan menggunakan data historis operasional pabrik, hasil yang diperoleh dapat menjadi dasar pengembangan strategi optimasi proses pada industri serat selulosa regenerasi lainnya dengan karakteristik proses wet spinning yang serupa.

#### REFERENCES

- Acharya, S., Liyanage, S., Parajuli, P., Rumi, S. S., Shamshina, J. L., & Abidi, N. (2021). Utilization of Cellulose to Its Full Potential: A Review on Cellulose Dissolution, Regeneration, and Applications. *Polymers*, *13*(24), 4344. <https://doi.org/10.3390/polym13244344>
- Anggarini, N. H., Suhartini, M., Rahmawati, R., Putri, M. A. ega, Yunus, M. Y., Deswita, D., & Sugiharto, U. (2025). Synthesis and application of bioadsorbent for Y(III) ions from Poly(vinyl amine) grafted onto rayon by radiation-induced grafting. *Nuclear Engineering and Technology*, *57*(6), 103398. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.103398>
- Ban, M. T., Mahadin, N., & Abd Karim, K. J. (2022). Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose for swelling properties study. *Materials Today: Proceedings*, *50*, 2567–2575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.342>
- Basu, P., Garg, M., Das, M., & Gupta, V. (2025). Portland cement concrete reinforced with irradiated rayon fiber from textile industry waste. *Environmental Science and Pollution Research*, *32*(48), 27434–27453. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36348-w>
- Boby, C. A., Muhsinin, S., & Roni, A. (2021). Review: Produksi, Karakterisasi Dan Aplikasi Selulosa Bakteri Di Bidang Farmasi. *JOPS (Journal Of Pharmacy and Science)*, *4*(2), 12–28. <https://doi.org/10.36341/jops.v4i2.1887>
- Chen, F., Sawada, D., Hummel, M., Sixta, H., & Budtova, T. (2020). Swelling and dissolution kinetics of natural and man-made cellulose fibers in solvent power tuned ionic liquid. *Cellulose*, *27*(13), 7399–7415. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03312-5>
- Čuk, N., Simončič, B., Fink, R., & Tomšič, B. (2024). Bacterial Adhesion to Natural and Synthetic Fibre-Forming Polymers: Influence of Material Properties. *Polymers*, *16*(17), 2409. <https://doi.org/10.3390/polym16172409>
- Dias, Y. J., Kolbasov, A., Sinha-Ray, S., Pourdeyhimi, B., & Yarin, A. L. (2020). Theoretical and experimental study of dissolution mechanism of cellulose. *Journal of Molecular Liquids*, *312*, 113450. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113450>
- Hemmatian, T., Lee, H., & Kim, J. (2021). Bacteria Adhesion of Textiles Influenced by Wettability and Pore Characteristics of Fibrous Substrates. *Polymers*, *13*(2), 223. <https://doi.org/10.3390/polym13020223>
- Henggu, K. U., Jodi, J. U., Ratu, O. H., Sihono, S., & Nurdiansyah, Y. (2024). Karakteristik fisik selulosa dari rumput laut *Chaetomorpha crassa* yang diekstraksi dengan suhu yang berbeda. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, *27*(11), 1074–1090. <https://doi.org/10.17844/jphpi.v27i11.58122>
- Hidayat, R., & Syahtaria, M. I. (2023). Black Liquor sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan dari Industri Pulp dan Kertas. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, *4*(2), 108–117. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17588>
- Kannan, G., & Thangaraju, R. (2022). Recent Progress on Natural Lignocellulosic Fiber Reinforced Polymer Composites: A Review. *Journal of Natural Fibers*, *19*(13), 7100–7131. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1944425>
- Mondal, Md. I. H., Ahmed, F., & Rahman, Md. H. (2025). Fabrication of Bio-Based Composite Materials for Antimicrobial Cotton Fabric With Microbial Anti-Adhesive Activity. *Biopolymers*, *116*(1). <https://doi.org/10.1002/bip.23635>
- Nikmatin, S., Irmansyah, I., Hermawan, B., Kardiansyah, T., Seta, F. T., Afiah, I. N., & Umam, R. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches as Raw Material of Dissolving Pulp for Viscose Rayon Fiber in Making Textile Products. *Polymers*, *14*(15), 3208. <https://doi.org/10.3390/polym14153208>
- Paminto, A. K., Surya Sitorus, R., Firmansyah, R., & Sahari Laili, N. (2020). Kajian Efisiensi Energi di Industri Pulp dan Kertas. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, *13*(1), 1. <https://doi.org/10.24843/JEM.2020.v13.i01.p01>



- Permata, R. M., & Erwin. (2023). Strategi Peningkatan Kualitas dan Efisiensi Biaya Pada Proses Stage Washing Dengan Penurunan Nilai Total Alkali Lime Mud di Industri Manufaktur Pulp dan Kertas. *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (JVTI)*, 5(1), 06–12. <https://doi.org/10.36870/jvti.v5i1.310>
- Ramadhani, S. A., Simanjuntak, H. T. R. F., & Mashur, D. (2022). Pengembangan Kapasitas Organisasi Pada Pendidikan Tinggi Teknologi Pulp dan Kertas Universitas Riau. *PUBLIKA : Jurnal Ilmu Administrasi Publik*, 8(2), 131–145. [https://doi.org/10.25299/jiap.2022.vol8\(2\).10407](https://doi.org/10.25299/jiap.2022.vol8(2).10407)
- Sanders, D., Grunden, A., & Dunn, R. R. (2021). A review of clothing microbiology: the history of clothing and the role of microbes in textiles. *Biology Letters*, 17(1), rsbl.2020.0700. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2020.0700>
- Santi, S. S., Febriansyah, H., Chamida, R., & Saputro, E. A. (2021). Karakteristik Gugus Fungsi Pada Polimerisasi Silika Selulosa. *Jurnal Teknik Kimia*, 15(2). [https://doi.org/10.33005/jurnal\\_tekkim.v15i2.2558](https://doi.org/10.33005/jurnal_tekkim.v15i2.2558)
- Shaker, K., & Nawab, Y. (2022). *Lignocellulosic Fiber Structure* (pp. 11–19). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97413-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97413-8_2)
- Singh, S. S., Lim, L.-T., & Manickavasagan, A. (2023). Imaging and spectroscopic techniques for microstructural and compositional analysis of lignocellulosic materials: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(1), 499–517. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01075-4>
- Susilo, N. A., Rizaldi, W., Apriani, R., Manik, N. N., & Maulia, G. (2020). Purifikasi Reject Pulp Sebagai Media Filtrasi Dalam Pengolahan Air Limbah Pulp Dan Kertas. *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (JVTI)*, 2(1). <https://doi.org/10.36870/jvti.v2i1.169>
- Thakur, V., Guleria, A., Kumar, S., Sharma, S., & Singh, K. (2021). Recent advances in nanocellulose processing, functionalization and applications: a review. *Materials Advances*, 2(6), 1872–1895. <https://doi.org/10.1039/D1MA00049G>
- Wu, C., Li, J., Zhang, Y., Li, X., Wang, S., & Li, D. (2023). Cellulose Dissolution, Modification, and the Derived Hydrogel: A Review. *ChemSusChem*, 16(21). <https://doi.org/10.1002/cssc.202300518>
- Xu, C., Zhang, X., Hussein, Z., Wang, P., Chen, R., Yuan, Q., Gao, Y., Song, N., & Gouda, S. G. (2021). Influence of the structure and properties of lignocellulose on the physicochemical characteristics of lignocellulose-based residues used as an environmentally friendly substrate. *Science of The Total Environment*, 790, 148089. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148089>
- Yu, S., & Budtova, T. (2024). Creating and exploring carboxymethyl cellulose aerogels as drug delivery devices. *Carbohydrate Polymers*, 332, 121925. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121925>
- Zhang, L., Huang, C., Zhang, C., & Pan, H. (2021). Swelling and dissolution of cellulose in binary systems of three ionic liquids and three co-solvents. *Cellulose*, 28(8), 4643–4653. <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03844-4>