

# Pra-Desain Pabrik *Vanillin* Sintetik dari *Kraft Lignin*

Agra Yuba Bachtiar, Nelly Fatrian Wahani, Sri Rachmania Juliastuti, dan Nuniek Hendrianie  
Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
e-mail: nuniek@chem-eng.its.ac.id

**Abstrak**—*Vanillin* merupakan senyawa yang digunakan untuk perasa *vanilla* sintetik, antioksidan guna kosmetik, dan salah satu bahan untuk senyawa farmasi. Sebagai salah satu negara agraris, masyarakat Indonesia melakukan bercocok tanam *vanilla* guna bahan baku utama dalam produksi *vanillin*. Meskipun demikian, berdasarkan data dari *Food Agricultural Organization* (FAO), bila diproyeksikan, kebutuhan *vanillin* nasional pada tahun 2025 akan mencapai sekitar 47.000 ton/tahun. Dengan ini, peluang untuk dibukanya industri yang memproduksi *vanillin* sintetik akan terbuka lebar untuk memenuhi kebutuhan yang masih belum tercukupi. Proses pembuatan *vanillin* sintetik dilakukan dengan *kraft lignin* sebagai bahan baku utama. Mula-mula *kraft lignin* akan mengalami reaksi oksidasi menjadi *vanillin* yang dibantu dengan senyawa *nitrobenzene* pada tekanan 10 bar dan suhu 110 °C. *Vanillin* yang dihasilkan diekstrak menggunakan pelarut *etil asetat* dan dilanjutkan dengan pemurnian menggunakan kolom distilasi pada suhu 88 °C dan tekanan 1 bar. *Vanillin* didapat dari kolom distilasi bagian bawah. *Vanillin* yang didapat kemudian mengalami kristalisasi, lalu dicuci, dikeringkan, dan selanjutnya disimpan untuk dijual. Untuk dapat mendirikan pabrik ini, diperlukan total modal investasi sebesar Rp. 220.572.130.151 dengan total biaya produksi sebesar Rp. 355.372.802.387 untuk produksi 100% kapasitasnya sebanyak 6880 ton/tahun. Estimasi umur pabrik adalah 10 tahun dan waktu pengembalian pinjaman sekiranya selama 4,88 tahun. Dari perhitungan yang telah dilakukan, *internal rate of return* (IRR) diperoleh sebesar 21,48%, *payout time* (POT) selama 4,46 tahun, dengan *Break Even Point* (BEP) sebesar 22,21%.

**Kata Kunci**—*Lignin*, Oksidasi, *Vanillin*.

## I. PENDAHULUAN

SEBAGAI salah satu negara agraris, masyarakat Indonesia melakukan bercocok tanam *vanilla* guna bahan baku utama dalam produksi *vanillin*. *Vanillin*, merupakan senyawa yang digunakan untuk perasa *vanilla* sintetik, antioksidan guna kosmetik, dan salah satu bahan untuk senyawa farmasi. Hingga kini Indonesia dikenal sebagai salah satu produser terbesar di Indonesia dalam memproduksi *vanillin* menggunakan bahan baku alami dari tanaman *vanilla*. Selain itu, Indonesia juga menjadi salah satu konsumen *vanilla* terbesar di dunia untuk memproduksi *vanillin*, tercatat Indonesia mengonsumsi 32% produksi *vanillin* yang ada di dunia [1]. Meskipun demikian, berdasarkan data *Food Agricultural Organization* (FAO), bahwa konsumsi Indonesia semakin meningkat melebihi kapasitas produksi yang ada, menyebabkan Indonesia melakukan impor *vanilla* bahkan tercatat tahun 2018 impor *vanilla* meningkat 45% dibanding tahun 2017. Gambar 1 merupakan grafik *supply* dan *demand vanillin* di Indonesia.

Mencegah kekurangan *vanillin*, guna memenuhi kebutuhan *vanillin* dalam Indonesia salah satu langkah yang dapat dilakukan ialah memproduksi *vanillin* sintetik. *Vanillin*

sintetik memiliki keuntungan yakni *vanillin* dijual di pasar dari proses kimia sintetik dibandingkan proses ekstraksi alami. Selain itu, *vanillin* alami relatif lebih mahal dibandingkan *vanillin* sintetik, berkisar 2000-4000\$/kg dibandingkan *vanillin* sintetik 15-1000\$/kg [2]. Meskipun demikian, *vanillin* sintetik umumnya dihasilkan dari senyawa *guaiacol*, senyawa yang harganya fluktuatif mengikuti harga *crude oil* menyebabkan keuntungan yang didapat dari penjualan *vanillin* sintetik memungkinkan menjadi sedikit. Sehingga bahan baku lain dalam sintesis *vanillin* diperlukan.

Salah satu bahan baku yang dapat digunakan untuk memproduksi *vanillin* ialah limbah pabrik kertas yaitu *lignin*. *Lignin* merupakan salah satu komponen pada limbah pabrik kertas dengan kandungan *lignin* hingga 30-40% sehingga dapat diolah menjadi *vanillin* [3]. Dalam pabrik kertas, jumlah *kraft lignin* didapat sekitar 12% dari total kapasitas produksi kertas. Tidak hanya itu, tercatat oleh Kementerian Perindustrian bahwa produksi kertas di Indonesia pada tahun 2018 meningkat 24% dibanding tahun 2017. Dari tahun ke tahun produksi kertas di Indonesia semakin meningkat, sehingga menyebabkan jumlah *lignin* yang dihasilkan juga akan semakin meningkat. Selain itu, *lignin* hanya diolah oleh pengolahan air limbah hingga sesuai mutu lingkungan, tidak dimanfaatkan kembali sehingga dapat menjadi produk yang bernilai jual tinggi.

Oleh karena itu, guna meningkatkan produksi *vanillin* diperlukan pembuatan pabrik *vanillin* dari *kraft lignin* sebagai bahan baku.

## II. KAPASITAS DAN LOKASI PENDIRIAN

Dalam penentuan kapasitas digunakan persamaan (1) untuk melakukan prediksi impor, ekspor, produksi, dan konsumsi *vanillin*.

$$F = P(1 + i)^n \quad (1)$$

Keterangan:

F= nilai prediksi

i= rata rata laju

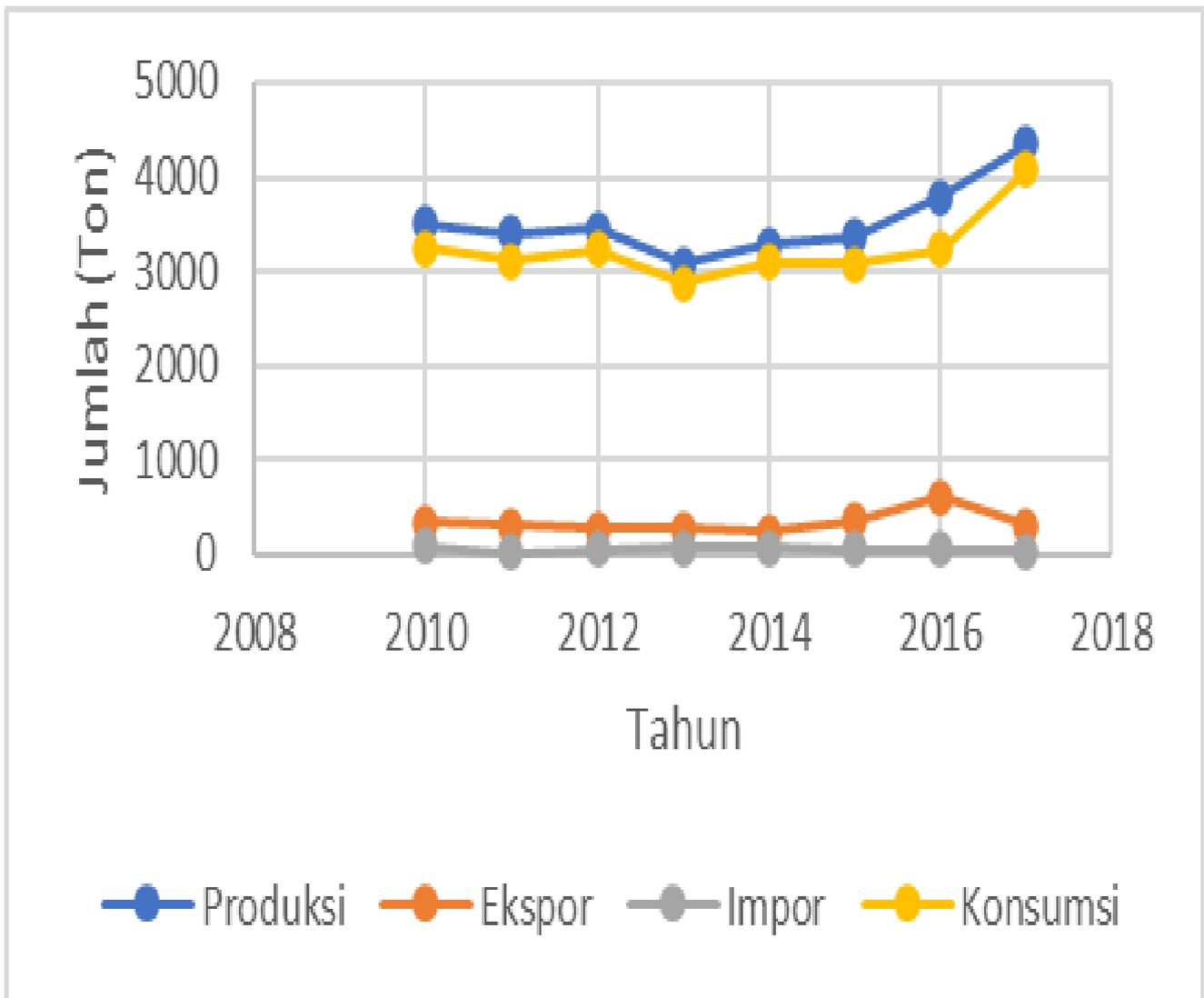
n=tahun

Data yang ditunjukkan dalam Tabel 1 adalah hasil prediksi kebutuhan *vanillin* di Indonesia. Sedangkan Tabel 2 menampilkan data perbandingan seleksi lokasi untuk pendirian pabrik *vanillin*.

Berdasarkan Tabel 2, diketahui bahwa Tangerang menjadi lokasi yang tepat untuk didirikannya pabrik *vanillin* sintetik disebabkan oleh beberapa aspek yang mendukung, diantaranya:

### A. Jumlah Bahan Baku yang Memadai

Bahan baku di daerah ini sudah sangat memadai untuk di



Gambar 1. Grafik Supply dan Demand Vanillin di Indonesia.

produksinya *vanillin* sintetik dengan sumber *lignin* dari produksi *pulp*. Bahan baku ini juga merupakan jumlah bahan baku terbesar diantara ketiga daerah yang berpotensi untuk didirikannya pabrik *vanillin* sintetik ini.

**B. Jarak Lokasi dengan Bahan Baku**

Lokasi yang kami pilih terletak di daerah kecamatan Kosambi, Tangerang, Banten. Lokasi ini berjarak dengan PT. Indah Kiat Pulp & Paper sejauh 44 km, yang mana jarak ini merupakan jarak yang paling kecil diantara tiga daerah yang mempunyai potensi untuk dijadikan lokasi pendirian pabrik ini.

**C. Ketersediaan Listrik**

Di daerah Banten, ketersediaan Listrik sudah mencapai 4.829 MW. ketersediaan listrik ini merupakan ketersediaan listrik yang terbesar diantara ketiga daerah yang memiliki potensi untuk didirikannya pabrik *vanillin* sintetik ini.

**D. Ketersediaan Lahan**

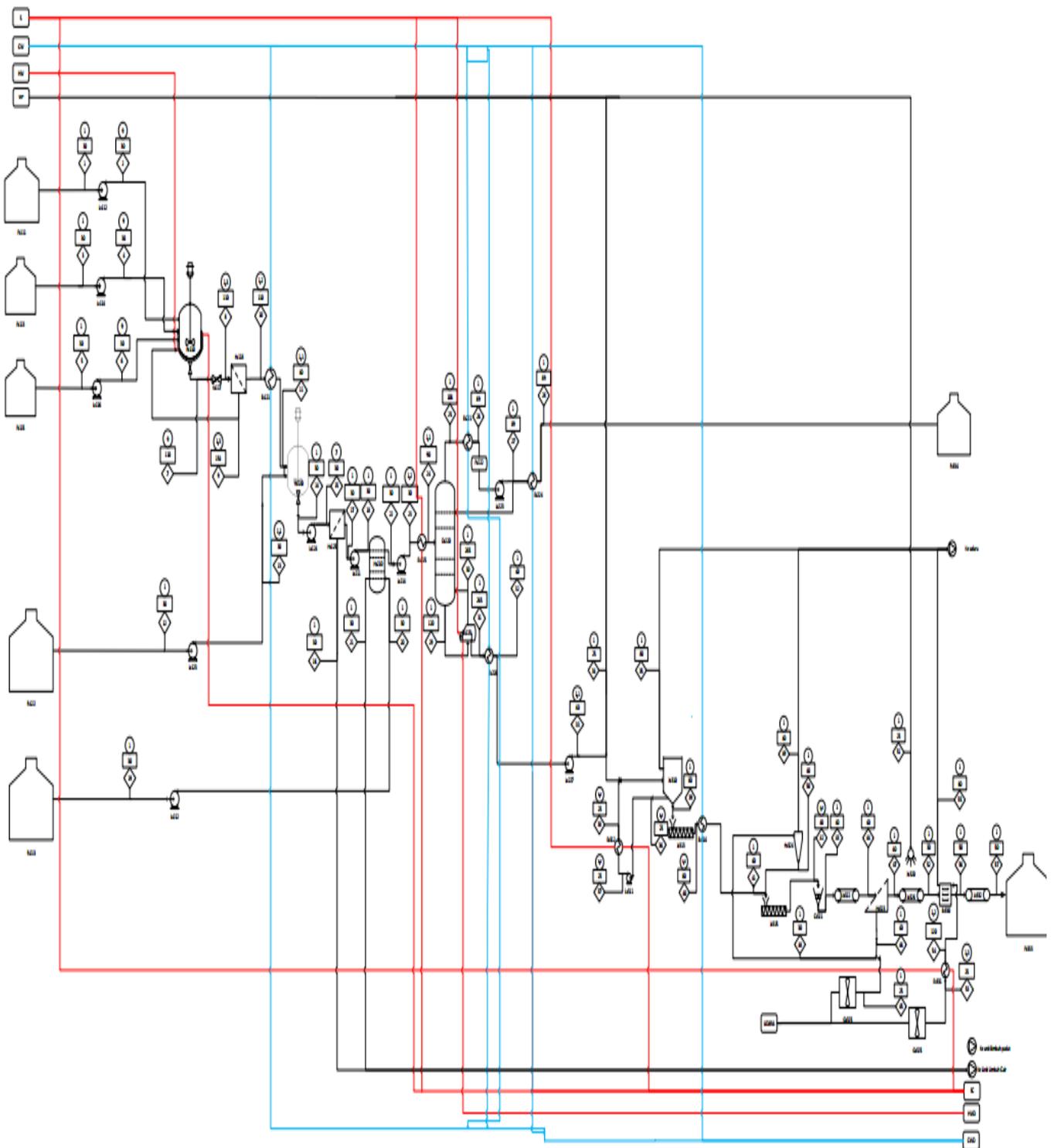
Di lokasi yang kami pilih, terdapat lahan kosong seluas 480 Ha yang mana merupakan lahan kosong terluas diantara ketiga daerah yang berpotensi untuk diirikannya pabrik *vanillin* sintetik ini.

Kemudian, untuk aspek – aspek yang lain, seperti jarak

lokasi dengan pelabuhan masih dapat ditempuh dengan jalur darat karena jalan yang digunakan sudah merupakan jalur provinsi. Lalu, pada aspek ketersediaan air, pada masing – masing daerah terdapat sungai dan laut yang dekat dengan lokasi. Hal ini tidak menjadi masalah untuk ketersediaan air dari wilayah tersebut. Terakhir, kekurangan dari daerah ini terletak di Upah Minimum Rakyat yang merupakan UMR tertinggi diantara ketiga daerah yang berpotensi untuk didirikannya pabrik.

Lokasi pabrik *Vanillin* direncanakan dibangun di Kota Tangerang. Pemilihan lokasi pabrik didasarkan atas pertimbangan ketersediaan bahan baku, lokasi pemasaran, sumber energy listrik dan air, sumber tenaga kerja, aksesabilitas dan fasilitas transportasi, serta hukum dan peraturan. Pabrik *Vanillin* ini memiliki kapasitas produksi sebesar 6.880 ton /tahun dengan mempertimbangkan kebutuhan *vanillin* di Indonesia.

Pada umumnya konversi *lignin* untuk menjadi *vanillin* berkisar 10-40%. Berdasarkan konversi tersebut penentuan kapasitas menggunakan produksi *lignin* sebagai basis penentuan kapasitas dikarenakan kebutuhan *vanillin* tidak bisa disuplai semua menggunakan *lignin* sebagai bahan baku. Sehingga dalam pendirian pabrik *vanillin* didirikan pada tahun 2024 mengambil 20% dari kebutuhan didapat kapasitas



Gambar 2. Process Flow Diagram (PFD) Vanillin Sintetik dari Kraft Lignin.

bahan baku lignin sebesar 10000 ton dan menghasilkan vanillin sebesar 7000 ton (pembulatan).

### III. SELEKSI PROSES

#### A. Seleksi proses senyawa oksidasi

Pada oksidasi mula mula lignin akan diberi reagent dalam rangka membantu reaksi oksidasi. Terdapat dua reagent yang dapat digunakan yaitu NaOH dan Nitrobenzene.

#### 1) Reaksi NaOH-Oksidasi

Dalam reaksi oksidasi menggunakan NaOH, mula mula setiap 100 mg lignin ditambahkan senyawa 7 ml NaOH 2 M, udara dan air. Campuran tersebut dinaikkan tekanannya hingga 10 bar dalam reaktor dan dipanaskan hingga suhu 154 °C 5 [4].

#### 2) Reaksi Alkaline-Nitrobenzene

Dalam reaksi oksidasi menggunakan Alkaline-Nitrobenzene lignin ditambahkan senyawa campuran NaOH

Tabel 1.

Prediksi Kebutuhan *Vanillin* di Indonesia

Tahun	Kebutuhan
2018	-3067,77
2019	-6589,43
2020	-10171,46
2021	-13857,56
2022	-17692,69
2023	-21723,58
2024	-25999,39
2025	-30572,31
2026	-35498,25
2027	-40837,57

Tabel 2.

Perbandingan Lokasi Pendirian Pabrik *Vanillin*

Lokasi	Tangerang	Probolinggo	Riau
Jumlah Lignin (ton)	455.157,15	360.336	374.540,3
Jarak Lokasi dengan Bahan Baku (km)	44	101	50
Jarak Lokasi dengan Pelabuhan (km)	38	20	41
Ketersediaan Listrik (MW)	4.829	2.045	25
Sumber Air	teluk Jakarta	laut di tepi kecamatan	sungai Siak
Lahan (ha)	480	300	240
Upah Minimum Rakyat (Rp)	4.168.268	2.319.796	2.888.564

2 M *Nitrobenzene*. Reaktor dipanaskan hingga 110 °C dengan tekanan 9 bar, dijaga konstan dengan agitasi didalamnya selama 3 jam. *Yield vanillin* yang dihasilkan pada proses ini ialah 40% [4].

Tabel 3 menyajikan perbandingan reaksi oksidasi antara reaksi NaOH dengan *Alkaline-Nitrobenzene*.

Berdasarkan perbandingan yang diberikan, reaksi menggunakan *Alkaline-Nitrobenzene* lebih tepat digunakan karena *yield* yang lebih tinggi dan tekanan yang lebih rendah dibandingkan dengan reaksi oksidasi menggunakan NaOH. Sehingga reaksi oksidasi *Alkaline-Nitrobenzene* lebih tepat digunakan dalam memproduksi *vanillin*.

### B. Seleksi Proses Purifikasi

Usai terjadi reaksi oksidasi dalam pembentukan *vanillin* dari *lignin*, dilakukan proses purifikasi guna mendapatkan *vanillin* murni. Terdapat 3 proses yang dapat digunakan untuk proses purifikasi

#### 1) *Liquid-Liquid Extraction & Distillation (LLED)*

Dalam proses LLED mula mula dilarutkan dalam *solvent* dan dimasukkan ke dalam kolom ekstraksi. *Vanillin* yang telah dilarutkan bersama *solvent* dimasukkan ke dalam kolom distilasi pertama untuk mendapatkan *vanillin* murni, *vanillin* tersebut kemudian dikristalkan [3].

#### 2) *Liquid-Liquid Extraction (LLE)*

Pada proses LLE, menggunakan dua kolom ekstraksi dalam pemurnian *vanillin*. Mula-mula senyawa produk dari reaktor dilarutkan bersama *solvent* ke dalam kolom ekstraksi pertama. Produk dari kolom ekstraksi pertama dialirkan menuju kolom ekstraksi kedua menggunakan air untuk menghilangkan produk samping lain. Produk dari kolom ekstraksi kedua kemudian dikristalkan ke dalam *crystallizer* [3].

#### 3) *Vacuum-Distillation (VD)*

Dalam proses VD menggunakan distilasi dalam keadaan vakum. Produk yang didapat dari reaktor dialirkan ke dalam

Tabel 3.

Perbandingan Reaksi Oksidasi

Kriteria	NaOH	<i>Alkaline-Nitrobenzene</i>
<i>Yield (%)</i>	10	40
<i>Pressure (bar)</i>	9	10
<i>Temperatur (°C)</i>	154	110

Tabel 4.

Perbandingan Proses Purifikasi

Kriteria	LLED	LLE	VD
Konsumsi Energi (MJ/jam)	97,964	97,355	280,579
Emisi CO <sub>2</sub> dalam utilitas (Kg/jam)	134	155	143
<i>Vanillin</i> terbuang	4,2%	8%	5%

Tabel 5.

Komposisi Bahan Baku Utama

Komposisi	% (Massa)
<i>Lignin</i>	40
H <sub>2</sub> O	27
NaOH	25
<i>Methanol</i>	5
<i>Asam Asetat</i>	3

kolom distilasi. Distilat yang didapat dialirkan menuju *flash drum* untuk memisahkan air dengan *vanillin*. *Vanillin* yang didapat dikristalkan ke dalam *crystallizer* [3].

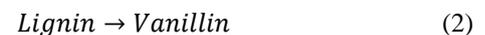
Berdasarkan perbandingan dalam Tabel 4 yang diberikan, purifikasi menggunakan proses LLED lebih tepat digunakan karena konsumsi energi yang cukup rendah, emisi gas CO<sub>2</sub> ke lingkungan yang rendah, dan persen *vanillin* yang terbuang paling sedikit dibandingkan dengan proses yang lain. Sehingga proses LLED lebih tepat digunakan untuk mendapatkan *vanillin* murni.

## IV. URAIAN PROSES

Gambar 2 merupakan ilustrasi dari *process flow diagram vanillin* sintetik dari *kraft lignin*. Proses diawali menggunakan bahan baku yang tertera pada Tabel 5 [5].

Pencampuran *lignin* dengan oksigen, NaOH, *nitrobenzene* serta air dengan perbandingan *lignin*, NaOH 0,1 M, dan *nitrobenzene*. Campuran tersebut dialirkan menggunakan pompa L-112, L-114, dan L-116 hingga bertekanan 10 bar menuju reaktor R-110. Oksidasi terjadi didalam *batch* reaktor selama 3 jam pada tekanan 10 bar dan suhu 110 °C sehingga menghasilkan *vanillin*, *azobenzene*, dan pengotor lainnya.

Pada proses oksidasi akan terjadi reaksi (2) pembentukan *vanillin*.



Produk dari reaktor oksidasi selanjutnya dikirim dan dialirkan menuju *pressure valve* (K-117) untuk menurunkan kembali tekanan menjadi 1 bar. Kemudian, aliran dialirkan menuju *Centrifuge* (H-118). Pada *Centrifuge* (H-118) terjadi pemisahan *kraft lignin* yang tidak bereaksi. Aliran keluaran terpecah menjadi dua. Aliran utama dilanjutkan menuju *heat exchanger*. Sedangkan aliran lainnya, *direcycle* menuju reaktor oksidasi (R-110) yang dipompa dengan pompa L-118 untuk memperoleh tekanan sebesar 10 bar. Pompa yang digunakan adalah *rotary pump* yang dapat memompa *slurry* *kraft lignin*. Dengan adanya *recycle* maka dapat digunakan untuk memaksimalkan bahan baku yang digunakan. Aliran utama yang dialirkan menuju *heat exchanger* (E-121), didinginkan suhunya menjadi 40°C dengan tekanan tetap 1

bar. Larutan yang sudah didinginkan, kemudian dialirkan menuju reaktor netralisasi (R-120). Dalam reaktor netralisasi(R-120) dilakukan proses untuk menetralkan pH menggunakan larutan HCl yang dipompa oleh L-123 dengan reaksi (3).



Usai dinetralkan aliran dilewatkan menuju *membrane reverse osmosis* (H-125) untuk menghilangkan garam terbentuk. Tujuannya mengurangi kadar garam yang semula 12% menjadi <1%.

Setelah dilakukan pemisahan pada H-125, larutan produk dikirim menuju kolom ekstraksi (H-210) untuk diekstraksi menggunakan *etil asetat* sebagai *solvent* dengan temperatur dan tekanan 30 °C dan 1 bar. Pada kolom ekstraksi ini digunakan 2,5 tray untuk memurnikan *vanillin* dengan kelarutan *vanillin* dalam *etil asetat* adalah 0,3 kg/kg. Dalam kolom ekstraksi ini diperoleh dua aliran produk, yaitu aliran ekstrak dan aliran *raffinate*. Dalam aliran ekstrak yang didapat, mengandung beberapa komponen yaitu *vanillin*, *asam vanillat* serta *etil asetat*. Setelah itu, aliran ekstrak yang keluar dari kolom ekstraksi (H-210) dialirkan menuju *heat exchanger* (E-215) untuk didapatkan suhu sebesar 90 °C. Kemudian, aliran ini dikirim menuju kolom *distilasi* (D-220) pada tekanan 1 bar dan temperature 90 °C. Sedangkan *raffinate* yang terbentuk dari kolom ekstraksi yang dominan mengandung *etil asetat*, dikirim menuju tanki penyimpanan dengan temperatur dan tekanannya adalah 30 °C dan 1 bar.

Kemudian, pada kolom distilasi (D-220), terjadi proses distilasi dengan digunakan 16 *plate* untuk memurnikan kembali *vanillin* yang telah didapatkan dari alat sebelumnya. Pada kolom distilasi ini, dihasilkan dua aliran produk, yaitu aliran *bottom* dan aliran *distillat*. Pada aliran *bottom*, dialirkan *vanillin* dengan kondisi operasi temperature 265 °C dan tekanannya sebesar 1 bar. Kemudian, untuk aliran *distillat*, didapatkan produk yaitu *etil asetat* dengan kondisi operasi, yaitu temperatur sebesar 106 °C dan tekanan 1 bar. Sebelum *etil asetat* dialirkan menuju tanki penyimpanan, aliran dilewatkan melalui dua *heat exchanger* (E-221 dan E-224) untuk mengubah temperatur menjadi 89 °C dan kemudian menjadi 30 °C. *Vanillin* murni yang didapat pada kolom distilasi dialirkan menuju *heat exchanger* (E-226) untuk diturunkan suhunya hingga suhu 40 °C pada tekanan 1 bar.

Kemudian, *vanillin* dialirkan menuju *crystallizer* (X-310) dengan ditambahkan air untuk dapat menghasilkan kristal *vanillin*. Jenis *crystallizer* yang digunakan adalah *circulating-liquid evaporator-crystallizer* yang mana dalam rangkaian alat ini, terdapat *heat exchanger* (E-312) yang digunakan untuk menaikkan temperatur menjadi 80 °C. Pada tahap ini, dilakukan proses kristalisasi untuk mendapatkan *vanillin* kristal dengan kadar 99.5%. Terdapat dua aliran produk yang dihasilkan, yaitu kristal *vanillin* dan udara. Aliran udara dibuang ke lingkungan.

Sedangkan aliran kristal *vanillin* dilanjutkan ke *screw conveyor* (J-313). Kemudian setelah melewati *screw conveyor* (J-313), aliran dilewatkan melalui *heat exchanger* (E-314) untuk menurunkan temperatur menjadi 40 °C. Kemudian kristal *vanillin* yang didapat diseragamkan ukurannya dengan menggunakan *roll mill* (C-321) dengan dialirkan dengan *screw conveyor* (J-315). Setelah itu, kristal *vanillin* yang sudah diseragamkan, diayak dengan *screener*

(H-323) dengan ukuran *mesh* 200 yang sebelumnya dialirkan menggunakan *belt conveyor*(J-322). Sedangkan untuk kristal *vanillin* yang ukurannya belum sesuai, akan dikembalikan ke *cyclone* (H-324) dengan bantuan blower(G-325) dan dipecah kembali menggunakan *roll mill*.

Pada kristal *vanillin* yang ukurannya sudah sesuai akan dicuci menggunakan *spray water* (X-320) dengan dilewatkan menggunakan *belt conveyor* (J-326) yang mengubah temperaturnya menjadi 30 °C. Kemudian, kristal *vanillin* dikeringkan menuju *air dryer* (E-330) dengan di alirkan udara dari *blower* (G-335) yang udaranya dipanaskan terlebih dahulu dengan *heat exchanger* (E-331) untuk menaikkan temperatur menjadi 120 °C. Setelah dikeringkan, kristal *vanillin* selanjutnya dialirkan menuju tanki penyimpanan kristal *vanillin* (F-333).

## V. NERACA MASSA DAN ENERGI

Untuk memproduksi *vanillin* sebanyak 6.880 ton/tahun dibutuhkan *lignin* sebanyak 10.000 ton/tahun, HCl 12.144 ton/tahun, *etil asetat* ton/tahun dan *nitrobenzene* 11.631 ton/tahun. Selama proses produksi dibutuhkan *steam* sebanyak 5.005 ton/tahun dan air pendingin sebanyak 102.808 ton/tahun.

## VI. ANALISIS EKONOMI

Berdasarkan analisis ekonomi untuk memproduksi *vanillin* dengan kapasitas 6.880 ton/tahun, diperlukan biaya produksi sebesar Rp 496.310.436.175 dengan investasi (*Total Cost Investment*) sebesar Rp Rp227.438.748.050 dan akan dihasilkan keuntungan rata-rata pertahunnya sebesar Rp131.193.280.317 dengan harga penjualan *vanillin* sebesar Rp 91.000/kg. Dari keuntungan yang diperoleh dapat dihitung laju pengembalian modal (IRR) pabrik sebesar 21,48 % pada tingkat suku bunga per tahun 10 %, waktu balik modal 4,46 tahun dan nilai *Break Even Point* (BEP) sebesar 22,21%.

## VII. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan didapat kesimpulan sebagai berikut: (1) Produksi *vanillin* dapat dilakukan sebanyak 6.880 ton/tahun dengan kebutuhan *lignin* 10.000 ton/tahun. (2) Pabrik didirikan di Kota Tangerang. (3) Proses utama produksi terdiri dari: reaksi oksidasi, reaksi netralisasi, *liquid-liquid extraction*, distilasi, kristalisasi, dan pengeringan. (4) Dari keuntungan yang diperoleh dapat dihitung laju pengembalian modal (IRR) pabrik sebesar 21,48 % pada tingkat suku bunga per tahun 10 %, waktu balik modal 4,46 tahun dan nilai *Break Even Point* (BEP) sebesar 22,21%.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] FAO, "Reduction of Post Harvest Losses for Food Security (DRK/10/005/01/99)," Korea, 2014.
- [2] S. Khoyratty, H. Kodja, and R. Verpoorte, "Vanilla flavor production methods: A review," *Ind. Crops Prod.*, vol. 125, pp. 433–442, 2018.
- [3] N. Wongtanyawat *et al.*, "Comparison of different kraft lignin-based vanillin production processes," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 117, pp. 159–170, 2018.
- [4] N. Khwanjaisakun, S. Amornraksa, L. Simasatitkul, P. Charoensuppanimit, and S. Assabumrungrat, "Techno-economic analysis of vanillin production from Kraft lignin: Feasibility study of

- lignin valorization,” *Bioresour. Technol.*, vol. 299, p. 122559, 2020.
- [5] E. D. Gomes and A. E. Rodrigues, “Recovery of vanillin from kraft lignin depolymerization with water as desorption eluent,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 239, p. 116551, 2020.