

Aplikasi Nanofibrillated Cellulose (NFC) Dari Waste Fiber Pada Pembuatan Kertas Tisu Toilet Grade Mainstream

Sarimas^{1*}, Rachmawati Apriani¹

¹Program Studi Teknologi Pengolahan Pulp dan Kertas, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sains Bandung

ABSTRAK

Dalam proses produksi, ditemukan bahwa serat terbawa bersama air limbah. Serat ini berasal dari proses produksi yang hilang dan terbuang dengan limbah cair sebagai produk samping. Serat tersebut disebut *waste fiber* atau *recovery fiber* dan dapat digunakan kembali sebagai bahan baku *pulp* dan kertas. Penelitian ini bertujuan memanfaatkan limbah dari *fiber catcher* dengan cara konversi *waste fiber* menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC) dan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan NFC tersebut terhadap *physical properties* kertas tisu yang dihasilkan. Metode yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental atau percobaan secara langsung yang diawali dengan *treatment waste fiber*, proses hidrolisis asam dengan variasi H_2SO_4 dan H_3PO_4 masing-masing konsentrasi 4 M dan 6 M serta pengujian karakteristik NFC tersebut. Pembuatan *handsheet* kertas tisu dengan penambahan dosis NFC, yaitu 0 Kg/T, 1 Kg/T, 3 Kg/T, 5 Kg/T, dan 7 Kg/T. Parameter pengujian *physical properties* kertas tisu, antara lain: *grammature*, *thickness*, *tensile strength*, *tearing strength*, dan *bursting strength*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin bertambahnya dosis NFC maka semakin meningkatkan nilai *strength* kertas tisu dengan dosis tertinggi pada 7 Kg/T tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah memenuhi nilai standar *blank* dan dapat menurunkan nilai *bulky* atau ketebalan kertas tisu dengan dosis terbaik pada dosis 1 Kg/T variasi H_3PO_4 6 M, yaitu 1,99 cm^3/g . Pemanfaatan *waste fiber* menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC) cukup efektif dan aplikatif. Hal ini dapat dilihat dari pengujian karakteristik NFC meliputi *fiber length*, *fiber width*, dan SEM yang berubah sebelum dan setelah menjadi NFC dan pengaruh penambahan dosis NFC terhadap nilai *physical properties* kertas tisu yang semakin meningkat walaupun pada dosis rendah.

Kata kunci: *waste fiber*, *nanofibrillated cellulose*, *physical properties*, kertas tisu

ABSTRACT

In the production process, it was found that the fiber was carried away with the waste water. This fiber comes from the production process, which is lost and wasted with liquid waste as a by-product. The fiber is called waste fiber or recovery fiber and can be reused as raw material for pulp and paper. This study aims to utilize waste from fiber catcher by converting waste fiber to nanofibrillated cellulose (NFC) and to find out how the addition of NFC has an effect on the physical properties of the resulting tissue paper. The method used is an experimental research method or a direct experiment that begins with treatment of waste fiber, acid hydrolysis process with variations of H_2SO_4 and H_3PO_4 at concentrations of 4 M and 6 M, and testing the NFC characteristics. Making handsheets of tissue paper with the addition of NFC doses, namely 0 Kg/T, 1 Kg/T, 3 Kg/T, 5 Kg/T, and 7 Kg/T. Parameters for testing the physical properties of tissue paper include: grammature, thickness, tensile strength, tearing strength, and bursting strength. The results showed that the increase in the NFC dose increased the strength value of tissue paper with the highest dose at 7 Kg/T but at a dose of 1 Kg/T it already meets the standard blank value and can decrease the bulk value or tissue paper thickness with the best dose at a dose of 1 Kg/T variation H_3PO_4 6 M, namely 1,99 cm^3/g . Utilization of waste fiber to nanofibrillated cellulose (NFC) is quite effective and applicable. This can be seen from the testing of NFC characteristics, including: fiber length, fiber width, and changes in SEM before and after becoming NFC and the effect of increasing the NFC dose on the value of physical properties of tissue paper, which is increasing even at low doses.

Keywords: *waste fiber*, *nanofibrillated cellulose*, *physical properties*, *tissue paper*

1. Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Industri *pulp* dan kertas Indonesia merupakan salah satu industri terbesar di dunia. Di wilayah Asia, Indonesia menempati urutan ke-3 untuk industri pulp dan menempati urutan ke-4 untuk industri kertas. Pencapaian ini diperoleh dari kapasitas produksi *pulp* 11 juta ton/tahun dan produksi kertas 16 juta ton/tahun. Berbagai tantangan harus dihadapi oleh para pengusaha industri *pulp* dan kertas, salah satunya pertumbuhan ekonomi dan meningkatnya permintaan pasar (Yudha, A. P, 2019). Kertas tisu merupakan bahan kertas berbobot rendah dengan berbagai fungsi, termasuk tisu toilet, tisu wajah, tisu towel, tisu napkin, dan lainnya. Persyaratan kualitas kertas tisu berbeda sesuai dengan tujuan dan keinginan konsumen (de Assis, *et all.* 2018 dalam jurnal Morais, *et all.* 2021).

Dalam industri *pulp* dan kertas, bahan baku utama yang digunakan adalah serat yang berasal dari tumbuhan dengan kandungan utama berupa selulosa. Dalam proses produksi, ditemukan bahwa serat terbawa bersama air limbah. Serat ini berasal dari proses produksi yang hilang dan terbuang dengan limbah cair sebagai produk samping. Serat yang ditangkap oleh unit *disc filter* dapat digunakan kembali sebagai bahan baku *pulp* dan kertas (Fitriyanti, R. 2018). Serat tersebut biasa disebut *waste fiber* atau *recovery fiber* pada sistem *fiber catcher* di unit *stock preparation*. Sistem tersebut memisahkan limbah cair dan limbah serat yang ditampung pada *waste water pit* dipompakan ke *disc filter* (proses penyaringan) kemudian serat masuk ke *recovered fiber tank*, selanjutnya melewati *compactor press* dan dikumpulkan di dalam *jumbo bag*. *Waste fiber* yang dihasilkan cukup banyak dan belum dimanfaatkan secara maksimal. Oleh karena itu, perlu dilakukan sebuah cara pemanfaatan limbah dari *fiber catcher* tersebut menjadi produk yang bernilai. Penelitian ini diawali dengan konversi *waste fiber* menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC). Penggunaan NFC sebagai aditif dalam pembuatan kertas merupakan alternatif yang menarik untuk meningkatkan kekuatan kertas (Delgado Aguilar, *et all.* 2015). Inovasi terbaru dalam produksi NFC dari berbagai bahan sekarang ini mendapat perhatian khusus karena sifatnya yang *biodegradable*, kepadatan rendah, sifat mekanik yang tinggi, nilai ekonomi dan terbarukan (Khalil, H. A, *et all.* 2014). Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian dan pengembangan NFC menarik di kalangan peneliti karena karakteristiknya yang unik, seperti luas permukaan tinggi, *modulus young* tinggi, kekuatan tarik tinggi, dan koefisien

ekspansi termal yang rendah (M. Babae, *et all.* 2015).

Nanoselulosa memiliki kemampuan untuk menghasilkan ikatan hidrogen yang lebih kuat dan lebih banyak antara mikrofibril dinding sel, menghasilkan bahan dengan ketahanan yang tinggi. *Nanofibrillated cellulose* (NFC) atau nanoselulosa memiliki sifat fisik dan mekanik yang baik dengan *density* rendah membuatnya menjadi bahan yang menarik untuk aplikasi sebagai *coating*, dalam produksi kertas khusus, atau sebagai aditif dalam produksi kertas tisu serta untuk meningkatkan sifat mekanik seperti *bursting strength*, *tearing strength*, *tensile strength*, dan lainnya (Viana, *et all.* 2018). Selain itu, penggunaan NFC pada kertas tisu yang dapat meningkatkan nilai *strength* juga diharapkan bisa mengurangi penggunaan *chemical* pada kertas tisu toilet dan *pulp* NBKP yang harganya masih cukup tinggi dengan tetap memperhatikan kualitas dan *runnability* dari *tissue machine*.

Berdasarkan sifat-sifat tersebut NFC dianggap sebagai bahan yang prospektif untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang seperti pembuatan kertas, pengemasan, pelapis, komposit, biomedis, dan otomotif (Nechporchuk, Oleksandr. *et all.* 2016). Penggunaan NFC sebagai aditif dalam kertas tisu berdasarkan serat selulosa telah mulai diteliti. Penelitian sudah mulai ada dari penerapan NFC sebagai aditif dalam produksi kertas tisu kebersihan (Zambrano, *et all.* 2021). Setelah diperoleh NFC dari *waste fiber* maka dilakukan pembuatan *handsheet* kertas tisu dan dilakukan pengujian *physical properties* kertas tisu, antara lain: *grammature*, *thickness*, *tensile strength*, *tearing strength*, dan *bursting strength*.

Penelitian penerapan nanoselulosa di industri *pulp* dan kertas masih baru dan masih dalam tahap awal eksplorasi (Viana, *et all.* 2018). Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai upaya pemanfaatan *waste fiber* tersebut menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC) yang diaplikasikan pada kertas tisu dan untuk mengetahui pengaruh penambahan dosis yang berbeda dari NFC terhadap *physical properties* kertas tisu yang dihasilkan.

1.2 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini terdapat batasan masalah yang hanya dilakukan untuk pemanfaatan *waste fiber* dari *fiber catcher* yang dikonversi menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC) dengan cara hidrolisis asam. Dilakukan beberapa pengujian karakteristik dari serat, seperti *fiber analysis* dan *scanning electron microscope* (SEM) dan pengujian terhadap *physical properties* kertas tisu, seperti *grammature*, *thickness*, *tensile strength*, *tearing strength*, dan *bursting strength*.

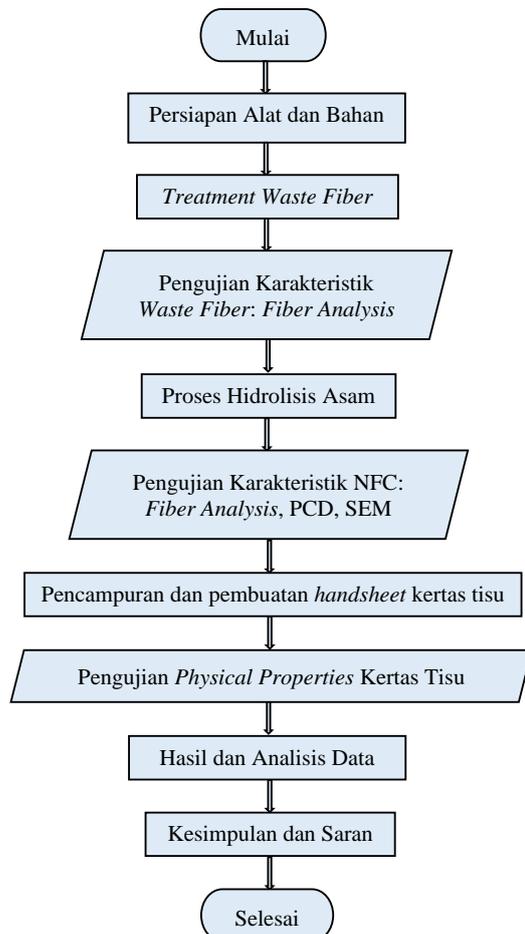
2. Metode Penelitian

2.1 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu peralatan percobaan dan peralatan pengujian. Peralatan percobaan antara lain: gelas ukur, labu ukur, *beaker glass*, *erlenmeyer*, spatula/pengaduk lab, pipet tetes, termometer, ember, *aluminium foil*, sarung tangan, masker respirator, kertas saring, corong, cawan, saringan 180 μm , *neraca digital*, desintegrator, desikator, *stopwatch*, oven, *hot plate magnetic stirrer*, *ultrasonic cleaner*, pH meter, pompa *vacuum*, *freeness tester*, *handsheet maker automatic*. Peralatan pengujian antara lain: *thickness tester*, *tensile tester*, *tearing tester*, *bursting tester*, *L&W fiber tester*, *particle charge detector (PCD)*, *scanning electron microscope (SEM)*. Bahan yang digunakan dengan bahan baku serat, antara lain: *waste fiber*, NBKP, LBKP, dan *broke*. Bahan untuk proses pembuatan NFC, antara lain: asam sulfat (H_2SO_4), asam fosfat (H_3PO_4), NaOH 10%, dan *demin water*.

2.2 Diagram Alir

Tahapan-tahapan proses dalam penelitian ini tergambarkan dalam diagram alir berikut ini:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3 Prosedur Penelitian

2.3.1 Treatment Waste Fiber

Sebelum dilakukan pembuatan NFC, dilakukan *treatment* pada *waste fiber* agar dapat mengangkat kotoran yang ada pada *waste fiber*. Langkah-langkah *treatment waste fiber* (Yilmaz, *et al.* 2021) adalah sebagai berikut:

1. Bahan *waste fiber* diambil dari *fiber catcher* pada unit *stock preparation* dan dicuci dengan air beberapa kali sampai bersih.
2. Bahan tersebut di *treatment* dengan *hot water* menggunakan *demin water* dengan suhu 45°C (konsistensi *fiber* 1%).
3. Campurkan keduanya dan diaduk menggunakan desintegrator dengan kecepatan 10.000 rpm atau 3 menit 20 detik.
4. Diamkan sebentar sampai larutan *fiber* mengendap.
5. Tuang dan buang air ke wadah lain dengan saringan 180 μm .
6. Lakukan beberapa kali sesuai jumlah *fiber* yang dibutuhkan.
7. Di proses akhir dicuci lagi sampai pH netral.
8. Setelah *treatment* selesai, dilakukan pengujian karakteristik awal dari *waste fiber*, antara lain: *fiber length*, *fiber width*, *fiber coarseness*, dan *fiber population*.
9. Kemudian *pulp* dimasukkan ke dalam oven untuk dikeringkan pada suhu 105°C selama 1 jam.
10. Setelah itu diperoleh *oven dry (OD) waste fiber* dan siap untuk diisolasi.

2.3.2 Pembuatan Nanofibrillated Cellulose (NFC)

Pada tahap ini dilakukan isolasi NFC menggunakan metode hidrolisis asam dan perlakuan mekanik terhadap *waste fiber*. Langkah-langkah isolasi NFC yang dilakukan, (Wulandari, *et al.* 2016 dan Dungani, *et al.* 2017) adalah sebagai berikut:

1. Bahan *waste fiber* yang telah di *treatment* dan di uji karakteristiknya disiapkan untuk isolasi NFC.
2. Bahan dihidrolisis menggunakan metode asam sulfat (H_2SO_4) konsentrasi 4 M dan 6 M serta asam fosfat (H_3PO_4) konsentrasi 4 M dan 6 M.
3. Dilarutkan variasi asam menggunakan *beaker glass* dan labu ukur dengan perhitungan yang telah ditentukan. Rasio pemasakan antara *waste fiber* : asam (1 : 15).
4. Larutan diaduk menggunakan *hot plate magnetic stirrer* dengan suhu 50°C selama 3,5 jam.

5. Setelah hidrolisis selesai, dinginkan suspensi. Tambahkan air demin 400 ml. Simpan semalaman dan kemudian bersihkan supernatan tersebut dengan cara dituang secara perlahan.
6. Tambahkan lagi dengan *demin water* atau kaustik sampai pH netral (7,0).
7. Suspensi NFC diaduk menggunakan desintegrator dengan kecepatan 30.000 rpm. Diendapkan suspensi selama 3 hari.
8. Suspensi koloid disonikasi selama 30 menit menggunakan alat *ultrasonic cleaner* dengan daya 50W.
9. Suspensi disaring menggunakan kertas saring agar diperoleh NFC murni dan disimpan dalam wadah.
10. Pengujian terhadap karakteristik NFC antara lain: *fiber length*, *fiber width*, *fiber population*, *particle charge detector* (PCD), dan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

2.3.3 Pencampuran Bahan Baku *Pulp* dan NFC

Pencampuran bahan baku dilakukan untuk pembuatan *handsheet* kertas tisu. Berikut merupakan langkah-langkah pencampuran bahan baku *pulp* dan dosis NFC antara lain:

1. *Stock* buburan dari LBKP, NBKP, dan *broke* yang telah diambil dari *mixing chest* dengan dosis yang telah ditentukan. Setelah itu dilakukan pengecekan pH, konsistensi, dan *freeness*.
2. Dihitung AD (berat basah) *stock* yang dibutuhkan dengan cara OD (berat kering) *pulp* dibagi konsistensi *pulp* yang telah di cek sebelumnya.
3. Campuran *stock* diaduk dengan kecepatan 500-1000 rpm sampai homogen.
4. Ditambahkan dosis NFC dengan variasi 0 Kg/T, 1 Kg/T, 3 Kg/T, 5 Kg/T, dan 7 Kg/T dari masing-masing variasi asam yang telah ditentukan.
5. Buburan *stock* siap dibuat *handsheet* kertas tisu.

2.3.4 Pembuatan *Handsheet* Kertas Tisu

Pembuatan *handsheet* kertas tisu dilakukan dengan menggunakan alat *handsheet maker automatic*, *handsheet* terbentuk berdiameter 20 cm berbentuk lingkaran dengan luas permukaan 0,0314 cm² dan dibuat dengan *grammature* 60 gsm. Langkah-langkah pembuatan *handsheet* sesuai standar TAPPI T205 sebagai berikut:

1. Alat *handsheet maker automatic* dipastikan dalam keadaan nyala (ON) dan sudah dibersihkan. Suhu *dryer* pada layar dipastikan ± 105 °C.

2. Diambil *screen* untuk dicuci dengan air dan pasang pada tabung *handsheet* kemudian ditutup dan kunci tabung *handsheet*.
3. Pastikan panel proses pada posisi 1 atau otomatis. Saluran air dan *vacuum* sudah dinyalakan.
4. Disiapkan sampel buburan (*stock*) yang telah ditentukan perhitungan untuk pembuatan *handsheet*.
5. Tekan tombol *start* yang berwarna hijau di bawah panel proses.
6. Tabung *handsheet* akan terisi air dan tunggu sampai batas nomor 4, kemudian buburan (*stock*) dimasukkan sesuai *grammature* yang diinginkan dan konsistensi buburan (*stock*).
7. *Stock* akan teraduk dan airnya berkurang secara otomatis hingga terbentuk lembaran basah di atas *screen*.
8. Selanjutnya tabung *handsheet* dibuka, ambil satu lembar *blotting paper* tebal dan pasang di atas lembaran basah tersebut.
9. Setelah *blotting paper* dipasang, letakkan *roll* di atasnya dan gerakkan dengan perlahan ke depan, belakang, kanan, dan kiri.
10. Angkat *screen* bersama lembaran basah kemudian lepaskan lembaran basah yang telah dilapisi *blotting paper* dari *screen* dengan cara membenturkan ujung *screen* pada lapisan *rubber* di atas meja.
11. Pada lembaran basah yang belum ditutupi, dipasang *blotting paper* tipis bagian atasnya.
12. Kemudian lembaran basah dimasukkan ke *press dryer* dan di oven selama 8 menit.
13. Setelah *handsheet* sudah kering kemudian ditimbang untuk memastikan gramturnya dan jika sudah sesuai *handsheet* diletakkan di dalam desikator dan wadah sampel.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengujian Karakteristik *Waste Fiber*

Pengujian morfologi serat dengan *fiber analysis* dilakukan untuk mengetahui karakteristik *waste fiber* dari *fiber catcher* sebelum isolasi NFC. Bahan baku yang digunakan adalah *waste fiber* yang telah di *treatment*. Berikut merupakan hasil pengujian morfologi *waste fiber* pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Fiber Analysis Waste Fiber*

<i>Fiber Length</i> (mm)	<i>Fiber Width</i> (µm)	<i>Fiber Population</i>	<i>Fiber Coarseness</i> (µg/m)
0,707	19,2	248668	976,8

3.2 Pengujian Karakteristik Nanofibrillated Cellulose (NFC)

3.2.1 Fiber Analysis

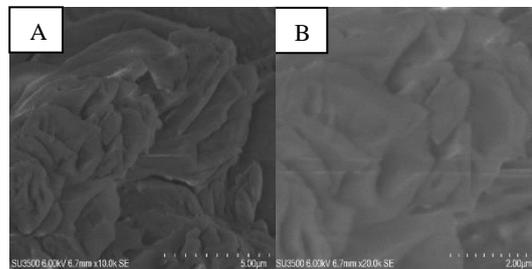
Pengujian *fiber analysis* dilakukan untuk mengetahui karakteristik *nanofibrillated cellulose* (NFC) dari *waste fiber* setelah dilakukan isolasi dan beberapa perlakuan mekanik. Berikut merupakan hasil pengujian morfologi NFC pada tabel 2 di bawah ini.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Fiber Analysis* NFC

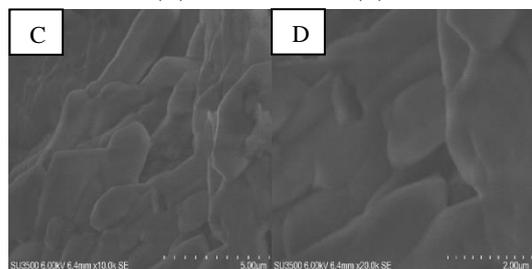
Propertie s	H ₂ SO ₄		H ₃ PO ₄	
	4 M	6 M	4 M	6 M
Fiber Length (mm)	0,106	0,08	0,55	0,53
Fiber Width (µm)	17,9	18	17,8	17,7
Fiber Population	2448 6	1715 6	10163 4	6357 5
PCD	-125	-80	-113	-57
pH	7,14	7,18	7,02	7,13

3.2.2 Scanning Electron Microscope (SEM)

Hasil analisa morfologi NFC dengan SEM dapat dilihat pada kedua gambar berikut ini:



Gambar 2. Hasil Pengujian SEM Variasi H₂SO₄ Perbesaran (A) 10.000 Kali dan (B) 20.000 Kali



Gambar 3. Hasil Pengujian SEM Variasi H₃PO₄ Perbesaran (C) 10.000 Kali dan (D) 20.000 Kali

Pengujian morfologi NFC dari *waste fiber* juga dilakukan dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan perbesaran 10.000 kali dan 20.000 kali yang bertujuan mengetahui karakteristik, bentuk, dan ukuran dari NFC yang telah dibuat. Gambar dan data

SEM diolah menggunakan *software imageJ* untuk mengetahui nilai diameter dari sampel NFC yang telah dihidrolisis pada konsentrasi tertentu. Pada gambar 2 variasi H₂SO₄ menunjukkan nilai diameter NFC lebih kecil dengan *range* nilai 150-450 nm. Sedangkan pada gambar 3 variasi H₃PO₄ menunjukkan nilai diameter NFC lebih besar dibandingkan variasi H₂SO₄ dengan *range* nilai 200-900 nm. Hal ini dapat dilihat pada kedua variasi jenis asam yang memiliki bentuk dan ukuran yang berbeda dengan diambil 30 data masing-masing gambar SEM dari kedua variasi asam.

Berdasarkan gambar 2 dan 3 dapat dilihat bahwa morfologi serat mengalami aglomerasi satu dengan yang lain dan masih terlihat sedikit menggumpal. Permukaan serat secara individu terlihat lebih rata dan teratur serta terpotong menjadi serat yang lebih pendek walaupun terlihat sedikit menggumpal. Hal ini kemungkinan disebabkan proses hidrolisis yang belum sempurna dan jenis serat pada *waste fiber* yang sudah tercampur.

Secara umum terlihat pada kedua variasi asam sulfat (H₂SO₄) dan asam fosfat (H₃PO₄) menghasilkan selulosa berukuran nano. Dalam penelitian ini dilakukan pengujian SEM dengan konsentrasi tinggi untuk mengetahui diameter partikel NFC lebih kecil dari sebelumnya. Menurut Sutjiono, N. (2020) semakin tinggi konsentrasi asam yang digunakan maka diameter partikel NFC semakin kecil, sehingga membuktikan bahwa konsentrasi asam yang digunakan sangat berperan dalam memperkecil ukuran dari NFC. Dimana semakin tinggi asam yang digunakan akan memudahkan proses menghidrolisis rantai selulosa karena asam dengan cepat masuk ke lapisan dalam rantai selulosa dan memutuskan rantai kristal menjadi individual yang lebih kecil. Hal ini dapat menyebabkan banyak rantai selulosa yang terputus dan membentuk ukuran nano yang diinginkan.

3.3 Pengujian *Stock Pulp Properties*

Pulp diambil dari tangki *mixing chest* TM 11.2 dengan komposisi *pulp*, yaitu LBKP 80%, NBKP 9%, dan *broke* 11%. Kemudian di cek pH, konsistensi, dan *freeness*. Pengujian konsistensi dilakukan untuk mengetahui *pulp* yang terlarut dalam air dan menentukan berapa jumlah *stock pulp* yang digunakan, pengujian *freeness* untuk mengetahui derajat giling *stock pulp*.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Stock Pulp Properties*

pH	Suhu (°C)	Konsistensi (%)	<i>Freeness</i> (CSF)
6,61	25,5	3,18	306

3.4 Pengujian *Physical Properties* Kertas Tisu

3.4.1 Pengujian *Tensile Strength*

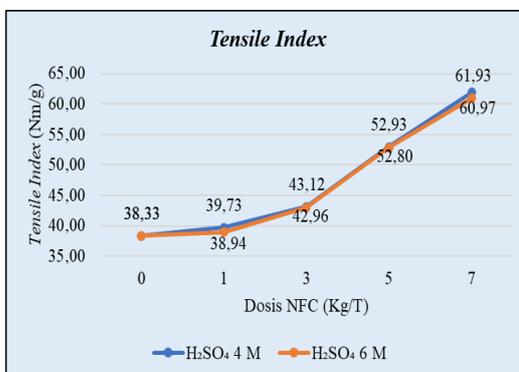
Tensile strength adalah kemampuan kertas tisu untuk mempertahankan lembarannya agar tidak putus jika diberi regangan. Pengujian ketahanan tarik merupakan salah satu parameter utama untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan NFC terhadap serat.

Tensile index merupakan ketahanan tarik lembar kertas tisu yang dinyatakan dalam satuan Nm/g, semakin tinggi nilai *tensile index*, maka semakin kuat lembar kertas tisu dalam menahan tarikan dari kedua ujung lembar kertas tisu tersebut, begitu juga sebaliknya (Faizah, BN. 2020). Nilai *tensile index* yaitu nilai *tensile strength* dibagi dengan *grammature*.

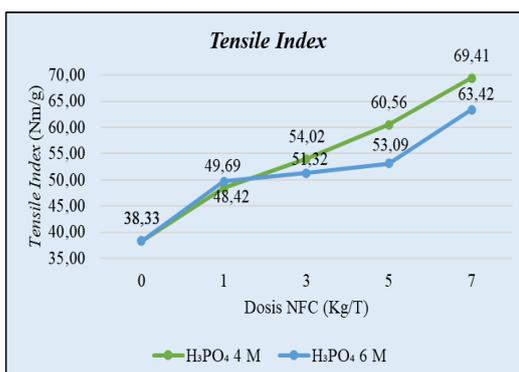
Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh nilai *tensile index* yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Pengujian *Tensile Index* (Nm/g)

Dosis NFC (Kg/T)	H ₂ SO ₄		H ₃ PO ₄	
	4 M	6 M	4 M	6 M
0	38,33	38,33	38,33	38,33
1	39,73	38,94	48,42	49,69
3	43,12	42,96	54,02	51,32
5	52,93	52,80	60,56	53,09
7	61,93	60,97	69,41	63,42



Gambar 4. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Tensile Index* (H₂SO₄ Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)



Gambar 5. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Tensile Index* (H₃PO₄ Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)

Hasil pengujian *tensile index* dapat dilihat pada kedua gambar grafik di atas. Terdapat dua grafik pengaruh penambahan dosis NFC terhadap nilai *tensile*. Perbedaan kedua gambar grafik di atas adalah variasi jenis asam yang digunakan dalam penelitian ini. Pada gambar 4 penambahan dosis NFC dari H₂SO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M, serta pada gambar 5 penambahan dosis NFC dari H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M. *Blank* pada penelitian ini berasal dari *mixing chest* yang terdiri dari campuran *pulp* LBKP, *pulp* NBKP, dan *broke* dengan rasio sebanyak (LBKP 80%, NBKP 9%, dan *broke* 11%) dan penggunaan dosis NFC 0 Kg/T.

Berdasarkan gambar 4 dan gambar 5 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai *tensile index* dengan bertambahnya dosis NFC. Pada gambar 4 dengan variasi asam sulfat (H₂SO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 61,93 Nm/g dan 60,97 Nm/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari *blank* (38,33 Nm/g), yaitu 39,73 Nm/g dan 38,94 Nm/g. Sedangkan pada gambar 5 dengan variasi asam fosfat (H₃PO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *tensile index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 69,41 Nm/g dan 63,42 Nm/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (38,33 Nm/g), yaitu 48,42 Nm/g dan 49,69 Nm/g. Ketahanan tarik dipengaruhi oleh ikatan antar serat, formasi, dan strukturnya. Serat dengan dimensi yang lebih kecil dan/atau serat NFC dapat meningkatkan area spesifik dan jumlah ikatan sehingga kekuatan tarik menjadi meningkat (Viana, L. C. *et all.* 2018). Pada dosis 1 Kg/T dari masing-masing variasi sudah melebihi nilai *tensile index blank* yaitu dari 38,33 Nm/g menjadi 38,94 Nm/g sampai 49,69 Nm/g. Dosis ini sudah memenuhi *standard blank* tanpa harus menggunakan dosis tinggi dan sekaligus dapat mengurangi *cost* yang harus dipertimbangkan.

Dari hasil penelitian nilai *tensile index* dari semua variasi dan konsentrasi asam mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan oleh penggunaan dosis NFC yang meningkat. Namun, efek peningkatan tergantung pada beberapa faktor seperti jumlah NFC yang ditambahkan, derajat fibrilasi NFC, penggunaan dan strategi penambahan *retention agent*, dan derajat *refining pulp* (Boufi, S. *et all.* 2017). Faktor yang mempengaruhi ketahanan tarik, yaitu ikatan antar serat dan panjang serat rata-rata, *nanofibrillated cellulose* memiliki ikatan serat yang kuat hingga semakin banyak penambahan NFC dapat meningkatkan ikatan antar serat (Yenie, E., & Sasmita, A. 2017). Maka dapat

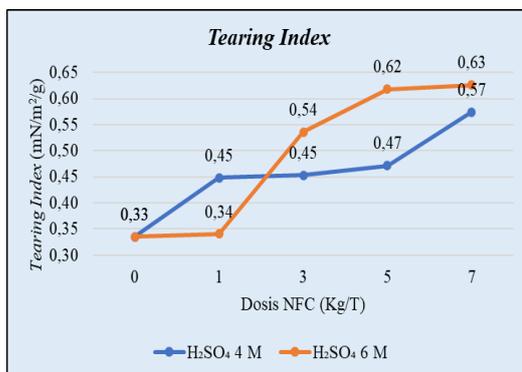
disimpulkan bahwa semakin tinggi penambahan dosis NFC maka semakin besar nilai *tensile strength* kertas tisu yang dihasilkan.

3.4.2 Pengujian *Tearing Strength*

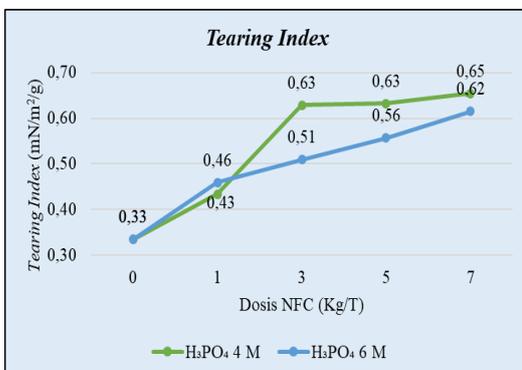
Tearing strength adalah kekuatan sobek kertas tisu yang dihasilkan. *Tearing index* merupakan ketahanan sobek lembaran kertas tisu yang dinyatakan dalam satuan $\text{mN/m}^2/\text{g}$, yang mana ketahanan sobek adalah gaya yang dibutuhkan untuk menahan sobekan yang dikenakan dari sejumlah tertentu lembaran secara bersama-sama melalui jarak tertentu. Nilai *tearing index* yaitu nilai *tearing strength* dibagi dengan *gramature*. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh nilai *tearing index* yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut:

Table 5. Hasil Pengujian *Tearing Index* ($\text{mN/m}^2/\text{g}$)

Dosis NFC (Kg/T)	H ₂ SO ₄		H ₃ PO ₄	
	4 M	6 M	4 M	6 M
0	0,33	0,33	0,33	0,33
1	0,45	0,34	0,43	0,46
3	0,45	0,54	0,63	0,51
5	0,47	0,62	0,63	0,56
7	0,57	0,63	0,65	0,62



Gambar 6. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Tearing Index* (H₂SO₄ Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)



Gambar 7. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Tearing Index* (H₃PO₄ Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)

Hasil pengujian *tearing index* dapat dilihat pada kedua gambar grafik di atas. Terdapat dua grafik pengaruh penambahan dosis NFC terhadap nilai *tearing*. Perbedaan kedua gambar grafik di atas adalah variasi jenis asam yang digunakan dalam penelitian ini. Pada gambar 6 penambahan dosis NFC dari H₂SO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M, serta pada gambar 7 penambahan dosis NFC dari H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M. *Blank* pada penelitian ini berasal dari *mixing chest* yang terdiri dari campuran *pulp* LBKP, *pulp* NBKP, dan *broke* dengan rasio sebanyak (LBKP 80%, NBKP 9%, dan *broke* 11%) dan penggunaan dosis NFC 0 Kg/T.

Berdasarkan gambar 6 dan gambar 7 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai *tearing index* dengan bertambahnya dosis NFC. Pada gambar 6 dengan variasi asam sulfat (H₂SO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 0,57 $\text{mN/m}^2/\text{g}$ dan 0,63 $\text{mN/m}^2/\text{g}$. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari *blank* (0,33 $\text{mN/m}^2/\text{g}$), yaitu 0,45 $\text{mN/m}^2/\text{g}$ dan 0,34 $\text{mN/m}^2/\text{g}$. Sedangkan pada gambar 7 dengan variasi asam fosfat (H₃PO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *tearing index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 0,65 $\text{mN/m}^2/\text{g}$ dan 0,62 $\text{mN/m}^2/\text{g}$. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (0,33 $\text{mN/m}^2/\text{g}$), yaitu 0,43 $\text{mN/m}^2/\text{g}$ dan 0,46 $\text{mN/m}^2/\text{g}$. Pada dosis ini sudah memenuhi *standard* dari *blank*, tanpa harus menggunakan dosis tinggi. Selain sudah memenuhi *standard* juga mempertimbangkan *cost* yang harus diperhatikan karena penggunaan NFC yang tinggi.

Kekuatan sobek dipengaruhi oleh *fiber length*, kekuatan serat, kekakuan serat, jumlah ikatan serat, dan kualitas ikatan serat. (Ali, I. 2012). *Nanofibrillated cellulose* memiliki jumlah ikatan serat yang banyak dan kualitas ikatan yang kuat sehingga nilai *tearing index* semakin meningkat seiring bertambahnya penggunaan dosis NFC.

Sehubungan dengan ketahanan sobek, diketahui bahwa sifat ini juga dipengaruhi oleh tingkat ikatan antar serat, tetapi sebagian besar oleh ketahanan elemen individu serat seperti panjang serat dan tebal dinding serat. Pengurangan panjang serat juga dapat mempengaruhi ketahanan sobek pada kertas tisu (Viana, *et al.* 2018). Pada pengujian *tearing index* nilai tertinggi dari semua variasi jenis dan konsentrasi asam adalah pada dosis 7 Kg/T. Hal ini disebabkan oleh penggunaan jumlah serat NFC yang tinggi dan jenis NFC yang digunakan. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi penambahan dosis NFC maka semakin besar nilai *tearing strength* kertas tisu yang dihasilkan.

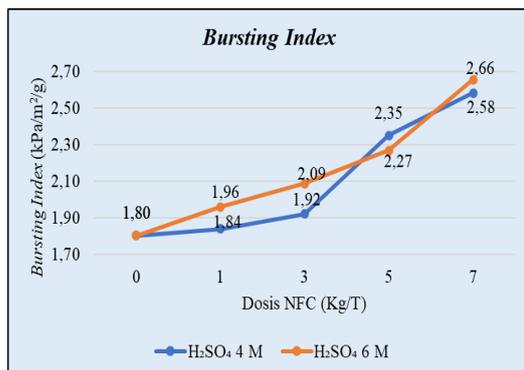
3.4.3 Pengujian *Bursting Strength*

Bursting strength adalah kekuatan retak kertas tisu yang dihasilkan. *Bursting index* merupakan ketahanan retak kertas tisu yang dinyatakan dalam satuan $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$, dimana ketahanan retak merupakan tekanan hidrostatik yang diperlukan untuk menghasilkan keretakan/pecah pada kertas tisu ketika tekanan dinaikkan pada kecepatan konstan dalam satuan kPa. Nilai *bursting index* yaitu nilai *bursting strength* dibagi dengan *gramature*.

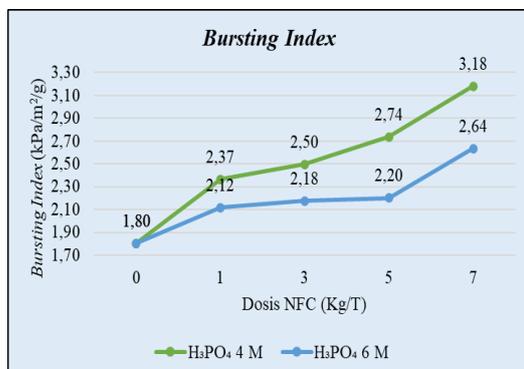
Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh nilai *bursting index* yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil Pengujian *Bursting Index* ($\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$)

Dosis NFC (Kg/T)	H_2SO_4		H_3PO_4	
	4 M	6 M	4 M	6 M
0	1,80	1,80	1,80	1,80
1	1,84	1,96	2,37	2,12
3	1,92	2,09	2,50	2,18
5	2,35	2,27	2,74	2,20
7	2,58	2,66	3,18	2,64



Gambar 8. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Bursting Index* (H_2SO_4 Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)



Gambar 9. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Bursting Index* (H_3PO_4 Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)

Hasil pengujian *bursting index* dapat dilihat pada kedua gambar grafik di atas. Terdapat dua grafik pengaruh penambahan dosis NFC terhadap nilai *bursting*. Perbedaan kedua gambar grafik di atas adalah variasi jenis asam yang digunakan dalam penelitian ini. Pada gambar 8 penambahan dosis NFC dari H_2SO_4 konsentrasi 4 M dan 6 M, serta pada gambar 9 penambahan dosis NFC dari H_3PO_4 konsentrasi 4 M dan 6 M. *Blank* pada penelitian ini berasal dari *mixing chest* yang terdiri dari campuran *pulp* LBKP, *pulp* NBKP, dan *broke* dengan rasio sebanyak (LBKP 80%, NBKP 9%, dan *broke* 11%) dan penggunaan dosis NFC 0 Kg/T.

Berdasarkan gambar 8 dan gambar 9 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai *bursting index* dengan bertambahnya dosis NFC. Pada gambar 8 dengan variasi asam sulfat (H_2SO_4) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 2,58 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$ dan 2,66 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari nilai *blank* (1,80 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$), yaitu 1,84 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$ dan 1,96 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$. Sedangkan pada gambar 9 dengan variasi asam fosfat (H_3PO_4) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *bursting index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 3,18 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$ dan 2,64 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (1,80 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$) yaitu 2,37 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$ dan 2,12 $\text{kPa}/\text{m}^2/\text{g}$. Hal ini dikarenakan *bursting strength* secara langsung bergantung pada ikatan antar serat, formasi, dan struktur dari kertas tisu. Serat dengan dimensi yang lebih kecil dan/atau NFC telah meningkatkan area spesifik dan lebih banyak titik kontak, meningkatkan jumlah ikatan sehingga nilai *bursting index* meningkat seiring bertambahnya penggunaan NFC (Viana, *et al.* 2018).

Pada pengujian *bursting index* nilai tertinggi dari semua variasi jenis dan konsentrasi asam adalah pada dosis NFC 7 Kg/T. Hal ini disebabkan penggunaan dosis NFC yang semakin tinggi dan mempengaruhi nilai *bursting index*. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi penambahan dosis NFC maka semakin besar nilai *bursting strength* kertas tisu yang dihasilkan.

Peningkatan sifat fisik kertas tisu terkait dengan jaringan ikatan hidrogen yang sangat padat, menghasilkan luas permukaan lebih besar yang diperoleh setelah *defibrillation*. Nilai *strength* yang lebih tinggi juga dapat dikaitkan dengan panjang serat. Selanjutnya, *defibrillation* dalam perlakuan mekanik dapat berdampak negatif terhadap sifat kertas tisu dengan menurunkan derajat polimerisasi rantai selulosa dan serangan daerah kristal pada molekul ini (Gomide, *et al.* 2005 dalam jurnal Viana, *et al.* 2018). Sehingga terbentuk ukuran NFC yang diinginkan dan jumlah ikatan yang banyak serta kuat antar serat dari kertas tisu yang dihasilkan.

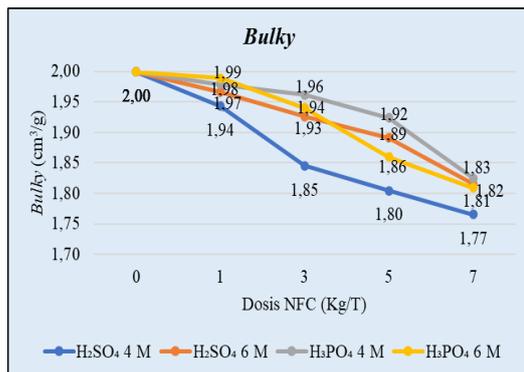
3.4.4 Pengujian *Bulky*

Pengujian *bulky* bertujuan untuk mengetahui volume lembaran kertas dibagi berat lembaran kertas tisu (cm^3/g). *Bulky* berbanding terbalik dengan *density* dan berbanding lurus dengan ketebalan kertas tisu. Semakin rendah ketebalan kertas tisu maka nilai *bulky* juga semakin rendah begitupun sebaliknya. Nilai *bulky* yaitu *thickness* dibagi *basis weight/gramature*.

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, diperoleh nilai *bulky* yang disajikan dalam bentuk tabel dan grafik sebagai berikut:

Tabel 7. Hasil Pengujian *Bulky* (cm^3/g)

Dosis NFC (Kg/T)	H ₂ SO ₄		H ₃ PO ₄	
	4 M	6 M	4 M	6 M
0	2,00	2,00	2,00	2,00
1	1,94	1,97	1,98	1,99
3	1,85	1,93	1,96	1,94
5	1,80	1,89	1,92	1,86
7	1,77	1,82	1,83	1,81



Gambar 10. Grafik Pengaruh Penambahan Dosis NFC Terhadap Nilai *Bulky* (H₂SO₄ & H₃PO₄ Konsentrasi 4 Molar dan 6 Molar)

Berdasarkan gambar 10 di atas, pengaruh penambahan dosis NFC terhadap nilai *bulky* pada variasi H₂SO₄ dan H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M mengalami penurunan seiring bertambahnya dosis NFC, yaitu nilai terendah pada dosis 7 Kg/T pada kedua variasi asam. Dapat dilihat pada variasi H₂SO₄ dan H₃PO₄ nilai terbaik pada dosis 1 Kg/T, yaitu 1,97 cm^3/g dan 1,99 cm^3/g dengan nilai *blank*, yaitu 2,00 cm^3/g . Hal ini disebabkan karena penambahan NFC mengisi rongga-rongga pada serat sehingga lembaran kertas tisu menjadi lebih padat dan jalinan antar serat menjadi rapat. Ketebalan kertas tisu menjadi menurun menyebabkan nilai *bulky* juga menurun dikarenakan nilai *bulky* berbanding lurus dengan ketebalan kertas tisu. Akan tetapi nilai *bulky* berbanding terbalik dengan nilai *strength* sehingga dapat meningkatkan nilai *strength* kertas tisu. Dapat dilihat pada hasil pengujian nilai *strength* yang telah dilakukan.

Menurunnya nilai *bulky* pada setiap variasi sampel juga disebabkan oleh perlakuan mekanis yang diberikan pada proses pembuatan kertas tisu, seperti pada saat proses *drying* maupun *pressing*. Maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi penambahan dosis NFC maka nilai *bulky* semakin menurun begitu juga ketebalan kertas tisu tetapi dapat meningkatkan nilai *strength* kertas tisu yang dihasilkan.

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan pada penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pemanfaatan *waste fiber* menjadi *nanofibrillated cellulose* (NFC) cukup efektif pada penelitian ini. Hal ini dapat dilihat dari pengecekan *fiber analysis*, yaitu *fiber length* dan *fiber width* yang mengalami perubahan sebelum dan setelah dihidrolisis menggunakan metode hidrolisis asam serta pengujian SEM yang berukuran nano. Sedangkan dalam pengaplikasiannya pada kertas tisu toilet menghasilkan nilai *strength* yang meningkat seiring penambahan dosis NFC. Hal ini membuktikan bahwa NFC efektif dan dapat diaplikasikan pada kertas tisu toilet walaupun pada dosis rendah.
2. Semakin bertambahnya dosis *nanofibrillated cellulose* (NFC) dari variasi H₂SO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M serta variasi H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M dapat meningkatkan nilai *strength*, yaitu *tensile index*, *tearing index*, dan *bursting index* tetapi menurunkan nilai *bulky*. Pertama, pada nilai *tensile index* variasi asam sulfat (H₂SO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 61,93 Nm/g dan 60,97 Nm/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari *blank* (38,33 Nm/g), yaitu 39,73 Nm/g dan 38,94 Nm/g. Sedangkan pada variasi asam fosfat (H₃PO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *tensile index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 69,41 Nm/g dan 63,42 Nm/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (38,33 Nm/g), yaitu 48,42 Nm/g dan 49,69 Nm/g. Kedua, pada nilai *tearing index* variasi asam sulfat (H₂SO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 0,57 mN/m²/g dan 0,63 mN/m²/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari *blank* (0,33 mN/m²/g), yaitu 0,45

- mN/m²/g dan 0,34 mN/m²/g. Sedangkan pada variasi asam fosfat (H₃PO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *tearing index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 0,65 mN/m²/g dan 0,62 mN/m²/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (0,33 mN/m²/g), yaitu 0,43 mN/m²/g dan 0,46 mN/m²/g. Ketiga, pada nilai *bursting index* variasi asam sulfat (H₂SO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M didapatkan nilai tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 2,58 kPa/m²/g dan 2,66 kPa/m²/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari kedua konsentrasi asam sudah melebihi dari nilai *blank* (1,80 kPa/m²/g), yaitu 1,84 kPa/m²/g dan 1,96 kPa/m²/g. Sedangkan pada variasi asam fosfat (H₃PO₄) konsentrasi 4 M dan 6 M juga sama nilai *bursting index* tertinggi pada dosis 7 Kg/T, yaitu 3,18 kPa/m²/g dan 2,64 kPa/m²/g. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T sudah melebihi nilai *blank* (1,80 kPa/m²/g) yaitu 2,37 kPa/m²/g dan 2,12 kPa/m²/g. Keempat, pada nilai *bulky* pada variasi H₂SO₄ dan H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M mengalami penurunan seiring bertambahnya dosis NFC, yaitu nilai terendah pada dosis 7 Kg/T pada kedua variasi asam. Pada variasi H₂SO₄ dan H₃PO₄ nilai terbaik pada dosis 1 Kg/T, yaitu 1,97 cm³/g dan 1,99 cm³/g dengan nilai *blank*, yaitu 2,00 cm³/g.
- Dosis terbaik dari nilai *strength* pada penelitian ini adalah pada dosis 7 Kg/T dari variasi H₂SO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M serta variasi H₃PO₄ konsentrasi 4 M dan 6 M. Akan tetapi pada dosis 1 Kg/T dari semua nilai *strength* sudah masuk dan melebihi nilai *blank*. Pada nilai *tensile index* dosis 1 Kg/T dari masing-masing variasi sudah melebihi nilai *tensile index blank* yaitu dari 38,33 Nm/g menjadi 38,94 Nm/g sampai 49,69 Nm/g. Pada nilai *tearing index* dosis 1 Kg/T dari masing-masing variasi sudah melebihi nilai *tearing index blank* yaitu dari 0,33 mN/m²/g menjadi 0,34 mN/m²/g sampai 0,46 mN/m²/g. Pada nilai *bursting index* dosis 1 Kg/T dari masing-masing variasi sudah melebihi nilai *bursting index blank* yaitu dari 1,80 kPa/m²/g menjadi 1,84 kPa/m²/g sampai 2,37 kPa/m²/g. Oleh karena itu, pada dosis ini sudah bisa menjadi pertimbangan pabrik untuk pengembangan selanjutnya.

4.2 Saran

Saran pada penelitian ini, adalah sebagai berikut:

- Perlu dilakukan pengecekan lebih lanjut terkait muatan *stock fiber* yaitu *system zeta potensial* (SZP) pada *stock pulp* sebelum

dan setelah penambahan NFC untuk mengetahui apakah NFC terikat dengan baik atau tidak antara *fiber* dan NFC.

- Perlu pembuatan *grammature* lebih tipis yang sesuai dengan *grammature* kertas tisu, yaitu di bawah 60 gsm.
- Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan variasi dosis *pulp* NBKP yang lebih rendah dari *standard* pabrik dengan penambahan NFC untuk mengurangi penggunaan *pulp* NBKP tersebut.
- Perlu pengecekan lain bagaimana pengaruh dari NFC terhadap nilai parameter lain. Misalnya FPR, *white water consist*, dan lain sebagainya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada pembimbing lapangan, dosen pembimbing, karyawan pabrik PT OKI Pulp and Paper Mills, dan orang yang berkompeten dalam bidang yang berkaitan dengan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Ali, I. (2012). *Study of the mechanical behavior of recycled fibers. Applications to papers and paperboards* (Doctoral dissertation, Universite de Grenoble).
- Boufi, S., Gonzalez, I., Delgado-Aguilar, M., Tarres, Q., & Mutje, P. (2017). *Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process*. In *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites* (pp. 153-173). Woodhead Publishing.
- Delgado Aguilar, M., Gonzalez Tovar, I., Tarres Farres, J. A., Alcalá Vilavella, M., Pelach Serra, M. A., & Mutje Pujol, P. (2015). *Approaching a low-cost production of cellulose nanofibers for papermaking applications*. *Bioresources*, 2015, vol. 10, num. 3, p. 5435-5355.
- Dungani, R., Owolabi, A. F., Saurabh, C. K., Abdul Khalil, H. P. S., Tahir, P. M., Hazwan, C. I. C. M., ... & Aditiawati, P. (2017). *Preparation and fundamental characterization of cellulose nanocrystal from oil palm fronds biomass*. *Journal of Polymers and the Environment*, 25(3), 692-700.
- Faizah, B.N. (2020). *Aplikasi Cationic Starch Sebagai Dry Strength Agent Untuk Meningkatkan Strength Properties Kertas Tisu*. [Tugas Akhir]. Bekasi: Teknologi Pengolahan Pulp dan Kertas,

- Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sains Bandung.
- Fitriyanti, R. (2018). Penerapan produksi bersih pada industri pulp dan kertas. *Jurnal Redoks*, 1(2), 16-25.
- Khalil, H. A., Davoudpour, Y., Islam, M. N., Mustapha, A., Sudesh, K., Dungani, R., & Jawaaid, M. (2014). *Production and modification of nanofibrillated cellulose using various mechanical processes: a review*. *Carbohydrate polymers*, 99, 649-665.
- M. Babae, M. Jonoobi dan Y. Hamzeh. (2015). "Biodegradability and mechanical properties of reinforced starch nanocomposites using cellulose nanofiber," *Carbohydrate Polymers*.
- Morais, F. P., Carta, A. M., Amaral, M. E., & Curto, J. M. (2021). *Micro/nanofibrillated cellulose (MFC/NFC) fibers as an additive to maximize eucalyptus fibers on tissue paper production*. *Cellulose*, 28(10), 6587-6605.
- Nechyporchuk, O., Belgacem, M. N., & Bras, J. (2016). *Production of cellulose nanofibrils: A review of recent advances*. *Industrial Crops and Products*, 93, 2-25.
- Sutjiono, N. (2020). Pembuatan Nanofiber Selulosa Dari TKKS Dengan Metode Hidrolisis Asam. In *TECHNOPEX 2020*.
- Viana, L. C., Potulski, D. C., Muniz, G. I. B. D., Andrade, A. S. D., & Silva, E. L. D. (2018). *Nanofibrillated cellulose as an additive for recycled paper*. *Cerne*, 24, 140-148.
- Wulandari, W. T., Rochliadi, A., & Arcana, I. M. (2016). *Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse*. In *IOP conference series: materials science and engineering* (Vol. 107, No. 1, p. 012045). IOP Publishing.
- Yenie, E., & Sasmita, A. (2017). Pengaruh Variasi Konsentrasi Perekat terhadap Massa Bahan Baku pada Daur Ulang Karton Kemasan Aseptik (Doctoral dissertation, Riau University).
- Yilmaz, U., Tutus, A., & Sonmez, S. (2021). *Fiber classification, physical and optical properties of recycled paper*. *Cellul. Chem. Technol*, 55, 689-696.
- Yudha, Arif Permana. (2019). Produktifitas Industri Pulp dan Kertas. (Warta Ekspor). Ditjen PEN/MJL/21/III/2019.
- Zambrano F, Wang Y, Zwilling JD, Venditti R, Jameel H, Rojas O, Gonzalez R. (2021). *Micro- and nanofibrillated cellulose*

from virgin and recycled fibers: a comparative study of its effects on the properties of hygiene tissue paper. *Carbohydr polym*.