

# Fraksinasi Lignoselulosa dari TKKS dengan Metode *Steam Explosion Pretreatment* Disertai Penambahan Asam Formiat

Bayu Yusuf Eka Saputra, Muhammad Fakhri Fahmi, dan Tri Widjaja  
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*email: triw@chem-eng.its.ac.id*

**Abstrak**—Tandan Kosong Kelapa Sawit merupakan salah satu limbah dari kelapa sawit yang sering kali kurang begitu dilirik untuk dimanfaatkan, sehingga produk samping ini hanya sering dijadikan limbah industri kelapa sawit. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, produksi kelapa sawit semakin meningkat dengan rata-rata 9,471% setiap tahun, oleh karenanya limbah TKKS yang dihasilkan juga meningkat tiap tahun. Terdapat tiga fraksi penting yang terkandung di dalam TKKS yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin yang masing-masing memiliki nilai ekonomis sehingga dapat dimanfaatkan lebih lanjut. dalam produksi energi terbarukan berupa biohidrogen serta bioetanol. *Steam explosion* merupakan salah satu metode *pretreatment* lignoselulosa dengan menggunakan uap bertekanan tinggi. Dalam proses ini, biomassa diperlakukan dengan uap panas (180 hingga 240°C) diikuti dengan peningkatan tekanan secara drastis yang kemudian uap tersebut diledakkan ke atmosfer sehingga tekanan akan kembali secara cepat. Pelepasan tekanan tiba-tiba menghasilkan aksesibilitas yang lebih baik dari selulosa untuk hidrolisis enzimatis dan fermentasi. Diharapkan pabrik fraksinasi TKKS ini dapat memenuhi kebutuhan etanol Indonesia sebesar 27,4%, sehingga direncanakan pabrik ini beroperasi dengan asumsi 330 hari produksi dan waktu kerja pabrik 20 jam/hari. Proses fraksinasi lignoselulosa ini terdiri dari 2 dua unit proses yang digolongkan berdasarkan fungsi utama dari keseluruhan proses. Unit pertama ialah *pretreatment* dan unit kedua ialah fraksinasi bertujuan untuk memisahkan tiga senyawa lignoselulosa yakni selulosa, hemiselulosa dan lignin ke dalam 3 aliran yang terpisah sebagai produk dari pabrik ini. Pabrik fraksinasi lignoselulosa dari TKKS ini didirikan di Kawasan Industri Dumai, dengan pertimbangan ketersediaan bahan, lokasi pemasaran, ketersediaan air, dan lain-lain. Dari analisa perhitungan ekonomi didapat hasil berupa IRR sebesar 24,33%, POT yaitu 4,48 tahun, dan BEP sebesar 28,86%. Secara keseluruhan, rata-rata %IRR, BEP dan POT masih menunjukkan bahwa pabrik ini layak untuk didirikan.

**Kata Kunci**—Asam Formiat, Fraksinasi, *Steam Explosion*, TKKS.

## I. PENDAHULUAN

**K**ELAPA sawit merupakan salah satu komoditas ekspor yang sangat berpengaruh terhadap perekonomian Indonesia. Dikarenakan Indonesia merupakan sebagai salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia. Dalam mendukung pengelolaan industri kelapa sawit yang berkelanjutan, pemerintah mengeluarkan berbagai kebijakan yang memberikan dukungan lebih terhadap industri kelapa sawit. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik, produksi kelapa sawit semakin meningkat dengan rata-rata 9,471% setiap tahun, oleh karenanya limbah TKKS yang dihasilkan juga meningkat tiap tahun. Ditinjau data dari BPS pada tahun 2020, produksi kelapa sawit mencapai 10 juta ton sedangkan,

Tabel 1.

Data ekspor-impor dari bahan perekat

Tahun	Ekspor (kg)	Impor (kg)
2016	21.708.087,71	200.004.245
2017	29.934.891,65	253.070.023
2018	21.497.770,18	264.103.407
2019	21.230.838,51	256.544.302
2020	23.078.841,67	258.175.245

Tabel 2.

Data ekspor-impor dari senyawa furfuraldehid

Tahun	Ekspor (kg)	Impor (kg)
2016	65	542.515
2017	5	484.148
2018	25	525.273
2019	40	666.590
2020	1	387.578

Tabel 3.

Data Ekspor-Impor dari Senyawa Etanol

Tahun	Ekspor (kg)	Impor (kg)
2016	13.747,66	9.003.478
2017	16.605	8.914.801
2018	315.165	13.073.019
2019	61.810,16	12.207.749
2020	235.919,5	10.601.523

pada tandan buah segar terdapat 20-23% tandan kosong, sehingga pada tahun 2020 produksi TKKS mencapai 2 juta ton. Limbah dari kelapa sawit atau yang biasa disebut dengan TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) juga menjadi salah satu pemanfaatan *green fuel* yang memiliki potensi yang menjanjikan. TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) merupakan produk turunan dari kelapa sawit yang sering kali kurang begitu dilirik untuk dimanfaatkan, sehingga produk samping ini hanya sering dijadikan limbah industri kelapa sawit. TKKS saat ini hanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar *boiler*. Selain itu, limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku produksi energi terbarukan seperti *bioethanol* dan biodiesel.

Terdapat tiga fraksi penting yang terkandung di dalam TKKS yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin—dapat disebut dengan lignoselulosa yang masing-masing memiliki nilai ekonomis sehingga dapat dimanfaatkan lebih lanjut. Secara umum, lignin telah dipandang sebagai bahan limbah yang bernilai rendah dengan pemanfaatannya terutama terbatas untuk digunakan sebagai bahan bakar untuk menyalakan *boiler* pembuatan pulp. Lignin dapat digunakan dalam pembuatan bahan dengan nilai tambah yang signifikan. Unit monomer utama yang menyusun molekul lignin adalah 2-metoksi-4-propilfenol (guaiakol) dalam *softwood* dan campuran guaiakol dan 1,5-dimetoksi-4-propilfenol (syringol) di *hardwood*. Sebagai biopolimer yang mengandung hidroksil fenolik yang murah dan terbarukan,

Tabel 4.

Perbandingan Metode <i>Physico-chemical Pretreatment</i>			
Aspek Pemandang	<i>Steam Explosion</i>	<i>Ammonia Fiber Explosion</i>	<i>Liquid Hot Water</i>
Suhu Operasi	180- 240°C	60-120°C	130- 240°C
Tekanan Operasi	1-3,5 MPa	1-5,2 MPa	0,7-4,8 MPa
Pembentukan Inhibitor	-	++	-
Pembentukan produk samping	+	TD	++
<i>Recovery</i> bahan kimia	++	-	++
Aksesibilitas Bahan Baku	++	-	++
<i>Capital Cost</i>	\$137 juta	\$348 juta	\$361 juta
Peluang Skala Pilot	++	TD	++

Keterangan:

(+) = karakteristik positif (seperti tidak ada atau rendah pembentukan inhibitor, tidak ada pembentukan *byproduct*, tidak ada atau rendahnya kebutuhan untuk *recovery* bahan kimia, biaya investasi rendah, aksesibilitas tinggi untuk berbagai jenis biomassa, terbukti pada skala pilot)

(-) = karakteristik negatif (seperti jumlah inhibitor yang tinggi, pembentukan *byproduct* yang tinggi, kebutuhan untuk *recovery* bahan kimia, biaya investasi yang tinggi, aksesibilitas yang rendah untuk jenis biomassa yang berbeda, belum terbukti pada skala pilot)

(TD) = Tidak diketahui.

Tabel 5.

Perbandingan <i>Yield</i> Metode <i>Physico-chemical Pretreatment</i>						
Metode <i>Pretreatment</i>	<i>Yield</i> Sebelum <i>Pretreatment</i> (%)			<i>Yield</i> Setelah <i>Pretreatment</i> (%)		
	Sel.	Hem.	Lig.	Sel.	Hem.	Lig.
<i>Steam Explosion</i>	28	24,1	19,96	34,9	7,69	35,3
Ledakan Serat Amonia	33	24,9	17,2	33,5	24,8	12,2
<i>Liquid Hot Water</i>	48	11	34,3	47,2	4,1	33,2

lignin menawarkan potensi yang menarik sebagai bahan dasar perekat. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik tahun 2016- 2020, Tabel 1 merupakan data ekspor-impor dari produk turunan dari lignin yaitu berupa bahan perekat.

Hemiselulosa adalah polimer heterogen kedua yang paling melimpah yang terutama terdiri dari glukuronoksilan, glukomanan dan sejumlah kecil polisakarida lainnya. Hemiselulosa juga diharapkan dapat digunakan dalam bidang pengemasan karena sifatnya yang hidrofilik, *biodegradable*, dan murah. [1]. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik tahun 2016-2020, Tabel 2 merupakan data ekspor-impor produk turunan dari hemiselulosa yaitu senyawa furfuraldehid.

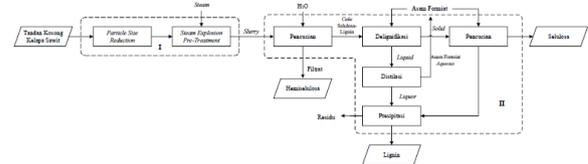
Selulosa adalah polimer paling melimpah yang memiliki struktur seperti rantai linier panjang yang terdiri dari (1,4) unit glukopiranosil beta-D terkait yang dirakit menjadi struktur hierarki mikrofibril dengan kekuatan dan kekakuan yang sangat baik. Pemanfaatan selulosa dapat digunakan dalam produksi energi terbarukan berupa biohidrogen serta bioetanol [2]. Dalam kosmetik, selulosa sangat penting untuk meningkatkan pengalaman aplikasi produk bagi konsumen seperti *lotion*, krim, dan masker [3]. Berdasarkan data dari Badan Pusat Statistik tahun 2016-2020, Tabel 3 merupakan data ekspor-impor produk turunan dari selulosa yaitu etanol.

Ketersediaan bahan lignoselulosa yang cukup melimpah, terutama sebagai limbah pertanian, perkebunan, dan

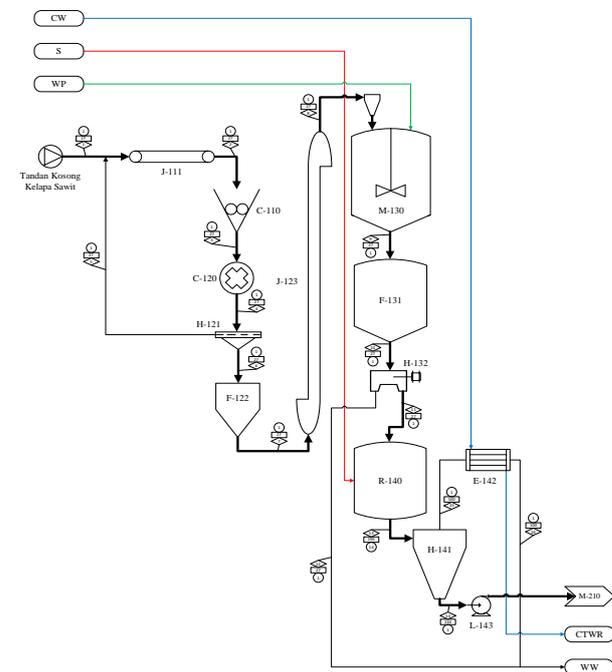
Tabel 6.

Perbandingan Pemilihan Pelarut Delignifikasi			
Pelarut	Harga Pasar	Waktu Operasi	% <i>Lignin Removal</i>
Asam Formiat	\$400/ton	1 jam	84 <sup>a</sup>
Soda Kaustik	\$261,23/ton	2 jam	7,63*
Asam Sulfat	\$400/ton	3 jam	82 <sup>b</sup>

Keterangan: \*NaOH 5% dengan pemanasan 90°C, <sup>a</sup>HCOOH 80%/wt dengan pemanasan 107°C, <sup>b</sup>H2SO4 4% dengan pemanasan 121°C



Gambar 1. Diagram Blok Proses Fraksinasi Lignoselulosa dari TKKS.

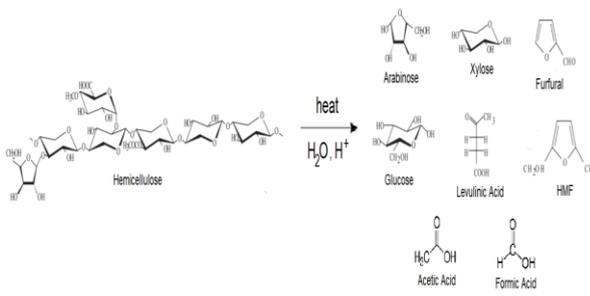


Gambar 2. Unit Proses *Pretreatment*.

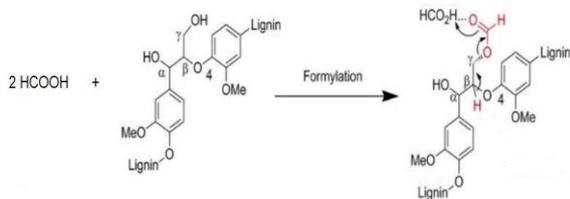
kehutanan, menjadikan bahan ini berpotensi sebagai salah satu sumber energi melalui proses konversi, baik proses fisika, kimia maupun biologis. Berdasarkan pemanfaatan dari lignin, hemiselulosa, dan selulosa yang telah dijabarkan di atas, maka potensi ekonomi dari ketiga fraksi tersebut dapat dimanfaatkan secara maksimal yang didukung dengan ketersediaan bahan baku yaitu Tandan Kosong Kelapa Sawit yang cukup melimpah di Indonesia.

## II. SELEKSI PROSES

Bahan lignoselulosa merupakan biomassa yang berasal dari tanaman dengan komponen utama lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Ketersediaannya yang cukup melimpah, terutama sebagai limbah pertanian, perkebunan, dan kehutanan, menjadikan bahan ini berpotensi sebagai salah satu sumber energi melalui proses konversi, baik proses fisika, kimia maupun biologis. Perlakuan awal diperlukan untuk mengubah struktur biomassa selulosa agar selulosa lebih mudah diakses oleh enzim yang mengubah polimer



Gambar 3. Reaksi Hemiselulosa dengan *Steam* menghasilkan monosakarida dan oligosakarida.



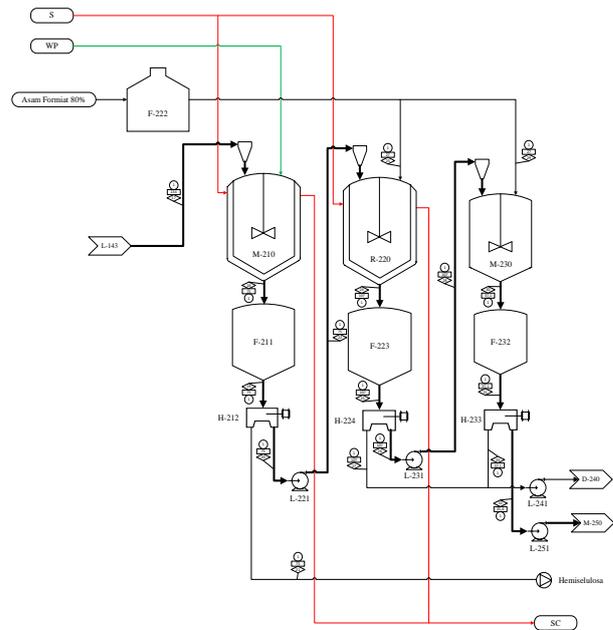
Gambar 4. Reaksi Formilasi antara Asam Formiat dengan Lignin.

karbohidrat menjadi gula yang dapat difermentasi. Tujuannya adalah untuk memecahkan segel lignin dan mengganggu struktur kristal dari selulosa. *Pretreatment* juga memiliki potensi besar untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya melalui serta memberikan solubilitas atau pemisahan komponen utama biomassa yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin dan dengan demikian membuat bahan lignoselulosa dapat dicerna. Hambatan dalam proses *pretreatment* yang ada meliputi pemisahan selulosa dan lignin yang tidak mencukupi (yang mengurangi efektivitas hidrolisis selulosa enzimatis berikutnya), pembentukan produk sampingan yang menghambat fermentasi etanol (misalnya asam asetat dari hemiselulosa, furan dari gula dan senyawa fenolik dari fraksi lignin).

Jenis kategori *pretreatment* dibagi menjadi empat macam yaitu, *pretreatment* fisika, *pretreatment* kimia, *pretreatment* biologis, dan *pretreatment* kimia-fisika. Di antara metode *pretreatment* tersebut salah satu metode yang cukup menjanjikan ialah metode fisikokimia. *Pretreatment* fisikokimia merupakan metode yang menggabungkan proses kimia dan fisik disebut sebagai proses fisikokimia. Beberapa kategori proses dari metode *pretreatment* ini meliputi: *steam explosion*, ledakan serat amonia (AFEX), *liquid hot water pretreatment* (LHW). Keunggulan dari metode fisikokimia antara lain dampak lingkungan yang ditimbulkan sangat rendah, serta biaya yang murah dikarenakan tidak melibatkan bahan kimia yang berbahaya. Di samping itu, metode ini juga mengonsumsi energi yang rendah. Berikut ini merupakan uraian dari *pretreatment* fisikokimia.

**A. Steam Explosion**

*Steam explosion* merupakan salah satu metode *pretreatment* lignoselulosa dengan menggunakan uap bertekanan tinggi. Secara umum *steam explosion* adalah proses di mana biomassa diperlakukan dengan uap panas (180 hingga 240°C) di bawah tekanan atau vakum (1 hingga 3,5 MPa) diikuti dengan peningkatan tekanan secara drastis yang kemudian uap tersebut diledakkan ke atmosfer sehingga tekanan akan kembali secara cepat. Proses ini dapat mengakibatkan pecahnya struktur kaku serat biomassa.



Gambar 5. Unit Fraksinasi.

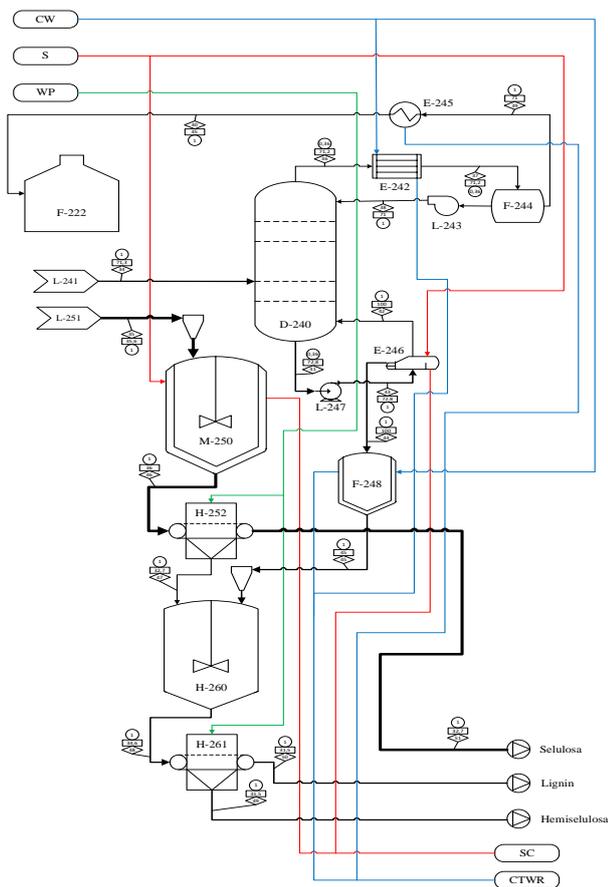
Pelepasan tekanan tiba-tiba mengakibatkan defibrilasi selulosa, dan ini menghasilkan aksesibilitas yang lebih baik dari selulosa untuk hidrolisis enzimatis dan fermentasi. Proses ini tergantung pada waktu tinggal dan suhu. [4]. Akan tetapi, tantangan yang akan dihadapi dalam melakukan metode *steam explosion* ini adalah terdapat inhibitor yang dapat mengganggu proses selanjutnya. Inhibitor yang dapat mengganggu antara lain asam lemah (terutama asam asetat), furan (produk degradasi gula hemiselulosa), dan senyawa fenolik dari degradasi lignin. Senyawa tersebut terdapat pada produk cair dari proses *steam explosion*.

**B. Ledakan Serat Amonia**

Ledakan serat amonia adalah proses *pretreatment* fisikokimia di mana biomassa lignoselulosa terkena amonia cair pada suhu dan tekanan tinggi (1-5,2 MPa) untuk jangka waktu tertentu, dan kemudian tekanan tiba-tiba berkurang. Proses AFEX sangat mirip dengan ledakan uap. Dosis amonia cair yang digunakan berkisar 1-2 kg amonia/kg biomassa kering, dengan suhu operasi 90°C, dan waktu tinggal 30 menit. *Pretreatment* AFEX menghasilkan dekrystalisasi selulosa, depolimerisasi parsial hemiselulosa, penghilangan gugus asetil terutama pada hemiselulosa, pemutusan ikatan kompleks lignin karbohidrat (LCC), pemutusan ikatan C-O-C lignin, peningkatan luas permukaan yang dapat ditingkatkan karena gangguan struktural, dan peningkatan kebasahan biomassa yang diolah. Keuntungan dari AFEX adalah bahwa amonia yang digunakan selama proses dapat dipulihkan dan digunakan kembali, proses *downstream* yang tidak kompleks dibandingkan dengan proses *pretreatment* lainnya. Akan tetapi, amonia harus didaur ulang setelah *pretreatment* untuk mengurangi biaya dan melindungi lingkungan serta, biaya amonia dan biaya proses pemulihan dapat meningkatkan biaya pra-perlakuan AFEX.

**C. Liquid Hot Water**

*Liquid Hot Water Pretreatment* (LHW), juga dikenal sebagai *pretreatment* hidrotermal, adalah proses menggunakan air sebagai media pemanas pada suhu tinggi (biasanya dari 130°C hingga 240°C) dan tekanan tinggi untuk



Gambar 6. Unit Fraksinasi.

mempertahankan air dalam fase cair tanpa bahan kimia tambahan. Pada suhu tinggi, air menunjukkan sifat asam dan dapat bekerja sebagai katalis asam. Hasil *pretreatment* tidak bergantung pada suhu dan waktu. Variabilitas hasil akan terkait dengan jenis biomassa dengan kelarutan lignin tinggi akan menghambat pemulihan gula hemicelulosa. Ada tiga jenis konfigurasi reaktor *Liquid Hot Water* yaitu *Co-current*, *countercurrent*, dan *flow through*. Dalam praperlakuan *co-current*, *slurry* biomassa dan air dipanaskan sampai suhu yang diinginkan dan dikontrol pada kondisi praperlakuan untuk waktu tinggal yang terkontrol sebelum didinginkan. *Pretreatment counter-current* dirancang untuk memindahkan air dan lignoselulosa dalam arah yang berlawanan melalui reaktor. Dalam reaktor *flow-through*, air panas melewati unggun hidrolisis stasioner lignoselulosa dan melarutkan komponen lignoselulosa dan membawanya keluar dari reaktor. *Pretreatment LHW* mengurangi kebutuhan untuk netralisasi dan bahan kimia karena asam tidak ditambahkan. Setelah melalui *steam explosion*, lignoselulosa terutama lignin belum bisa terpisahkan secara sempurna. Oleh karena itu, diperlukan proses fraksinasi untuk memisahkan dan mengambil lignin dari biomassa. Dalam penggunaan pelarut ini dapat menggunakan berbagai macam bahan kimia antara lain dapat menggunakan asam/basa kuat seperti soda kaustik (NaOH), dan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) serta dapat menggunakan asam organik/asam lemah seperti asam formiat (HCOOH).

#### D. Seleksi Proses

Sebagai permulaan dalam melakukan desain pabrik terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan salah satunya yaitu dalam menentukan proses yang akan digunakan. Dalam perencanaan pabrik terdapat beberapa pertimbangan dalam

menentukan proses yang akan digunakan. Dari berbagai proses tersebut dilakukan seleksi dengan parameter yang telah ditentukan. Di dalam pabrik fraksinasi lignoselulosa kali ini, terdapat empat teknologi praperlakuan terhadap lignoselulosa yaitu metode *steam explosion*, AFEX, dan LHW. Tabel 4 disajikan perbandingan parameter dalam melakukan seleksi proses *pretreatment* fraksinasi lignoselulosa dari TKKS.

Berdasarkan hasil perbandingan yang tertera pada Tabel 5 pemilihan metode *pretreatment* fisika-kimia yang tersedia, maka dapat ditentukan bahwa *pretreatment* yang sangat memungkinkan untuk diaplikasikan menjadi pabrik adalah metode *Steam Explosion Pretreatment* dikarenakan biayanya yang murah, dampak lingkungan yang rendah, konsumsi energi yang rendah, tidak ada kebutuhan *recovery* bahan kimia waktu yang dibutuhkan lebih singkat, serta *yield* lignin dan selulosa setelah *pretreatment* yang lebih dominan.

Setelah melalui *steam explosion*, lignoselulosa terutama lignin belum bisa terpisahkan secara sempurna. Oleh karena itu, diperlukan proses fraksinasi untuk memisahkan dan mengambil lignin dari biomassa. Dalam penggunaan pelarut ini dapat menggunakan berbagai macam bahan kimia antara lain dapat menggunakan asam/basa kuat seperti soda kaustik (NaOH), dan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) serta dapat menggunakan asam organik/asam lemah seperti asam formiat (HCOOH). Terdapat beberapa parameter untuk membandingkan jenis pelarut yang digunakan seperti harga pasar setiap ton, waktu operasi, dan persen lignin *removal*.

Berdasarkan hasil perbandingan pemilihan pelarut yang tertera pada Tabel 6, maka dapat ditentukan bahwa pelarut yang digunakan pada pabrik adalah menggunakan pelarut asam formiat 80% wt dikarenakan memiliki harga pasar yang tidak terlalu mahal, waktu operasi yang lebih singkat, dan efektivitas dalam memisahkan lignin yang baik.

### III. URAIAN PROSES TERPILIH

Proses fraksinasi lignoselulosa ini terdiri dari 2 dua unit proses yang digolongkan berdasarkan fungsi utama dari keseluruhan proses. Unit pertama ialah *pretreatment* yang berfungsi untuk mereduksi ukuran bahan baku dan memecah struktur lignin. Kemudian unit berikutnya ialah fraksinasi yang bertujuan untuk memisahkan tiga senyawa lignoselulosa yakni selulosa, hemicelulosa dan lignin ke dalam 3 aliran yang terpisah. Gambar 1 merupakan diagram balok proses fraksinasi lignoselulosa dari TKKS berdasarkan hasil seleksi proses yang telah dilakukan.

#### A. Unit Pretreatment

Pada proses ini, TKKS yang didapat dari vendor akan direduksi ukurannya dengan proses mekanik yang selanjutnya akan melalui proses *steam explosion pretreatment*. Pertama, TKKS yang sebelumnya disimpan dalam gudang penyimpanan bahan baku storage ditransportasikan menuju pabrik dengan menggunakan belt conveyor. Selanjutnya, TKKS direduksi ukurannya menjadi 10 mm melalui dua alat. Mula-mula TKKS melalui shredder (C-110) sehingga ukurannya akan menjadi 1-100 cm, kemudian TKKS dihancurkan lagi pada hammer mill (C-120) sehingga ukurannya menjadi 10 mm. Tujuan dari proses mekanik ini ialah untuk mengecilkan bahan lignoselulosa serta

menambah luas permukaan kontak untuk proses pre-treatment berikutnya di samping itu juga ukuran 8-12 mm adalah ukuran yang efektif untuk dapat memperoleh recovery selulosa yang besar [5]. Unit *pretreatment* tertera pada Gambar 2.

Setelah melalui proses *size reduction* TKKS kemudian dicuci pada tangki *Pre-Washing* (M-130) untuk menghilangkan *ash* dan zat ekstraktif di dalam TKKS dengan bantuan agitator berkecepatan 360 rpm. Selanjutnya TKKS yang telah melalui proses pencucian dialirkan menuju reaktor *steam explosion* (R-140) untuk proses *steam explosion*. Reaktor tersebut dialiri dengan *saturated steam* bertekanan 14 bar sehingga reaktor beroperasi pada suhu 195°C selama 6 menit, di mana jumlah *steam* yang masuk reaktor sebesar 0,5 dari biomassa yang masuk [6]. Pada proses ini sebagian besar lignin akan dihilangkan dari struktur lignoselulosa dan sebagian besar hemiselulosa akan keluar sebagai monosakarida dan oligosakarida untuk siap diambil pada unit berikutnya [5]. Gambar 3 merupakan reaksi degradasi hemiselulosa.

Sesudah proses *pre-treatment*, TKKS akan dikeluarkan dari reaktor dan menuju *cyclone* (H-141) untuk dipisahkan antara *steam* dan TKKS yang telah melalui proses *pre-treatment*. *Steam* yang keluar dari *cyclone* dikondensasikan kemudian dialirkan menuju unit pengolahan limbah (WW) dan TKKS yang telah melalui proses *pre-treatment* kemudian dialirkan ke unit kedua untuk dilakukan proses fraksinasi.

#### B. Unit Fraksinasi

TKKS yang telah melalui tahap *pre-treatment* kemudian dialirkan menuju *washing unit* (M-210) untuk melarutkan hemiselulosa yang telah berubah menjadi monosakarida dan oligosakarida. Proses ini beroperasi pada suhu 75°C dengan menambahkan air 20 kali dari berat biomassa yang masuk. Proses beroperasi di atas suhu kamar dan di bawah 100°C guna mengefektifkan pelarutan serta mencegah reaksi berkelanjutan dari degradasi hemiselulosa menjadi produk samping yang tidak diinginkan [7]. Setelah dari *washing unit stream outlet* yang berupa *slurry* selanjutnya dialirkan menuju *centrifuge unit* (H-212) untuk memisahkan antara *soluble hemicellulose* yang merupakan salah satu produk dengan konsentrat lignoselulosa yang tidak larut yang berupa fase padat.

Lignoselulosa yang berupa fase padat ini kemudian dialirkan menuju tangki delignifikasi (R-220) untuk melarutkan lignin dari proses *pretreatment*. Pada tangki delignifikasi konsentrat lignoselulosa dicampur dengan pelarut organik berupa asam formiat dengan konsentrasi 80% dan dioperasikan pada suhu 107°C lalu konsentrat lignoselulosa berubah wujud menjadi liquor. Gambar 4 merupakan reaksi pelarutan antara asam formiat dengan lignin.

Gugus karboksil pada asam formiat dapat dengan mudah membentuk ikatan hidrogen dengan molekul lignin, sehingga asam format *aqueous* memiliki kelarutan lignin yang tinggi. Di sisi lain, H<sup>+</sup> yang terdisosiasi dari asam organik dapat berperan sebagai katalis untuk mempercepat pembentukan fragmen lignin dan hidrolisis hemiselulosa. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan unit fraksinasi.

Dari tangki delignifikasi liquor selanjutnya dialirkan ke *decanter centrifuge* (H-224) untuk memisahkan liquor yang

berisi asam format, *solute* lignin, dan hemiselulosa yang tersisa dari *washing unit* dengan fase padat yang berisi selulosa. Liquor yang keluar dari *centrifuge* selanjutnya dilakukan proses destilasi (D-240) untuk me-*recovery* larutan asam format pada kolom distilasi yang beroperasi pada suhu 71,3°C dan tekanan 0,362 atm. Liquor yang telah melalui proses distilasi akan menjadi konsentrat liquor yang kemudian dialirkan menuju tangki pendingin (F-248) sedangkan kondensat asam format akan dialirkan ke tangki penampung (F-222) untuk digunakan pada proses berjalan berikutnya. Padatan selulosa yang telah keluar dari *centrifuge* sebelumnya (F-232) kemudian dialirkan ke *washing unit* (M-250) untuk dibersihkan lalu memasuki *horizontal belt filter* (H-252) untuk diekstrak selulosa bersihnya. Untuk konsentrat liquor yang berasal dari tangki pendingin (F-248) kemudian dialirkan menuju tangki presipitasi lignin beragitator untuk mengendapkan lignin dengan cara mencampur konsentrat liquor dengan air untuk mengendapkan lignin dari konsentrat kemudian dialirkan menuju *horizontal belt filter* (H-261) untuk dipisahkan antara produk yang berupa lignin padat dengan *hemicellulose syrup*.

#### IV. MATERIAL BALANCE DAN PERHITUNGAN EKONOMI

Proses *pretreatment* TKKS dipilih berdasarkan beberapa aspek yaitu suhu operasi, tekanan operasi, pembentukan inhibitor, pembentukan produk samping, *Recovery* bahan kimia, aksesibilitas bahan baku, *capital cost*, peluang skala pilot, dan *yield* produk selulosa dan lignin yang lebih dominan. Sedangkan pemilihan pelarut dalam proses fraksinasi TKKS dipilih berdasarkan beberapa aspek, yaitu harga pasar, waktu operasi dan persentase dalam melarutkan lignin.

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa Pra Desain Pabrik Fraksinasi Lignoselulosa dari TKKS dengan metode *Steam Explosion* disertai penambahan asam formiat diperoleh kapasitas pabrik didasarkan pada bahan baku berupa TKKS sebesar 7.233,94 kg/jam (waktu operasi 330 hari kerja/tahun dan waktu kerja pabrik 20 jam/hari menghasilkan lignin sebesar 2414 kg/jam dengan kadar sebesar 95%, selulosa sebesar 2482 kg/jam dengan kadar 80%, dan produk samping berupa *hemicellulose syrup* sebesar 224.033 kg/jam.

Kemudian hasil perhitungan ekonomi yang diperoleh ialah nilai *capital investment* sebesar Rp 663.073.380.339 dengan biaya operasi sebesar Rp. 900.599.680.256 per tahun diperoleh pendapatan per tahun sebesar Rp. 1.212.834.280.343. Dengan bunga bank sebesar 7,95% per tahun dan laju inflasi sebesar 1,75% per tahun diperoleh nilai NPV sebesar Rp 246.214.935.402, laju pengembalian modal sebesar 24,33%, waktu pengembalian sebesar 4,48 tahun, dan nilai BEP sebesar 28,86%. Jumlah pendapatan per tahun memiliki selisih sekitar Rp. 312.000.000.000 dengan jumlah pengeluaran per tahun sehingga pabrik akan mendapatkan keuntungan yang besar juga. Selain itu menimbang dari nilai NPV yang bernilai positif, nilai laju balik modal yang lebih besar dari nilai bunga bank, waktu pengembalian modal kurang dari 5 tahun, dan nilai BEP di bawah 50% menunjukkan bahwa pabrik fraksinasi lignoselulosa dari TKKS dengan metode *steam explosion* disertai penambahan asam formiat memiliki kelayakan untuk dibangun dan

dilanjutkan ke tahap perencanaan.

#### V. KESIMPULAN

Berdasarkan tinjauan dari segi proses *pretreatment* dan pemilihan jenis pelarut pada proses fraksinasi dengan menimbang beberapa aspek yang telah diuraikan serta tinjauan dari segi ekonomi maka Pabrik Fraksinasi Lignoselulosa dari TKKS dengan Metode *Steam Explosion* Disertai Penambahan Asam Formiat memiliki potensi untuk direalisasikan dengan kapasitas produksi lignoselulosa yang terdiri dari lignin sebesar 2414 kg/jam dengan kadar sebesar 95%, selulosa sebesar 2482 kg/ jam dengan kadar 80%, dan produk samping berupa *hemicellulose syrup* sebesar 224.033 kg/jam yang berasal dari bahan baku TKKS sebesar 7.223, 94 kg/jam.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] L.-Z. Huang, M.-G. Ma, X.-X. Ji, S.-E. Choi, and C. Si, "Recent Developments and applications of hemicellulose from wheat straw: a review," *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, 2021.
- [2] N. Hasan, D. R. A. Biak, and S. Kamarudin, "Application of bacterial cellulose (BC) in natural facial scrub," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 1--4, 2012.
- [3] T. Amnuait, T. Chusuit, P. Raknam, and P. Boonme, "Effects of a cellulose mask synthesized by a bacterium on facial skin characteristics and user satisfaction," *Med. Devices*, vol. 4, no. 77, 2011.
- [4] W. Stelte, "Steam explosion for biomass pre-treatment," *Danish Technol. Inst.*, pp. 1-15, 2013.
- [5] M. Brodin, M. Vallejos, M. . Opedal, and M. . Area, "Lignocellulosics as sustainable resources for production of bioplastics – A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 162, pp. 646--664, 2017.
- [6] H.-Z. Chen and Z.-H. Liu, "Multilevel composition fractionation process for high-value utilization of wheat straw cellulose," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 7, no. 1, pp. 1--12, 2014.
- [7] J. J. Varghese and S. H. Mushrif, "Origins of complex solvent effects on chemical reactivity and computational tools to investigate them: a review," *React. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 165--206, 2019.