

PRARANCANGAN PABRIK FRAKSINASI LIGNOSELULOSA DARI SABUT KELAPA MENGGUNAKAN METODE *STEAM EXPLOSION* KAPASITAS 26.000 TON/TAHUN

Ayu Wulandari, Intan Rahmi Putri, Syahfa Adinda, M. Maktum Muharja, Bektu Palupi

S1 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember

Jl. Kalimantan Tegalboto No. 37, Krajan Timur, Kecamatan Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68121

Email : ayuwulandari280601@gmail.com

Abstrak

Kelapa merupakan salah satu komoditas utama yang berperan cukup besar terhadap perekonomian Indonesia. Komposisi penyusun utama sabut kelapa secara kimiawi adalah terdiri dari lignoselulosa yaitu >95% dari massa sabut kelapa. Kandungan lignoselulosa yang tinggi ini, menunjukkan adanya potensi lain yang lebih efektif dan efisien apabila dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaat lignoselulosa dalam sabut kelapa sehingga menjadikannya sebagai *high value-added product*. Fraksinasi Lignoselulosa dilakukan dengan beberapa tahapan proses, yaitu pretreatment awal bahan baku, proses steam explosion, proses pemisahan komponen lignoselulosa yang menghasilkan produk selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Pabrik ini dirancang akan dibangun pada tahun 2026 yang berlokasi di Kecamatan Keritang, Kabupaten Indragiri Hilir, Provinsi Riau. Pabrik ini memiliki kapasitas produksi 26.000 ton/tahun, beroperasi selama 330 hari/taun. Dalam operasinya, pabrik ini membutuhkan bahan baku berupa sabut kelapa sebanyak 70.000 ton/tahun, natrium hidroksida sebanyak 4.744,55 ton/tahun, asam sulfat sebanyak 5.724,5 ton/tahun dan hidrogen peroksida sebanyak 1.336,18 ton/tahun. Pabrik ini beroperasi 24 jam per hari dan 330 hari per tahun. Pabrik ini memiliki pay out time (POT) selama 2,89 tahun, laju pengembalian modal (ROR) 30,45%, dan titik impas (BEP) 49%.

Kata Kunci: Sabut kelapa, steam explosion, lignoselulosa

1. Pendahuluan

Kelapa merupakan tanaman tahunan, memiliki batang keras, tidak bercabang (monopodial), dan berakar serabut. Kelapa (*cocos nucifera L*) termasuk komoditas utama yang berperan cukup besar terhadap perekonomian Indonesia. Luas areal perkebunan kelapa mencapai 26% dari total area perkebunan negara, nilai ini lebih luas jika dibandingkan kelapa sawit dan karet. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi kelapa nasional pada tahun 2021 mencapai 17,16 juta ton sehingga menjadikan Indonesia sebagai produsen tersebar di dunia. Sementara, Filipina menempati urutan kedua dengan produksi kelapa sebesar 14,72 juta ton. Setelah itu diikuti India, Sri Lanka, dan Brazil (Statistika, 2023). Komposisi dari komponen kelapa adalah sabut 35%, daging 28%, air 25% dan tempurung 12% (Grinwood, 1960). Meskipun diketahui serabut kelapa menjadi komponen kelapa terbesar dan Indonesia menjadi produsen utama kelapa, tetapi Indonesia hanya memenuhi 3% dari kebutuhan sabut kelapa dunia. Nilai ekspor sabut kelapa Indonesia tahun 2018 menempati posisi ke-9 dengan nilai 11 juta USD (setara 154 miliar rupiah). Padahal total nilai ekspor sabut kelapa dunia sekitar 593 juta USD dimana 42% pasar didominasi oleh India (Warta Ekspor Indonesia, 2019).

Rendahnya nilai transaksi tersebut disebabkan karena pemanfaatan sabut kelapa yang kurang serta baru sebatas barang dengan nilai ekonomi kecil. Saat ini, sabut kelapa sebagian besar hanya dimanfaatkan sebagai bahan baku produk kerajinan, bahan bakar tambahan, atau dikembangkan menjadi berbagai produk, seperti *cocofibre*, *cocomesh*, *cocopot*, *coco fiber board*, dan *cocopeat*. Bahan tersebut merupakan bahan baku kompos kering, pot, industri matras, dan sebagainya (Indahyani, 2011). Sehingga meskipun Indonesia menjadi produsen utama penghasil kelapa, namun pemanfaatan sabut kelapa sebagai komoditas dengan nilai tambah ekonomi masih terbelakang tertinggal dibandingkan India dan Sri Lanka (Asosiasi Sabut Kelapa, 2019).

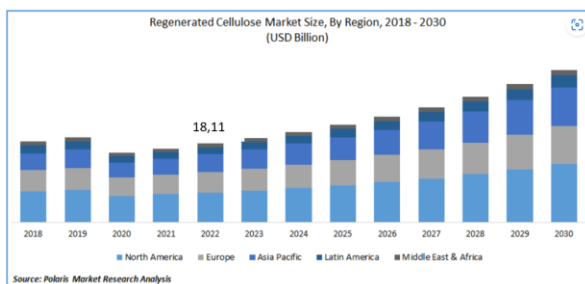
Komposisi penyusun utama sabut kelapa secara kimiawi adalah terdiri dari lignoselulosa yaitu >95% dari massa sabut kelapa. Kandungan lignoselulosa yang tinggi ini, menunjukkan adanya potensi lain yang lebih efektif dan efisien apabila dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaat lignoselulosa dalam sabut kelapa sehingga menjadikannya sebagai *high value-added product*. Berikut merupakan komponen penyusun lignoselulosa dalam sabut kelapa yang disajikan pada Tabel 1.



Tabel 1. Komposisi Lignoselulosa dalam sabut kelapa

Fraksi Komponen Lignoselulosa dalam Sabut Kelapa				
Selulosa	Hemiselulosa	Lignin	Abu	Air
25-45%	15-30%	25-40%	1-5%	5-8%

Tingginya kandungan selulosa dalam sabut kelapa mampu menjadikan peluang bagi industri pengembang produk selulosa, karena saat ini selulosa merupakan salah satu produk *intermediate* yang sangat dibutuhkan oleh dunia. Berdasarkan data dari Polaris Market Research 2022, nilai pasar selulosa di dunia bernilai USD 18,11 miliar dan diperkirakan menunjukkan CAGR 8,6% dari tahun 2022 hingga 2030. Permintaan yang meningkat untuk pasar selulosa diharapkan didorong oleh tingkat pendapatan yang meningkat, dan preferensi konsumen yang berubah di negara-negara berkembang mendukung pertumbuhan pasar. Meskipun demikian, kebutuhan selulosa dalam negeri hingga saat ini masih bergantung dari kapas, padahal *supply* bahan baku kapas lokal tidak memungkinkan untuk memenuhi kebutuhan pasar domestik. Berdasarkan data dari *Cotton and Product Annual* tahun 2022 budidaya kapas semakin kurang menarik bagi petani Indonesia dikarenakan margin yang lebih rendah dan kurangnya insentif pemerintah dibandingkan tanaman lain. Akibatnya, produksi kapas dalam negeri menurun, hanya mampu memenuhi <1% permintaan industri lokal. Pada tahun 2021 produksi kapas turun menjadi 1.000 bal. Bahkan untuk memproduksi tekstil berbasis rayon, Indonesia sepenuhnya mengimpor rayon. Oleh karena itu, jika bahan baku selulosa diproduksi menggunakan bahan lain, maka diharapkan mampu memenuhi permintaan selulosa. Gambar 1, Polaris Market Research Analysis pada tahun 2022 mencatat peningkatan nilai pasar selulosa, serta mencatat bahwa Asia Pasifik meliputi; China, Jepang, Malaysia, dan Indonesia salah satu wilayah yang mendominasi permintaan pasar selulosa global.



Gambar 1. Nilai Pasar Selulosa Global (*Polaris Market Research Analysis*)

Selain kebutuhan yang telah diuraikan sebelumnya, Menurut *Renewable Intensive Global Energy Scenario* (RIGES) dalam konferensinya menyatakan mengenai komitmen target setengah konsumsi energi primer dunia sekitar 400 EJ/tahun dapat terpenuhi dari biomassa di tahun 2050. Oleh sebab itu, perkembangan riset teknologi *biorefinery* saat ini telah berhasil membuat energi dari biomassa dapat potensial untuk di kembangkan menjadi lebih bernilai lebih dari sekedar limbah biomasannya. Energi biomassa yang umum digunakan contohnya adalah *biofuel pellet* dari lignin, serta bioethanol dari selulosa. Oleh karena itu, apabila kandungan selulosa dan lignin yang tinggi dalam sabut kelapa dapat diisolasi dan konversi secara optimal maka menjadi *high value-added product* sekaligus operasi kelapa yang berwawasan lingkungan di Indonesia.

Selulosa ditemukan pada tahun 1838 oleh kimia Prancis Anselme Payen, yang mengisolasinya dari materi tumbuhan dan menentukan rumus kimianya (Young, 1986). Selulosa digunakan untuk memproduksi polimer termoplastik pertama yang sukses, seluloid oleh Hyatt Manufacturing Company pada tahun 1870. Pada tahun 1890, produksi rayon “sutra buatan” dari selulosa mulai diperkenalkan dan selofan ditemukan pada 1912. Herman Staudinger menentukan struktur polimer selulosa pada tahun 1920. Senyawa ini pertama kali disintesis secara kimia (tanpa menggunakan enzim yang diturunkan secara biologis) pada tahun 1992, oleh Kobayashi dan Shoda (Kobayashi et al., 1992).

Selulosa dapat larut dalam beberapa jenis pelarut dan media, beberapa di antaranya merupakan dasar teknologi komersial. Proses disolusi ini bersifat *reversible* dan digunakan dalam produksi selulosa yang diregenerasi (seperti viscose dan selofan) dari pulp yang larut. Pelarut yang paling penting adalah karbon disulfida dengan adanya alkali. Agen pelarut lain yang digunakan termasuk reagen Schweizer, N-methylmorpholine, N-oxide, dan lithium klorida dalam dimethylacetamide. Secara umum, agen ini memodifikasi selulosa, menjadikannya larut. Agen tersebut kemudian dihilangkan bersamaan dengan pembentukan serat (Per, 2000).

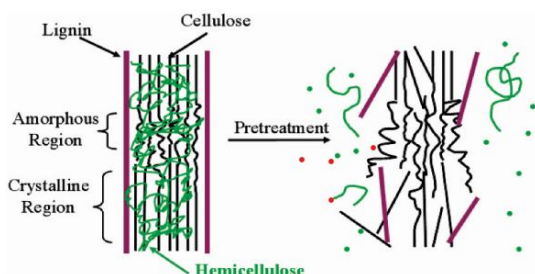
Sejarah regenerasi selulosa sering dikutip dimulai oleh George Audermars, yang pertama kali memproduksi serat nitroselulosa pada tahun 1855. Meskipun serat-serat lembut dan kuat menyerupai sutra. Namun, memiliki kelemahan yaitu sangat mudah terbakar. Hilaire de Chardonnet menyempurnakan produksi serat nitroselulosa, tetapi pembuatan serat ini memiliki proses relative tidak ekonomis (Volker, 2005). Pada tahun 1890, L.H. Despeissis menemukan proses cuprammonium yang menggunakan larutan cuprammonium untuk melarutkan selulosa, metode yang masih digunakan saat ini untuk produksi sutera



buatan. Pada tahun 1891, ditemukan bahwa perlakuan selulosa dengan alkali dan karbon disulfida menghasilkan turunan selulosa larut yang dikenal sebagai viscose. Proses ini, dipatenkan oleh Viscose Development Company, yang merupakan metode paling banyak digunakan untuk pembuatan produk selulosa yang diregenerasi. Selulosa yang diregenerasi dapat digunakan untuk memproduksi berbagai macam produk. Sementara aplikasi pertama regenerasi selulosa adalah sebagai tekstil pakaian, bahan ini juga digunakan dalam produksi alat kesehatan sekali pakai serta pembuatan membran buatan (Borbély, 2008).

2. Pemilihan Kapasitas dan Proses

Biomass recalcitrance merupakan sifat hampir dimiliki oleh semua jenis serat tanaman berkayu, seperti sabut kelapa. Oleh karena itu, perlu adanya metode khusus proses fraksinasi dan isolasi selulosa serta hemiselulosa dan lignin dari lignoselulosa yang dapat berlangsung secara efektif dan efisien.



Gambar 2. Efek pretreatment terhadap struktur lignoselulosa (Schwietzke et al., 2009)

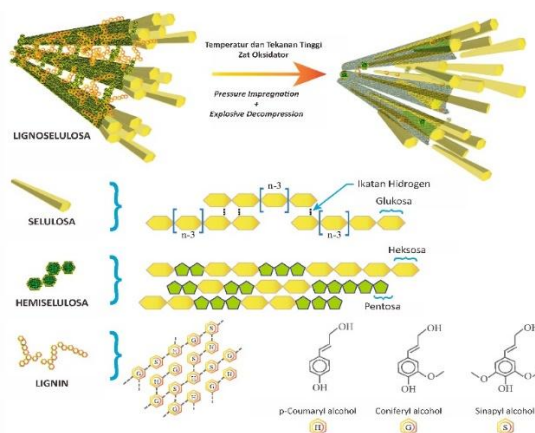
Salah satu perlakuan termofisika yang dapat dijadikan sebagai opsi adalah *steam explosion*, karena perlakuan ini paling ramah lingkungan dan didalam prosesnya minim menggunakan bahan kimia. Perlakuan termofisika cenderung berperan lebih untuk memecah *biomass recalcitrance* tanpa banyak perlakuan kimiawi seperti penggunaan bahan kimia berbahaya. Metode *steam explosion* diperkenalkan pertama kali dan dipatenkan oleh Mason dkk pada tahun 1926.

Metode *steam explosion* yang dipatenkan tersebut digunakan dalam mengolah lignoselulosa kayu menggunakan steam pada suhu 200-285°C dan tekanan 3-5 MPa selama 2 menit (*initiation*). Setelah itu, tekanan operasi dinaikkan secara drastis menjadi 6-8 MPa selama 5 detik (*impregnation*) dan diturunkan ke tekanan atmosfer yang mengakibatkan perubahan tekanan mendadak. Perubahan tekanan secara mendadak tersebut membuat struktur lignoselulosa didalam serat terpecah akibat adanya dekomposisi eksplosif (Wang et al., 2015).

Babcock juga menerapkan proses ini untuk mengolah kayu terlebih dahulu untuk produksi gula dan alkohol yang dapat difermentasi. Serpihan kayu dipanaskan dengan uap jenuh bertekanan suhu tinggi (160-180°C dan 0,7-4,8 MPa) untuk waktu retensi yang relatif singkat. Dekompresi biomassa yang eksplosif dapat memecahkan selulosa dan struktur dinding sel yang kaku. *Steam explosion* ditetapkan secara komersial dalam proses Masonite untuk produksi papan

serat, *pulpchemimechanical/chemithermomechanical, ultra-high-yield*, serta produk lainnya. Saat ini, minat kuat untuk mengejar sumber energi alternatif dan terbarukan dari produksi bioetanol meningkat kembali semenjak munculnya pencemaran lingkungan dengan penggunaan bahan bakar fosil. Dengan demikian, *pretreatment* sangat penting karena memiliki dampak besar pada pencernaan selulosa, toksisitas fermentasi, kebutuhan daya pengadukan, kebutuhan energi dalam proses hilir, dan pengolahan air limbah. Dari semua teknologi *pretreatment*, *steam explosion* dianggap sebagai unit operasi potensial dalam skema proses berbagai produk komersial (Wang et al., 2015).

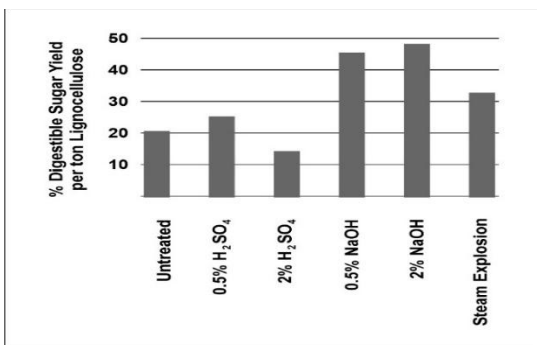
Dekomposisi eksplosif yang terjadi mengakibatkan makrofibril-makrofibril pada partikel serat biomassa terlepas dari struktur serat biomassa, sehingga celah-celah pada serta microfibril dapat terbuka secara mikroskopis (defibrilasi). Proses tersebut dapat memberikan potensi kemudahan proses fraksinasi berikutnya, baik secara hidrolisis menggunakan proses enzimatik, fermentasi, maupun isolasi termofisika-kimia guna memperoleh hasil fraksinasi dengan lebih efektif dan efisien (Hendriks & Zeeman, 2009)



Gambar 3. Pengaruh Steam Explosion terhadap struktur lignoselulosa (Biswas et al., 2020)

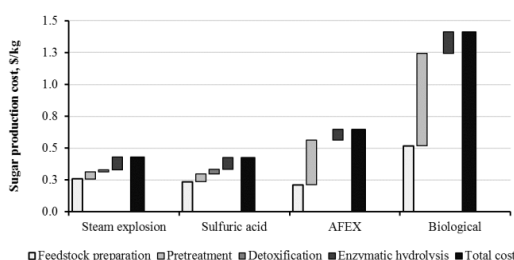
A. Seleksi Proses

Riset fraksinasi lignoselulosa dengan metode *steam explosion* telah berkembang dengan cukup modern. Selain mengoptimalkan variable kondisi operasi, beberapa studi juga mengombinasikan metode *steam explosion* dengan metode lain agar diperoleh hasil fraksinasi dengan yield yang lebih tinggi. Penggunaan reagen alkali seperti natrium hidroksida dapat menargetkan penghilangan lignin yang tinggi dan pelarutan kompleks lignoselulosa (Dziekońska-Kubczak et al., 2018).



Gambar 4. Perbandingan hasil fraksinasi sebagai % *Digestible Sugar Yield* dari beberapa metode pretreatment (Dziekońska-Kubczak et al., 2018)

Diantara beberapa riset yang ada, salah satu *pilot scale* yang memberikan hasil memuaskan secara tekno-ekonomi adalah kombinasi *steam explosion* dengan menggunakan *alkali-acid delignification process* yang sangat berpotensi untuk dilakukan *scale-up design* sebagai usulan pra-rancangan pabrik fraksinasi lignoselulosa dari serat biomassa yang relatif paling ekonomis (Baral & Shah, 2017).



Gambar 5. Perbandingan biaya operasi beberapa teknologi fraksinasi dengan *basis product-downstream* sebagai gula (Baral & Shah, 2017)

Berbagai metode pretreatment memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, tetapi pretreatment yang paling banyak diterapkan pada skala industri adalah *steam explosion*. *Steam explosion* merupakan metode yang tidak memerlukan pretreatment biomassa berukuran kecil sehingga lebih hemat energi, tanpa bahan kimia, kadar air yang rendah sehingga

menghasilkan penghematan energi, tidak terjadi degradasi lignin dan selulosa sehingga rendemen gula lebih tinggi dan lignin dapat diperoleh kembali, produk degradasi hemiselulosa dapat dipisahkan dengan pencucian dan memiliki nilai ekonomis (Rahardjo et al., 2021).

B. Uraian Proses Terpilih

Proses fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa dengan menggunakan metode *steam explosion* terbagi menjadi 3 unit. Unit pertama merupakan tahapan dari proses *pretreatment* yang digunakan untuk mengurangi ukuran bahan baku dan memecah struktur lignin. Unit kedua terdapat tahapan fraksinasi yang digunakan untuk memisahkan senyawa lignoselulosa yaitu selulosa, hemiselulosa, serta lignin. Setelah itu pada unit terakhir terdapat tahapan lignin precipitation yang digunakan untuk mengubah lignin yang masih berbentuk larutan Na-Lignin menjadi bentuk lignin bebas.

1. Tahap Perlakuan Awal *Pretreatment* Bahan Baku

Pada proses ini, sabut kelapa yang didapat dari vendor akan direduksi ukurannya dengan menggunakan proses mekanik. Langkah awal sabut kelapa dari tempat penyimpanan bahan baku (F-110) diangkut menuju *Fiber Cyclone Destoner* (H-120) menggunakan Belt Conveyor (J-111) untuk menghilangkan partikel pengotor seperti pasir, kerikil, dan lainnya. Setelah itu, diangkut menuju *Bulk Fiber Silo* (F-130) yang digunakan sebagai gudang penyimpanan sabut kelapa bersih.

Sabut kelapa direduksi ukurannya menjadi 1 mm (18 mesh) sampai 2 mm (10 mesh) melalui beberapa proses. Awal mula sabut kelapa dengan ukuran 5-10 cm dari F-130 diumpankan ke *Fiber Hammer Mill* (C-140) menggunakan *Screw Conveyor* (J-131), sehingga dihasilkan sabut kelapa yang telah digiling (*shredded fiber*) dengan ukuran 1-2 mm. Proses ini disebut sebagai proses mekanik yang memiliki tujuan untuk mengecilkan bahan lignoselulosa dan menambah luas permukaan kontak untuk proses *pretreatment* berikutnya. Oleh karena itu dapat meningkatkan efektivitas dari proses *steam explosion*.

2. Tahap Proses *Steam Explosion*

Shredded fiber diumpankan menggunakan *Bucket Elevator* (H-151) dari *Hammer mill* (C-140) menuju Reaktor *Steam Explosion* secara *batch*. Kondisi operasi dari *steam explosion* berlangsung melalui 3 tahapan, yaitu *pressurization* (13 bar dan 160°C), *holding* (15 menit), dan *explosion/sudden decompression* (< 3 menit). Pada proses ini sebagian besar lignin akan dihilangkan dari struktur lignoselulosa dan sebagian besar hemiselulosa akan keluar sebagai monosakarida dan oligosakarida yang siap diambil pada tahapan



selanjutnya. Produk yang didapatkan dari proses ini disebut sebagai *exploded fiber*. *Exploded fiber* merupakan serat sabut kelapa yang mikrofibril dan ikatan antar fraksi lignoselulosa (*biomass recalcitrance*) sudah terlepas dari struktur serat sabut kelapa. Hal ini terjadi pada saat dibukanya *Explosion Control Valve* (K-211) yang mengalami dekompresi mendadak, sehingga di dalam bejana menimbulkan *pressure drop* yang sangat tinggi. Proses dekompresi mendadak saat operasi berlangsung sangat cepat. Proses fraksinasi dan isolasi komponen penyusun lignoselulosa dapat dilakukan setelah *biomass recalcitrance* pecah. Setelah proses *steam explosion* selesai, dilakukan pemisahan antara steam dan padatan sabut kelapa menggunakan *cyclone* (H-213).

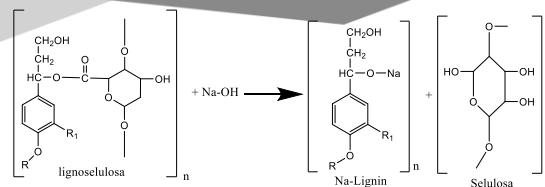
3. Tahap Pemisahan Komponen Lignoselulosa

a) Pemisahan Hemiselulosa

Karakteristik hemiselulosa yang terdapat di dalam *exploded fiber* relatif paling mudah larut di dalam air. Oleh karena itu, perlu adanya proses pencucian pada (R-220) dengan penambahan air pada aliran *exploded fiber*, sehingga campuran yang terbentuk berupa *slurry*. Selanjutnya *slurry* diproses menggunakan *Belt Filter Press* (H-230) yang bertujuan untuk memisahkan fase *liquid* yang terdapat campuran hemiselulosa dan air, serta fase *solid cake* yang terdapat campuran selulosa dan lignin (*cellu-lignin cake*). Hemiselulosa yang telah dipisahkan, diproses agar berbentuk padat dan kering sesuai spesifikasi produk akhir menggunakan *Spray Dryer* (B-240).

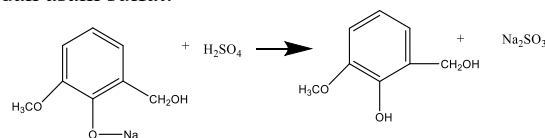
b) Pemisahan Selulosa

Solid cake yang terdapat campuran selulosa dan lignin akan diolah melalui proses *Delignification* dengan kondisi operasi bertekanan 121°C selama 1 jam dan menggunakan NaOH 17,5% w/v pada *Delignification Reactor* (R-320). Mekanisme proses yang terjadi berdasarkan prinsip reaksi antara lignin dan alkali, sehingga dapat melarutkan lignin sebagai Na-Lignin berupa *Black Liquor*. Sedangkan komponen selulosa akan tetap tidak larut, sehingga kedua komponen tersebut dapat dipisahkan secara fisika dengan menggunakan *Centrifuge Separator* (H-330). Berikutnya, selulosa cake akan melewati proses *bleaching* pada tangki (R-340) untuk tahap pemurnian agar dapat diperoleh kemurnian selulosa yang lebih tinggi menggunakan H₂O₂ 10% dan kembali dilakukan pemisahan sehingga diperoleh cake selulosa yang lebih murni untuk selanjutnya dikeringkan pada *rotary dryer* (B-360). Persamaan reaksi delignifikasi yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan sebagai berikut.



c) Pemisahan Lignin

Terdapat 2 aliran yang dihasilkan dari *Outlet Centrifuge Separator* (H-330), yaitu padatan *cake* yang berisi selulosa dan *black liquor* yang berisi Na-Lignin. *Black liquor* yang terdapat di dalam aliran akan melalui proses lanjutan *Lignin Precipitation*. Lignin yang masih berbentuk larutan Na-Lignin diubah kembali menjadi bentuk lignin bebas dengan penambahan H₂SO₄ 20% w/v hingga pH = 2, sehingga lignin akan mengendap di dalam campuran tersebut sebagai lignin bebas yang tidak larut. Endapan lignin yang terbentuk dapat dipisahkan agar memperoleh *lignin cake* dengan proses *dewatering* menggunakan *Belt Filter* (H-420) dan dikeringkan dengan menggunakan *Rotary Dryer* (B-430) agar didapatkan lignin kering sebagai produk akhir. Berikut merupakan persamaan reaksi antara lignin dan asam sulfat.



3. Neraca Massa dan Neraca Energi

A. Neraca Massa

Pabrik Fraksinasi Lignoselulosa dari sabut kelapa dirancang dengan kapasitas produksi 26.000 ton/tahun menggunakan metode *steam explosion*. Pabrik ini membutuhkan bahan baku sabut kelapa sebanyak 70.000 ton/tahun, natrium hidroksida sebanyak 4.744,55 ton/tahun, asam sulfat sebanyak 5.724,5 ton/tahun dan hidrogen peroksida sebanyak 1.336,18 ton/tahun. Pabrik ini beroperasi 24 jam per hari dan 330 hari per tahun.

B. Neraca Energi

Pabrik fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa ini membutuhkan energi berupa *steam* sebesar 1382,08 kg/jam, listrik sebesar 1489,25 kWh, air proses sebesar 28604,48 kg/jam, air sanitasi sebesar 1399,1184 kg/jam, dan *brine water* sebesar 4411,716 kg/jam

4. Evaluasi Ekonomi

Analisa ekonomi pabrik fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa dengan kapasitas 26.000 ton/tahun menunjukkan bahwa pabrik membutuhkan biaya produksi (TPC) sebesar US\$62.080.398 dengan *total capital investment* (TCI) sebesar US\$23.352.219. Pemodalan pabrik 100% berasal dari peminjaman.



Keuntungan yang diperoleh perusahaan tiap tahunnya sebesar US\$7.110.150 dengan harga jual selulosa sebesar US\$1.600 per ton, hemiselulosa sebesar US\$500 per ton, dan lignin sebesar US\$720 per ton. Pabrik ini memiliki *pay out time* (POT) selama 2,89 tahun, laju pengembalian modal (ROR) 30,45%, dan titik impas (BEP) 49%.

5. Kesimpulan

Pabrik fraksinasi lignoselulosa dari sabut kelapa direncanakan dibangun dengan kapasitas produksi 26.000 ton/tahun menggunakan metode *steam explosion*. Kebutuhan bahan baku produksi meliputi sabut kelapa sebanyak 70.000 ton/tahun, natrium hidroksida sebanyak 4.744,55 ton/tahun, asam sulfat sebanyak 5.724,5 ton/tahun dan hidrogen peroksida sebanyak 1.336,18 ton/tahun. Pabrik ini beroperasi 24 jam per hari dan 330 hari per tahun. Pabrik ini memiliki *pay out time* (POT) selama 2,89 tahun, laju pengembalian modal (ROR) 30,45%, dan titik impas (BEP) 49%.

Daftar Pustaka

- A. Spivakovsky, v. Dyachkov. 1966. "Conveyors and Related Equipment." *Journal of the Franklin Institute* 248(3):268.
- Arini Paskawati, Y., & Susiany Retnoningtyas, E. (n.d.). *PEMANFAATAN SABUT KELAPA SEBAGAI BAHAN BAKU PEMBUATAN KERTAS KOMPOSIT ALTERNATIF*.
- Ashby, M. F. (2013). Material profiles. In *Materials and the Environment* (pp. 459–595). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-385971-6.00015-4>
- Baasel, W. D. (1976). *Preliminary Chemical Engineering Plant Design*. Elsevier.
- Baral, N. R., & Shah, A. (2017). Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover. *Bioresource Technology*, 232, 331–343. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.068>
- Biswas, R., Teller, P. J., Khan, M. U., & Ahring, B. K. (2020). Sugar production from hybrid poplar sawdust: Optimization of enzymatic hydrolysis and wet explosion pretreatment. *Molecules*, 25(15). <https://doi.org/10.3390/molecules25153396>
- Borbély, É. (n.d.). Lyocell, The New Generation of Regenerated Cellulose. In *Acta Polytechnica Hungarica* (Vol. 5, Issue 3).
- Brownell, L.E. and Young, E.H., 1979, *Process Equipment Design*, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Coulson, J.M. and Richardson, J.F., 1983, *Chemical Engineering*, Vol. 6, Pergamon Press, Oxford.
- Dziekońska-Kubczak, U., Berłowska, J., Dziugan, P., Patelski, P., Balcerek, M., Pielech-Przybylska, K., Czyżowska, A., & Domański, J. (2018). HW pretreatment. In *BioResources* (Vol. 13, Issue 3).
- Geankoplis, C.J and J.F. Richardson. 1989. *Design Transport Process and Unit Operation*. Pegamon Press. Singapore
- Geankoplis, C.J., 2018, "Transport Processes and Unit Operations", 5rd Edition, Prentice-Hall International Inc., New York.
- Grinwood. (1960). *Coconut palm products*. FAO.
- Hao, L. C., Sapuan, S. M., Hassan, M. R., Sheltami, R. M., & Sheltami, R. M. (2018). Natural fiber reinforced vinyl polymer composites. In *Natural Fiber Reinforced Vinyl Ester and Vinyl Polymer Composites: Development, Characterization and Applications* (pp. 27–70). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102160-6.00002-0>
- Hariansyah, M. R., Hermanto, K., Wijaya, E., & Hudaningsih, N. (n.d.). *JITSA Jurnal Industri&Teknologi Samawa PT SEMEN INDONESIA (PERSERO) TBK PABRIK TUBAN MENGGUNAKAN METODE NASA-TLX* (Vol. 3, Issue 1). <https://sig.id/id/profil-perusahaan>.
- Hendriks, A. T. W. M., & Zeeman, G. (2009). Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. In *Bioresource Technology* (Vol. 100, Issue 1, pp. 10–18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.027>
- Ifa, L., Pakala, F. R., Burhan, R. W., Jaya, F., & Masjid, R. A. (2020). Pemanfaatan Sabut Kelapa Sebagai Bioadsorben Logam Berat Pb(II) Pada Air Limbah Industri (Coconut Fiber Utilization As A Heavy Metal Bio adsorbent Pb (II) On Industrial Waste Water). *Journal of Chemical Process Engineering*, 5(1), 54–60.
- Indahyani, T. (n.d.). *PEMANFAATAN LIMBAH SABUT KELAPA PADA PERENCANAAN INTERIOR DAN FURNITURE YANG BERDAMPAK PADA PEMBERDAYAAN MASYARAKAT MISKIN*.
- Kern, D.Q., 1950, *Process Heat Transfer*, Mc. Graw-Hill International Book Company Inc., New York
- Kobayashi, S., Kashiwa, K., Shimada, J., Kawasaki, T., & Shoda, S.-I. (1992). ENZYMATIC POLYMERIZATION: NONBIOSYNTHETIC PATH CATALYZED BY CELLULASE. In *Makromol. Chem., Macromol. Symp* (Vol. 54).
- Kusnarjo. 2010. *Desain Pabrik Kimia*. Surabaya: ITS.
- Leto, K. T. 2017. *Pelindihan Bijih Mangan Dari Nusa Tenggara Timur Menggunakan Hasil Hidrolisis Serbuk Gergaji Kayu Sebagai Reduktor Dengan Pelarut Asam Sulfat*. Tesis. Surabaya: Program Magister Bidang Keahlian Kimia Analitik Departemen Kimia Fakultas Matematika dan



- Ilmu Pengetahuan Alam Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Morales, A., B. Gullon, I. Davila, G. Eibes, J. Labidi, dan P. Gullon. 2018. Optimization of alkaline pretreatment for the co-production of biopolymer lignin and bioethanol from chestnut shells following a biorefinery approach. *Industrial Crops & Products*. 124.
- Nurmianto, E., Anita, N., Apriani, D., & Aulia, N. (n.d.). *IDENTIFIKASI HAZARD DAN PERANCANGAN SISTEM INFO RMASI KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA DI UNIT AMoNIAK (Studi Kasus : PT. PETRoKIMIA GRESIK)*.
- Per, S. (2000). *Forest Products Chemistry. Papermaking Science and Technology* (Vol. 3). Fapet OY.
- Perry, R.H. and Green, D.W., 1997, Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed., Mc. Graw-Hill Book Company, New York.
- Perry, R.H. and Green, D.W. 2008. Perry's Chemical Engineer's Handbook, 8th ed. Mc Graw Hill Book Co., Inc. New York
- Peters, M.S. and Timmerhaus, K.D., 2003, Plant Design and Economic for Chemical Engineering, 5th ed., Mc. Graw-Hill International Book Company Inc., New York.
- Pratama, M. A. (2021). Scooping Review : Efektivitas Penggunaan Alat Pelindung Diri dengan Kejadian Dermatitis Kontak pada Pekerja Pabrik. *Jurnal Riset Kedokteran*, 1(1), 26–31. <https://doi.org/10.29313/jrk.v1i1.107>
- Putra, I. P. W. D., & Budiana, I. N. (2018). Kebebasan Penetapan Modal Dasar Perseroan Terbatas Oleh Para Pihak Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 29 Tahun 2016. *Jurnal Analisis Hukum*, 1.
- Rahardjo, A. H., Azmi, R. M., Muharja, M., Apamarta, H. W., & Widjaja, A. (2021). Pretreatment of Tropical Lignocellulosic Biomass for Industrial Biofuel Production : A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1053(1), 012097. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1053/1/012097>
- Rarindo, H. (2018). Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3): Suatu Analisis Studi Kasus Kecelakaan Kerja di Pabrik, Kebijakan Hukum dan Peraturannya. *Jurnal Ilmiah Teknologi FST Undana*, 12.
- Sahadi, Taufiq, O. H., & Wardani, A. K. (2020). Karakter Kepemimpinan Ideal dalam Organisasi. *Jurnal MODERAT*, 6.
- Santoso, J. (2000). Perseroan Terbatas sebagai Institusi Kegiatan Ekonomi yang Demokratis. *Jurnal Hukum*, 7.
- Santoso Putri, K., Gede, I., Widyadana, A., & Palit, H. C. (2015). / Peningkatan kapasitas produksi pada PT. In *Adicitra Bhirawa / Jurnal Titra* (Vol. 3, Issue 1).
- Sitorus, P. Supartiningsih, J. K. Marpaung, dan B. R. Munthe. 2020. Isolasi dan Identifikasi Pektin Dari Kulit Pisang Mas (*Musa acuminata* Colla). *FARMANESIA*. 7(1):31-36.
- Tarmizi. (2019). Desain Organisasi dalam Pengembangan Struktur Organisasi Perguruan Tinggi di Era Industri 4.0. *Manajemen Pendidikan Islam*, 4.
- Towler, G., & Sinnott, R. (2007). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant And Process Design*. Elsevier.
- Ulrich, G.D., 1984, A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics, John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Vaithanomsat, P., Apiwatanapiwat, W., Chumchuent, N., Kongtud, W., & Sundhrarajun, S. (2011). The Potential of Coconut Husk Utilization for Bioethanol Production. In *Nat. Sci.* (Vol. 45).
- Volker, A. (2005). *Encyclopedia of polymer science and technology (Wird aktualisiert. ed.)*.
- Wang, K., Chen, J., Sun, S.-N., & Sun, R.-C. (2015). Steam Explosion. *Pretreatment of Biomass*.
- Wardhana, A. (2021). *Desain Organisasi dan Wewenang*.
- Waruwu, S., & Yuamita, F. (n.d.). *ANALISIS FAKTOR KESEHATAN DAN KESELAMATAN KERJA (K3) YANG SIGNIFIKAN MEMPENGARUHI KECELAKAAN KERJA PADA PROYEK PEMBANGUNAN APARTEMENT STUDENT CASTLE*.
- Widyaningrum, M. E., & Siswati, E. (2017). *Manajemen Sumber Daya Manusia* (M. E. Widiana, Ed.; 1st ed.). UBHARA Manajemen Press.

