

Pra-Desain Pabrik Fraksinasi Lignoselulosa dengan Metode *Steam Explosion*

Muhammad Abdurrokhim Al Hafiih¹, Widiyastuti¹, Tantular Nurtono¹

DOI: [10.12962/j2964710X.v3i1.17323](https://doi.org/10.12962/j2964710X.v3i1.17323)

Abstrak— Lignoselulosa merupakan bahan organik alami yang paling banyak terdapat di bumi namun selama ini hanya fraksi selulosa yang dimanfaatkan secara komersial. Hal ini tentu menjadi tantangan sekaligus kesempatan baik bagi industri sabut kelapa di Indonesia untuk melakukan diversifikasi produk samping selain mengekspor produk mentahnya saja, namun juga berpotensi menghasilkan produk *intermediate* yang lebih bernilai ekonomi secara komersial melalui teknologi *biorefinery*. Tingginya kandungan lignoselulosa dalam sabut kelapa menunjukkan adanya potensi lain yang lebih efektif dan efisien apabila dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan lignoselulosa yang terkandung dalam sabut kelapa untuk menjadikannya sebagai *high value-added products*. Struktur kokoh dalam lignoselulosa yang secara alami melindungi partikel serat dari gangguan lingkungan, termasuk dapat menahan beban mekanis yang tinggi bahkan resisten terhadap degradasi kimia maupun enzimatis oleh mikroorganisme membuat pengembangan teknologi *biorefinery* menghadapi banyak tantangan. Karena itu disusunlah studi pra-desain pabrik fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa dengan metode *steam explosion* yang dikombinasikan dengan *alkali-acid delignification process*. Proses ini mempermudah tahap isolasi komponen-komponen penyusun lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa dan lignin) sehingga memungkinkan untuk dapat dimurnikan sebagai *high value-added products* dari turunan komoditas kelapa. Setelah *preliminary techno-economic analysis* dilakukan, diperkirakan kebutuhan investasi untuk membangun pabrik dengan kapasitas olah 33.000ton sabut kelapa/tahun adalah Rp 1,01 triliun dengan Laju Pengembalian Modal (IRR) sebesar 19%. Dengan potensi penerimaan hasil penjualan Rp 600-700 miliar/tahun, diperkirakan Durasi Pengembalian Modal (POT) dapat dicapai selama 8-9 tahun pada *Break Even Point* di angka 40%. Rancangan ini memerlukan waktu konstruksi lancar 3-5 tahun dengan umur rencana pabrik selama 20 tahun.

Kata Kunci— *Biorefinery*, Fraksinasi, Lignoselulosa, *Steam Explosion*

I. PENDAHULUAN

Tingginya kandungan produk turunan lignoselulosa yang terdapat dalam sabut kelapa yang selama ini belum dioptimalkan pemanfaatannya secara komersial tentu menjadi tantangan sekaligus kesempatan baik bagi industri kelapa di Indonesia untuk melakukan diversifikasi produk samping selain mengekspor produk mentahnya saja, namun juga berpotensi menghasilkan produk *intermediate* yang lebih bernilai ekonomi secara komersial melalui teknologi *biorefinery*.

Secara kimiawi sabut kelapa terdiri dari lignoselulosa dengan kandungan >95% massa sabut kelapa sehingga berpotensi sebagai bahan baku produk turunan lignoselulosa yang pasokannya melimpah di Indonesia. Namun struktur kokoh dalam lignoselulosa secara alami melindungi partikel serat dari gangguan lingkungan, termasuk dapat menahan beban mekanis yang tinggi bahkan resisten terhadap degradasi kimia maupun enzimatis oleh mikroorganisme. Karakteristik tersebut dikenal sebagai *biomass recalcitrance*. Namun oleh karena kokohnya karakteristik *biomass recalcitrance*, hal

ini juga menjadi kendala teknis utama dalam riset dan pengembangan teknologi *biorefinery* untuk memperoleh produk turunan dari lignoselulosa [1].

Oleh karena itu diperlukan suatu metode perlakuan khusus untuk menangani *biomass recalcitrance* sehingga fraksinasi dan isolasi selulosa, hemiselulosa dan lignin dari lignoselulosa dapat dilakukan dengan efektif dan efisien. Salah satu opsi perlakuan *pretreatment* yang relatif ramah lingkungan dan secara ekonomi lebih hemat penggunaan bahan kimia dalam prosesnya adalah *steam explosion* karena perlakuan termofisika ini cenderung berperan lebih optimum untuk memecah *biomass recalcitrance* tanpa banyak tahap perlakuan kimiawi.

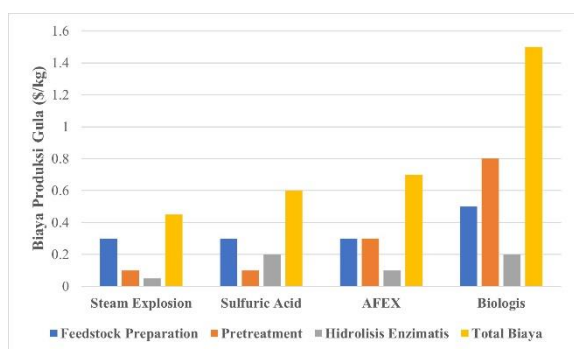
Proses *steam explosion* menggunakan *steam* pada suhu 200-285°C dan tekanan 3-5 MPa yang dikontakkan pada partikel serat lignoselulosa selama 2 menit (*initiation*). Kemudian tekanan operasi dinaikkan secara drastis menjadi 6-8 MPa selama 5 detik (*impregnation*), lalu tekanan diturunkan kembali ke tekanan atmosfer sehingga terjadi perubahan tekanan mendadak yang menyebabkan terpecahnya struktur lignoselulosa di dalam serat akibat dekomposisi eksplosif [2].

¹ Department of Chemical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya 60111, Indonesia. *E-mail: widi@chem-eng.its.com; tantular@chem-eng.its.ac.id

Dekompresi eksplosif yang terjadi pada partikel serat biomassa menyebabkan jaringan makrofibril-makrofibril terlepas dari struktur serat biomassa sehingga celah-celah pada serat mikrofibril kemudian dapat terbuka secara mikroskopis (defibrilasi). Perlakuan ini memberi potensi kemudahan proses fraksinasi berikutnya, baik hidrolisis menggunakan proses enzimatik, fermentasi, maupun isolasi kimia untuk memperoleh hasil fraksinasi dengan lebih efektif dan efisien [3].

Perkembangan riset fraksinasi lignoselulosa dengan metode *steam explosion* kini telah cukup modern. Beberapa studi mengkombinasikan proses *steam explosion* dengan metode lain sehingga memperoleh *yield* fraksinasi yang lebih tinggi [4].

Diantara riset yang ada, salah satu *pilot scale* yang terbukti memberi hasil memuaskan secara tekno-ekonomi dan *scalable* adalah kombinasi *steam explosion* dengan perlakuan *acid delignification* dan *alkali delignification* sebagai usulan pra-rancangan pabrik fraksinasi lignoselulosa dari serat biomassa yang relatif lebih ekonomis [5].



Gambar 1. Perbandingan beberapa metode fraksinasi lignoselulosa dengan basis perhitungan gula sebagai produk akhir

Indonesia memiliki lahan perkebunan kelapa terluas kedua di dunia dengan luas mencapai 3,86 juta ha atau 31,2% dari total area perkebunan kelapa dunia dengan luas sekitar 12 juta ha [6]. Dari angka tersebut, produksi buah kelapa Indonesia mencapai 2,8 juta ton Kementerian Pertanian mencatat penghasil produk kelapa di Indonesia saat ini tersebar di berbagai wilayah.

TABLE 1.

PROVINSI DENGAN PERKEBUNAN KELAPA TERLUAS DI INDONESIA [6]

Provinsi	Luas Perkebunan Kelapa (ha)
Riau	552.300
Sulawesi Utara	359.000
Jawa Timur	343.150
Maluku Utara	307.600
Sulawesi Tengah	232.370
Jawa Tengah	231.200
Jambi	141.270
Maluku	127.000
Lampung	125.000
Jawa Barat	115.800

A. Karakteristik Bahan Baku

Komposisi dari komponen buah kelapa adalah sabut 35%, daging buah 28%, air kelapa 25% dan cangkang 12% [7], sehingga sabut adalah komponen terbesar dalam buah kelapa secara fraksi massa. Selulosa, hemiselulosa, dan lignin membentuk suatu ikatan kimia yang kompleks yang menjadi bahan penyusun struktur dinding sel tumbuhan [8, 9]. Besarnya kandungan masing-masing komponen bergantung pada jenis biomassa, umur, dan kondisi lingkungan tempat biomassa tersebut tumbuh dan berkembang [10]. Terlampir pada Tabel 2, secara kimiawi sabut kelapa terdiri dari lignoselulosa dengan kandungan >95% massa sabut kelapa.

TABLE 2.

KOMPOSISI KIMIAWI LIGNOSELULOSA DALAM SABUT KELAPA

Komponen	% Fraksi Massa
Selulosa	25 – 45
Hemiselulosa	15 – 35
Lignin	25 – 45
Abu	1 – 5
Moisture	1 – 15

Karakteristik fisika dan kimia lignoselulosa yang terdapat dalam sabut kelapa secara alamiah cenderung sukar diurai, baik dengan perlakuan mekanis, degradasi enzimatik maupun kombinasi keduanya [11]. Meski telah cukup banyak penelitian untuk mendapatkan metode efektif fraksinasi lignoselulosa secara biokimia, metode hidrolisis biokimia hampir selalu terkendala oleh resistensi alami dinding sel semua tumbuhan berkayu. Karakteristik serupa juga dimiliki partikel serat lignoselulosa dalam sabut kelapa yang berupa struktur kompleks multi-skala heterogen [12]. Adapun karakteristik fisik dan mekanik sabut kelapa terlampir pada Tabel 3.

TABLE 3.

KARAKTERISTIK FISIKA MEKANIS SABUT KELAPA [13]

Parameter	Nilai
Tensile Strength (MPa)	60 - 81
Tensile Strain (%)	10 - 15
Young Modulus (GPa)	1 - 9
Densitas (g/cm ³)	0.7 - 1.55
Diameter serat (μm)	250 - 610
Elongation at break (%)	8 - 18
Length-weighted fiber length (mm)	0.9 - 1.1
Cell-wall thickness (μm)	3 - 4
Panjang Partikel Sabut (mm)	50 - 200

Di dalam kompleks lignoselulosa, selulosa berperan mempertahankan struktur serat kristal dan sebagai komponen inti kompleks dengan bertindak sebagai struktur utama dari dinding sel semua tumbuhan kayu apapun [14]. Hemiselulosa terletak diantara mikro dan makrofibril selulosa, sementara lignin terletak di area *interfibrilous* dan juga di permukaan sel [15].

Selulosa (C₆H₁₀O₅)_n merupakan komponen utama lignoselulosa yang berupa mikrofibril homopolisakarida yang terdiri atas unit-unit β-D-glukopiranosida yang

terhubung melalui ikatan glikosidik. Struktur selulosa secara umum berbentuk kristalin, tetapi terdapat juga bagian yang berbentuk *amorph*. Karakteristik ini menjadikan selulosa lebih resisten terhadap panas, bahan kimia maupun oleh perlakuan fisik mekanis [16].

Hemiselulosa merupakan istilah umum bagi polisakarida yang dapat larut terhidrolisis dalam air. Hemiselulosa sangat dekat asosiasinya dengan selulosa dalam dinding sel tanaman. Lima gula netral, yaitu glukosa, mannanosa, dan galaktosa (heksosan) serta xilosa dan arabinosa (pentosan) merupakan konstituen utama hemiselulosa [17]. Berbeda dari selulosa yang merupakan homopolisakarida dengan monomer glukosa dan derajat polimerisasi yang tinggi (10.000–14.000 unit), rantai utama hemiselulosa dapat terdiri atas hanya satu jenis monomer seperti xilan, atau terdiri atas dua jenis atau lebih monomer (heteropolimer). Rantai molekul hemiselulosa pun lebih pendek daripada selulosa [18].

Struktur molekul lignin sangat berbeda bila dibandingkan polisakarida lainnya karena terdiri atas sistem aromatik yang tersusun atas unit-unit fenilpropana: unit *guaiacyl* (G) dari prekursor *trans*-koniferil alkohol, unit *syringyl* (S) dari prekursor *trans*-sinapil alkohol, dan *p*-hidroksifenil (H) dari prekursor *trans*-*p*-kumaril alkohol^[19]. Lignin dapat dinyatakan dengan rumus $C_9H_{7,16}O_{2,44}(OCH_3)_{1,36}$ per unit fenilpropana [17]. Pada lignin terdapat ikatan eter yang lebih stabil yang dikenal sebagai *lignin carbohydrate complexes* (LCC) yang terbentuk antara lignin dengan grup arabinosa atau galaktosa dalam xilan atau manan [18]. Sehingga keberadaannya memberikan bentuk lignoselulosa yang kompleks dan menghambat degradasi selulosa oleh mikroba ataupun bahan kimia lainnya. Oleh karena itu lignin merupakan komponen dalam lignoselulosa yang paling sulit untuk didegradasi secara biologis maupun kimiawi [19, 20].

B. Karakteristik Produk Akhir

Rangkaian proses dirancang untuk dapat menghasilkan produk akhir masing-masing fraksi dengan tingkat kemurnian *industrial grade* berdasarkan spesifikasi umum JEFCA FNP 52, Addendum 4, 2006a yang tercantum pada Tabel 4.

TABLE 4.
SPESIFIKASI PRODUK TURUNAN LIGNOSELULOSA INDUSTRIAL GRADE
BERDASARKAN JEFCA FNP 52

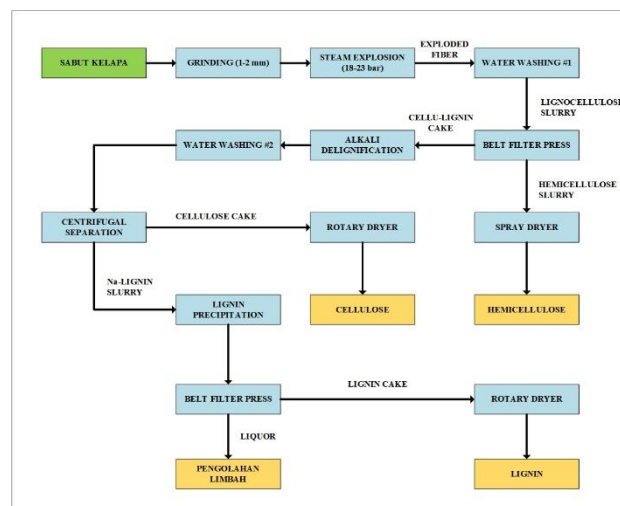
Parameter	Selulosa	Hemiselulosa	Lignin
Kadar (Assay)	Min.95% wt	Min.90% wt	Min.85% wt
Moisture	Max.5% wt	Max.5% wt	Max.10% wt
Abu	Max.1% wt	Max.3% wt	Max.3% wt
Densitas	1.35-1.45 g/cm ³	1.40-1.55 g/cm ³	1.30-1.40 g/cm ³
Ukuran	Fine Grinded	Fine Grinded	Fine Grinded

II. URAIAN SELEKSI PROSES

Untuk memperoleh produk akhir sesuai target

spesifikasi, maka proses fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa dengan metode *steam explosion* dirancang untuk terbagi menjadi 3 tahap sebagai berikut:

- A. Pretreatment Bahan Baku (Perlakuan Awal)
- B. Proses *Steam Explosion*
- C. Pemisahan dan Pemurnian Produk



Gambar 2. Diagram Balok Rancangan Proses Fraksinasi Lignoselulosa

A. Pretreatment Bahan Baku

Pada tahap pertama, bahan baku sabut kelapa berukuran 5-10 cm dari *Loading Ramp Receiving Station* (E-110) atau stasiun penerimaan bahan baku dirancang untuk dapat diproses terlebih dahulu menggunakan *Fiber Cyclone Destoner* (E-110) yang bertujuan untuk menghilangkan partikel pengotor berukuran besar (pasir, kerikil dll). Setelah partikel pengotor dipisahkan, sabut kelapa kemudian diangkut menggunakan *Screw Conveyor* menuju *Bulk Fiber Silo* (ST-130) sebagai gudang penyimpanan bahan baku. Sabut kelapa dari ST-130 kemudian diumpukan ke *Fiber Hammer Mill* (E-140) menggunakan *Screw Conveyor* E-130 untuk menghasilkan sabut kelapa yang telah dicacah (*shredded fiber*) berukuran 1-2 mm yang kemudian dialirkan ke *Shredded Fiber Silo* ST-140 sebagai gudang penyimpanan *shredded fiber* menggunakan *Screw Conveyor* E-141. Proses *size reduction* ini bertujuan meningkatkan luas permukaan sabut kelapa sehingga meningkatkan efektivitas proses *steam explosion*.

B. Steam Explosion

Tahap *steam explosion* diawali dengan mengumpukan *Shredded fiber* dari penyimpanan *Silo* ST-140 menggunakan *Screw Conveyor* E-151 menuju Reaktor *Steam Explosion* yang alirannya dikontrol dengan *valve* CV-210 secara *batch*. Operasi *steam explosion* berlangsung dalam 3 tahap yaitu :

1. *Pressurization* (15-25 bar; 190-240°C)
2. *Holding* (5-15 menit)

3. Explosion / Sudden Decompression (< 3 menit)

Produk yang dihasilkan dari tahap proses ini disebut dengan *exploded fiber*, yaitu serat sabut kelapa yang mikrofibrilnya dan ikatan antar fraksi lignoselulosa (*biomass recalcitrance*) telah terlepas dari struktur serat sabut kelapa. Mekanisme ini dipicu oleh dekompresi tekanan reaktor secara mendadak yang terjadi saat *explosion control valve* (CV-214) dibuka sehingga menimbulkan *pressure drop* yang sangat besar dalam bejana. Proses *explosion* atau *sudden decompression* yang berlangsung sangat cepat diprediksi menghasilkan tingkat kebisingan yang besar saat dioperasikan, oleh karena itu digunakan *exhaust silencer* (SL-213) untuk meredam tingkat kebisingan selama proses ini beroperasi. Apabila *biomass recalcitrance* telah dipecahkan, maka proses fraksinasi dan isolasi komponen penyusun lignoselulosa dapat dilakukan. Proses ini juga menghasilkan kondensat yang sebagian terbawa bersama *exploded fiber* sehingga produk tahap ini berwujud serat padatan yang basah.

C. Pemisahan dan Pemurnian Produk

Hemiselulosa yang terdapat dalam *exploded fiber* memiliki karakteristik yang relatif paling mudah larut dalam air. Sehingga dilakukan proses *Water Washing* pada TK-220 dengan menambahkan air (*solid:liquid=1:4*) pada aliran *exploded fiber* sehingga campuran tersebut berupa *slurry*. *Slurry* lignoselulosa kemudian diproses menggunakan *Belt Filter Press* E-230 untuk memisahkan fase *liquid* yang berisi campuran hemiselulosa dan air serta fase *solid cake* yang berisi campuran selulosa dan lignin (*Cellu-Lignin Cake*). Hemiselulosa yang sudah dipisahkan lalu diproses menggunakan *Spray Dryer* E-341 untuk memperoleh hemiselulosa padat dan kering sesuai spesifikasi produk akhir.

Solid cake yang merupakan campuran selulosa dan lignin kemudian akan diolah dengan proses delignifikasi menggunakan NaOH 17.5% w/v di *Delignification Reactor* dengan pada temperatur 121°C selama 30 menit untuk setiap *batch*. Mekanisme proses ini berdasarkan prinsip reaksi antara lignin dan alkali yang kemudian dapat melarutkan lignin sebagai Na-Lignin berupa *Black Liquor* sementara komponen selulosa akan tetap tidak larut sehingga campuran kedua komponen tersebut dapat dipisahkan secara fisika, yaitu menggunakan *Centrifuge Separator* CF-270.

Outlet dari *Centrifuge Separator* CF-270 akan menghasilkan 2 aliran yaitu padatan *cake* yang berisi selulosa dan *black liquor* yang berisi Na-Lignin. Masing-masing komponen dalam aliran tersebut kemudian dapat dimurnikan melalui proses lanjutan :

- *Lignin Precipitation*
- *Cellulose Drying*

Lignin yang masih berupa larutan Na-Lignin diubah kembali menjadi bentuk lignin bebas dengan proses penambahan H₂SO₄ 20% w/v hingga pH 2 sehingga lignin akan mengendap dalam campuran tersebut sebagai lignin

bebas yang tidak larut. Endapan lignin tersebut kemudian dapat dipisahkan dengan proses *dewatering* menggunakan *Belt Filter Press* E-430 untuk memperoleh lignin *cake* yang kemudian dikeringkan dengan *Rotary Dryer* E-441 sehingga diperoleh lignin kering sebagai produk akhir. Adapun selulosa yang berupa *cake* dari CF-270 dapat dikeringkan dengan menggunakan *Rotary Dryer* E-281 untuk memperoleh selulosa kering sebagai produk akhir. Seluruh produk akhir kemudian disimpan pada *Storage Silo* masing-masing untuk selulosa (ST-290), hemiselulosa (ST-340), dan lignin (ST-440) sebagai gudang penyimpanan produk akhir.

III. KAPASITAS PRODUKSI DAN SPESIFIKASI PERALATAN UTAMA

Kapasitas olah bahan baku	:	33.000 ton/tahun
	:	5 ton/jam
Durasi operasional pabrik	:	330 hari/tahun
	:	20 jam/hari

A. Fiber Cyclone Destoner

Kapasitas proses	:	3.5 ton/jam/unit
Diameter cyclone	:	1.4 m
Tinggi bagian silinder	:	2.8 m
Tinggi bagian inlet	:	0.7 m
Kec. aliran gas	:	40.0 m/s
Rancangan <i>Pressure Drop</i>	:	90 – 100 bar
<i>Power</i>	:	12 kW/unit
Jumlah unit	:	3 unit (2 ON / 1 Standby)

B. Feedstock Storage Silo

Kapasitas penyimpanan	:	250 m ³
Tinggi bagian silinder	:	14.5 m
Tinggi bagian cone (60°)	:	6.5 m
<i>Residence time</i>	:	Max. 36 jam

C. Screw Conveyor

Diameter tabung	:	30 cm
Panjang tabung	:	15 m
Kapasitas conveyor	:	6 m ³ /jam/unit
<i>Shaft Rotational Speed</i>	:	30 RPM
<i>Specific Throughput</i>	:	90 m ³ /m ² .jam/unit
Jumlah unit	:	6 unit

D. Hammer Mill

Kapasitas proses	:	5 ton/jam/unit
<i>Output Size</i>	:	1 – 2 mm
<i>Power</i>	:	150 kW

E. Steam Explosion Reactor

Skema operasi	:	15-20 menit/ <i>batch</i>
Kapasitas proses bahan baku	:	Max.3 ton/ <i>batch</i> /reaktor Max.6 ton/jam/reaktor
Kebutuhan steam	:	870–950 kg/jam/reaktor
<i>Design Pressure</i>	:	15 – 25 bar
<i>Auto Blowdown Pressure</i>	:	50 bar
<i>Max. Failure Pressure</i>	:	100 bar
<i>Design Temperature</i>	:	190 – 240°C

Material Konstruksi	: SS SA-240 Grade 316
Tebal Dinding Reaktor	: 6.5 in
Total Tinggi Reaktor	: 696 cm
Diameter Dalam (ID)	: 376 cm
Volume Kosong	: 67 m ³
Diameter Nozzle (In/Out)	: 1 in
Jumlah unit	: 3 unit (2 ON/ 1 Standby)

F. Belt Filter Press

Kapasitas proses	: Max. 24 m ³ /jam
Belt Width	: 3.5 m
Liquor Water Content	: 90 – 95%

G. Centrifuge Separator

Kapasitas proses	: Max. 22 m ³ /jam
Min. Inlet Solid Content	: 15% w/v
Min. Particle Size	: 10 micron

H. Spray Dryer

Kapasitas proses	: Max. 25 m ³ /jam/unit
Feed Solid Content	: 5 – 25% w/w
Design Product Moisture	: Max. 2%
Design Evaporation Rate	: 470 kg/jam/m ³ /unit
Inlet Gas Temperature	: 220 – 250°C
Kebutuhan Inlet Hot Gas	: 540.000 m ³ /jam/unit
Outlet Gas Temperature	: 130 – 150°C
Output Product Temperature	: 80 – 100°C
Tekanan operasi	: 1 atm
Design Outlet Dew Point	: 42°C
Design Radiation Loss	: 15%
Diameter Spray Dryer	: 2.9 m
Tinggi Spray Dryer	: 7.3 m
Jumlah unit	: 2 unit (1 ON/ 1 Standby)

I. Rotary Dryer

Kapasitas proses	: 2 ton/jam/unit
Feed Moisture Content	: Max. 30%
Design Product Moisture	: Max. 2%
Design Evaporation Rate	: 20 kg/jam/m ³ /unit
Inlet Gas Temperature	: 250 – 270°C
Kebutuhan Inlet Hot Gas	: 13.500 m ³ /jam/unit
Outlet Gas Temperature	: 140 – 160°C
Outlet Product Temperature	: 80 – 100°C
Design Outlet Dew Point	: 25°C
Design Radiation Loss	: 15%
Diameter Drum	: 1.5 m
Panjang Drum	: 9.4 m
Jumlah unit	: 6 unit (5 ON/ 1 Standby)

IV. NERACA MASSA

Berdasarkan hasil perhitungan neraca massa pada rancangan ini, target rencana kapasitas pabrik berbasis pada kapasitas olah bahan baku yaitu 5 ton sabut kelapa per hari, dengan basis durasi operasi harian 20 jam/hari direncanakan pabrik dapat beroperasi mengolah 330.000 ton sabut kelapa/tahun sehingga pabrik dapat memproduksi *industrial grade*:

Selulosa	: 90.000 – 11.000 ton/tahun
Hemiselulosa	: 5.000 – 6.000 ton/tahun
Lignin	: 12.000 – 13.000 ton/tahun

V. KESIMPULAN

Proses produksi telah dipilih berdasarkan pertimbangan berbagai aspek, yaitu aspek teknis proses, ekonomi, keamanan, fabrikasi dan lingkungan. Ditinjau dari segi tekno-ekonomi maka pabrik fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa dengan metode *steam explosion* berkapasitas olah 330.000 ton sabut kelapa/tahun layak dibangun dan dikembangkan.

VI. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ALTEKIMITS atas dukungan, saran dan masukan dalam penyusunan penelitian ini sehingga wawasan perihal relevansi desain dapat disesuaikan dengan implementasi praktis di industri.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Stelte, "Steam Explosion for Biomass Pretreatment," Resultat Kontrakt (RK) Report, Centre for Renewable Energy and Transport, Danish Technological Institute, 2011. https://www.teknologisk.dk/_root/media/52681_RK%20report%20steam%20explosion.pdf
- [2] W. H. Mason, "Process and Apparatus for Disintegration of Wood and the like," U.S. Patent 1578609, 1926. <https://patents.google.com/patent/US1578609A/en>
- [3] A. T. W. M. Hendriks, and G. Zeeman, "Pretreatments to Enhance the Digestibility of Lignocellulosic Biomass," *Bioresource Technology*, vol. 100, Issue 1, pp. 10-18, 2009. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.05.027
- [4] Mesfun et al., "Integration of hot water extraction in biomass-based CHP plants-possibilities for green-chemicals and increased electricity production," Master's Thesis. Lulea University of Technology, 2010. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1016647/FULLTEXT01.pdf>
- [5] N. R. Baral, and A. Shah, "Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover," *Bioresource Technology*, Feb. 2017. PMID: 28242390. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.068
- [6] Warta Ekspor Kementerian Perdagangan, "Optimalisasi Bahan Baku Kelapa. Ditjen PEN/MJL/67/IX/2017," Publikasi Warta Ekspor, 2017.
- [7] E. Sjöström, "Kimia Kayu: Dasar-dasar dan Penggunaannya," Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 1998.
- [8] J. Pérez, J. Muñoz-Dorado, T. de la Rubia, and J. Martínez, "Biodegradation and Biological Treatments of Cellulose, Hemicellulose and Lignin: An Overview," *Int. Microbiol.*, vol. 5, pp. 53-63, 2002. DOI: 10.1007/s10123-002-0062-3
- [9] H. Jørgensen, J. B. Kristensen, and C. Felby, "Enzymatic Conversion of Lignocellulose into Fermentable Sugars: Challenges and Opportunities," *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, vol. 1, pp. 119-134, 2007. DOI: 10.1002/bbb.4
- [10] J. H. Jang, S. H. Lee, and N. H. Kim, "Changes in the Dimensions of Lignocellulose Nanofibrils with Different Lignin Contents by Enzymatic Hydrolysis," 2014. DOI: 10.3390/polym12102201
- [11] A. Zoghalmi and G. Paes, "Lignocellulosic Biomass: Understanding Recalcitrance and Predicting Hydrolysis," National Center for Biotechnology Information, 2019. DOI: 10.3389/fchem.2019.00874
- [12] M. S. Sreekala, M. G. Kumaran, S. Joseph, et al., "Oil Palm Fibre Reinforced Phenol Formaldehyde Composites: Influence of Fibre Surface Modifications on the Mechanical Performance," *Applied Composite Materials*, vol. 7, pp. 295-329, 2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026534006291>
- [13] Z. Anwar., M. Gulfranz., and M. Irshad, "Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: A brief review," *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*.

- vol. 7, issue 2, pp. 163-173, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2014.02.003>
- [14] P. F. H. Harmsen, W. Huijgen, L. Bermudez, R. Bakker, "Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass," Food & Biobased Research Report, 2010. ISBN 9789085857570
- [15] A. Frölander, & R. Gudbrand, "Conversion of cellulose, hemicellulose and lignin into platform molecules: biotechnological approach," Borregaard Industries, Ltd., Norway, 2011. DOI: 10.1515/9783110260281.141
- [16] D. Fengel, and G. Wegener, "Kayu: Kimia Ultrastruktur, Reaksi-reaksi," Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 1984.
- [17] R. C. Kuhad, A. Singh, and K. E. Eriksson, "Microorganisms and Enzymes Involved in The Degradation of Plant Fiber Cell Walls," Adv. Biochem. Eng. Biotechnol., vol. 57, pp. 45-125, 1997. DOI: 10.1007/BFb0102072
- [18] H. Palonen, "Role of Lignin in the Enzymatic Hydrolysis of Lignocellulose," VTT Publications 520, ESPOO 2004, VTT Technical Research Centre of Finland, 2004. <https://publications.vtt.fi/pdf/publications/2004/P520.pdf>
- [19] J. Aguado, D. P. Serrano, G. S. Miguel, M. C. Castro, and S. Madrid, "Feedstock Recycling in A Two Step Thermo Catalytic Reaction System," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 79, pp. 415-423, 2006. DOI: 10.1016/J.JAAP.2006.11.008
- [20] A. A. Boateng, K. B. Hicks, R. A. Flores, and A. Gutsol, "Pyrolysis of Hull Enriched Byproducts from The Saccharification of Hull Barley (*Hordeum vulgare L.*)," Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 78, pp. 95-103, 2006. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.05.004