

# BAB I

## PEMBAHASAN UMUM

### 1.1 Pendahuluan

Industri kimia memiliki peran utama dalam mendukung pertumbuhan ekonomi nasional melalui penyediaan bahan baku dan produk *intermediate* yang dibutuhkan oleh berbagai sektor, seperti pertanian, farmasi, energi, serta industri manufaktur lainnya. Seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya pengembangan industri berbasis sumber daya terbarukan dan ramah lingkungan, pemanfaatan limbah industri sebagai bahan baku alternatif mulai mendapatkan perhatian serius secara global. Pemanfaatan limbah industri tidak hanya berkontribusi dalam mengurangi dampak lingkungan, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru melalui konversi limbah menjadi produk yang bernilai tambah.

Salah satu limbah industri yang memiliki potensi besar untuk diolah menjadi produk bernilai ekonomis adalah *Lignin Pulp Mill*, yaitu limbah lignin hasil samping dari proses Industri *Pulp and Paper*. Menurut paten yang diajukan oleh Satelewal *et al* (2024) dengan nomor AU 202311 B2, *lignin pulp mill* kaya akan lignoselulosa, tidak memiliki kegunaan lain, serta biasanya dibakar sebagai strategi pengelolaan limbah. Proses pembakaran ini juga menyebabkan hilangnya selulosa yang seharusnya bisa dimanfaatkan. Padahal, *lignin pulp mill* dapat diolah menjadi berbagai macam bahan kimia, sehingga memiliki potensi besar sebagai sumber bahan baku dalam dunia industri.

*Lignin pulp mill* dapat diperoleh dari limbah industri *pulp and paper*. Dimana berdasarkan pernyataan dari Argyropoulos *et al* (2023), jumlah limbah lignin yang dapat tersedia dan dimanfaatkan menjadi produk bernilai tinggi adalah sekitar 41,18% dari total produksi *pulp* per tahun dalam satuan ton. Salah satu industri *pulp and paper* di Indonesia yaitu PT. OKI *Pulp and Paper Mills* yang memiliki kapasitas produksi *pulp* sebesar 3 juta ton pada tahun 2022. Dimana jumlah dari *lignin pulp mill* sebagai limbah adalah sebanyak 1,24 juta ton. *Lignin Pulp Mill* tersebut dapat diambil sekitar 80% untuk digunakan sebagai bahan baku dan diolah menjadi produk bernilai

tinggi di berbagai industri kimia. Salah satunya, dapat digunakan sebagai bahan baku dalam produksi Asam Levulinat.

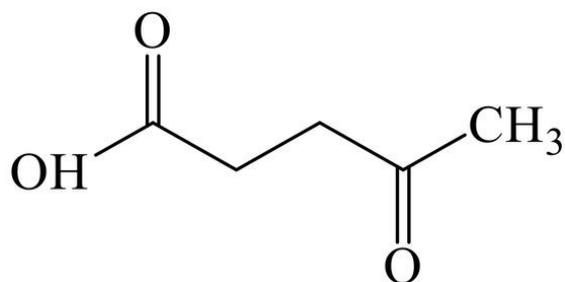
Sementara itu pabrik Asam Levulinat belum tersedia di Indonesia. Banyaknya impor asam levulinat di Indonesia sebagian besar berasal dari tiga negara utama, yaitu China sebagai penyumbang terbesar mencapai sekitar 5 ribu ton, diikuti India dan Spanyol masing-masing sebesar 576 ton dan 175 ton. Ketergantungan ini menunjukkan bahwa adanya kebutuhan mendesak untuk mengembangkan industri asam levulinat dalam negeri guna mengurangi impor, meningkatkan nilai tambah sumber daya lokal, serta memperkuat kemandirian industri kimia nasional. Untuk itu dilakukan pembangunan pabrik Asam Levulinat di Indonesia dengan Kapasitas 120.000 ton/tahun menggunakan *lignin pulp mill* sebagai sumber bahan baku utama.

## 1.2 Sejarah dan Perkembangan Proses Pembuatan Asam Levulinat

Asam levulinat adalah senyawa organik dengan rumus kimia  $\text{CH}_3\text{-C(O)-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CO}_2\text{-H}$ . Asam levulinat juga dikenal sebagai asam 4-oksopentanoat, merupakan padatan kristal putih yang larut dalam air dan pelarut organik polar. Asam levulinat diklasifikasikan oleh Departemen Energi Amerika Serikat sebagai salah satu penyusun hayati yang paling menjanjikan untuk sintesis bahan bakar dan bahan kimia. Menurut paten yang diajukan oleh Sattlewal *et al* (2024) dengan nomor AU 202311 B2, asam levulinat dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang, antara lain sebagai bahan penyusun resin polimer, *plasticizer*, bahan kimia khusus, herbisida, dan sebagai zat penyedap. Selain itu, juga digunakan sebagai pelarut, pengisi bahan bakar, prekursor untuk farmasi dan berbagai aditif lainnya.

Asam levulinat merupakan senyawa kimia bifungsional yang memiliki 2 gugus penting yaitu keton dan asam karboksilat, dimana struktur kimianya ditunjukkan pada Gambar 1.1. Keberadaan gugus ini menjadikan asam levulinat sebagai bahan dasar utama dalam sintesis berbagai senyawa kimia, seperti ester levulinat,  $\gamma$ -valerolakton, asam akrilat, 1,4-pentanediol, *angelica lakton*, 2-metiltetrahidrofuran, serta asam  $\delta$ -aminolevulinat (Pyo *et al*, 2020).

Berbagai proses telah dikembangkan untuk memproduksi asam levulinat dari kayu, selulosa, pati, atau glukosa.



**Gambar 1.1** Struktur Kimia Asam Levulinat

(Sumber : Meinita *et al*, 2021)

Asam levulinat pertama kali ditemukan pada tahun 1840-an oleh seorang profesor Belanda, GJ Mulder, yang juga dikenal sebagai penemu istilah protein. Mulder berhasil mensintesis asam levulinat dengan memanaskan fruktosa menggunakan HCl. Meskipun demikian, penggunaan komersial asam levulinat pada masa itu masih sangat terbatas. Asam levulinat mulai diproduksi secara komersial pada tahun 1940-an oleh perusahaan AE Staley, dan pada tahun 1956, diakui sebagai bahan kimia *platform* yang memiliki potensi besar dalam pengembangan produk berbasis selulosa (Meinita *et al*, 2021).

Menurut Arvai *et al* (2024), pada tahun 1975 Kitano mengusulkan asam levulinat sebagai “*new chemical raw material*”. Kemudian Thomas menegaskan bahwa asam levulinat memiliki peran penting sebagai bahan baku bernilai tinggi yang berasal dari selulosa. Selanjutnya pada tahun 2004 asam levulinat diakui sebagai bahan kimia *platform* utama. Peran penting asam levulinat dalam konsep *biorefinery* semakin diperkuat oleh meningkatnya jumlah publikasi ilmiah yang membahas *chemistry of levulinic acid*. Bahkan pada tahun 2022, rata-rata sebanyak 50 artikel ilmiah per bulan diterbitkan mengenai topik ini, berdasarkan data dari *Web of Science*.

Banyak industri penting seperti farmasi, makanan, polimer, resin, tekstil, pestisida, bahan bakar/energi, dan sintesis organik menggunakan asam levulinat sebagai bahan baku, serta tertarik untuk mengembangkan teknologi komersial baru dalam memproduksinya dari biomassa dan bahan limbah mentah. Hal ini menunjukkan bahwa asam levulinat merupakan bahan

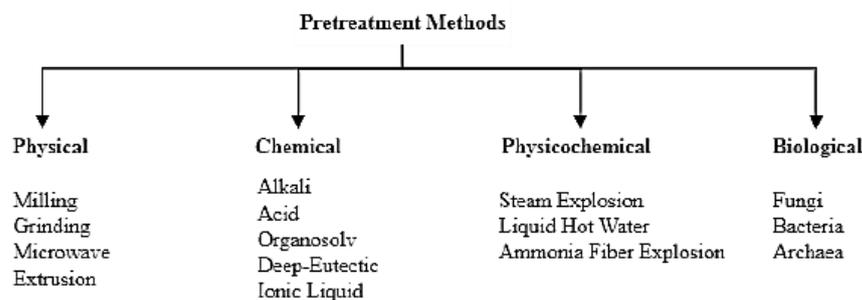
yang serbaguna untuk menghasilkan produk kimia dan turunannya. Asam levulinat dapat diproduksi secara ekonomis dan memiliki hasil yang tinggi menggunakan bahan baku terbarukan seperti limbah pertanian, lignoselulosa, gula, dan makroalga.

### 1.3 *Pre-treatment Lignin Pulp Mill* dan Proses Pembuatan Asam Levulinat

*Pre-treatment* pada *lignin pulp mill* bertujuan untuk membuka struktur lignoselulosa dengan cara menghilangkan lignin yang menghambat akses enzim atau katalis pada selulosa dan hemiselulosa. Setelah *pre-treatment*, proses pembuatan asam levulinat dapat dilakukan.

#### 1.3.1 Proses *Pre-treatment Lignin Pulp Mill*

Proses *pre-treatment* bertujuan untuk menghilangkan komponen hemiselulosa dan lignin dari struktur lignoselulosa, serta meningkatkan efisiensi pemecahan selulosa. Menurut Tanis *et al* (2023), metode *pre-treatment* terdiri atas *Physical*, *Chemical*, *Physicochemical*, dan *Biological* yang ditunjukkan pada Gambar 1.2 berikut. Adapun kelebihan dan kekurangan dari keempat metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.1.



**Gambar 1.2** Metode *Pre-treatment* Biomassa

(Sumber : Tanis *et al*, 2023)

#### 1.3.1.1 *Physical Pre-treatment*

*Physical Pre-treatment* umumnya digunakan untuk memperkecil ukuran partikel, meningkatkan kapasitas penyimpanan, mengurangi kadar air, serta menghomogenkan bahan baku. Proses ini menyebabkan perubahan pada luas permukaan spesifik, indeks kristalinitas, dan tingkat polimerisasi

biomassa. Metode *Physical Pre-treatment* mencakup berbagai proses seperti penggilingan (*milling*), *grinding*, *microwave*, dan *extrusion*.

Penggilingan biasanya dilakukan untuk memperkecil ukuran bahan baku hingga mencapai partikel berukuran antara 0,2 hingga 2 mm menggunakan mesin pemotong. Berbeda dengan proses penggilingan, *grinding* dilakukan hingga ukuran partikel menjadi sangat halus berupa bubuk dengan cara ditumbuk. *Microwave irradiation* merupakan proses *pre-treatment* yang melibatkan radiasi gelombang elektromagnetik untuk memecah struktur lignin secara efisien. *Extrusion* adalah proses mekanis yang menggunakan sekrup berputar dengan tekanan tinggi untuk menghaluskan material.

#### 1.3.1.2 *Chemical Pre-treatment*

*Chemical Pre-treatment* adalah proses *pre-treatment* biomassa dengan menggunakan bahan kimia untuk memecah struktur kompleks lignin, hemiselulosa, dan selulosa. *Chemical Pre-treatment* terdiri atas *Alkaline*, *Acid*, *Organosolv*, *Deep-eutectic*, dan *Ionic Liquid*. Reagen umum yang digunakan dalam *Alkaline Pre-treatment* adalah Natrium Hidroksida (NaOH), Natrium Karbonat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Kalium Hidroksida (KOH), dan Amonium Hidroksida (NH<sub>4</sub>OH). *Acid Pre-treatment* adalah metode yang dilakukan untuk menghilangkan fraksi lignin yang larut dalam asam seperti Asam Sulfat (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), Asam Klorida (HCl), Asam Fosfat (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), dan Asam Bromat (HBr).

*Organosolv* atau *Organic Solvent Pre-treatment* menggunakan pelarut organik seperti etanol, aseton, gliserol, gamma-valerolakton, dan etilen glikol untuk memfraksinasi lignoselulosa menjadi komponen selulosa, lignin, dan hemiselulosa dengan kemurnian tinggi. *Deep-eutectic Solvents* (DESs) adalah pelarut ramah lingkungan yang menggunakan campuran senyawa organik dan anorganik untuk membentuk ikatan hidrogen kuat, sehingga efektif dalam menguraikan lignoselulosa. Contoh pelarut yang umum digunakan adalah kombinasi antara *Choline Chloride* (ChCl) – *Oxalic Acid* (OA). *Ionic Liquid* adalah sejenis garam yang terdiri dari anion organik dan kation organik sebagai pelarut untuk menguraikan struktur lignoselulosa.

### 1.3.1.3 *Physicochemical Pre-treatment*

*Physicochemical* adalah metode *pre-treatment* biomassa yang menggabungkan proses fisik dan kimia untuk mengurai struktur lignoselulosa. Metode ini bertujuan untuk memecah ikatan lignin dengan bantuan panas, tekanan, dan bahan kimia tertentu. *Physicochemical pre-treatment* terdiri atas *Steam Explosion*, *Liquid Hot Water*, dan *Ammonia Fiber Explosion*. *Steam Explosion* menggunakan uap jenuh pada tekanan tinggi untuk mengubah struktur lignoselulosa. *Liquid Hot Water* menggunakan air panas pada suhu tinggi di bawah tekanan untuk menjaga air tetap dalam keadaan cair. *Ammonia Fiber Explosion* adalah metode perendaman biomassa dalam amonia cair pada suhu dan tekanan tinggi untuk menghilangkan lignin dan hemiselulosa.

### 1.3.1.4 *Biological Pre-treatment*

*Biological Pre-treatment* adalah metode yang menggunakan mikroorganisme untuk memodifikasi dan menguraikan struktur kompleks biomassa, terutama untuk mengurangi kadar lignin, serta meningkatkan aksesibilitas selulosa dan hemiselulosa. Metode ini bersifat ramah lingkungan dan hemat energi karena menggunakan aktivitas biologis alami dari mikroorganisme. 3 kelompok utama yang digunakan dalam *biological pre-treatment* adalah *Fungi*, *Bacteria*, dan *Archaea*. Secara keseluruhan metode ini menggunakan aktivitas enzimatik mikroorganisme untuk menguraikan lignin dan hemiselulosa secara bertahap, mengubah struktur fisik dan kimia biomassa sehingga meningkatkan ketersediaan selulosa untuk proses hidrolisis dan fermentasi.

**Tabel 1.1.** Perbandingan Metode *Pre-Treatment*

<b>Metode <i>Pre-treatment</i></b>	<b>Kelebihan</b>	<b>Kekurangan</b>
<i>Physical</i>	Meminimalkan hambatan struktural, mengurangi ukuran partikel dan kadar air, meningkatkan ketersediaan penyimpanan	Kurangnya kemampuan untuk menghilangkan lignin, kebutuhan energi tinggi, pemisahan komponen tidak memadai

<i>Chemical</i>	Kondisi operasi dilakukan pada suhu ruang, tingkat delignifikasi lebih tinggi, konversi polisakarida menjadi gula maksimal dan efisien	Mebutuhkan biaya yang lebih tinggi dan perlu penanganan tertentu untuk mengurangi dampak lingkungan karena menggunakan bahan kimia
<i>Physicochemical</i>	Meningkatkan akseibilitas struktur lignoselulosa, efisien dalam menghilangkan lignin, minim menghasilkan senyawa penghambat	Permintaan energi tinggi, biaya tinggi, menggunakan temperatur dan tekanan yang tinggi
<i>Biological</i>	Konsumsi energi lebih rendah, dapat mendegradasi lignin dan hemiselulosa	Efisiensi rendah dan tingkat hidrolisis rendah

(Sumber : Tanis et al, 2023)

### 1.3.2 Proses Pembuatan Asam Levulinat

Proses pembuatan asam levulinat dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu *Acid Hydrolysis*, *Enzymatic Hydrolysis*, *Heterogeneous Catalytic Dehydration*, dan *Microwave Heating*. Adapun kelebihan dan kekurangan dari keempat metode tersebut dapat dilihat pada Tabel 1.2.

#### 1.3.2.1 *Acid Hydrolysis*

*Acid Hydrolysis* melibatkan penggunaan katalis asam untuk mempercepat reaksi termokimia. Proses ini dilakukan dengan mengatur kondisi reaksi, di mana asam berperan sebagai katalis untuk meningkatkan hasil produk yang diinginkan (Meinita et al, 2021). Dalam pelaksanaannya, katalis asam dengan konsentrasi tertentu ditambahkan ke biomassa, kemudian campuran tersebut dipanaskan secara hidrotermal pada suhu dan waktu yang telah ditentukan. Setiap jenis biomassa memerlukan kondisi hidrolisis yang berbeda-beda agar hasilnya optimal, tergantung pada komposisi dan karakteristik biomassa tersebut.

Menurut Aliko et al (2020), katalis asam yang umum digunakan dalam pembuatan asam levulinat yaitu HCl dan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Kemudian Yan et al (2023), menyatakan bahwa katalis asam mineral dapat dikombinasikan dengan katalis asam lewis (AlCl<sub>3</sub>, CuCl<sub>2</sub>, CrCl<sub>3</sub>, dan FeCl<sub>3</sub>), yang dapat mempercepat proses

isomerisasi glukosa menjadi fruktosa dan lebih efisien karena memiliki energi aktivasi yang relatif lebih rendah. Menurut paten yang diajukan oleh Satelewal *et al* (2024) dengan nomor AU 202311 B2, kombinasi tersebut dapat meningkatkan *yield* dan kemurnian dari asam levulinat.

#### 1.3.2.2 *Enzymatic Hydrolysis*

Hidrolisis enzimatis menggunakan enzim untuk mempercepat reaksi, yang umumnya lebih efisien dan lebih sederhana dibandingkan dengan hidrolisis asam (Meinita *et al*, 2021). Efisiensi hidrolisis enzimatis pada selulosa dapat ditingkatkan dengan memanaskan bahan baku menggunakan uap air pada suhu tinggi untuk menguraikan hemiselulosa menjadi pentosa. Proses ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti suhu, durasi reaksi, tingkat pencampuran, konsentrasi katalis, dan kadar suspensi pati, meskipun biayanya cenderung lebih tinggi dibandingkan hidrolisis asam.

#### 1.3.2.3 *Heterogeneous Catalytic Dehydration*

Asam levulinat dapat diperoleh dengan melakukan dehidrasi katalitik heterogen terhadap gula heksosa, fruktosa, dan glukosa menggunakan resin penukar kation (mengandung gugus sulfonat yang tersedia dalam bentuk ion  $H^+$ ) sebagai katalis dalam sistem berair. Adapun media berair dipilih dari berbagai jenis garam seperti NaCl, KCl,  $CaCl_2$ ,  $Na_2CO_3$ , dan  $Na_2SO_4$  (Pyo *et al*, 2020). Jenis garam yang digunakan dapat mempengaruhi laju konversi gula dan *yield* Asam Levulinat. Oleh karena itu, pemilihan garam yang tepat menjadi salah satu faktor penting dalam mengoptimalkan efisiensi dan selektivitas proses konversi biomassa menjadi produk kimia bernilai tinggi seperti asam levulinat.

#### 1.3.2.4 *Microwave Heating*

*Microwave Heating* telah menjadi teknik pemanasan yang efisien untuk mengatasi kekurangan pemanasan secara konvensional, seperti waktu pemanasan yang lama, penggunaan suhu tinggi, dan transfer energi yang tidak memadai ke reaksi. Dalam pemanasan konvensional panas ditransfer secara konduksi dari permukaan alat ke reaktan, yang seringkali menyebabkan gradien suhu, sehingga kontrol kinetika reaksi menjadi kurang efisien. Menurut Aliko *et al* (2020), iradiasi gelombang mikro yang dikombinasikan

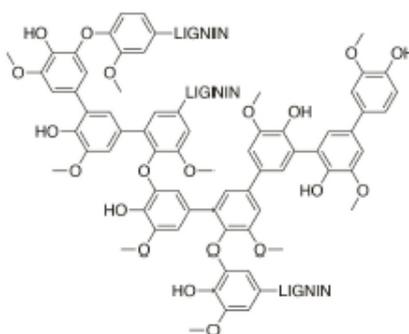
dengan asam sulfat telah terbukti mengurangi waktu reaksi dari 8 jam menjadi 30 menit dengan hasil *yield* asam levulinat yang tinggi.

**Tabel 1.2.** Perbandingan Proses Pembuatan Asam Levulinat

Metode	Kelebihan	Kekurangan
<i>Acid Hydrolysis</i>	Efisiensi konversi tinggi, metode konvensional yang sudah banyak dikaji dan dioptimasi, dapat digunakan untuk berbagai jenis biomassa	Menghasilkan banyak produk samping (fulfural, HMF, humin), korosif terhadap peralatan, limbah cair bersifat asam dan berbahaya bagi lingkungan
<i>Enzymatic Hydrolysis</i>	Biaya energi lebih rendah dan ramah lingkungan	Waktu reaksi lama, harga enzim mahal dan stabilitas enzim terbatas, butuh tahap lanjut untuk menghasilkan asam levulinat
<i>Heterogeneous Catalytic Dehydration</i>	Mengurangi korosivitas, katalis dapat dipisahkan dan digunakan kembali	Aktivitas dan stabilitas katalis heterogen belum setinggi asam homogen, harga katalis lebih tinggi
<i>Microwave Heating</i>	Mempercepat laju reaksi, mengurangi waktu proses dibandingkan pemanasan konvensional, dapat meningkatkan <i>yield</i> asam levulinat	Skala industri masih terbatas, perlu peralatan khusus sehingga menambah biaya

## 1.4 Data-data Sifat Fisik dan Kimia Bahan

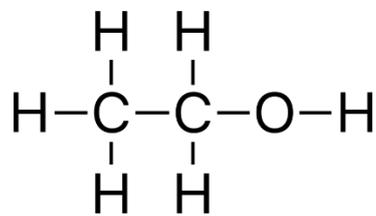
### 1.4.1 Lignin Pulp Mill



Komposisi	25% Selulosa, 5% Hemiselulosa, 39% Lignin, 31% Ash
Keadaan fisik	Slurry
Kategori	Limbah pabrik <i>pulp and paper</i>
Kelarutan	Dapat larut dalam etanol, asam asetat, asetaldehida, asam format pada suhu 160°C
Densitas <i>slurry</i>	1.224 kg/m <sup>3</sup> pada suhu 30°C
Fraksi massa	39% cairan dan 61% padatan

(Sumber : Patent AU202311B2)

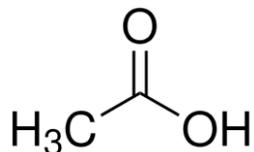
#### 1.4.2 Etanol



Nama lain	<i>Ethyl Alcohol</i>
Rumus molekul	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O
Berat molekul	46,07 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair, bening
Warna	Tidak berwarna
Bau	Seperti alkohol
Titik lebur	-114°C
Titik didih	78°C
Viskositas	1,2 mPa.s pada 20°C
Kelarutan dalam air	Larut sepenuhnya
Tekanan uap	59,5 hPa pada 20°C
Densitas	0,79 g/cm <sup>3</sup> pada 20°C

(Sumber : Merck, 2023)

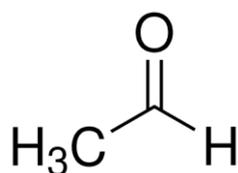
## 1.4.3 Asam Asetat



Nama lain	<i>Glacial Acetic Acid</i>
Rumus molekul	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>
Berat molekul	60,05 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair
Warna	Tidak berwarna
Bau	Sensasi pedih atau menyengat
Titik lebur	16,2°C
Titik didih	117-118°C
Viskositas	1,05 mPa.s pada 25°C
Reaktifitas	Campuran uapnya dengan udara bersifat mudah-meledak jika terkena sumber api
Tekanan uap	20,79 hPa pada 25°C
Densitas	1,049 g/cm <sup>3</sup> pada 25°C

(Sumber : Merck, 2025)

## 1.4.4 Asetaldehida

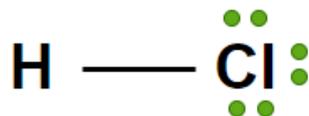


Nama lain	<i>Ethanal</i>
Rumus molekul	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O
Berat molekul	44,05 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair, bening
Warna	Tidak berwarna
Bau	Sensasi pedih atau menyengat
Impuritis	0,5% asam asetat

Titik lebur	-125°C
Titik didih	21°C
Viskositas	0,24 mPa.s pada 20°C
Kelarutan dalam air	Larut sepenuhnya
Tekanan uap	1,202 hPa pada 25°C
Densitas	0,785 g/cm <sup>3</sup> pada 25°C

(Sumber : Merck, 2025)

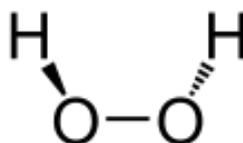
#### 1.4.5 Asam Klorida



Nama lain	Klorana
Rumus molekul	HCl
Berat molekul	36,46 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair
Bau	Menyengat
Konsentrasi	32%
Impuritis	0,00005% Cl <sup>-</sup>
Titik lebur	-43°C pada 3,130 hPa
Titik didih	110°C pada 1,013 hPa dan 84°C pada 3,130 hPa
Kelarutan dalam air	Larut pada 20°C
Densitas	1,16 g/cm <sup>3</sup> pada 20°C
Sifat toksisitas	Dapat mengiritasi kulit yang mengakibatkan luka bakar

(Sumber : Merck, 2023)

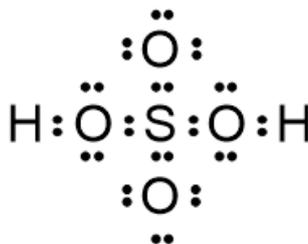
#### 1.4.6 Hidrogen Peroksida



Nama lain	<i>Hydrogen peroxide solution</i>
Rumus molekul	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Berat molekul	34,01 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair, bening
Warna	Tidak berwarna
Konsentrasi	30%
Impuritis	0,00005% Cl <sup>-</sup>
Titik lebur	-52°C
Titik didih	108°C
Kelarutan dalam air	Larut pada 20°C
Densitas	1,110 g/cm <sup>3</sup>
Sifat toksisitas	Jika terkena kulit dapat mengakibatkan luka bakar yang parah

(Sumber : Merck, 2025)

#### 1.4.7 Asam Sulfat

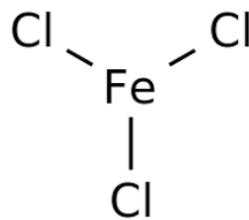


Nama lain	<i>Sulfuric Acid</i>
Rumus molekul	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Berat molekul	98,08 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair, bening
Warna	Tidak berwarna
Bau	Tidak berbau
Impuritis	0,1 ppm Cl <sup>-</sup>
Titik lebur	10,31°C
Titik didih	290°C
Viskositas	23 mPa.s pada 20°C

Kelarutan dalam air	Larut
Tekanan uap	1,33 hPa pada 145,8°C
Densitas	1,84 g/cm <sup>3</sup> pada 25°C
Sifat toksisitas	Sangat korosif dan merusak jaringan, jika terkena mata dapat menyebabkan kerusakan yang serius

(Sumber : Merck, 2025)

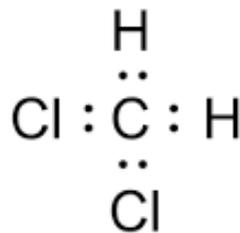
#### 1.4.8 Besi (III) Klorida



Nama lain	<i>Ferric Chloride Solution</i>
Rumus molekul	FeCl <sub>3</sub>
Berat molekul	162,2 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair
Warna	Coklat
Bau	Berbau asam
Impuritis	0,01% SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
Titik didih	230°C
Kelarutan dalam air	Larut pada 20°C
pH	0-1 pada 20°C
Sifat toksisitas	Jika tertelan dapat menyebabkan luka bakar parah pada mulut, muntah, dan diare

(Sumber : Merck, 2024)

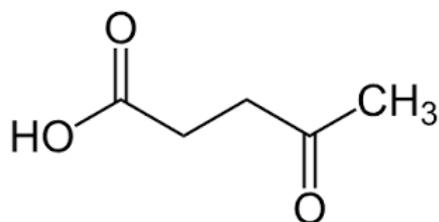
## 1.4.9 Diklorometana



Nama lain	<i>Methylene chloride</i>
Rumus molekul	CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
Berat molekul	84,93 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair
Warna	Tidak berwarna
Bau	Seperti eter
Titik lebur	-97°C
Titik didih	39,8-40°C
Viskositas	0,42 mPa.s pada 25°C
Tekanan uap	584 hPa pada 25°C
Densitas	1,325 g/mL pada 25°C

(Sumber : Merck, 2025)

## 1.4.10 Asam Levulinat

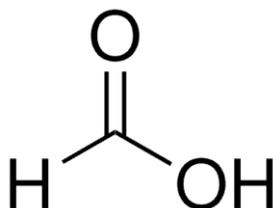


Nama lain	<i>4-Oxopentanoic acid</i>
Rumus molekul	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>
Berat molekul	116,11 kg/kmol
Keadaan fisik	Cairan bening kekuningan
Bau	Asam, manis seperti karamel
Titik lebur	33-35°C
Titik didih	245-246°C
Temperatur kritis	493°C

Tekanan kritis	53,1 bar
Kelarutan	Larut dalam pelarut organik
Densitas	1,447 g/mL pada 25°C
$\Delta H^{\circ}_f$	-678,64 kJ/kmol
Sifat toksisitas	Dapat menyebabkan iritasi pada kulit dalam konsentrasi 4%

(Sumber : Arvai et al, 2024)

#### 1.4.11 Asam Format



Nama lain	4-Oxopentanoic acid
Rumus molekul	CH <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Berat molekul	46,03 kg/kmol
Keadaan fisik	Cair
Warna	Tidak berwarna
Bau	Sensasi pedih atau menyengat
Impuritis	Asam asetat 1%
Titik lebur	8,5°C
Titik didih	100-101°C
Viskositas	1,8 mPa.s pada 20°C
Kelarutan dalam air	Larut pada 20°C
Tekanan uap	171 hPa pada 50°C
Densitas	1,22 g/mL pada 25°C
$\Delta H^{\circ}_f$	-678,64 kJ/kmol
Sifat toksisitas	Jika terkena kulit dapat mengakibatkan luka bakar yang parah

(Sumber : Merck, 2025)