

4.2	Pengolahan Data % <i>Recovery</i> Sn.....	38
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		43
5.1	Analisis Hasil Karakterisasi Awal pada <i>Tin Anode Slime</i>	43
5.2	Analisis Perbandingan nilai % <i>Recovery</i> Sn terhadap Setiap Percobaan dengan Metode Taguchi	44
5.3	Analisis Pengaruh Parameter Uji terhadap Perolehan % <i>Recovery</i> Sn	46
5.4	Analisis % Kontribusi pada Tiap Parameter Terhadap % <i>Recovery</i> Sn	52
5.5	Analisis Mekanisme Pengendali Laju Reaksi dengan Menggunakan Model Kinetika SCM.....	54
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....		57
6.1	Kesimpulan	57
6.2	Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....		59
LAMPIRAN.....		62

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Perbandingan stock ton Sn pada slime per tahun (PT. Timah Tbk, 2025).....	1
Gambar 2.1 Struktur kristal SnO ₂ (Austin dkk, 2008)	10
Gambar 2.2 Komponen sel elektrolisis (Kusumah, 2017)	11
Gambar 2.3 <i>Tin anode slime</i> (Dokumentasi pribadi)	12
Gambar 2.4 Diagram <i>pourbaix</i> Sn (Rimaszeki dkk., 2012)	14
Gambar 2.5 Skema spektrometer XRF (Teknologi & Bakar Nuklir -Batan, 2012)	16
Gambar 2.6 Difusi lapisan film (Levenspiel, 1999)	17
Gambar 2.7 Difusi lapisan <i>ash</i> (Levenspiel, 1999)	18
Gambar 2.8 Reaksi kimia (Levenspiel, 1999)	18
Gambar 3.1 Kerangka metodologi penelitian.....	24
Gambar 3.2 Diagram tahapan penelitian	29
Gambar 3.3 Proses pengambilan sampel <i>tin anode slime</i> (Dokumentasi pribadi)	30
Gambar 3.4 Proses pengeringan <i>tin anode slime</i> menggunakan oven (Dokumentasi pribadi).....	31
Gambar 3.5 Proses penggerusan dengan menggunakan <i>disc mill</i> (Dokumentasi pribadi).....	31
Gambar 3.6 Proses <i>sieving</i> pada <i>tin anode slime</i> (Dokumentasi pribadi)	32
Gambar 3.7 Proses pelindian <i>tin anode slime</i> menggunakan HCl (Dokumentasi pribadi).....	33
Gambar 3.8 Proses titrasi iodometri (Dokumentasi pribadi).....	34
Gambar 5.1 Grafik perbandingan nilai <i>%recovery</i> Sn terhadap setiap percobaan	44
Gambar 5.2 Perbandingan nilai S/N rasio pada tiap level variasi uji	45
Gambar 5.3 Grafik <i>interval plot of %recovery Sn vs time</i>	47
Gambar 5.4 Grafik pengaruh waktu terhadap <i>recovery</i>	48
Gambar 5.5 Grafik <i>interval plot of % recovery Sn vs temperatur</i>	49

Gambar 5.6 Grafik pengaruh temperatur terhadap % <i>recovery</i> Sn	50
Gambar 5.7 Grafik <i>interval plot of % recovery</i> Sn vs rasio S/L.....	51
Gambar 5.8 Grafik pengaruh rasio S/L terhadap <i>recovery</i> Sn	52
Gambar 5.9 Perolehan % kontribusi pada tiap parameter terhadap % <i>recovery</i> Sn	54
Gambar 5.10 Plot dan lregrasi linear dari (Xb)	55
Gambar 5.11 Plot dan regresi linear dari $(1-3(1-Xb)^{2/3}+2(1-Xb))$	55
Gambar 5.12 Plot dan regresi linear dari $(1-(1-Xb)^{1/3})$	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Penelitian terdahulu.....	7
Tabel 2.2 Posisi peneliti	9
Tabel 2.3 Komposisi kimia <i>tin anode slime</i> (Chen dkk, 2019).....	12
Tabel 2.4 Kombinasi faktor dan level berdasarkan orthogonal array L9.....	20
Tabel 3.1 Alat penelitian	25
Tabel 3.2 Bahan penelitian	27
Tabel 3.3 Desain eksperimen pelindian.....	33
Tabel 3.4 Jadwal penelitian	35
Tabel 4.1 Hasil XRF pada sampel awal	37
Tabel 4.2 Data hasil % <i>recovery</i> Sn dari metode Taguchi	38
Tabel 4.3 Data hasil S/N <i>recovery</i> Sn	39
Tabel 4.4 Data ANOVA terhadap % <i>recovery</i> Sn.....	39
Tabel 4.5 Data <i>mean</i> % <i>recovery</i> terhadap waktu.....	40
Tabel 4.6 Data <i>mean</i> % <i>recovery</i> terhadap temperatur	40
Tabel 4.7 Data <i>mean</i> % <i>recovery</i> terhadap rasio S/L	40
Tabel 4.8 Nilai R^2 dari <i>External Mass Transfer Control</i> (Xb).....	40
Tabel 4.9 Nilai R^2 dari <i>Rate Diffusion</i> $(1-3(1-Xb)^{(2/3)}+2(1-Xb))$	41
Tabel 4.10 Nilai R^2 dari <i>Surface Chemical Control</i> $(1-(1-Xb)^{1/3})$	42
Tabel 5.1 Data <i>variable control</i> pada proses pelindian.....	46
Tabel 5.2 Data ANOVA pengaruh waktu terhadap % <i>recovery</i> Sn	47
Tabel 5.3 Data ANOVA pengaruh temperatur terhadap % <i>recovery</i> Sn	49
Tabel 5.4 Data ANOVA pengaruh rasio S/L terhadap % <i>recovery</i> Sn	51

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. Instruksi Kerja dan Hasil Pengujian	63
Lampiran B. MSDS	69
Lampiran C. Dokumentasi	73

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

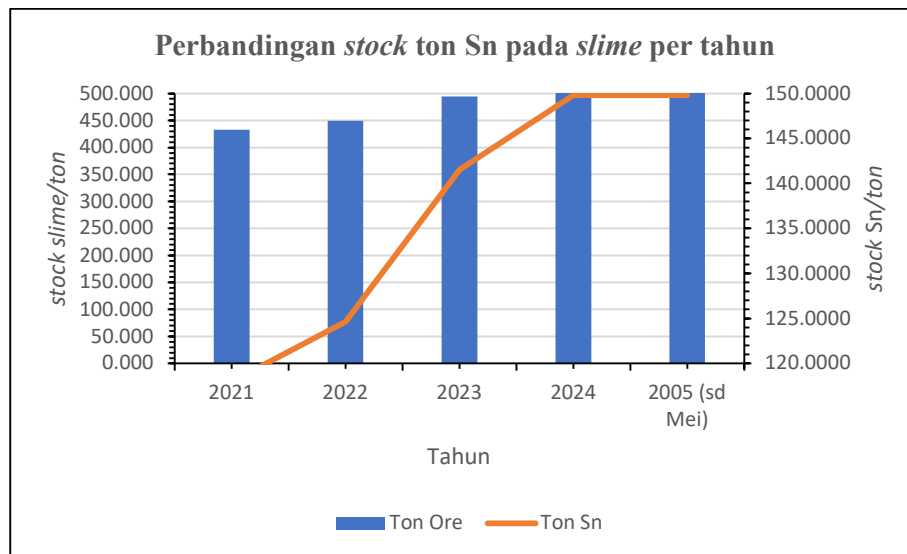
SINGKATAN		Halaman
BUMN	Badan Usaha Milik Negara	1
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral	1
S/L	<i>Solid – Liquid</i>	2
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>	2
XRF	<i>X-Ray Fluoresence</i>	3
SCM	<i>Shrinking Core Model</i>	3
SNR	<i>Signal to Noise Rasio</i>	21
PLS	<i>Pregnant Leach Solution</i>	32
DF	<i>Degree of Freedom</i>	39
Seq SS	<i>Sequintial Sum of Squares</i>	39
Adj SS	<i>Adjusted Sum of Squares</i>	39
Adj MS	<i>Adjusted Sum of Squares</i>	39
F-Value	<i>F-Statistik</i>	39
P-Value	Probabilitas Signifikansi	39
LAMBANG		
R	<i>Recovery</i>	15
K	Berat Konsentrat	15
k	Kadar dalam Konsentrat dalam %	15
F	Berat Umpan	15
f	Kadar dalam Umpan dalam %	15
X_B	Konversi B	18
t / T	Perbandingan waktu aktual dan waktu saat proses	19
R^2	Regresi Determinasi	20

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Timah Tbk adalah salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang melakukan pengelolaan terhadap komoditas timah di Indonesia. Berdasarkan data dari kementerian ESDM pada tahun 2020, Indonesia memiliki cadangan timah terbesar ke-2 di dunia dengan angka 17% dari total cadangan timah dunia sebesar 4.741.000 ton dan juga merupakan produsen timah terbesar ke-2 di dunia setelah China dengan angka produksi sebesar 22%. Oleh karena itu, Indonesia memiliki suatu peranan penting terhadap ketersediaan bijih timah di dunia. Keterdapatn bijih timah di Indonesia bisa dijumpai sangat banyak seperti daerah Bangka Belitung, Karimun dan Bengkinang (*Booklet-Timah-FA*, 2020)



Gambar 1.1 Perbandingan stock ton Sn pada slime per tahun (PT. Timah Tbk, 2025)

Bangka Belitung merupakan daerah pertambangan timah aluvial terbesar di Indonesia yang sebagian besar pengelolaannya dipegang oleh PT. Timah Tbk dalam proses pemurnian timah dengan salah satu metode pemurnian, yaitu *electrorefining*. Proses pemurnian ini menghasilkan produk samping berupa *tin anode slime* yang masih mengandung logam-logam berharga, salah satunya berupa logam timah sebesar 30% di dalamnya (Kusumah, 2017). Hingga saat ini, terjadi peningkatan

pada *tailing* yang dihasilkan dari proses pemurnian yang dilakukan, didukung oleh data perbandingan *stock slime* dari tahun ke tahun pada Gambar 1.1 di atas. Grafik tersebut menunjukkan *stock slime* mencapai angka 150.000 ton pada tahun 2025.

Keterdapatannya Sn yang masih cukup tinggi pada *tin anode slime* membuat perlu dilakukannya suatu penelitian untuk mengambil kembali logam timah yang terdapat di dalamnya melalui proses pelindian asam menggunakan beberapa asam. Metode ini merupakan suatu pendekatan yang efektif untuk mengekstraksi kembali Sn yang masih tersisa, dengan optimasi parameter-parameter pelindian untuk memperoleh *recovery* Sn yang maksimal. Penelitian ini menggunakan pelarut berupa asam klorida (HCl) sebagai media pelindian. HCl dipilih karena memiliki kemampuan melarutkan Sn yang lebih baik dibandingkan jenis asam lainnya, terutama dalam melarutkan senyawa oksida Sn yang terdapat pada *tin anode slime*. HCl juga dipilih dalam proses pelindian karena sifatnya yang stabil serta kemampuannya dalam mempertahankan konsentrasi selama proses pemurnian (Kurnia dkk, 2014). Menurut Habashi (1999), HCl merupakan salah satu pelarut yang paling efektif dalam proses pelindian logam dasar karena sifatnya yang merupakan asam kuat, ketersediaannya yang melimpah, serta biayanya yang relatif rendah dibandingkan asam lain seperti H_2SO_4 atau HNO_3 . Penggunaan HCl memungkinkan pembentukan larutan Sn^{2+} yang lebih stabil, sehingga mempermudah proses pemisahan dan pemurnian lebih lanjut.

Parameter utama yang dikaji dalam penelitian ini meliputi rasio *solid-liquid* (S/L), waktu proses, dan temperatur pelindian. Rasio S/L dipilih karena berhubungan langsung dengan konsentrasi relatif padatan terhadap pelarut yang dapat memengaruhi kontak antar reagen pada bijih (Levenspiel, 1999). Waktu proses dianalisis karena menentukan sejauh mana reaksi pelindian berlangsung, meskipun pada titik tertentu peningkatan waktu tidak lagi memberikan efek signifikan. Sementara itu, temperatur dipertimbangkan karena secara umum dapat mempercepat kinetika reaksi kimia sesuai dengan teori Arrhenius. Untuk memperoleh kondisi pelindian yang optimal, penelitian ini menggunakan metode desain eksperimen Taguchi L9. Desain ini dipilih karena mampu mengurangi jumlah percobaan yang dibutuhkan, tetapi tetap memberikan informasi yang akurat mengenai pengaruh faktor-faktor utama. Analisis hasil percobaan selanjutnya diuji

menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengetahui parameter mana yang memberikan pengaruh paling signifikan terhadap *recovery* Sn. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kondisi optimal proses pelindian Sn dari *tin anode slime* menggunakan HCl, sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan kembali, salah satunya dalam proses pemurnian timah melalui metode *electrorefining*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik komposisi kimia dari *tin anode slime*?
2. Bagaimana kombinasi parameter optimum yang dihasilkan dalam proses pelindian asam terhadap *tin anode slime* terhadap *recovery* Sn menggunakan metode Taguchi dengan variasi waktu, temperatur, dan rasio *solid-liquid* pelindian?
3. Bagaimana pengaruh dari variasi waktu pelindian, temperatur pelindian, dan rasio *solid-liquid* dalam proses pelindian asam pada *tin anode slime* yang ditinjau dari *Analysis of Variance* (ANOVA)?
4. Bagaimana signifikansi kontribusi tiap parameter proses berupa waktu, temperatur, dan rasio *solid-liquid* terhadap nilai *recovery* Sn yang ditinjau dari *Analysis of Variance* (ANOVA)?
5. Bagaimana analisis kinetika pelindian dari proses pelindian asam pada *tin anode slime* dengan metode *shrinking core model* terhadap pengendali reaksi?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik komposisi kimia dari *tin anode slime*.
2. Menganalisis pengaruh variasi waktu pelindian, temperatur pelindian, dan rasio *solid-liquid* pelindian dalam proses pelindian asam pada *tin anode slime* terhadap *recovery* Sn yang ditinjau dari *Analysis of Variance* (ANOVA).

3. Menganalisis kombinasi parameter optimal yang dihasilkan dalam proses pelindian asam terhadap *tin anode slime* menggunakan metode Taguchi dengan variasi waktu, temperatur, dan rasio *solid-liquid* pelindian.
4. Menganalisis hasil dari signifikansi kontribusi tiap parameter proses terhadap nilai *recovery* dan kadar Sn yang ditinjau dari *Analysis of Variance* (ANOVA).
5. Menganalisis kinetika *shrinking core model* pelindian dari proses pelindian asam *tin anode slime* terhadap pengendali reaksi.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sampel yang digunakan merupakan produk sisa dari proses *electrorefining* timah berupa *tin anode slime* di PT. Timah Tbk.
2. Proses preparasi sampel meliputi pengeringan menggunakan oven dengan suhu 200°C selama 22 jam. Sampel kering kemudian dihaluskan menggunakan *dish mill* dan diayak hingga mencapai ukuran butir lolos 150 *mesh*.
3. Proses pelindian asam dilakukan pada sampel dengan metode Taguchi menggunakan desain eksperimen *orthogonal array* L9. Variabel tetap yang digunakan pada proses pelindian adalah berat sampel 25 gram, kecepatan pengadukan 550 rpm, menggunakan jenis asam kuat HCl dengan konsentrasi HCl 6M, dan penambahan H₂O₂ sebanyak 10% dari jumlah larutan.
4. Variabel bebas yang digunakan pada proses pelindian asam adalah waktu pelindian (6, 8, dan 10 jam), temperatur pelindian (80, 90, dan 100°C) dan variasi rasio *solid-liquid* (1:14 ; 1:18 ; dan 1:22).
5. Variabel terikat yang diamati yaitu persen *recovery* Sn dan selektivitas Sn terhadap pengotor berupa Pb yang diperoleh dari hasil pelindian.
6. Metode karakterisasi yang digunakan adalah XRF untuk menganalisis karakterisasi pada sampel awal.
7. Titrasi iodometri digunakan untuk melihat kandungan Sn²⁺ pada hasil pelindian.

8. Metode analisis statistika yang digunakan pada penelitian adalah *Analysis of Variance* (ANOVA).
9. Metode analisis kinetika yang digunakan adalah model kinetika *Shrinking Core Model* (SCM) untuk melihat laju pengendali reaksi.

1.5 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Unit Metalurgi Muntok PT. Timah Tbk yang terletak di Kelurahan Tanjung, Kecamatan Muntok, Kabupaten Bangka Barat, Provinsi Kepulauan Bngka Belitung. Unit Metalurgi Muntok merupakan unit yang berfokus pada pengolahan dan pemurnian logam timah, termasuk peleburan, pemurnian, dan analisis laboratorium pada PT. Timah Tbk.

Secara geografis, Unit Metalurgi Muntok terletak di sekitar koordinat $2^{\circ}3'27''\text{S}$ dan $105^{\circ}9'16''\text{E}$ yang merupakan wilayah pesisir barat pulau Bangka yang memiliki akses yang cukup mudah dijangkau. Lokasi berjarak 130 km dari Bandara Depati Amir, Pangkalpinang, dengan waktu tempuh 3-4 jam menggunakan transportasi darat.

Pemilihan lokasi penelitian didasari oleh ketersediaan fasilitas laboratorium, kelengkapan peralatan metalurgi, dan akses langsung terhadap sampel peneliti yang berupa *tin anode slime*. Oleh karena itu, lokasi dinilai representatif untuk menunjang kegiatan penelitian yang akan dilakukan.

1.6 Luaran Penelitian

Penelitian ini direncanakan memiliki luaran berupa terbitan artikel ilmiah. Hasil penelitian yang telah dilakukan akan menjadi bagian riset terkait pemanfaatan kembali *anode slime* pada proses *electrorefining* sebagai sampel yang masih mengandung logam timah (Sn), serta akan menjadi riset awal untuk penelitian selanjutnya.

1.7 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi dan kontribusi di bidang akademik, terutama dalam pengembangan dan pengaplikasian ilmu metalurgi

mengenai ekstraksi Sn dari *tin anode slime*. Selain itu adapula manfaat dari penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Bagi Mahasiswa
 - a. Menambah wawasan dan pengalaman tentang gambaran di dunia kerja
 - b. Berlatih berkomunikasi dengan masyarakat Industri/Instansi.
 - c. Memberikan peningkatan keahlian profesi sehingga menumbuhkan kepercayaan diri
 - d. Menerapkan teori-teori yang telah diterima selama perkuliahan
2. Bagi Perguruan Tinggi
 - a. Menambah referensi mengenai hasil penelitian pada arsip kampus dan/atau program studi
 - b. Memperkenalkan Jurusan Teknik Metalurgi UPN “Veteran” Yogyakarta pada perusahaan-perusahaan yang bergerak di bidang metalurgi
3. Bagi Perusahaan
 - a. Menjadi masukan bagi perusahaan terkait permasalahan yang ada
 - b. Menjadi bahan pertimbangan perusahaan dalam melakukan penyesuaian setingan alat yang akan digunakan dengan optimal sesuai kebutuhan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan rujukan atau referensi untuk menjadi dasar dilakukannya penelitian ini ditunjukkan pada tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

No	Nama Peneliti	Tahun	Judul	Variabel Penelitian	Hasil Penelitian
1	Edwin Kurnia	2014	Ekstraksi <i>Stannate Chloride</i> (SnCl_4) dari Limbah Slag Menggunakan Pelarut Asam Klorida	Metode pelindian asam dengan massa slag 100 gram, kecepatan pengadukan 900 rpm, waktu 20 menit, dan suhu 80°C dengan variasi rasio S/L dan konsentrasi HCl	Semakin besar rasio pelarut, semakin tinggi nilai <i>recovery</i> . Persen (%) <i>recovery</i> tertinggi 60,85% didapat pada ukuran slag 150 <i>mesh</i> (0,099 mm) dengan waktu proses 20 menit dan rasio HCl 10%wt / slag = 25 / 1.
2	Wei-Sheng Chen, Yi-Fan	2019	<i>Oxidation Leaching of Tin</i>	Pelindian asam menggunakan	Perolehan mineral pada

No	Nama Peneliti	Tahun	Judul	Variabel Penelitian	Hasil Penelitian
	Zhoung, and Li-Pang Wang		<i>Anode Slime by Controlling Potential</i>	H ₂ SO ₄ , HCl dan HNO ₃ dengan konsentrasi larutan 5M dan rasio S/L 50 pada suhu ruang selama 30 menit, oksidasi menggunakan NaClO ₃ 0,1M	<i>tin anode slime</i> meningkat hingga Sn 85,93%, Bi 97,63%, dan Sb 96,93%
3	Wei-Sheng Chen, Shota Mesaki and Cheng-Han Lee	2021	<i>Separation of Sn, Sb, Bi, and Cu from Tin Anode Slime by Solvent Extraction and Chemical Precipitation</i>	Pelindian dengan HCl 3M dan NaClO ₃ dengan rasio 30 mL/g pada suhu 45°C selama 30 menit, <i>Solvent Extraction</i> dengan TBP 10mL	<i>Recovery tin anode slime</i> stabil dan logam berharga yang terkandung dapat digunakan kembali dengan Wt% Sn 96,25.

Posisi peneliti terhadap penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Posisi peneliti				
Peneliti	Pengeringan	Pelindian Asam	Karakterisasi XRD, XRF, ICP	Sn ²⁺
Edwin Kurnia	√	√	√	
Wei-Sheng Chen, Yi-Fan Zhong, and Li-Pang Wang	√	√	√	
Wei-Sheng Chen, Shota Mesaki and Cheng-Han Lee	√	√		√
Leona Agudina Wijanarka	√	√	√	√

2.2 Landasan Teori

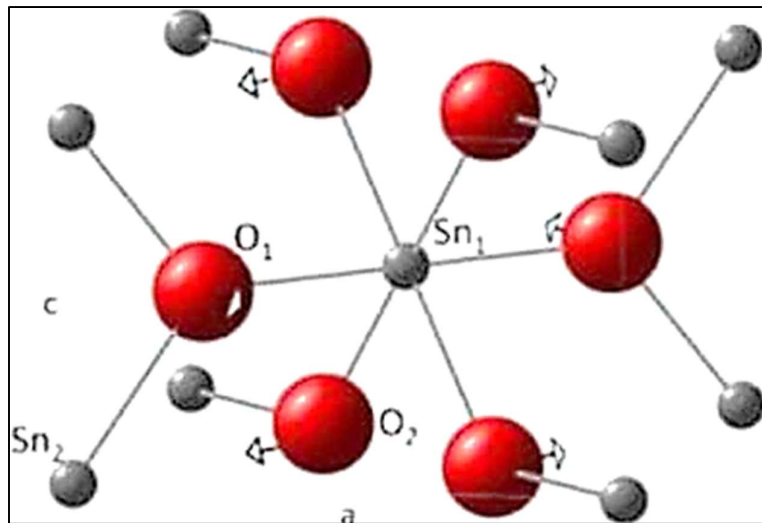
2.2.1 Logam Timah

Timah biasanya ditemukan sebagai endapan primer di batuan granit atau di area perbatasan antara batuan granit dan batuan metamorf. Timah biasanya berasosiasi dengan turmalin dan urat kuarsa timah, serta sebagai endapan sekunder yang terdiri dari *alluvium*, *elluvial* dan *koluvium*. Timah utamanya diperoleh dari mineral *cassiterite* yang ditemukan dalam bentuk oksida (Yulianti dkk, 2020).

Pada saat ini, bijih timah yang dominan ditemukan berupa *cassiterite* (SnO₂) pada endapan magmatik-hidrotermal dan juga endapan *placer*. Timah memiliki titik leleh yang relatif rendah dibandingkan dengan logam lainnya, yaitu sekitar 232°C. Bentuk kristal *cassiterite* adalah tetragonal dengan nilai kekerasan 6-7 skala Mohs, densitas 6-7 g/cm³, dan kandungan timah hingga 79% dengan mayoritas warna

coklat hingga coklat kehitaman. Variasi warna tersebut dipicu oleh kandungan unsur-unsur seperti Ti, Nb, Fe, dan Ta pada *cassiterite*. *Cassiterite* dikategorikan sebagai mineral oksidatif dan secara kimiawi memiliki ketahanan yang baik, terutama terhadap pelapukan kimia (Habashi, 1997).

Timah oksida (SnO_2) memiliki struktur kristal *rutile orthogonal*, dengan setiap atom Sn berkoordinasi dengan 6 atom oksigen. SnO_2 tidak dapat larut dalam air, tetapi dapat larut dalam asam dan basa kuat. Jika dilarutkan dalam asam halide, SnO_2 akan membentuk heksahalostanat, sedangkan jika dilarutkan dalam basa, SnO_2 akan membentuk stanat dengan rumus umum Na_2SnO_3 (Kurnia dkk, 2014). Gambaran struktur kristal *rutile* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Struktur kristal SnO_2 (Austin dkk, 2008)

2.2.2 Tin Anode Slime

Tin anode slime merupakan residu padat yang mengandung logam-logam dalam bentuk oksida atau senyawa kompleks. Meski dianggap sebagai limbah, kandungan timah di dalamnya masih cukup signifikan dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku sekunder untuk mendukung prinsip *zero waste* dalam industri pertimahan. *Tin anode slime* sebagai *byproduct* dari proses *electrorefining* memiliki kandungan campuran dari Sn, Sb, Bi, dan metal lainnya yang disimpan pada dasar tangki pemurnian selama proses pemurnian berlangsung. Proses *electrorefining* timah dimulai dari ingot timah yang dilebur ulang dan dicetak membentuk anoda. Katoda yang digunakan berupa *starter sheet* dari timah murni. Larutan elektrolit yang