

**KARAKTERISTIK SIFAT FISIK DAN DIMENSI SERAT DALAM PROSES
PEMBUATAN KERTAS**

Oleh:

Nyoman J. Wistara



**DEPARTEMEN HASIL HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
IPB UNIVERSITY**

2026

!. PENDAHULUAN

Kualitas kertas sangat dipengaruhi oleh karakteristik serat pulp serta perlakuan yang diterapkan selama proses pembuatannya. Berbagai tahapan proses, terutama penggilingan (refining) dan pengeringan (drying), menyebabkan perubahan pada sifat fisik, kimia, dan morfologi serat yang selanjutnya menentukan kemampuan serat membentuk ikatan antarfiber serta sifat mekanik lembaran kertas (Walsh 2006).

Pengeringan merupakan salah satu tahapan yang memberikan perubahan permanen terhadap struktur serat. Selama proses ini, penguapan air dari dinding sel menyebabkan terjadinya **hornifikasi**, yaitu kontraksi dinding sel yang diikuti penutupan pori-pori dan pembentukan ikatan hidrogen internal yang bersifat irreversibel. Fenomena tersebut mengurangi kemampuan serat untuk menyerap air dan mengembang kembali (swelling), sehingga menurunkan fleksibilitas serat dan potensi pembentukan ikatan antarfiber pada proses pembentukan lembaran berikutnya (Park 2006). Penurunan kemampuan mengembang akibat hornifikasi bahkan diduga telah dimulai sejak lembaran mengalami penurunan kadar air secara drastis pada bagian *wire* mesin kertas (Park 2006). Padahal, interaksi antara air dan serat selulosa merupakan faktor penting yang menentukan fleksibilitas serat serta luas bidang kontak antarfiber, yang pada akhirnya memengaruhi kekuatan kertas (Walsh 2006).

Selain pengeringan, penggilingan pulp juga merupakan tahapan penting dalam pengembangan sifat serat. Perlakuan mekanis selama refining meningkatkan fibrilasi eksternal, fleksibilitas serat, dan luas permukaan spesifik sehingga memperbaiki kemampuan pembentukan ikatan antarfiber. Di sisi lain, refining yang berlebihan dapat menyebabkan pemotongan serat dan penurunan panjang serat, sehingga sifat kekuatan yang sangat dipengaruhi oleh integritas serat tunggal, seperti ketahanan sobek (*tear strength*), cenderung menurun (Scott dan Abbott 1995). Oleh karena itu, kualitas kertas merupakan hasil keseimbangan antara peningkatan kemampuan ikatan antarfiber dan mempertahankan dimensi serta integritas serat.

Meskipun pengaruh pengeringan dan refining terhadap sifat pulp telah banyak dilaporkan, sebagian besar penelitian berfokus pada perubahan sifat pulp secara umum atau pada sifat mekanik kertas. Informasi mengenai perubahan sifat fisik serat, seperti **water retention value (WRV)** dan viskositas pulp, serta perubahan dimensi serat pada berbagai fraksi proses, termasuk **beaten pulp**, **unbeaten pulp**, **primary sludge**, dan **white water**, masih relatif terbatas. Padahal, pemahaman mengenai karakteristik masing-masing fraksi tersebut penting untuk mengevaluasi efisiensi proses, potensi pemanfaatan kembali serat, serta pengelolaan kehilangan serat selama proses pembuatan kertas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan sifat fisik dan dimensi serat pada **beaten pulp**, **unbeaten pulp**, **primary**

sludge, dan **white water** sebagai akibat dari proses refining dan pengeringan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai perubahan karakteristik serat selama proses pembuatan kertas serta menjadi dasar dalam pengendalian proses untuk meningkatkan kualitas produk dan efisiensi pemanfaatan serat.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Selama proses pulping dan pembuatan kertas, sebagian serat ikut terbawa bersama aliran limbah cair dari proses tersebut. Dua fraksi limbah yang masih mengandung serat dalam jumlah cukup tinggi adalah **primary sludge** dan **white water**. Primary sludge merupakan hasil pemisahan padatan pada tahap pengolahan limbah primer yang masih mengandung lebih dari 20% serat selulosa (Casey 1980b; Camden 2007). Sementara itu, white water merupakan air sirkulasi dari proses pembentukan lembaran yang mengandung serat halus (*fines*), fragmen serat, dan partikel pengisi yang masih berpotensi dimanfaatkan kembali dalam sistem produksi (BBPK 2005; Asyikin 2000). Karakteristik kedua fraksi tersebut sangat dipengaruhi oleh perlakuan mekanis maupun termal yang dialami serat selama proses pembuatan kertas.

Perubahan karakteristik serat terutama terjadi selama proses **refining**. Perlakuan mekanis ini menghasilkan dua kelompok *fines*, yaitu **primary fines** yang telah terdapat pada pulp sebelum penggilingan dan **secondary fines** yang terbentuk akibat pemotongan serta fibrilasi serat selama refining (Niskanen 1998; Park 2006). Secondary fines memiliki luas permukaan yang jauh lebih besar dibandingkan dengan primary fines, sehingga memberikan kontribusi yang lebih signifikan terhadap pembentukan ikatan antarfiber (Niskanen 1998). Selain meningkatkan luas permukaan kontak, refining juga menyebabkan fibrilasi internal dan eksternal yang meningkatkan fleksibilitas serat serta kemampuan pembentukan ikatan hidrogen selama pembentukan lembaran (Hiltunen 2003). Akibatnya, sifat kekuatan yang bergantung pada kualitas ikatan antarfiber, seperti kekuatan tarik, retak, dan kebocoran, umumnya meningkat (Kang 2007). Sebaliknya, refining yang berlebihan meningkatkan proporsi serat pendek sehingga menurunkan ketahanan sobek yang sangat dipengaruhi oleh panjang serat (Walsh 2006; Hubbe dan Heitmann 2007).

Selain refining, proses pengeringan juga memberikan pengaruh permanen terhadap karakteristik serat melalui fenomena **hornifikasi**. Selama pengeringan, air yang berada di dalam dinding sel menguap sehingga pori-pori serat menyusut dan terbentuk ikatan hidrogen internal yang bersifat irreversibel. Perubahan tersebut mengurangi kemampuan serat untuk menyerap air dan mengembang kembali pada siklus berikutnya, sehingga fleksibilitas serat menurun (Park 2006; Walsh 2006). Hornifikasi menjadi salah satu penyebab utama penurunan kemampuan pembentukan ikatan antarfiber pada pulp yang telah mengalami pengeringan, terutama dalam proses pemulihan serat daur ulang.

Fenomena hornifikasi umumnya dievaluasi melalui pengukuran **water retention value (WRV)**, yaitu parameter yang menggambarkan kemampuan serat dalam mempertahankan air setelah proses sentrifugasi. Nilai WRV berkaitan langsung dengan tingkat pengembangan dinding sel serta luas permukaan efektif yang tersedia untuk pembentukan ikatan antarfiber (Walsh 2006). Refining meningkatkan WRV melalui pembentukan fibril dan secondary fines yang mampu mengikat lebih banyak air dibandingkan dengan serat utuh (Asyikin 2000; Hubbe dan Heitmann 2007). Sebaliknya, pengeringan menyebabkan penurunan WRV akibat terjadinya hornifikasi. Oleh karena itu, WRV banyak digunakan sebagai indikator perubahan struktur serat selama proses pembuatan maupun daur ulang kertas.

Selain WRV, **viskositas pulp** juga merupakan parameter penting untuk mengevaluasi kualitas serat. Viskositas mencerminkan derajat polimerisasi selulosa dan tingkat degradasi rantai polimer. Penurunan viskositas umumnya menunjukkan terjadinya degradasi selulosa yang diikuti oleh penurunan kekuatan intrinsik serat (Wathén et al. 2005; Spiridon dan Paula 2002). Oleh karena itu, pengukuran WRV dan viskositas secara bersamaan memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai perubahan struktur maupun kualitas serat akibat refining dan pengeringan.

Pemanfaatan kembali serat melalui proses daur ulang memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan karena dapat mengurangi konsumsi serat primer, menurunkan biaya produksi, menghemat energi, serta mengurangi beban limbah (Hubbe et al. 2007). Namun demikian, serat daur ulang umumnya mengalami penurunan fleksibilitas, kekuatan, dan kecerahan akibat akumulasi kerusakan struktur selama siklus penggunaan sebelumnya. Serat tersebut juga dapat mengandung kontaminan yang memengaruhi kualitas produk akhir (Wahyudi dan Zen 2007). Meskipun demikian, karakteristik tertentu, seperti formasi lembaran dan opasitas, dapat ditingkatkan melalui pengendalian komposisi pulp serta penggunaan bahan tambahan yang sesuai.

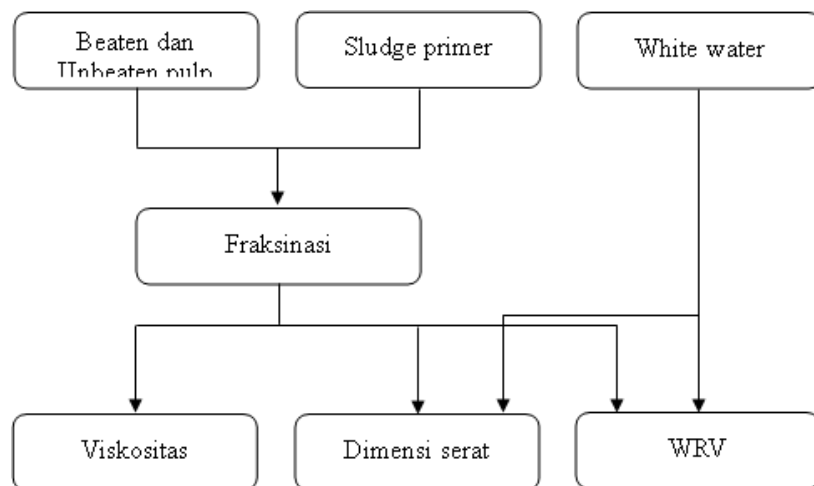
Karakteristik dimensi serat merupakan faktor penting yang menentukan sifat akhir pulp dan kertas. Panjang serat yang tinggi umumnya meningkatkan ketahanan sobek karena mampu membentuk jaringan serat yang lebih kuat (Cappelletto et al. 2000). Sebaliknya, serat yang lebih pendek menghasilkan formasi lembaran yang lebih seragam dan permukaan yang lebih halus, meskipun dengan ketahanan sobek yang lebih rendah (Walsh 2006). Selain dimensi dasar, berbagai **indeks turunan serat** seperti **Runkel ratio**, **flexibility ratio**, **coefficient of rigidity**, **Muhlsteph ratio**, dan **felting power** juga banyak digunakan untuk memprediksi kualitas pulp dan kertas. Serat dengan nilai Runkel ratio rendah dan flexibility ratio tinggi umumnya memiliki dinding sel tipis dan mudah mengalami kolaps sehingga menghasilkan luas kontak antarfiber yang besar serta meningkatkan kekuatan tarik, lipat, dan jebol (Ververis et al. 2004; Ogbonnaya et al. 1997). Sebaliknya, serat berdinding tebal atau yang memiliki coefficient of rigidity dan Muhlsteph ratio tinggi cenderung membentuk lembaran yang lebih kasar dengan luas

ikatan antarfiber yang lebih kecil, sehingga kekuatan tarik menurun meskipun ketahanan sobek relatif meningkat (Sofyan et al. 1993; Panshin dan de Zeeuw 1980).

3. BAHAN DAN METODE

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perubahan sifat fisik dan dimensi serat akibat proses refining dan pengeringan pada berbagai fraksi serat selama proses pembuatan kertas. Sampel yang dianalisis terdiri atas **beaten pulp**, **unbeaten pulp**, **primary sludge**, dan **white water**. Parameter yang diamati meliputi distribusi fraksi serat, **water retention value (WRV)**, viskositas pulp, dimensi serat, serta nilai turunan dimensi serat. Alur penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Bagan Kerja Penelitian.

3.2 Fraksinasi Serat

Fraksinasi serat dilakukan menggunakan **Bauer-McNett Fiber Classifier** pada beaten pulp, unbeaten pulp, dan primary sludge. Masing-masing sampel disiapkan sebanyak 5 g berdasarkan berat kering tanur (oven-dry basis), kemudian didispersikan dalam air hingga volume 1.500 mL dan diaduk selama ± 20 menit untuk memperoleh suspensi yang homogen.

Suspensi selanjutnya difraksinasi secara bertingkat menggunakan saringan berukuran **30, 50, 100, 150, dan 200 mesh** (Tabel 1). Serat yang tertahan pada setiap fraksi dikeringkan dalam oven pada suhu $105 \pm 3^\circ\text{C}$ hingga berat konstan untuk menentukan distribusi fraksi serat, sedangkan sebagian sampel digunakan untuk analisis selanjutnya. Persentase masing-masing fraksi dihitung berdasarkan perbandingan berat kering serat pada setiap saringan dengan berat awal contoh uji.

Tabel 1 Ukuran Saringan Pulp pada Proses Fraksinasi

Jenis	Kehalusan saringan (mesh)
E1	30
E2	50
E3	100
E4	150
E5	200

3.3 Water Retention Value (WRV)

Nilai **water retention value (WRV)** ditentukan berdasarkan metode Thode et al. (1960) yang dimodifikasi oleh Wistara (2000). Sebanyak 1,5 g pulp (berat kering tanur) didispersikan dalam air destilata hingga volume 2.000 mL. Suspensi kemudian divakum selama 4 jam sebelum digunakan untuk membentuk lembaran.

Sebanyak 200 mL suspensi digunakan untuk membentuk lembaran pulp yang setara dengan **0,15 g** serat kering menggunakan alat pembentuk lembaran khusus. Pada penelitian ini digunakan saringan **stainless steel 200 mesh** sebagai pengganti saringan perunggu 100 mesh untuk meminimalkan kehilangan serat selama pembentukan lembaran.

Lembaran pulp selanjutnya disentrifugasi pada **910 × g (5.000 rpm)** selama **15 menit**, kemudian ditimbang dalam kondisi basah, dikeringkan pada suhu **105 ± 3 °C** hingga berat konstan, lalu ditimbang kembali. Nilai WRV dihitung berdasarkan perbandingan berat air yang tertahan dengan berat kering setelah oven.

3.4 Pulp Viscosity

Viskositas pulp ditentukan sesuai metode standar **TAPPI T230 om-94**. Nilai viskositas digunakan sebagai indikator derajat polimerisasi selulosa dan tingkat degradasi serat selama proses refining dan pengeringan.

3.5 Analisis Dimensi Serat

Analisis dimensi serat dilakukan sesuai dengan standar **SII 1883-86**. Sebelum pengukuran, serat dimaserasi hingga terdispersi sempurna.

Panjang serat diukur pada **200 serat individu**, sedangkan diameter serat, diameter lumen, dan tebal dinding sel diukur pada **50 serat** menggunakan mikroskop digital yang dilengkapi kamera dan perangkat lunak analisis citra. Pengamatan panjang serat

dilakukan pada perbesaran **40×**, sedangkan diameter serat, diameter lumen, dan tebal dinding sel diamati pada perbesaran **400×**.

Parameter dimensi serat yang diukur meliputi: panjang serat, diameter serat, diameter lumen, dan tebal dinding sel

3.6 Nilai Turunan Serat

Nilai turunan serat dihitung berdasarkan data dimensi serat menggunakan persamaan standar sebagai berikut: **Runkel ratio**, **Felting power (slenderness ratio)**, **Muhlsteph ratio**, **Coefficient of rigidity**, dan **Flexibility ratio**.

3.7 Pengamatan Mikroskopis

Karakteristik morfologi serat didokumentasikan menggunakan kamera digital yang terintegrasi dengan mikroskop. Seluruh citra mikroskopis dianalisis secara deskriptif untuk mengevaluasi perubahan morfologi serat akibat refining dan pengeringan, kemudian dibandingkan dengan hasil penelitian terdahulu.

3.8 Analisis Data

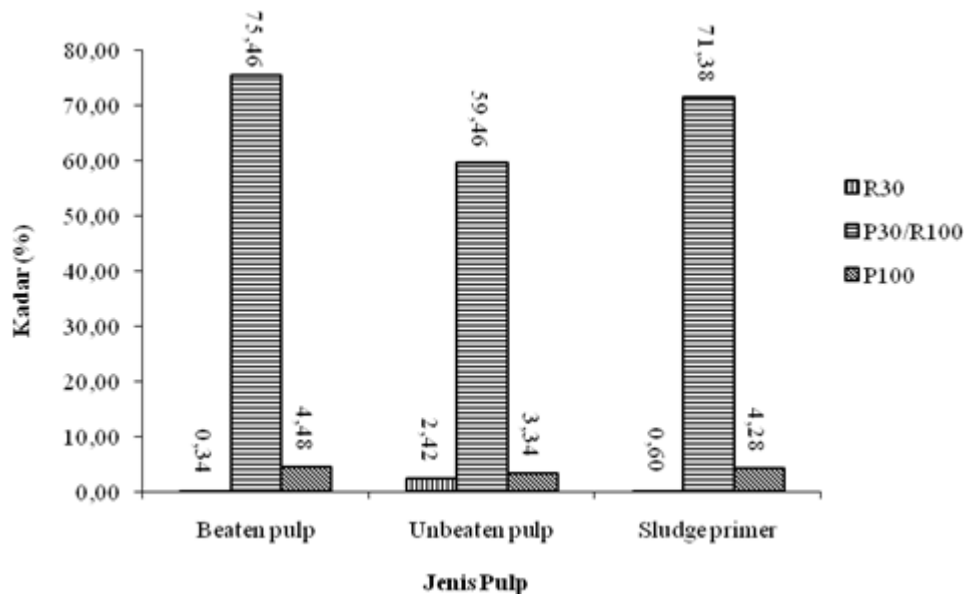
Seluruh data disajikan dalam bentuk nilai rata-rata dan dianalisis secara deskriptif berdasarkan perubahan karakteristik fisik serta dimensi serat pada masing-masing fraksi pulp. Hasil pengamatan dibandingkan dengan teori dan penelitian terdahulu untuk menjelaskan pengaruh refining dan pengeringan terhadap karakteristik serat.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Fraksionasi Serat (Versi Revisi)

Fraksionasi serat dilakukan untuk mengevaluasi distribusi serat panjang, serat pendek, dan *finer* pada beaten pulp, unbeaten pulp, serta primary sludge. Fraksionasi white water tidak dilakukan karena kandungan seratnya relatif rendah (sekitar 5%) serta jumlah sampel yang tersedia tidak mencukupi untuk analisis lebih lanjut (Casey 1980b). Distribusi masing-masing fraksi serat disajikan pada Gambar 2.

Hasil fraksionasi menunjukkan bahwa fraksi serat pendek (P30/R100) merupakan komponen dominan pada seluruh jenis pulp, diikuti oleh fraksi *finer* (P100/R200) dan serat panjang (R30). Dibandingkan dengan **beaten pulp**, **unbeaten pulp** memiliki proporsi serat panjang yang lebih tinggi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa proses refining menyebabkan pemendekan serat (*fiber shortening*) akibat aksi mekanis selama penggilingan, sebagaimana dilaporkan oleh Park (2006). Pemotongan serat tersebut mengubah distribusi ukuran serat dan berkontribusi pada peningkatan proporsi serat pendek dalam beaten pulp.



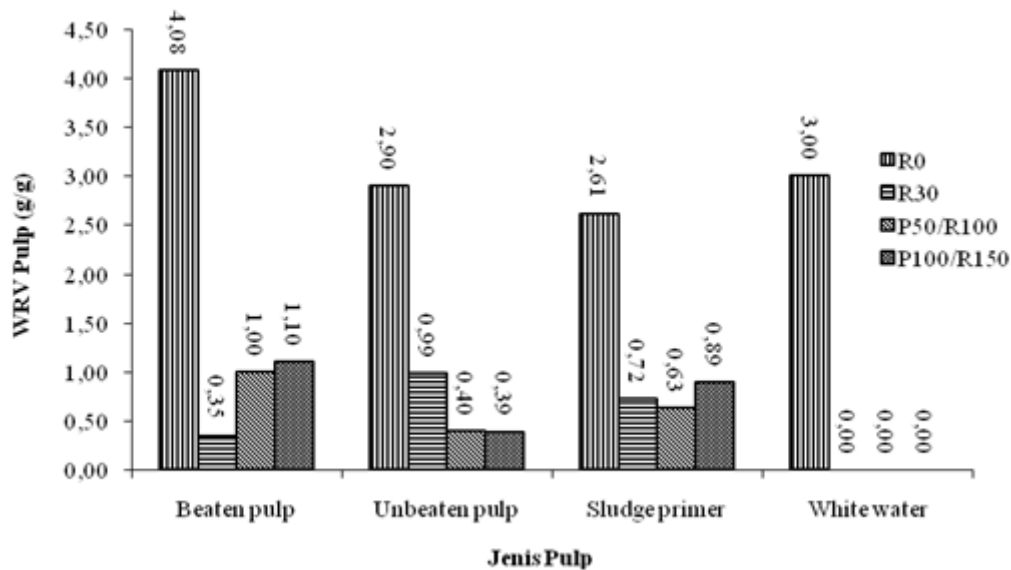
Gambar 2 Fraksionasi serat pada berbagai tingkat ukuran saringan (LF: serat panjang; SF: serat pendek; F: *finer*; R30, P30/R100, P100/R200: ukuran saringan)

Selain menyebabkan pemendekan serat, refining juga meningkatkan pembentukan *secondary fines*. Gambar 2 menunjukkan bahwa beaten pulp memiliki kandungan *finer* tertinggi, diikuti oleh **primary sludge** dan **unbeaten pulp**. Pembentukan *finer* selama refining terjadi akibat delaminasi dinding sel dan pelepasan mikrofibril dari permukaan serat (Hiltunen 2003). Sementara itu, kandungan *finer* pada primary sludge berasal dari akumulasi serat halus dan fragmen serat yang terbawa selama proses pengolahan limbah primer (Das dan Tollner 2002; Casey 1980b). Meningkatnya kandungan *finer* diperkirakan akan meningkatkan luas permukaan spesifik serat serta kemampuan pulp dalam mempertahankan air (*water retention value*, WRV), sebagaimana dilaporkan oleh Wistara (2000). Kondisi ini mengindikasikan bahwa refining tidak hanya mengubah distribusi ukuran serat, tetapi juga memengaruhi karakteristik fisik pulp yang berperan penting dalam pembentukan ikatan antarfiber.

4.2 Sifat Fisik Serat

4.2.1 Water Retention Value (WRV)

Water Retention Value (WRV) merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan serat menyerap dan mempertahankan air, sekaligus mencerminkan tingkat pengembangan (*swelling*) dinding sel. Nilai WRV pada berbagai jenis pulp dan fraksi serat disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Nilai rata-rata WRV pada berbagai tingkat ukuran saringan hasil fraksionasi serat (R0: *unfractionated fiber*; LF: serat panjang; SF: serat pendek; F: *fines*; R30, P50/R100, P100/R150: ukuran saringan).

Secara umum, nilai WRV tertinggi diperoleh pada beaten pulp, kemudian menurun pada unbeaten pulp dan primary sludge, sedangkan white water menunjukkan nilai yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan primary sludge. Pengujian WRV pada white water hanya dilakukan pada sampel tanpa fraksionasi (R0) karena keterbatasan jumlah serat yang tersedia.

Tingginya nilai WRV pada beaten pulp berkaitan erat dengan kandungan *fines* yang lebih besar dibandingkan dengan jenis pulp lainnya (Gambar 2). *Fines* memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga mampu menyerap dan mempertahankan air lebih banyak dibandingkan dengan serat utuh (Hubbe dan Heitmann 2007). Selain itu, refining menyebabkan terjadinya fibrilasi eksternal yang meningkatkan jumlah gugus hidroksil yang terekspos, sehingga memperbesar kemampuan serat untuk berinteraksi dengan air melalui ikatan hidrogen.

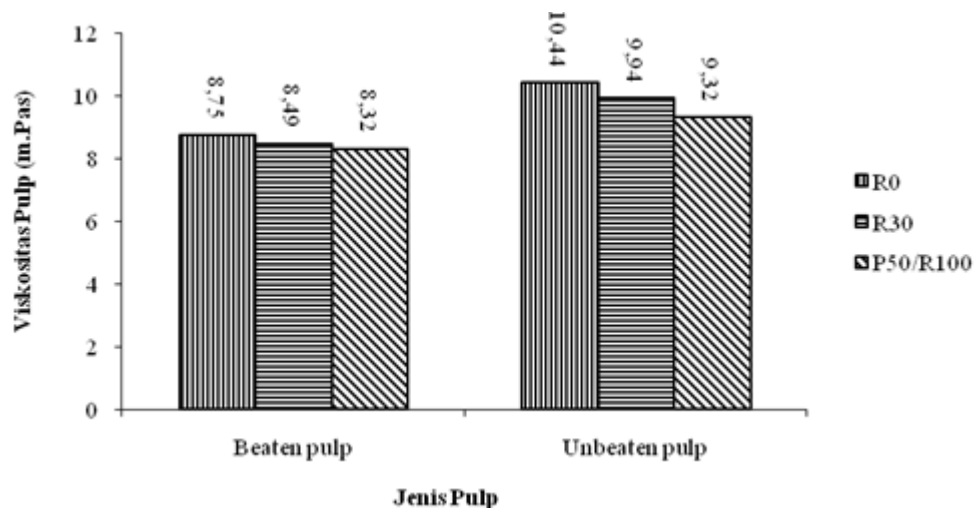
Peningkatan WRV menunjukkan bahwa refining meningkatkan kemampuan pengembangan serat serta memperbesar luas bidang kontak antarfiber selama pembentukan lembaran. Kondisi tersebut berpotensi meningkatkan jumlah ikatan hidrogen yang terbentuk sehingga menghasilkan lembaran pulp dengan kekuatan tarik yang lebih tinggi (Klungness et al. 2000). Dengan demikian, kandungan *fines* dan perubahan morfologi serat akibat refining merupakan faktor utama yang menentukan nilai WRV pulp.

4.2.2 Viskositas Pulp

Viskositas pulp merupakan indikator derajat polimerisasi selulosa dan tingkat degradasi rantai polimer selama proses pengolahan. Penurunan viskositas umumnya menunjukkan terjadinya degradasi selulosa yang dapat menurunkan kekuatan intrinsik serat (Joutsimo 2004; Spiridon dan Paula 2002). Oleh karena itu, pengukuran viskositas digunakan untuk mengevaluasi pengaruh refining terhadap kualitas serat.

Pada penelitian ini, pengujian viskositas hanya dilakukan pada **beaten pulp** dan **unbeaten pulp**. Primary sludge tidak dianalisis karena kandungan ligninnya melebihi 4%, sehingga tidak memenuhi persyaratan pengujian menggunakan larutan cupriethylenediamine (CED). Pengujian juga tidak dilakukan pada white water karena keterbatasan jumlah sampel.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai viskositas berkisar antara **8,32–10,44 mPa·s**, dengan **unbeaten pulp** memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan **beaten pulp** (Gambar 4). Perbedaan ini menunjukkan bahwa refining menyebabkan penurunan derajat polimerisasi selulosa akibat aksi mekanis selama proses penggilingan. Selain menghasilkan fibrilasi, refining juga menyebabkan pemotongan serat (*fiber shortening*) sehingga panjang serat rata-rata berkurang (Park 2006). Serat yang lebih panjang umumnya memiliki rantai selulosa yang lebih utuh dan menghasilkan nilai viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan serat pendek (Spiridon dan Paula 2002).



Gambar 4 Nilai rata-rata viskositas pulp pada berbagai tingkat ukuran saringan hasil fraksionasi serat (R0: *unfractionated fiber*; LF: serat panjang; SF: serat pendek, R30, P50/R100 : ukuran saringan).

Meskipun terjadi penurunan viskositas setelah refining, seluruh nilai yang diperoleh masih berada di atas batas minimum kualitas pulp menurut standar internal RAPP (>6 mPa·s) (Maringan 2007). Hal ini menunjukkan bahwa proses refining yang diterapkan belum menyebabkan degradasi selulosa yang berlebihan dan masih menghasilkan pulp dengan kualitas yang memenuhi persyaratan industri.

4.3.2 Turunan Dimensi Serat (Versi Revisi)

Turunan dimensi serat merupakan parameter yang lebih representatif dibandingkan dimensi serat tunggal dalam memprediksi kualitas pulp dan kertas, karena mencerminkan kemampuan serat membentuk ikatan antarfiber selama pembentukan lembaran. Nilai turunan dimensi serat yang diperoleh pada berbagai jenis pulp dan fraksi serat disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Nilai Rata-rata Turunan Dimensi Serat

Jenis pulp		Turunan Dimensi Serat				
		RR	FP	MR	CR	FR
Beaten pulp	BPR0	1,18	44,15	79,01	0,27	0,46
	BPR30	1,17	34,42	78,69	0,27	0,46
	BPP50/R100	0,61	43,70	61,54	0,19	0,62
	BPP150/R200	0,67	27,47	64,03	0,20	0,60
	UBPR0	1,21	73,47	79,53	0,27	0,45
Unbeaten pulp	UBPR30	1,34	76,50	81,66	0,29	0,43
	UBPP50/R100	1,01	44,80	75,14	0,25	0,50
	UBPP150/R200	1,13	38,62	77,93	0,27	0,47
	SPR0	1,42	65,02	82,85	0,29	0,41
Sludge priemer	SPR30	1,28	60,24	80,83	0,28	0,44
	SPP50/R100	1,23	50,36	79,90	0,28	0,45
	SPP150/R100	1,30	55,53	81,05	0,28	0,44
White water R0		1,17	57,70	78,72	0,27	0,46

Runkel Ratio. Nilai Runkel ratio (RR) pada penelitian ini berkisar antara 0,61–1,42, yang menurut klasifikasi serat kayu Indonesia termasuk dalam kelas mutu II untuk bahan baku pulp dan kertas. Nilai RR terendah diperoleh pada fraksi beaten pulp P50/R100 (0,61), sedangkan nilai tertinggi terdapat pada primary sludge R0 (1,42).

Runkel ratio menggambarkan perbandingan antara ketebalan dinding sel dan diameter lumen serat. Semakin rendah nilai RR, semakin tipis dinding sel relatif terhadap lumen sehingga serat lebih mudah mengalami kolaps selama pembentukan lembaran. Kondisi tersebut meningkatkan luas kontak antarfiber dan memperkuat pembentukan ikatan

hidrogen, yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan tarik, kekuatan retak, dan kekuatan lipat kertas (Ververis et al. 2004; Ogbonnaya et al. 1997). Sebaliknya, nilai RR yang tinggi menunjukkan serat ber dinding tebal yang lebih kaku, sehingga kemampuan membentuk ikatan antarfiber menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, berdasarkan parameter ini, beaten pulp, khususnya fraksi P50/R100, diperkirakan menghasilkan kualitas pulp dan kertas yang paling baik.

Felting Power. Nilai felting power (FP) berkisar antara 27,47–76,50, yang termasuk dalam kelas mutu II–III menurut klasifikasi serat kayu Indonesia. Nilai tertinggi diperoleh pada unbeaten pulp fraksi R30 (76,50), sedangkan nilai terendah terdapat pada beaten pulp fraksi P150/R200 (27,47).

Felting power merupakan indikator kemampuan serat membentuk jaringan yang saling mengunci selama pembentukan lembaran dan sangat dipengaruhi oleh rasio panjang terhadap diameter serat. Nilai FP yang tinggi umumnya menunjukkan serat yang lebih panjang dan ramping sehingga mampu meningkatkan ketahanan sobek (*tear strength*) karena distribusi beban pada jaringan serat menjadi lebih efektif (Ververis et al. 2003). Hubbe dan Heitmann (2007) juga melaporkan bahwa panjang serat merupakan salah satu faktor utama yang menentukan ketahanan sobek kertas. Dengan demikian, **unbeaten pulp**, khususnya fraksi **R30**, diperkirakan memiliki potensi terbaik untuk menghasilkan kertas dengan ketahanan sobek yang tinggi.

Muhlsteph Ratio. Nilai **Muhlsteph ratio (MR)** berkisar antara **61,54–82,85** dan seluruh sampel termasuk dalam **kelas mutu III**. Nilai terendah diperoleh pada **fraksi beaten pulp P50/R100**, sedangkan nilai tertinggi terdapat pada **fraksi primary sludge R0**.

Muhlsteph ratio berkaitan dengan kemampuan serat untuk mengalami kolaps selama pembentukan lembaran. Nilai MR yang rendah menunjukkan bahwa serat lebih mudah mengalami deformasi, sehingga menghasilkan luas bidang kontak antarfiber yang lebih besar. Sebaliknya, nilai MR yang tinggi mengindikasikan serat yang lebih kaku dengan luas kontak antarfiber yang lebih kecil, sehingga kekuatan tarik dan kekuatan retak cenderung menurun (Tamolang dan Wangaard 1961 dalam Sofyan et al. 1993). Berdasarkan parameter ini, beaten pulp fraksi P50/R100 memiliki karakteristik yang paling menguntungkan untuk menghasilkan lembaran pulp dengan kekuatan mekanik yang lebih baik.

Coefficient of Rigidity. Nilai coefficient of rigidity (CR) berada pada kisaran 0,19–0,29 dan termasuk dalam kelas mutu III. Nilai terendah diperoleh pada beaten pulp fraksi P50/R100, sedangkan nilai tertinggi dijumpai pada unbeaten pulp fraksi R30 dan primary sludge R0.

Koefisien kekakuan mencerminkan tingkat kekakuan dinding sel serat. Semakin rendah nilai CR, semakin fleksibel serat sehingga lebih mudah mengalami kolaps dan membentuk ikatan antarfiber yang kuat. Sebaliknya, serat dengan koefisien kekakuan

tinggi memiliki kemampuan deformasi yang lebih rendah sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih kecil (Tamolang dan Wangaard 1961 dalam Sofyan et al. 1993). Oleh karena itu, beateen pulp, khususnya fraksi P50/R100, menunjukkan karakteristik terbaik berdasarkan parameter ini.

Flexibility Ratio. Nilai **flexibility ratio (FR)** berkisar antara **0,41–0,62** dan termasuk dalam **kelas mutu II–III**. Nilai tertinggi diperoleh pada fraksi beateen pulp P50/R100 (0,62), sedangkan nilai terendah terdapat pada fraksi primary sludge R0 (0,41).

Flexibility ratio menunjukkan kemampuan serat untuk mengalami deformasi selama proses pembentukan lembaran. Serat dengan nilai FR yang tinggi umumnya memiliki dinding sel yang relatif tipis sehingga lebih mudah mengalami kolaps dan membentuk ikatan antarfiber yang lebih sempurna. Kondisi ini menghasilkan luas bidang kontak yang lebih besar dan berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik, kekuatan retak, serta kekuatan lipat kertas (Ververis et al. 2004; Ogbonnaya et al. 1997). Sebaliknya, nilai FR yang rendah menunjukkan serat yang lebih kaku dan kurang fleksibel. Berdasarkan parameter ini, **beateen pulp dengan fraksi P50/R100** diperkirakan menghasilkan kualitas pulp dan kertas terbaik.

Secara keseluruhan, hasil analisis turunan dimensi serat menunjukkan bahwa proses refining menghasilkan perubahan karakteristik serat yang menguntungkan bagi pembentukan ikatan antarfiber. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan Runkel ratio, Muhlsteph ratio, dan coefficient of rigidity, serta peningkatan flexibility ratio pada beateen pulp dibandingkan dengan unbeaten pulp dan primary sludge. Perubahan tersebut mengindikasikan bahwa refining meningkatkan kemampuan serat untuk mengalami kolaps dan memperluas bidang kontak antarfiber selama pembentukan lembaran.

Di sisi lain, Unbeaten pulp memiliki nilai felting power tertinggi karena masih mempertahankan panjang serat yang relatif lebih panjang. Kondisi ini menunjukkan bahwa unbeaten pulp lebih berpotensi menghasilkan kertas dengan ketahanan sobek yang tinggi, sedangkan beateen pulp lebih unggul dalam sifat-sifat kekuatan yang bergantung pada kualitas ikatan antarfiber, seperti kekuatan tarik, retak, dan lipat. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa refining menghasilkan kompromi (*trade-off*) antara pemendekan serat dan peningkatan kemampuan pembentukan ikatan antarfiber, yang pada akhirnya menentukan karakteristik mekanik pulp dan kertas.

DAFTAR PUSTAKA

Abubakar S. M., Scot G. M., and Klunghness J. H. 1995. *Fiber Fractionation as a Method of Improving Handsheet Properties after Recycling*. Wisconsin: The Forest Product Technology. The University of Wisconsin. *Tappi Journal*. Vol. 78 No. 5.

- Asyikin. 2000. Proses Produksi dan Pengendalian Kualitas Kertas PPC 80 g/m² Di PT. Pido Deli Pulp and Paper Mills Karawang Jawa Barat [skripsi]. Bogor: Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- [BBPK] Balai Besar Pulp dan Kertas. 2005. Panduan Teknis Bagi Industri Dalam Pemenuhan Persyaratan Kriteria Ekolabel Kertas Cetak Tanpa Salut. Asdep Urusan Standardisasi, Teknologi dan Produksi Bersih Kementerian Lingkungan Hidup (KLH). Bandung.
- Cappelletto P, Mongardini F, Barberi B, Sannibale M, Brizzi M, Pignatelli V. 2000. Papermaking Pulps from the Fibrous Fraction of *Miscanthus × giganteus*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Centro Tecnico Industriale Roma. Italy: Industrial Crops and Products 11 (2000) 205–210
- Casey JP. 1980b. *Pulping Chemistry and Chemical Technology. Volume II. Third Edition. Pulping and Papermaking*. New York; Intercine Publicer Inc.
- Camden C. 2007. Wastewater Treatment. <http://www.ccmua.org/sludge.html> [20 September 2007].
- Das C. K. and E. W. Tollner. 2002. Comparison Between Composting of Untreated and Anaerobically Treated Paper Mills Sludge. Georgia: Department of Biological and Agricultural Engineering. American Society of Agricultural Engineers. *Tappi Journal*. Vol 46(2): 475–481.
- Fengel D. and G. Wegener. 1995. Kayu: Kimia, Ultrastruktur, Reaksi-reaksi. Terjemahan. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hiltunen E. 2003. On The Beating of Reinforcement Pulp [disertasi]. Finland: The Degree of Doctor of Science in Technology. The Department of Forest Products Technology.
- Hubbe M. A., Venditti R. A., and Rojas O. J. 2007. What happens to cellulosic fibers during papermaking and recycling? A Review. Department of Forest Biomaterials Science and Engineering. USA: North Carolina State University.
- Hubbe M. A., and Heitman J. J. 2007. Review of Factors Affecting The Release of Water from Cellulosic Fibers During Paper Manufacturing. *Bioresources* 2(3), 500–523.
- Joutsimo O. 2004. Effect of Mechanical Treatment on Softwood Kraft Fiber Properties [disertasi]. Helsinki: The Degree of Doctor of Technology. The Helsinki University of Technology.
- Kang T. 2007. Role of External Fibrillation in Pulp and Paper Properties [disertasi]. Finland: The Degree of Doctor of Science in Technology. The Helsinki University of Technology.
- Kang T. and Hannu P. 2006. Characterization of Chemical Pulp Fines. Finland: The National Technology Agency of Finland. *Tappi Journal*. Vol. 5: No. 2 Februari: 25–28.
- Klungness J.H., Sykes Ms., Ahmed A., and Abubakar S. 2000. Preventing Loss and Restoring Water Retention Value to Pulp by Fiber Loading. Di dalam *Tappi Recycling*

- Symposium. Tappi Proceeding: Hyatt Crystal City. 5-8 March 2000. Washington, DC. Tappi Press. Hlm 663-666.
- Maringan, Y. P. S. 2007. Analisis Biaya Produksi Pulp: Studi kasus di PT. Riau Andalan Pulp And Paper (PT. RAPP) Pangkalan Kerinci Riau [skripsi]. Bogor: Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- Niskanen, K. 1998. In-Plane Tensile Properties. Paper Physics. Ed. K.Niskanen, Publ. in co-operation with The Finnish Paper Engineers' Association and Tappi, Jyväskylä, Finland, 1998, pp. 139–191.
- Ogbonnaya, C.I., Roy-Macauley, H., Nwalozie, M.C., Annerose, D.J.M., 1997. Physical and histochemical properties of kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) grown under water deficit on a sandy soil. Ind. Crops Prod. 7, 9–18.
- Panshin AJ and C de Zeeuw. 1980. Textbook of Wood Technology: Structure, Identification, Uses, and Properties of the Commercial Woods of the United States and Canada. New York: McGraw-Hill Book Company.
- Park, S. 2006. Drying Behavior of Cellulose Fibers Characterized by Thermal Anlysis [disertasi]. North Carolina: The Degree of Doctor of Philosophy. The Graduate Faculty of North Carolina State University.
- Scott W. E. and Abbott J. C. 1995. Properties of Paper: An Introduction. Second Edition. Tappi Press. Georgia: Atlanta.
- Sofyan K, Deded SN, Trisna P. 1993. Sifat Pulp Pada Jenis-Jenis Kayu Cepat Tumbuh. Bogor: Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- Spiridon I. and Paula A. D. 2002. Some Preliminary Data on Enzymatic Hydrolysis of Pinus Pinaster Kraft Pulp. Department of Science and Paper Technology. Romania: Institute of Macromolecular Chemistry.
- Sulistiyowati, P. 1998. Kajian Struktur Anatomi *Pinus oocarpa* Schiede sebagai Bahan Baku Pulp dan Kertas [skripsi]. Bogor: Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor.
- Vervis C, Georghiou K, Christodoulakis N, Santas P, Santas R. 2004. Fiber Dimensions, Lignin and Cellulose Content of Various Plant Materials and Their Suitability for Paper Production. Department of Botany, Faculty of Biology, University of Athens, and OikoTechnics Institute, Greece: Industrial Crops and Products 19 (2004) 245–254
- Wahyudi T. W. and Zen H. M. 2007. Peningkatan Kualitas Serat Sekunder Dengan Perlakuan Enzim dan Polimer. Berita selulosa, Desember 2007. Bandung: Balai Besar Pulp dan Kertas (BBPK). Vol 42, hal. 83-89
- Walsh, F. L. 2006. An Isotopic Study of Fiber–Water Interactions [disertasi]. Georgia: The Doctor of Philosophy degree in the School of Chemical and Biomolecular Engineering. Georgia Institute of Technology. Tappi Journal Vol.4: No.1. Januari: 12.
- Wathen R, Olli J, and Tarja T. 2005. Effect of Different Degradation Mechanisms on Axial and Z-Directional Fiber Strength. 13th Fundamental Research Symposium, Cambridge, September 2005. Finland: KCL Science and Consulting. hlm: 631–647.

Wistara N. 2000. Sifat Penyerapan Air oleh Pulp Akibat Perbedaan Konsistensi Penggilingan dan Pendaaran. Bogor: Fakultas Kehutanan. Institut Pertanian Bogor. Jurnal Teknologi Hasil Hutan Vol 13(1): 36-43