BAB I

PEMBAHASAN UMUM

1.1 Pendahuluan

Industri merupakan salah satu sektor pembangunan yang berperan penting dalam mempercepat pertumbuhan ekonomi suatu negara. Saat ini, Indonesia tengah berupaya untuk tumbuh dan berkembang dengan mengurangi ketergantungan terhadap negara lain. Oleh karena itu, berbagai sektor terus ditingkatkan melalui pemanfaatan sumber daya yang tersedia secara optimal.

Salah satu sektor yang diharapkan menjadi tulang punggung perekonomian bangsa adalah sektor industri. Peran sektor ini sangat strategis dalam mendukung pembangunan ekonomi, menciptakan lapangan kerja, serta meningkatkan daya saing nasional di tingkat global.

Pertumbuhan industri kimia di Indonesia saat ini masih tergolong tertinggal dibandingkan dengan negara-negara berkembang lainnya dikarenakan terbatasnya akses pengolahan serta kurangnya pemanfaatan bahan baku yang tersedia di dalam negeri. Padahal industri kimia dijadikan salah satu fokus pemerintah dalam mengembangkan industri strategis untuk menopang aktivitas ekspor, sehingga meningkatkan pendapatan perkapita negara.

Salah satu industri kimia yang perlu dikembangkan saat ini adalah industri asam levulinat. Asam levulinat merupakan komoditas bahan kimia yang cukup potensial untuk diproduksi di Indonesia. Hal ini dikarenakan Indonesia masih mengimpor bahan baku dari luar negeri. Di Indonesia, asam levulinat memiliki peran penting dalam berbagai sektor industri, dalam industri farmasi contohnya.

Asam levulinat digunakan sebagai prekursor dalam sintesis obat-obatan seperti antibiotik dan obat penenang. Kemudian pada industri kosmetik, asam levulinat digunakan sebagai humektan dalam produk kosmetik dan pelarut untuk bahan aktif kosmetik. Selain itu, asam levulinat juga digunakan sebagai zat aditif pada biodiesel, bahan baku polimer, *plasticizer*, dan pengganti bioetanol dalam campuran bensin. Permintaan asam levulinat yang terus meningkat di berbagai sektor industri menyebabkan Indonesia masih harus mengandalkan impor untuk memenuhinya.

Perkembangan industri asam levulinat masih tergolong rendah akibat mahalnya bahan baku sintesis dan rendahnya hasil (*yield*) produk yang dihasilkan. Untuk mengatasi masalah ini, bahan organik (biomassa) mulai digunakan sebagai pengganti bahan baku sintesis dalam pembuatan asam levulinat. Bumi memiliki pasokan biomassa yang melimpah, yaitu sekitar 1.800 miliar ton biomassa di darat dan 4 miliar ton di laut. Total energi dari biomassa yang tersedia di daratan mencapai 33.000 EJ, atau lebih dari 80 kali konsumsi energi dunia selama satu tahun (The Japan Institute of Energy, 2008).

Sebagian besar biomassa digunakan untuk kebutuhan pangan makhluk hidup. Oleh karena itu, penting untuk mengidentifikasi jumlah dan jenis biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Biomassa lignoselulosa merupakan salah satu bahan baku yang berpotensi menggantikan sumber bahan baku fosil. Pasokan biomassa lignoselulosa mencapai $1{,}2–1{,}7 \times 10^{11}$ ton per tahun, yang sebagian besar berasal dari tanaman.

Salah satu sumber biomassa lignoselulosa yang melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal di Indonesia adalah Tandan Kosong Kelapa Sawit

(TKKS). Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Dalam industri kelapa sawit, setiap 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) menghasilkan limbah TKKS sebanyak 22–23%. Saat ini, TKKS hanya dianggap sebagai limbah. Padahal, TKKS mengandung senyawa selulosa (45,95%) dan hemiselulosa (22,84%) yang dapat dikonversi menjadi asam levulinat.

Melihat pentingnya asam levulinat dan melimpahnya ketersediaan TKKS di Indonesia, pembangunan pabrik asam levulinat di Indonesia perlu dipertimbangkan. Saat ini, kebutuhan asam levulinat dalam negeri masih dipenuhi melalui impor. Dengan mendirikan pabrik asam levulinat, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan pada impor, meningkatkan devisa negara dan meningkatkan perekonomian dan kesejahteraan masyarakat. Langkah ini diharapkan tidak hanya memberikan dampak positif bagi perekonomian nasional, tetapi juga mendukung keberlanjutan industri berbasis biomassa di Indonesia.

1.2 Sejarah dan Perkembangan

Asam levulinat pertama kali ditemukan pada abad ke-19 melalui penelitian tentang dekomposisi karbohidrat. Senyawa ini dihasilkan dari pemecahan bahan organik, terutama selulosa dan hemiselulosa, melalui proses hidrasi dengan bantuan katalis asam. Penelitian awal menunjukkan bahwa asam levulinat memiliki potensi besar sebagai senyawa kimia serbaguna (*platform chemical*), karena dapat diubah menjadi berbagai produk bernilai tinggi.

Pada pertengahan abad ke-20, minat terhadap asam levulinat meningkat seiring dengan perkembangan teknologi kimia. Peneliti mulai mempelajari kemampuannya sebagai prekursor untuk bahan bakar, pelarut, dan aditif dalam

berbagai aplikasi industri. Namun, pada masa itu, pengembangan asam levulinat terbatas karena biaya produksi yang tinggi dan ketersediaan bahan baku yang terbatas.

Seiring dengan perkembangan industri, asam levulinat mengalami kemajuan pesat berkat dorongan global untuk mencari alternatif bahan bakar fosil dan bahan kimia ramah lingkungan. Dengan melimpahnya biomassa lignoselulosa, seperti limbah pertanian dan residu tanaman, sebagai bahan baku, asam levulinat kini dapat diproduksi lebih efisien dan ekonomis.

Dengan meningkatnya kebutuhan global akan bahan kimia berkelanjutan dan energi terbarukan, pasar asam levulinat terus berkembang. Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku utama menjadikan asam levulinat sebagai solusi yang menjanjikan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendukung keberlanjutan lingkungan. Di Indonesia, sumber biomassa seperti tandan kosong kelapa sawit memberikan peluang besar untuk pengembangan industri asam levulinat di masa depan.

1.3 Macam-Macam Proses Pembuatan

Produksi asam levulinat secara komersial pertama kali dilakukan di Amerika Serikat oleh AE Staley pada tahun 1940 menggunakan autoklaf (Qi Fang, dkk, 2002). Secara tradisional, asam levulinat diproduksi melalui konversi karbohidrat atau gula heksosa menggunakan katalis asam mineral, seperti HCl atau H_2SO_4 (Muhammad Chalid, 1971).

Langkah signifikan berikutnya dalam pengembangan asam levulinat terjadi dengan konversi limbah dan biomassa lignoselulosa secara komersial. Pabrik

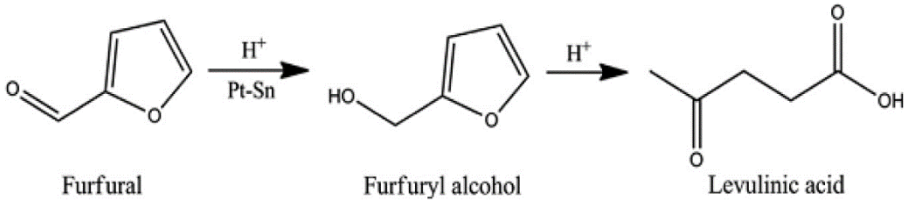
pertama yang mengadopsi teknologi ini didirikan di Caserta, Italia, menggunakan proses *biofine* berbasis bahan baku terbarukan (Steve Ritter, 2006).

Sejak itu, berbagai teknologi telah dikembangkan untuk memproduksi asam levulinat dari biomassa lignoselulosa (LCB). Namun, setiap teknologi memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pemilihan teknologi yang digunakan sangat bergantung pada hasil yang diinginkan, kemudahan dalam proses pemulihan produk, serta kemampuan untuk meminimalkan produksi air limbah.

Bagian ini akan membahas teknologi-teknologi yang saat ini tersedia untuk produksi asam levulinat, termasuk keuntungan dan keterbatasan masing-masing proses.

1.3.1 Proses *Biofine*

Proses *biofine* adalah salah satu teknologi yang paling terkenal untuk memproduksi asam levulinat dari lignoselulosa. Proses ini terdiri dari dua tahap yang dikatalisis oleh asam. Pada tahap pertama, gula heksosa dikonversi menjadi hidroksimetilfurfural (HMF) menggunakan katalis asam mineral (1-4%) pada suhu 200-230°C dan tekanan sekitar 20-25 bar selama beberapa detik. Pada tahap kedua, HMF dipindahkan ke reaktor, di mana proses selanjutnya adalah hidrolisis berlebih menjadi asam levulinat pada suhu 190-220°C dengan tekanan 10-15 bar selama 15-30 menit.



Gambar 1.1 Reduksi furfural menjadi asam levulinat

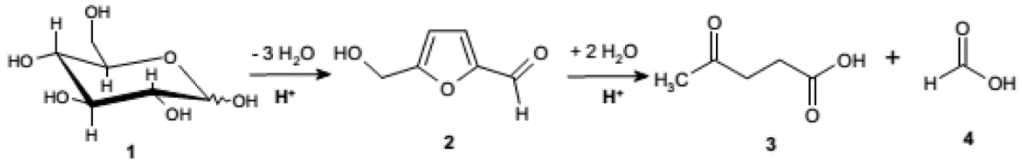
Asam format juga diproduksi secara bersamaan dalam proses ini, sementara asam levulinat yang dihasilkan mencapai sekitar 70-80%, yang merupakan persentase tertinggi yang dilaporkan dalam literatur dibandingkan dengan proses kimia lainnya. Proses *biofine* adalah satu-satunya teknologi yang digunakan untuk produksi asam levulinat secara semi-komersial. Namun, kelemahan utama dari proses ini terletak pada inefisiensi dalam pemisahan dan pemulihan asam levulinat dari larutan encer. Selain itu, humins (senyawa organik yang tidak larut dalam air pada semua pH) dapat terbentuk dan menyebabkan penyumbatan pada sistem perpipaan dan reaktor. Meskipun residu yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk pemanasan dan pembangkit listrik, proses ini memerlukan langkah detoksifikasi/netralisasi dan pembersihan yang ekstensif sebelum pembakaran. Selain itu, pemulihan katalis asam mineral merupakan proses yang rumit dan mahal. Kebutuhan energi dan air untuk proses *biofine* juga sangat tinggi dibandingkan dengan proses lainnya.

1.3.2 Proses Berbasis Katalis Asam Homogen

Metode konvensional untuk konversi kimia biomassa lignoselulosa (LCB), seperti gula, selulosa dan pati. Asam levulinat biasanya menggunakan katalis asam karena aktivitas katalitiknya yang tinggi. Oleh karena itu, sebagian besar penelitian di bidang produksi asam levulinat menggunakan katalis asam. Katalis asam mineral yang umum digunakan meliputi HCl, HNO_3, H_2SO_4, H_3PO_4 dan lain-lain, karena biayanya yang rendah, ketersediaannya yang mudah, serta kemampuannya menghasilkan hidroksimetilfurfural (HMF) dengan kadar tinggi, yang dapat meningkatkan produksi asam levulinat (Laura Kupiainen, dkk, 2010). Efektivitas

katalis asam ini tergantung pada konsentrasi asam yang digunakan, kekuatan konstanta disosiasi utama, serta bahan baku yang digunakan.

Namun, metode ini juga dapat menghasilkan produk sampingan yang tidak diinginkan, yang dapat mempengaruhi hasil akhir asam levulinat. Derajat variabilitas hasil asam levulinat dipengaruhi oleh desain reaktor, kondisi operasi yang bervariasi, serta metode *pre-treatment* yang digunakan. Faktor-faktor ini memainkan peran penting dalam mentransfer hasil dari skala laboratorium ke skala industri, yang secara eksplisit menjelaskan tantangan dalam komersialisasi produksi asam levulinat dari LCB. Proses ini memerlukan optimasi berbagai parameter, seperti konsentrasi asam, kondisi operasi, konsentrasi pelarut dan waktu reaksi. Hal ini penting untuk menghindari reaksi sampingan yang tidak diinginkan, karena kondisi yang terlalu ekstrem dapat menyebabkan penurunan efisiensi. Selain itu, pengoptimalan kondisi ini akan bervariasi tergantung pada bahan baku yang digunakan, dan variabilitas komposisi bahan baku akan mempengaruhi suhu reaksi serta waktu yang dibutuhkan.



Gambar 1.2 Mekanisme reaksi dekomposisi glukosa menjadi asam levulinat menggunakan katalis asam H_2SO_4. Glukosa (1), HMF (2), Asam Levulinat (3), Asam Format (4)

1.3.3 Proses Berbasis Katalis Asam Heterogen

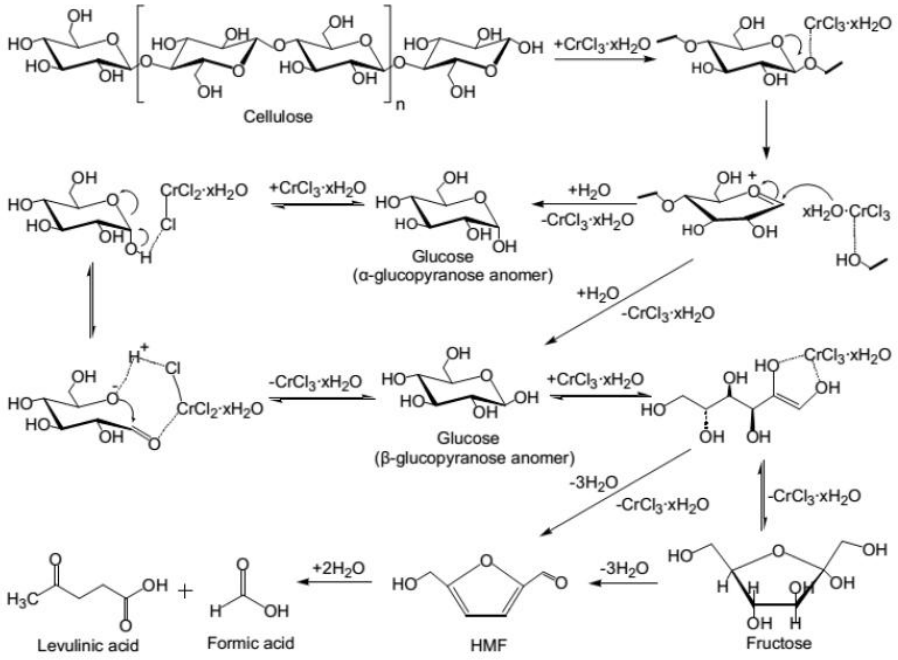
Katalis heterogen melibatkan penggunaan katalis asam padat dan katalis logam. Kedua jenis katalis ini menjadi alternatif menarik untuk produksi asam levulinat, terutama karena sifatnya yang dapat digunakan kembali dan didaur ulang. Katalis heterogen memiliki keunggulan berupa selektivitas tinggi dan tidak

menimbulkan masalah korosi. Namun, penelitian tentang katalis heterogen masih terbatas dibandingkan dengan katalis homogen.

Salah satu kendala utama adalah adanya adsorpsi kuat dari asam levulinat pada permukaan katalis, yang mengurangi hasil produksi asam levulinat. Reaksi yang terjadi pada permukaan katalis padat, termasuk di dalam pori-porinya, seringkali memengaruhi efisiensi proses. Beberapa katalis padat yang umum digunakan meliputi $S_2O_8^{2-}/ZrO_2$-SiO_2-Sm_2O_3, Amberlite IR-120, LZY-zeolit, Nafion SAC-13, dan grafena oksida (Michikazu Hara, 2010). Produksi asam levulinat dengan katalis asam padat umumnya dilakukan melalui pembentukan HMF menggunakan selulosa, glukosa, fruktosa, atau sukrosa sebagai bahan baku (Nazlina Ya'aini, dkk, 2013).

Katalis logam memiliki keunggulan dibandingkan katalis asam dalam hal aktivitas katalitik. Penelitian oleh Li dkk (2009) menunjukkan bahwa kromium klorida ($CrCl_3$) lebih efektif untuk konversi glukosa menjadi HMF, yang kemudian dikonversi menjadi asam levulinat. Penggunaan katalis logam seperti $FeSO_4$, $Fe_2(SO_4)_3$, $Al_2(SO_4)_3$, dan *lanthanum chloride* telah dipelajari secara luas dan dilaporkan dalam literatur (Lincai Peng, dkk, 2010).

Klorida logam transisi, seperti $CrCl_3$, terbukti lebih unggul dibandingkan klorida logam alkali atau logam tanah jarang, dengan hasil asam levulinat mencapai 67% mol dalam beberapa kasus. Namun, hasil produksi asam levulinat dengan katalis logam relatif lebih rendah dibandingkan katalis asam, karena konversi HMF lebih tinggi daripada asam levulinat. Selain itu, toksisitas logam berat menjadi salah satu kendala utama yang membatasi aplikasi katalis logam dalam produksi asam levulinat.



Gambar 1.3 Mekanisme reaksi konversi selulosa menjadi asam levulinat menggunakan katalis logam $CrCl_3$

1.3.4 Ekstraksi Pelarut

Hidroksimetilfurfural (HMF) mudah mengalami rehidrasi dalam media air, sehingga penting untuk menghilangkan HMF secara bersamaan dari campuran reaksi. Hal ini membawa kebutuhan untuk menggunakan metode ekstraksi pelarut. Sistem pelarut dua fase, di mana fase organik bercampur dengan fase cair, memiliki koefisien partisi yang signifikan lebih tinggi untuk HMF dibandingkan air, seperti yang dijelaskan oleh Ana I. Torres, dkk (2010).

Salah satu pelarut yang menjanjikan adalah *gamma-valerolactone* (GVL), sebuah sumber daya cair terbarukan dan berkelanjutan untuk energi. GVL digunakan dalam konversi biomassa lignoselulosa (LCB) menjadi asam levulinat. Penggunaan pelarut seperti GVL menghilangkan kebutuhan untuk metode *pre-treatment* karena memungkinkan konversi selulosa dan hemiselulosa langsung

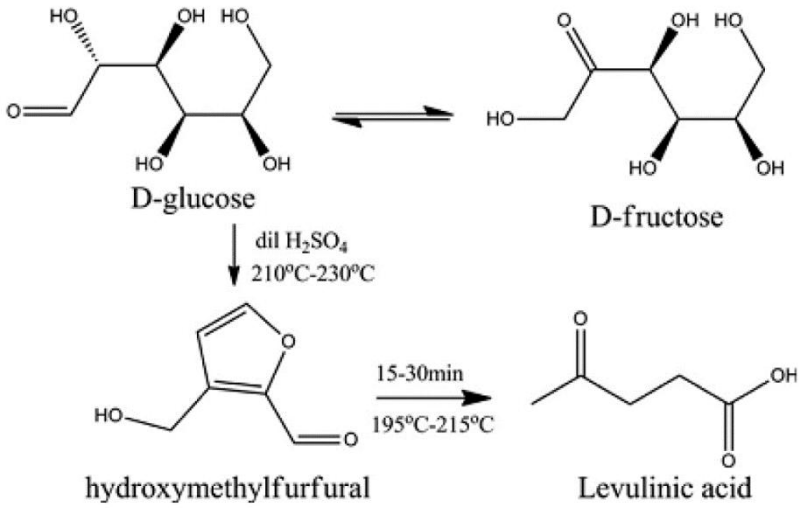
menjadi asam levulinat dalam reaktor yang sama. Proses ini tidak memerlukan pemisahan gula heksosa dan pentosa.

Dalam reaksi ini, selulosa diubah menjadi asam levulinat melalui HMF, sedangkan hemiselulosa dikonversi menjadi asam levulinat melalui furfural. Furfural sendiri diubah menjadi furfuril alkohol, yang selanjutnya menghasilkan asam levulinat melalui derivatif hidroksi ketika direaksikan dalam etil metil keton dengan adanya katalis HCl. Proses ini dapat mencapai hasil 90-93% asam levulinat, sebagaimana dilaporkan oleh Timokhin Boris V (1999).

Sistem dua fase untuk produksi asam levulinat juga telah dilaporkan oleh Wettstein dkk (2012), yang menggunakan campuran *γ-valerolactone* dan larutan HCl (0,1-1,25 M) dengan beberapa zat terlarut seperti gula atau garam. Reaksi dilakukan pada suhu 154°C dan menunjukkan hasil yang menguntungkan karena mayoritas asam levulinat diekstraksi oleh pelarut GVL dengan hasil mencapai 70%.

Pelarut ekstraksi lainnya, seperti diklorometana, butanol sekunder, dan metil isobutil keton, juga digunakan secara individual atau dalam kombinasi (Tan Z, 2014). Namun, biaya penggunaan pelarut ini tergolong tinggi karena kebutuhan volume yang besar dan biaya pemulihan yang signifikan.

Untuk mengurangi biaya dan beban energi, pelarut dengan koefisien partisi tinggi antara fase harus digunakan. Hal ini dapat mengurangi volume pelarut yang dibutuhkan dan meningkatkan efisiensi proses. Dengan demikian, pencarian pelarut baru atau pengembangan pelarut yang lebih hemat biaya dan lebih cocok untuk skala industri tetap menjadi tantangan utama dalam optimasi produksi asam levulinat (Juben N. Chheda, 2007).



G**ambar 1.4** Mekanisme reaksi konversi selulosa menjadi asam levulinat menggunakan katalis logam $CrCl_3$

1.3.5 Proses *Solvolisis*

Proses *solvolisis* merupakan metode yang memanfaatkan reagen organik spesifik, dengan atau tanpa katalis, di mana pelarut berperan dalam mengubah sifat campuran reaksi untuk meningkatkan selektivitas reaksi. Dibandingkan dengan proses hidrolisis, pelarut pada *solvolisis* dapat berfungsi penting dalam transportasi hidrogen. Selain itu, pelarut juga memungkinkan reaksi terjadi pada suhu yang lebih rendah atau mempercepat reaksi sehingga waktu yang diperlukan menjadi lebih singkat. Hal ini disebabkan oleh konstanta dielektrik pelarut yang tinggi.

Dalam proses *solvolisis*, hidroksimetilfurfural (HMF) terbentuk terlebih dahulu, yang kemudian dikonversi menjadi asam levulinat. Proses ini tidak memerlukan tahap *pre-treatment* karena selulosa dan hemiselulosa dapat langsung dikonversi menjadi asam levulinat di dalam reaktor secara simultan, tanpa perlu pemisahan antara gula heksosa dan pentosa.

Selama reaksi, selulosa diubah menjadi asam levulinat melalui HMF, sementara hemiselulosa dikonversi menjadi asam levulinat melalui furfural dengan bantuan *gamma-valerolactone* (GVL). Furfural selanjutnya diubah menjadi furfuril alkohol, yang kemudian menghasilkan asam levulinat melalui derivatif hidroksi saat dididihkan dalam etil metil keton dengan adanya katalis HCl.

1.4 Sifat Fisika

1.4.1 Bahan Baku

1.4.1.1 Tandan Kosong Kelapa Sawit

Spesifikasi kandungan bahan baku tandan kosong kelapa sawit disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 1.1 Kandungan Tandan Kosong Kelapa Sawit

Kandungan	Kandungan (%)
Selulosa	37,6
Hemiselulosa	23,9
Lignin	38,5

(Sumber: Athanasia *et al*, 2018)

Tabel 1.2 Spesifikasi Kandungan Fisik Tandan Kosong Kelapa Sawit

Parameter	Bagian Pangkal	Bagian Ujung
Panjang Serat		
a. Minimum, mm	a. 0,63	a. 0,63
b. Maksimum, mm	b. 0,81	b. 0,81
c. Rata-rata (L), mm	c. 0,2	c. 0,2
Diameter serat (D), μm	15,01	14,34
Tebal, μm	3,49	3,68
Kelangsingan (L/D)	79,95	53,00
Kelemasan	0,54	0,49
Kadar serat	72,67	67,42
Kadar bukan serat %	27,33	37,53
Rapat massa tumpukan serpih (campuran) (kg/m^3)	177,98	

(Sumber: Darnoko *et al*, 1995; Erwiansyah *et al*, 2012)

Tabel 1.3 Analisis Ultimat dan Proksimat Tandan Kosong Kelapa Sawit

Ultimate analysis	**(wt%)**
Carbon	43,52
Hydrogen	5,72
Nitrogen	1,20
Sulfur	0,66
Oxygen (diff)	48,90
Stoichiometric air/fuel ratio (kg/kg)	4,84
Proximate Analysis	**(wt.%)**
Moisture	7,8
Volatiles	79,34
Ash	4,5
Fixed Carbon	8,36
HHV, MJ/kg (dry basis)	15,22

(Sumber: Gaol, 2018)

1.4.1.2 Lignin

Tabel 1.4 Spesifikasi Lignin

Parameter	**Spesifikasi**
Rumus molekul	$C_9H_{10}O_3$
Berat molekul	166 g/mol
Bentuk	Cairan
Densitas	0,9308 g/ml
Viskositas	1,4565 Ns/m^2
Kadar air	3,07%
Titik didih normal	232℃

(Sumber: Suhartati *et al*, 2016)

1.4.1.3 NaOH

Tabel 1.5 Spesifikasi Bahan Pendukung Natrium Hidroksida

Parameter	**Spesifikasi**
Rumus molekul	NaOH
Berat molekul	40 g/mol
Bentuk	Cairan
Titik didih normal	140℃
Titik leleh	12℃
Spesific gravity	1,53
Warna	Tidak berwarna

Kemurnian	55%
Kelarutan	Larut dalam air

(Sumber: Yaws, 1999)

1.4.1.4 H_2O

Tabel 1.6 Spesifikasi Bahan Pendukung H_2O

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	H_2O
Berat molekul	18,015 g/mol
Bentuk	Cairan
Warna	Jernih
Titik didih normal	100℃
Titik beku	0℃
Densitas	0,998 g/ml
Viskositas	8,949 mP (pada 1 atm)
Tekanan uap	0,0212 atm
Panas Penguapan	22,6105 kJ/mol
Panas pembentukan	6,013 kJ/mol

(Sumber: Kirk, 1968)

1.4.1.5 *Methyl Isobutyl Ketone* (MIBK)

Tabel 1.7 Spesifikasi Bahan Pendukung *Methyl Isobutyl Ketone*

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	$C_6H_{12}O$
Berat molekul	100,161 g/mol
Bentuk	Cairan
Titik didih normal	116-118 ℃
Titik lebur	-84 ℃
Densitas	0,802 g/cm^3
Viskositas	0,59 cp
Tekanan kritis	34,7 bar
Panas spesifik	0,230 kJ/mol

(Sumber: Kirk and Othmer, 1991)

1.4.2 Katalis

1.4.2.1 Asam Sulfat

Tabel 1.8 Spesifikasi Asam Sulfat

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	H_2SO_4
Bentuk	Cairan
Warna	Tak Berwarna
Titik leleh	10,31 ^oC
Titik didih	337 ^oC
Densitas	1,84 g/cm^3
Viskositas	26,7 cp

(Sumber: Admi *et al*, 2020)

1.4.3 Produk Utama

1.4.3.1 Asam Levulinat

Asam levulinat sebagai produk akhir dalam rancangan pabrik digunakan sebagai bahan baku industri kimia. Asam levulinat dapat digunakan sebagai pelarut dalam berbagai proses kimia, karena sifatnya yang dapat melarutkan banyak senyawa organik., serta asam levulinat dapat digunakan dalam pembuatan resin sintetis dan plastik.

Tabel 1.9 Spesifikasi Produk Utama Asam Levulinat

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	$C_5H_8O_3$
Berat molekul	116,11 g/mol
Bentuk	Cairan
Titik didih normal	245,5℃
Densitas	1,1447 g/cm^3
Titik leleh	33℃
Warna	Tak berwarna

(Sumber: Perry, 1997)

1.4.4 Produk Samping

1.4.4.1 Asam Format

Asam format dengan rumus kimia CH_2O_2 memiliki berbagai kegunaan dalam industri dan pertanian. Dalam industri kimia, asam format digunakan untuk pembuatan ester formiat yang berfungsi sebagai pelarut serta bahan baku untuk sintesis asam asetat. Di bidang pertanian, asam format berperan sebagai pengawet pakan ternak dan disinfektan untuk fasilitas peternakan karena sifat antimikrobanya. Selain itu, dalam industri tekstil, asam format digunakan dalam proses pewarnaan dan pengolahan kulit. Asam ini juga digunakan dalam pembuatan pestisida, herbisida, serta sebagai bahan baku dalam produksi obat-obatan. Karena kemampuannya dalam menghambat pertumbuhan mikroorganisme, asam format juga digunakan sebagai pengawet makanan dan minuman, serta dalam pengendalian hama kesehatan.

Tabel 1.10 Spesifikasi Produk Samping Asam Format

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	CH_2O_2
Berat molekul	46,03 g/mol
Bentuk	Cairan
Viskositas	1,607 mPas
Titik didih	100,8℃
Titik leleh	8,3℃
Densitas	1,22 g/cm^3

(Sumber: *National Center for Biotechnology Information*, 2021)

1.4.4.2 Hidroksimetilfurfural

HMF (Hidroksimetilfurfural) adalah senyawa organik yang memiliki rumus kimia $C_6H_6O_3$. HMF terbentuk melalui dehidrasi gula, terutama dari glukosa atau

fruktosa, dan sering kali dianggap sebagai senyawa perantara dalam proses konversi biomassa menjadi bahan kimia dan bahan bakar terbarukan.

Tabel 1.11 Spesifikasi Produk Samping Hidroksimetilfurfural

Parameter	Spesifikasi
Rumus molekul	$C_6H_6O_3$
Berat molekul	126,111 g/mol
Bentuk	Cairan
Densitas	1,29 g/cm^3
Titik didih	291,5℃
Titik lebur	31,5℃
Viskositas	10 mPas

(Sumber: Kirk and Othmer, 1991)