

BAB I

PEMBAHASAN UMUM

1.1 Pendahuluan

Indonesia sebagai negara berkembang terus berupaya memperkuat perekonomian nasional melalui pembangunan industri yang berkelanjutan. Pembangunan industri menjadi salah satu pilar utama dalam mendorong pertumbuhan ekonomi, menciptakan lapangan kerja, serta meningkatkan daya saing di pasar global. Pola pembangunan linier yang berjalan saat ini, dengan tahapan ambil, produksi, dan buang, mendorong eksploitasi sumber daya alam secara berlebih serta menimbulkan masalah limbah dan polusi lingkungan. Karena itu, diperlukan perubahan menuju konsep ekonomi sirkular, yaitu sistem ekonomi yang berupaya menjaga nilai bahan dan produk agar tetap digunakan selama mungkin melalui efisiensi sumber daya, penggunaan kembali material, serta daur ulang, sehingga jumlah limbah dapat ditekan dan pembangunan berkelanjutan dapat tercapai (Masruroh et al., 2022).

Salah satu subsektor yang berperan penting dalam mendorong industrialisasi nasional adalah industri logam, khususnya aluminium. Aluminium merupakan material strategis yang memiliki sifat ringan, kuat, tahan korosi, serta konduktivitas listrik dan panas yang baik. Karakteristik ini menjadikan aluminium banyak digunakan dalam berbagai sektor, mulai dari konstruksi, transportasi, otomotif, kemasan, hingga industri kedirgantaraan. Dengan meningkatnya permintaan aluminium di dalam negeri maupun global, pengembangan kapasitas produksi aluminium nasional menjadi sangat penting untuk mengurangi ketergantungan impor serta memperkuat kemandirian industri logam dasar (Masruroh et al., 2022).

Indonesia sendiri memiliki cadangan bauksit yang cukup besar sebagai bahan baku utama pembuatan aluminium. Namun, sebagian besar bauksit tersebut masih diekspor dalam bentuk bahan mentah tanpa melalui proses hilirisasi yang memadai. Hal ini menyebabkan hilangnya potensi nilai tambah yang seharusnya dapat diperoleh melalui pengolahan lebih lanjut. Dengan mendirikan pabrik pengolahan dan pemurnian aluminium di dalam negeri, Indonesia tidak hanya

mampu mendukung kebijakan hilirisasi mineral, tetapi juga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular, yakni memaksimalkan nilai sumber daya serta meminimalkan dampak lingkungan (Masruroh et al., 2022).

Secara umum, terdapat beberapa metode dalam produksi aluminium. Proses konvensional terdiri atas dua tahapan utama, yaitu proses *Bayer* dan *Hall-Hérault*. Proses *Bayer* digunakan untuk mengubah bauksit menjadi alumina (Al_2O_3). Dalam proses ini, bauksit dicampur dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) pada suhu dan tekanan tinggi untuk melarutkan kandungan aluminium hidroksida. Setelah pengotor seperti besi oksida dan silika dipisahkan sebagai residu yang dikenal sebagai *red mud*, larutan aluminat didinginkan untuk memisahkan endapan aluminium hidroksida. Endapan ini kemudian dikalsinasi atau dipanaskan pada suhu tinggi untuk menghasilkan alumina murni. Alumina hasil proses *Bayer* kemudian digunakan dalam proses *Hall-Hérault*, yaitu proses elektrolisis untuk mereduksi alumina menjadi logam aluminium. Proses ini dilakukan dalam sel elektrolisis pada suhu tinggi dengan elektroda karbon. Arus listrik dialirkan sehingga terjadi reaksi reduksi aluminium di katoda dan oksidasi anoda menghasilkan gas CO_2 . Aluminium cair yang dihasilkan akan terkumpul di dasar sel dan diambil secara berkala untuk proses pencetakan (Reverdy & Potocnik, 2020).

Selain kedua proses tersebut, terdapat pula proses *Alcoa* yang dikembangkan sebagai alternatif dengan pendekatan kimiawi berbeda. Pada proses ini, alumina direaksikan dengan gas klorin (Cl_2) dan karbon monoksida (CO) untuk menghasilkan aluminium klorida (AlCl_3). Selanjutnya, aluminium klorida (AlCl_3) yang terbentuk dielektrolisis pada suhu tinggi. Dalam proses elektrolisis ini, ion aluminium (Al^{3+}) akan mengalami reduksi di katoda menjadi logam aluminium cair, sedangkan ion klorida (Cl^-) teroksidasi di anoda menghasilkan gas klorin (Cl_2). Keunggulan proses *Alcoa* dibandingkan proses *Hall-Hérault* adalah konsumsi energi listrik yang relatif lebih rendah karena reduksi tidak dilakukan dengan elektrolisis dalam skala besar, melainkan melalui jalur reaksi kimia yang lebih efisien. Dengan demikian, proses *Alcoa* berpotensi lebih ramah energi dan ekonomis apabila dikembangkan dengan dukungan teknologi yang memadai (Reverdy & Potocnik, 2020).

Di Indonesia, salah satu produsen utama aluminium adalah PT Indonesia Asahan Aluminium (PT Inalum), yang berdiri sejak tahun 1976. Perusahaan ini mengoperasikan pabrik peleburan aluminium di Kuala Tanjung, Sumatera Utara, dengan memanfaatkan energi listrik dari PLTA Asahan. Kapasitas produksi aluminium PT Inalum mencapai sekitar 250.000 ton per tahun. PT Inalum juga menjadi bagian dari holding industri pertambangan negara dan saat ini sedang mendorong pengembangan ekosistem industri aluminium nasional termasuk pembangunan *Smelter Grade Alumina Refinery* (SGAR) di Kalimantan Barat yang bekerja sama dengan PT Aneka Tambang Tbk (Antam) (Ruswana et al., 2020).

Melalui pengembangan industri aluminium yang terintegrasi dari hulu ke hilir, Indonesia diharapkan tidak hanya dapat memenuhi kebutuhan aluminium dalam negeri, tetapi juga berperan penting di pasar aluminium Asia dan dunia. Selain meningkatkan ekspor dan menyerap tenaga kerja, pembangunan pabrik aluminium juga akan mendorong masuknya teknologi baru dan meningkatkan kemampuan teknik dalam negeri di bidang logam dan proses industri. Keberadaan industri aluminium yang terintegrasi juga dapat memacu tumbuhnya industri-industri pendukung lainnya seperti industri pengecoran, pembuatan komponen, peralatan teknik, hingga industri daur ulang, sehingga memberikan dampak positif yang besar bagi ekonomi nasional (Shinta & Wikarya, 2024).

Pengembangan industri aluminium dalam negeri sejalan dengan upaya pemerintah untuk mempercepat perubahan ekonomi berbasis sumber daya dan inovasi. Dengan memanfaatkan cadangan bauksit nasional dan melakukan pengolahan di dalam negeri, Indonesia dapat mengurangi ketergantungan impor dan meningkatkan daya saing ekspor produk logam. Investasi pabrik aluminium juga akan mendorong penguatan pendidikan kejuruan dan penelitian terapan di bidang teknik material, sehingga terjadi kerja sama antara industri, pendidikan, dan riset. Perencanaan awal pabrik aluminium ini merupakan langkah penting untuk mewujudkan kemandirian industri logam nasional dan dapat menjadi dasar studi kelayakan yang lebih mendalam. Dengan pendekatan sistematis dan berkelanjutan, pembangunan pabrik aluminium akan memperkuat ketahanan industri nasional dan mendukung pembangunan ekonomi jangka panjang (Shinta & Wikarya, 2024).

1.2 Sejarah dan Perkembangan

Aluminium pertama kali berhasil diperoleh dalam bentuk murni pada awal abad ke-19 oleh ahli kimia Denmark, Hans Christian Ørsted pada tahun 1825 yang kemudian disempurnakan oleh Friedrich Wöhler pada tahun 1827. Namun, pada masa itu aluminium tergolong sebagai logam yang sangat langka dan mahal karena sulit dipisahkan dari senyawanya. Pada akhir abad ke-19, aluminium mulai dapat diproduksi secara ekonomis setelah ditemukannya proses elektrolisis *Hall-Héroult* secara independen dan hampir bersamaan oleh Charles Martin Hall di Amerika Serikat dan Paul Héroult di Prancis pada tahun 1886. Proses ini menggunakan elektrolisis alumina (Al_2O_3) yang dilarutkan dalam kriolit cair (Na_3AlF_6) pada suhu tinggi untuk mereduksi ion aluminium menjadi logam aluminium murni. Teknologi ini menjadi terobosan besar dalam industri logam karena secara drastis menurunkan biaya produksi aluminium, menjadikannya logam yang dapat diproduksi secara massal dan terjangkau (Reverdy & Potocnik, 2020).

Seiring perkembangan zaman proses produksi aluminium terus mengalami berbagai penyempurnaan baik dalam efisiensi energi, skala produksi, maupun pengendalian dampak lingkungannya. Salah satu teknologi pendukung yang sangat penting adalah proses *Bayer* yang ditemukan oleh Karl *Bayer* pada tahun 1888 yang memungkinkan ekstraksi alumina dari bauksit secara efisien. Dalam proses ini, bauksit direaksikan dengan larutan natrium hidroksida panas untuk melarutkan aluminium hidroksida, yang kemudian diendapkan dan dikalsinasi menjadi alumina murni. Proses *Bayer* menjadi tahap awal dalam rantai produksi aluminium, yang kemudian dilanjutkan dengan proses *Hall-Héroult* pada tahap peleburan. Kombinasi kedua proses ini masih digunakan hingga saat ini sebagai metode standar dalam produksi aluminium di seluruh dunia (Granata et al., 2021).

Di Indonesia, industri aluminium mulai berkembang sejak didirikannya PT Indonesia Asahan Aluminium (PT Inalum) pada tahun 1976, hasil kerja sama antara Pemerintah Indonesia dan Nippon Asahan Aluminium Co., Ltd. dari Jepang. Pabrik peleburan aluminium tersebut berlokasi di Kuala Tanjung, Sumatera Utara, dan mulai beroperasi secara penuh pada tahun 1982. PT Inalum menggunakan teknologi *Hall-Héroult* dan memperoleh pasokan listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di Sungai Asahan, yang menjadikannya salah satu smelter aluminium yang

efisien dari sisi energi. Keberadaan PLTA ini menjadi salah satu faktor kunci yang memungkinkan produksi aluminium secara berkelanjutan di Indonesia, mengingat proses elektrolisis membutuhkan energi listrik dalam jumlah besar (Shinta & Wikarya, 2024).

Dalam perkembangannya Indonesia mulai menunjukkan komitmen yang kuat terhadap pengembangan industri hilir berbasis bauksit dan aluminium, sejalan dengan kebijakan pemerintah dalam program hilirisasi mineral. Kawasan industri seperti Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Galang Batang di Bintan dan proyek pembangunan smelter grade alumina refinery (SGAR) di Mempawah, Kalimantan Barat, menjadi contoh konkret langkah strategis yang diambil untuk memperkuat rantai pasok industri aluminium nasional. Dengan penguatan infrastruktur dan investasi dalam sektor ini Indonesia tidak hanya bertujuan memenuhi kebutuhan domestik, tetapi juga menargetkan posisi sebagai salah satu pemain penting dalam pasar aluminium global (Shinta & Wikarya, 2024).

1.3 Macam-macam Proses Pembuatan Aluminium

Pembuatan aluminium dari bahan baku utama berupa bauksit melibatkan dua tahapan proses utama yang umum digunakan dalam industri modern, yaitu proses *Bayer* untuk mengubah bauksit menjadi alumina (Al_2O_3), dan proses *Hall-Héroult* untuk mereduksi alumina menjadi aluminium murni dalam bentuk cair. Kedua proses ini merupakan proses yang saling terintegrasi dan telah terbukti secara teknis dan ekonomis untuk produksi aluminium skala besar secara global.

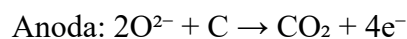
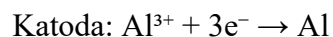
1.3.1 Proses *Bayer*

Proses *Bayer* merupakan proses kimia yang dikembangkan oleh Karl *Bayer* pada tahun 1888 dan hingga kini menjadi metode standar industri dalam produksi alumina dari bijih bauksit. Proses ini diawali dengan penghancuran bauksit menjadi partikel kecil agar memiliki luas permukaan yang lebih besar. Setelah itu, bauksit dicampur dengan larutan natrium hidroksida (NaOH) pekat dan dipanaskan dalam reaktor bertekanan tinggi pada suhu sekitar $140\text{--}240^\circ\text{C}$. Pada kondisi ini, komponen aluminium dalam bauksit yang berupa gipsit ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmit ($\text{AlO}(\text{OH})$), atau diaspor akan larut, membentuk larutan natrium aluminat (NaAlO_2) (Granata et al., 2021).

Pengotor seperti besi oksida (Fe_2O_3) dan silika (SiO_2) tidak larut dan akan terpisah sebagai limbah padat yang dikenal sebagai red mud atau lumpur merah. Lumpur merah ini kemudian dipisahkan melalui proses sedimentasi dan filtrasi. Larutan natrium aluminat yang telah jernih selanjutnya didinginkan dan diberikan benih aluminium hidroksida untuk mengendapkan kembali alumina sebagai endapan $\text{Al}(\text{OH})_3$. Endapan ini kemudian disaring, dicuci, dan dikalsinasi pada suhu tinggi (1000–1100 °C) untuk menghasilkan alumina anhidrat (Al_2O_3) murni yang siap digunakan dalam proses selanjutnya. Keuntungan dari proses *Bayer* adalah kemampuannya menghasilkan alumina dengan kemurnian tinggi dan dalam jumlah besar. Namun demikian, tantangan utama dari proses ini adalah pengelolaan limbah lumpur merah yang bersifat alkalis dan berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan benar (Granata et al., 2021).

1.3.2 Proses *Hall-Héroult*

Proses *Hall-Héroult* adalah proses elektrolisis lelehan alumina yang dikembangkan pada tahun 1886 dan merupakan teknologi utama dalam pembuatan aluminium murni hingga saat ini. Proses ini dilakukan dengan melarutkan alumina hasil proses *Bayer* ke dalam kriolit cair (Na_3AlF_6), yang berfungsi sebagai pelarut dan penurun titik lebur campuran dari 2000 °C menjadi sekitar 950 °C, sehingga memungkinkan proses elektrolisis dilakukan dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Proses berlangsung dalam sebuah sel elektrolisis (*pot cell*) yang dilapisi dengan karbon yang juga berfungsi sebagai katoda, sementara batang-batang karbon digantung sebagai anoda. Ketika arus listrik dialirkan, ion Al^{3+} dalam larutan kriolit akan tereduksi di katoda menjadi logam aluminium cair, sedangkan ion oksida (O^{2-}) akan teroksidasi di anoda karbon, membentuk gas karbon dioksida (CO_2) melalui reaksi berikut:



Aluminium cair yang terkumpul di dasar sel kemudian disedot atau disaring secara berkala dan dipindahkan ke unit pengecoran untuk dibentuk menjadi produk setengah jadi seperti ingot, billet, slab, atau produk-produk ekstrusi. Keuntungan utama dari proses ini adalah kemampuannya memproduksi aluminium dengan kemurnian tinggi dalam skala besar. Namun, selain konsumsi energi yang besar,

proses ini juga menimbulkan emisi gas rumah kaca, terutama CO₂, serta penggunaan elektroda karbon yang habis secara bertahap, yang harus diganti secara berkala (Reverdy & Potocnik, 2020).

1.3.3 Proses *Alcoa*

Proses *Alcoa* pada prinsipnya tetap memadukan tahap pemurnian bauksit dengan proses *Bayer* dan tahap reduksi elektrolitik berbasis *Hall–Hérault*, namun dalam beberapa aplikasi khusus perusahaan ini juga mengembangkan varian proses yang bekerja pada suhu lebih rendah, sekitar 700 °C, dibandingkan suhu konvensional ±950 °C. pembuatan aluminium yang memanfaatkan reaksi kimia antara alumina (Al₂O₃), karbon monoksida (CO), dan gas klorin (Cl₂) untuk menghasilkan aluminium triklorida (AlCl₃) sebagai produk antara. Pada tahap awal, alumina dari bauksit direaksikan dengan CO dan Cl₂ pada suhu sekitar 700–800 °C di dalam reaktor klorinasi. Karbon berperan sebagai reduktor yang memecah ikatan aluminium–oksigen, sementara klorin membentuk senyawa AlCl₃ yang bersifat mudah menguap. Gas AlCl₃ yang terbentuk kemudian dipisahkan dari campuran gas lain dengan proses pendinginan atau kondensasi, sehingga diperoleh AlCl₃ murni (Reverdy & Potocnik, 2020).

Tahap selanjutnya yaitu reaksi elektrolisis yaitu AlCl₃ murni kemudian dimasukkan ke dalam sel elektrolisis berbasis garam cair yang berfungsi sebagai medium konduktif. Dalam sel ini AlCl₃ diuraikan oleh arus listrik searah, ion Al³⁺ bergerak menuju katoda dan direduksi menjadi aluminium cair, sedangkan ion Cl⁻ bergerak menuju anoda dan dioksidasi membentuk gas klorin. Aluminium cair yang terbentuk mengendap di dasar sel dan secara periodik dikeluarkan untuk pemurnian atau pencetakan, sementara gas klorin yang dilepaskan di anoda ditangkap dan didaur ulang kembali ke tahap klorinasi (Reverdy & Potocnik, 2020).

1.4 Sifat Fisika dan Kimia Bahan Baku, Produk dan Limbah

1.4.1 Bahan Baku

1. Aluminium Oksida (Al₂O₃) (Perry, 1999)

Rumus molekul	: Al ₂ O ₃
Berat molekul	: 101,9612 g/mol
Wujud	: Padatan kristal

- | | | | |
|----|-----------------------------------|--|---------------|
| | Warna | : Putih | |
| | Titik lebur | : $\pm 2.072\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
| | Densitas | : $3,95\text{--}4,0\text{ g/cm}^3$ | |
| 2. | Klorin (Cl_2) | | (Perry, 1999) |
| | Rumus molekul | : Cl_2 | |
| | Berat molekul | : $70,9060\text{ g/mol}$ | |
| | Wujud | : Gas pada suhu ruang | |
| | Warna | : Kuning kehijauan | |
| | Titik didih | : $-34,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
| | Densitas gas | : $3,2\text{ g/L}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm) | |
| 3. | Karbon Monoksida (CO) | | (Perry, 1999) |
| | Rumus molekul | : CO | |
| | Berat molekul | : $28,0101\text{ g/mol}$ | |
| | Wujud | : Gas tak berwarna dan tak berbau | |
| | Titik didih | : $-191,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
| | Densitas gas | : $1,25\text{ g/L}$ ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 atm) | |
| 4. | Natrium Klorida (NaCl) | | (Perry, 1999) |
| | Rumus molekul | : NaCl | |
| | Berat molekul | : $58,44\text{ g/mol}$ | |
| | Wujud | : Padatan kristal kubik | |
| | Warna | : Putih (tak berwarna bila murni) | |
| | Titik lebur | : $\pm 801\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
| | Densitas | : $\pm 2,165\text{ g/cm}^3$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) | |
| 5. | Kalium Klorida (KCl) | | (Perry, 1999) |
| | Rumus molekul | : KCl | |
| | Berat molekul | : $74,55\text{ g/mol}$ | |
| | Wujud | : Padatan kristal kubik | |
| | Warna | : Putih (tak berwarna bila murni) | |
| | Titik lebur | : $\pm 770\text{ }^{\circ}\text{C}$ | |
| | Densitas | : $\pm 1,984\text{ g/cm}^3$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) | |

1.4.2 Produk Utama

Aluminium (Al)

(Perry, 1999)

Rumus molekul : Al

Berat atom : 26,9815 g/mol

Wujud : Logam padat

Warna : Perak mengkilap

Titik lebur : 660,3 °C

Titik didih : 2.470 °C

Densitas : 2,70 g/cm³