

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian mengenai *atmospheric leaching* nikel saprolit menggunakan asam sulfat telah dilakukan dengan variabel-variabel tertentu. Pada penelitian ini menggunakan proses hidrometalurgi yang bertujuan untuk menentukan konsentrasi asam, temperatur, dan %S/L terbaik dengan harapan dapat menghasilkan persen ekstraksi nikel lebih dari 90% dan juga dapat mengetahui kinetika pelindiannya. Bijih nikel saprolit harus melalui proses reduksi terlebih dahulu, kemudian dilakukan proses *atmospheric leaching* menggunakan asam sulfat. Pada bab ini dijelaskan mengenai karakterisasi sampel awal, hasil, hingga produk akhir penelitian. Pada bab ini akan dibahas juga pengaruh konsentrasi asam sulfat, temperatur, dan %S/L terhadap persen perolehan ekstraksi nikel pada proses pelindian, serta laju pengendali pelindian kalsin nikel saprolit dan besarnya energi aktivasi yang diperoleh.

4.1 Karakterisasi Nikel Saprolit dan Kalsin

Setelah dilakukan tahapan preparasi awal, kemudian sampel diuji komposisi kimianya menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) untuk mengetahui kandungan unsur Fe dan Ni pada nikel saprolit. Selain itu, sampel juga dikarakterisasi menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) yang bertujuan untuk mengetahui unsur yang terkandung.

Berdasarkan Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa terdapat kandungan unsur Ni dan Fe masing-masing sebesar 1,78% dan 4,24%. Ni dan Fe diuji menggunakan AAS

karena untuk menghasilkan ketelitian yang lebih tinggi, sehubungan dengan pengujian selanjutnya untuk kadar Ni dan Fe menggunakan AAS.

Tabel 4.1 Hasil Analisis Komposisi Kimia dengan metode AAS

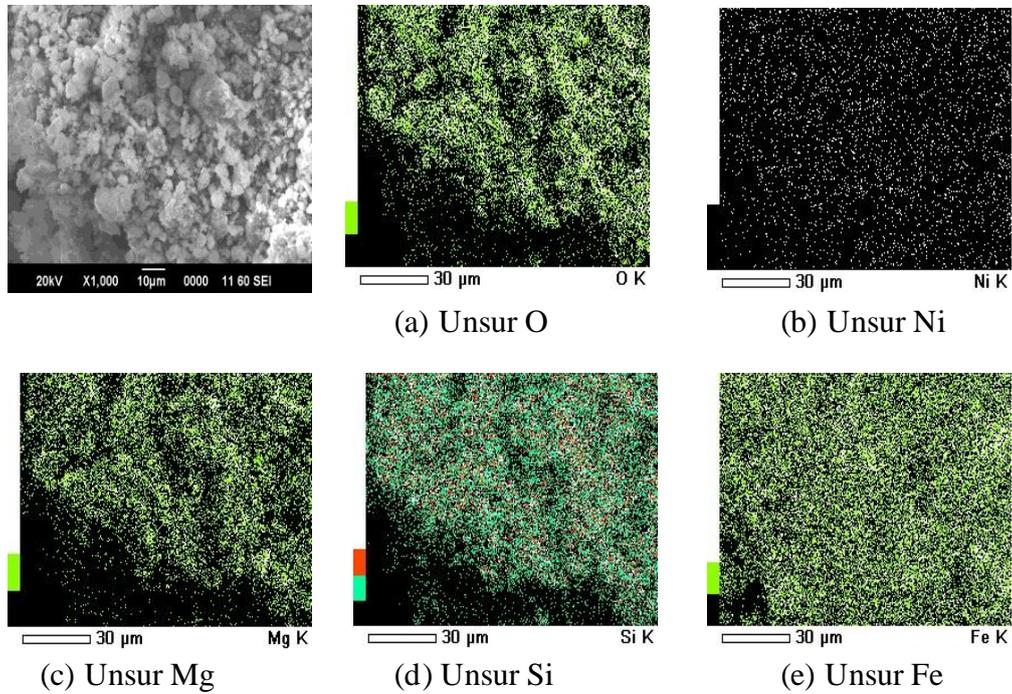
Unsur	%
Ni	1,78
Fe	4,24

Tabel 4.2 Hasil Analisis Komposisi Kimia dengan metode XRF

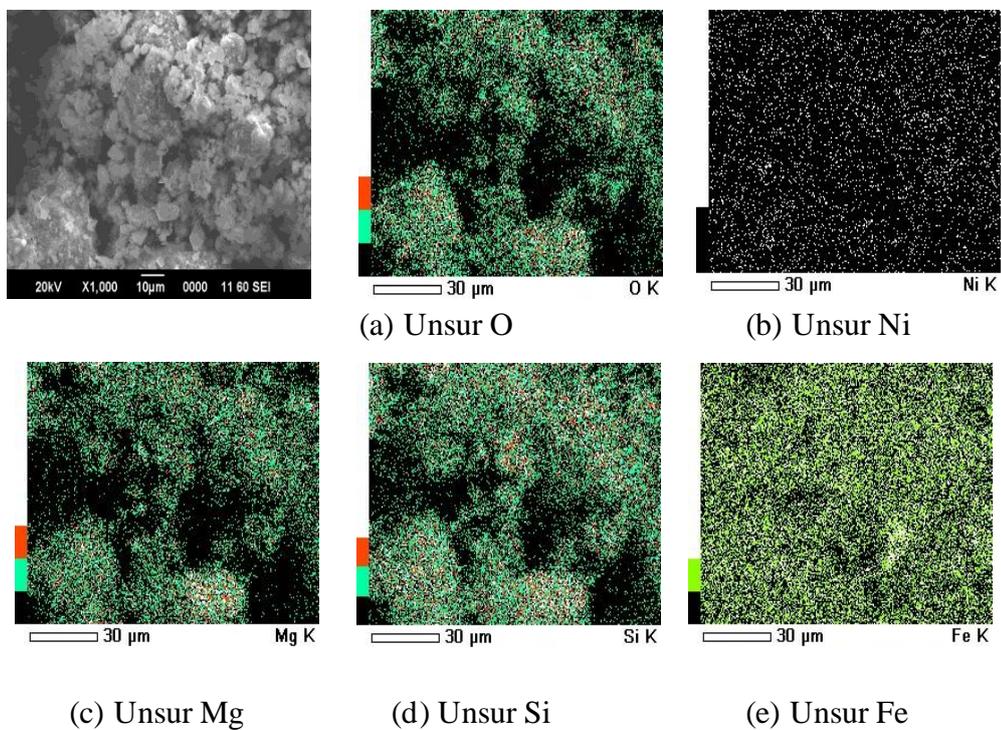
Unsur	%
Na	0,50248
Al	1,10697
Mg	22,9996
Ti	0,0734
Si	23,0995
Cr	0,92064
Ca	0,05918
Zn	0,03482
Ni	1,78
Fe	4,24
O	45,1835
Total	100

Dapat dilihat pada Tabel 4.2 merupakan hasil analisis XRF kalsin nikel Saprolit. Dari data hasil XRF terdapat beberapa unsur pengotor yaitu Na, Al, Mg, Ti, Si, Cr, Ca dan Zn sebesar 0,38; 0,84; 17,49; 0,06; 17,56; 0,36; 0,04 dan 0,02%.

XRF yang tersedia tidak dapat menguji sampel dalam bentuk larutan dari filtrat hasil percobaan.



Gambar 4.1 Hasil SEM pada Nikel Saprolit (perbesaran 1000x)



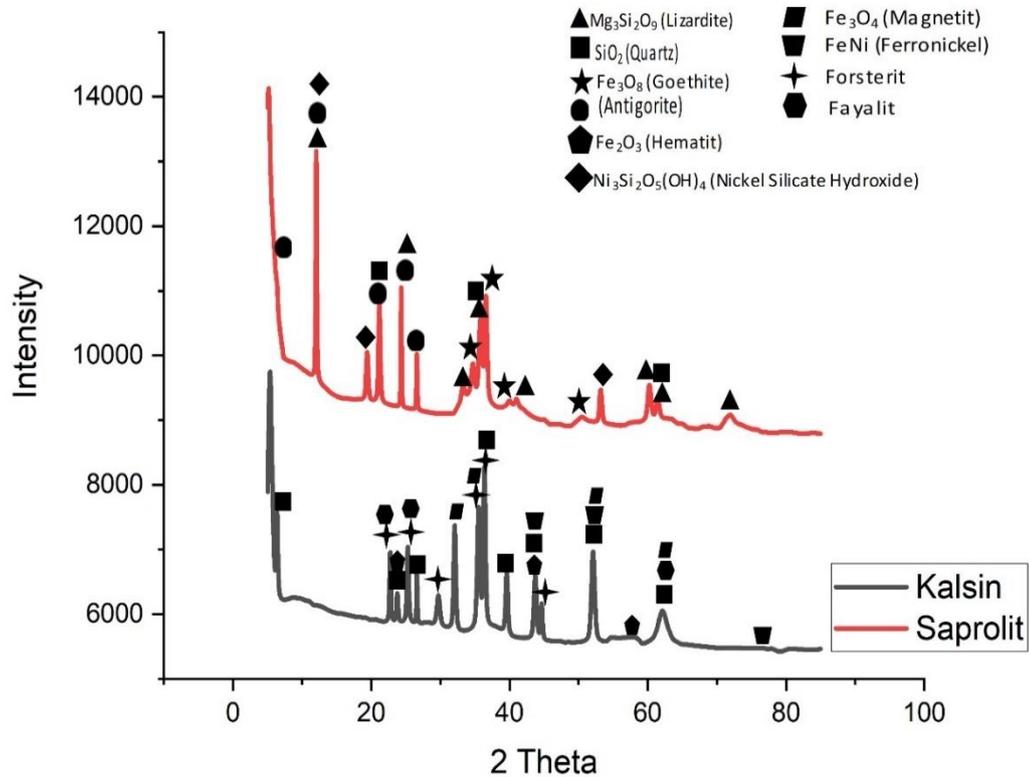
Gambar 4.2 Hasil SEM pada Kalsin Nikel Saprolit (perbesaran 1000x)

Selanjutnya sampel awal dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui morfologi dan distribusi unsur dalam sampel. *Scanning Electron Microscopy* (SEM) merupakan instrumen yang digunakan untuk memindai permukaan sampel dengan suatu sinar elektron. Pada penelitian ini bijih nikel saprolit dilakukan karakterisasi SEM dengan perbesaran 1000x.

Gradasi unsur oksigen pada sampel awal lebih sedikit daripada gradasi unsur oksigen pada kalsin, ini menandakan bahwa unsur besi, magnesium, silikon yang terkandung dalam bijih kemungkinan telah mengalami transformasi menjadi senyawa oksida yang lebih sederhana, sehingga distribusi unsur oksigen terdeteksi lebih jelas pada sampel kalsin.

Data distribusi unsur pada sampel nikel saprolit sebelum dilakukan reduksi (sampel awal) menunjukkan terdapat unsur-unsur dominan seperti O, Ni, Mg, Si, dan Fe. Sedangkan hasil karakterisasi distribusi pada sampel nikel saprolit hasil reduksi (kalsin) seperti pada Gambar 4.2 juga menunjukkan unsur-unsur dominan yang sama. Karakterisasi lain yang diperlukan yaitu analisis struktur mineral untuk mengetahui jenis-jenis mineral pembentuk sampel dan perubahan struktur mineral setelah dilakukan reduksi. Karakterisasi ini menggunakan alat XRD. Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan hasil analisis XRD antara bijih nikel saprolit dengan kalsin nikel saprolit.

Bijih nikel saprolit yang belum direduksi tersusun dari beberapa mineral yaitu *lizardit*, *quartz*, *goethite*, *antigorite*, dan nikel silika hidroksida. Hasil ini sesuai dengan literatur oleh Lediyantje Lintjewas. dkk, 2019 dan juga sesuai dengan hasil yang telah dilakukan sebelumnya oleh MacCarthy, Jennifer. dkk, 2015.



Gambar 4.3 Hasil XRD pada Bijih Nikel Saproilit dan Kalsin Nikel Saproilit

Pada kalsin nikel saproilit hasil reduksi terdapat mineral hematit, magnetit, *quartz*, ferronickel, forsterit, dan fayalit. Hasil ini sesuai dengan yang diharapkan dan juga sesuai dengan hasil yang telah dilakukan sebelumnya oleh Suprayogi, tahun 2012.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian XRD

Jenis mineral pada saproilit awal (sebelum reduksi)	Jenis mineral pada kalsin (setelah reduksi)
Lizardit ($Mg_3Si_2O_9$)	Hematit (Fe_2O_3)
<i>Quartz</i> (SiO_2)	<i>Quartz</i> (SiO_2)
<i>Goethite</i> ($FeOOH$)	Fayalit (Fe_2SiO_4)
Antigorit	Forsterit (Mg_2SiO_4)
$(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$	<i>Ferronickel</i> ($FeNi$)
Nikel silika hidroksida ($Ni_3Si_2O_5(OH)_4$)	Magnetit (Fe_3O_4)

Mineral-mineral utama dalam saprolit seperti *Lizardite*, *antigorite* mengalami perubahan struktur menjadi forsterit. *Lizardit* dan *antigorite* merupakan mineral serpentin, transformasi mineral serpentin menjadi forsterit disebabkan oleh berbagai faktor seperti temperatur tinggi dan pelarutan mineral. Mineral serpentin dengan struktur berlapis berubah menjadi forsterit dengan struktur amorf setelah perlakuan termal pada temperatur di atas 700°C. Selain itu, reduksi bijih laterit dapat mengakibatkan perubahan dalam fase mineral, termasuk pembentukan forsterit (Li, 1999). Transformasi lizardit menjadi forsterit dapat dilihat dari persamaan reaksi berikut:



Sedangkan *goethite* berubah menjadi hematit dan fayalit disebabkan oleh temperatur yang tinggi dan transformasi kimia dan mineral. Perubahan mineral goethit dapat terjadi dengan mengubah komposisi kimia dan mineral bijih di bawah pengaruh temperatur yang tinggi, yaitu transformasi fasa mineral yang direduksi pada temperatur hingga 800°C Transformasi kimia dan mineral goethit dapat terjadi akibat dehidroksilasi, pemanggangan reduksi dalam campuran gas CO dan CO₂. Pemanggangan reduksi dapat menghilangkan kelembaban, tetapi tidak secara signifikan mengubah kandungan Fe dalam bahan baku. Namun, pemanggangan reduksi mengubah goethit menjadi hematit. Transformasi *goethite* menjadi hematit dapat dilihat dari persamaan reaksi berikut (Setiawan *et al.*, 2019):



Reduktor yang digunakan pada proses reduksi nikel saprolit ini yaitu batubara sub-bituminous yang sebelumnya telah dikarakterisasi dengan Proximat

Analisis untuk mengetahui kandungan karbon di dalam batubara.

Tabel 4.4 Karakteristik batubara sub-bituminous dalam % berat (*as received*)

Reduktor	VM (%)	Ash (%)	FC (%)	S (%)	TM(%)	Kcal/Kg
Batubara sub-bituminous	36,26	14,39	36,92	0,91	12,43	6000

Tabel 4.4 merupakan karakteristik batubara yang digunakan, kandungan FC (*fixed carbon*) pada batubara sebesar 36,92%, VM (*volatile matter*) bernilai 36,26%. sedangkan TM (*Total Moisture*) sebesar 12,43%. Nilai *fixed carbon* dalam batu bara sebesar 36,92%, menunjukkan bahwa 36,92% dari massa batu bara tersebut terdapat kandungan karbon yang tetap setelah proses pengeringan dan penghilangan *volatile matter*.

4.2 Pengaruh Konsentrasi Asam Sulfat terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Salah satu faktor yang dapat mempengaruhi proses pelindian adalah konsentrasi pelarut. Pada penelitian ini menggunakan larutan asam sulfat (H_2SO_4) dengan variasi konsentrasi yang digunakan adalah 0,1; 0,2; 0,5M. Diuji pada sampel yang dilakukan pelindian selama 2 jam dengan penambahan batu bara sebanyak 20%. Sementara %S/L dan temperatur tetap konstan pada 10% dan $70^\circ C$, selama proses pelindian. Pada penelitian ini diperoleh persen ekstraksi nikel tertinggi pada konsentrasi H_2SO_4 0,2M, yaitu sebesar 83,69%. Hasil yang diilustrasikan pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa persen ekstraksi logam meningkat dengan peningkatan konsentrasi H_2SO_4 , namun pada konsentrasi H_2SO_4 sebesar 0,5M terjadi penurunan persen ekstraksi nikel. Semakin tinggi konsentrasi asam sulfat menyebabkan jumlah ion hidrogen (H^+) yang terbentuk pada tahap

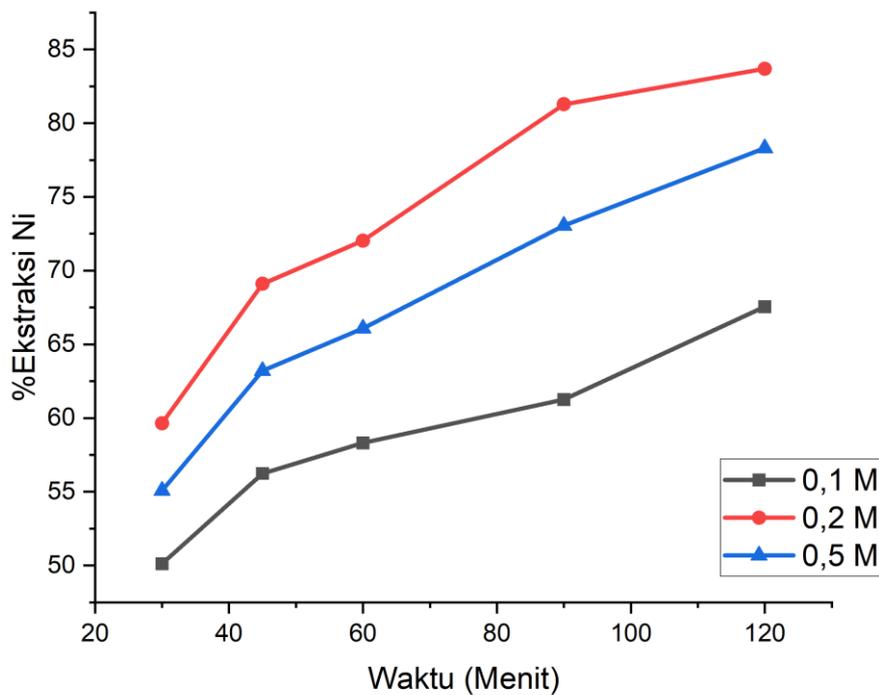
disosiasi asam juga akan meningkat. Persamaan reaksi yang terjadi pada tahap disosiasi asam sulfat adalah :



Peningkatan jumlah ion hydrogen (H^+) ini akan mengakibatkan terjadinya peningkatan aktivitas pada tahap *proton attack*, dimana persamaan reaksi yang terjadi sebagai berikut :



Ion hidrogen (H^+) yang terbentuk ini akan bereaksi dengan senyawa NiO yang terkandung dalam sampel. Semakin banyak ion hidrogen H^+ yang bereaksi akan mengakibatkan ion nikel (II) (Ni^{2+}) yang terbentuk akibat reaksi *proton attack* juga akan semakin banyak (Nida, 2017).



Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Konsentrasi terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Ketika konsentrasi H_2SO_4 sebesar 0,2M digunakan, diperoleh 83,69% Ni berhasil diekstraksi. Konsentrasi di bawah 0,2M dianggap tidak cukup untuk melarutkan Ni, sedangkan konsentrasi H_2SO_4 sebesar 0,5M tidak lebih tinggi nilainya dari pada nilai persen ekstraksi nikel pada konsentrasi 0,2M. Menurut literatur, rasio ekstraksi nikel mencapai nilai konstan tertentu pada dosis asam sulfat lebih dari 0,16 mol/L, sekitar 85% dari total nikel (92% dari nikel logam) dapat diekstraksi (Katsuyoshi, 1991). Oleh karena itu, konsentrasi H_2SO_4 sebesar 0,2M ditentukan sebagai konsentrasi yang paling maksimal.

Apabila dibandingkan dengan penelitian menggunakan kalsin nikel limonit yang sebelumnya telah dilakukan oleh Annisa Nabilah pada tahun 2022, penelitian tersebut dilakukan dengan durasi 4 jam memperoleh hasil konsentrasi H_2SO_4 terbaik adalah 1M dengan persen ekstraksi nikel sebesar 97,45%. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan kalsin nikel saprolit dengan durasi 2 jam memperoleh hasil konsentrasi H_2SO_4 terbaik adalah 0,2M dengan persen ekstraksi nikel sebesar 83,69%.

4.3 Pengaruh Temperatur terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Faktor lain yang dapat mempengaruhi persen ekstraksi nikel pada proses pelindian adalah temperatur. Pada penelitian ini variasi temperatur yang digunakan adalah 30, 50, dan 70°C. Dilakukan pelindian selama 2 jam dengan penambahan batu bara sebanyak 20%, sementara %S/L dan konsentrasi asam sulfat tetap konstan pada 10% dan 0,2M. Hasilnya menunjukkan bahwa temperatur memiliki efek terhadap ekstraksi nikel. Dengan menjaga kondisi reaksi lainnya tetap konstan, laju

pelarutan nikel meningkat dengan peningkatan temperatur reaksi pada waktu reaksi yang sama.

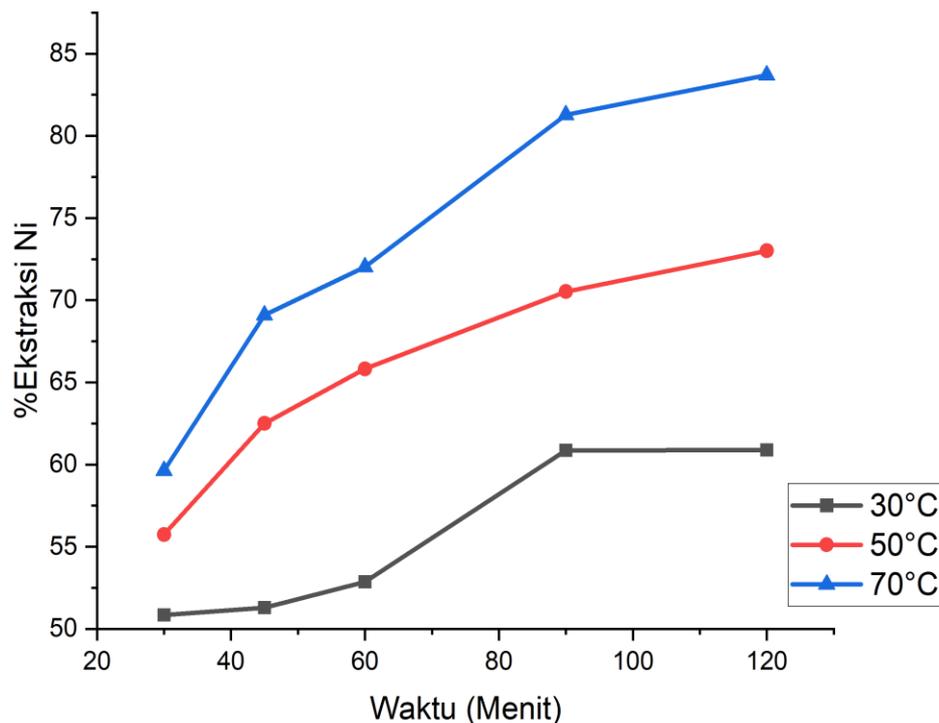
Peningkatan temperatur menyebabkan peningkatan persentase ekstraksi nikel disebabkan karena semakin tinggi temperatur maka semakin tinggi pergerakan spesi yang bereaksi di dalam larutan. Tingginya pergerakan spesi yang bereaksi menyebabkan frekuensi tumbukan antara spesies yang bereaksi akan semakin tinggi yang menyebabkan tingginya produk reaksi yang terbentuk (Wahab *et al.*, 2021).

Pada temperatur yang lebih rendah, perubahan laju pelarutan relatif seiring waktu sangat kecil, menunjukkan bahwa proses pelarutan terbatas oleh reaksi kimia. Ketika temperatur proses meningkat, laju reaksi kimia meningkat, menyebabkan perubahan intensif laju pelarutan relatif, yang mengindikasikan bahwa zona reaksi dalam proses terjadi di tengah-tengah partikel bijih yang bereaksi. Hal ini menunjukkan adanya pengendalian difusi dalam proses pelarutan.

Hasil yang diilustrasikan pada Gambar 4.5 menunjukkan bahwa persen ekstraksi logam meningkat dengan peningkatan temperatur pelindian. Pada penelitian ini diperoleh persen ekstraksi nikel tertinggi pada temperatur 70°C yaitu sebesar 83.69%. Oleh karena itu, temperatur 70°C ditentukan sebagai temperatur pelindian yang paling tertinggi.

Apabila dibandingkan dengan penelitian menggunakan kalsin nikel limonit yang sebelumnya telah dilakukan oleh Annisa Nabilah pada tahun 2022, penelitian tersebut dilakukan dengan durasi 4 jam memperoleh hasil temperatur terbaik adalah 70°C dengan persen ekstraksi nikel sebesar 97,45%. Sedangkan pada penelitian ini

menggunakan kalsin nikel saprolit dengan durasi 2 jam memperoleh hasil temperatur terbaik adalah 70°C dengan persen ekstraksi nikel sebesar 83,69%.



Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Persen Ekstraksi Nikel

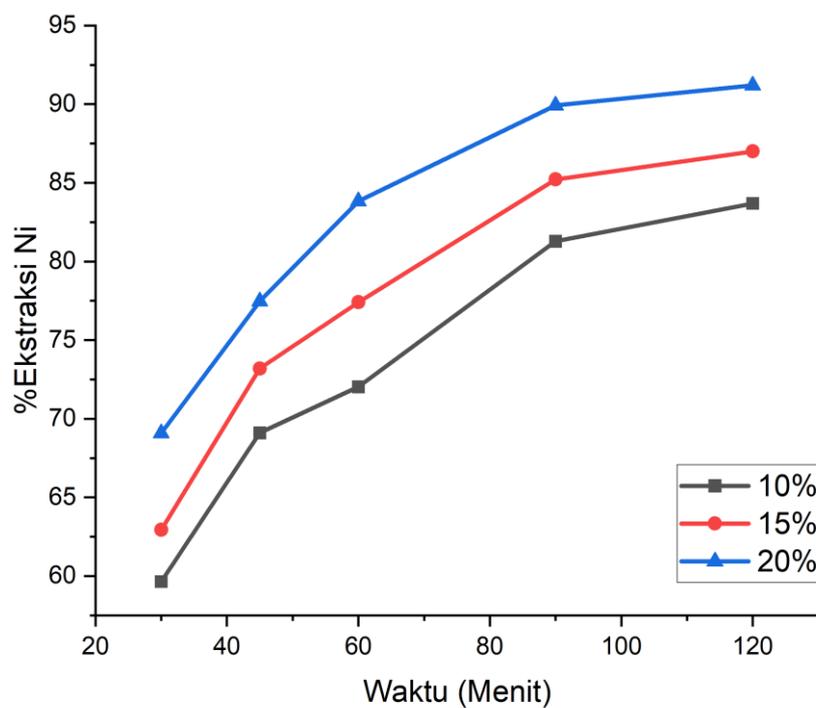
4.4 Pengaruh %S/L terhadap Persen Ekstraksi Nikel

Selain konsentrasi asam dan temperatur pelindian, %S/L juga merupakan faktor yang dapat mempengaruhi persen ekstraksi nikel dalam proses pelindian. Pada penelitian ini variasi %S/L yang digunakan adalah 10, 15, dan 20%. Dilakukan pelindian selama 2 jam dengan penambahan batu bara sebanyak 20%, sementara temperatur dan konsentrasi asam sulfat tetap konstan pada 70°C dan 0,2M.

Persentase rasio cairan/padatan memengaruhi distribusi partikel bijih dan

area kontak antara partikel bijih dengan asam sulfat, dengan demikian memengaruhi laju pelarutan. Distribusi temperatur dan konsentrasi reaktan akan homogen dan stabil pada persentase rasio cairan/padatan yang sesuai, dan ekstraksi nikel akan tinggi dalam kondisi ini (Liu, 2013). Dengan peningkatan padatan dalam pelarut, ada lebih banyak kontak antara partikel bijih dan pelarut. Ini memungkinkan partikel bijih untuk lebih efisien berinteraksi dengan pelarut dan reaktan yang diperlukan untuk ekstraksi nikel.

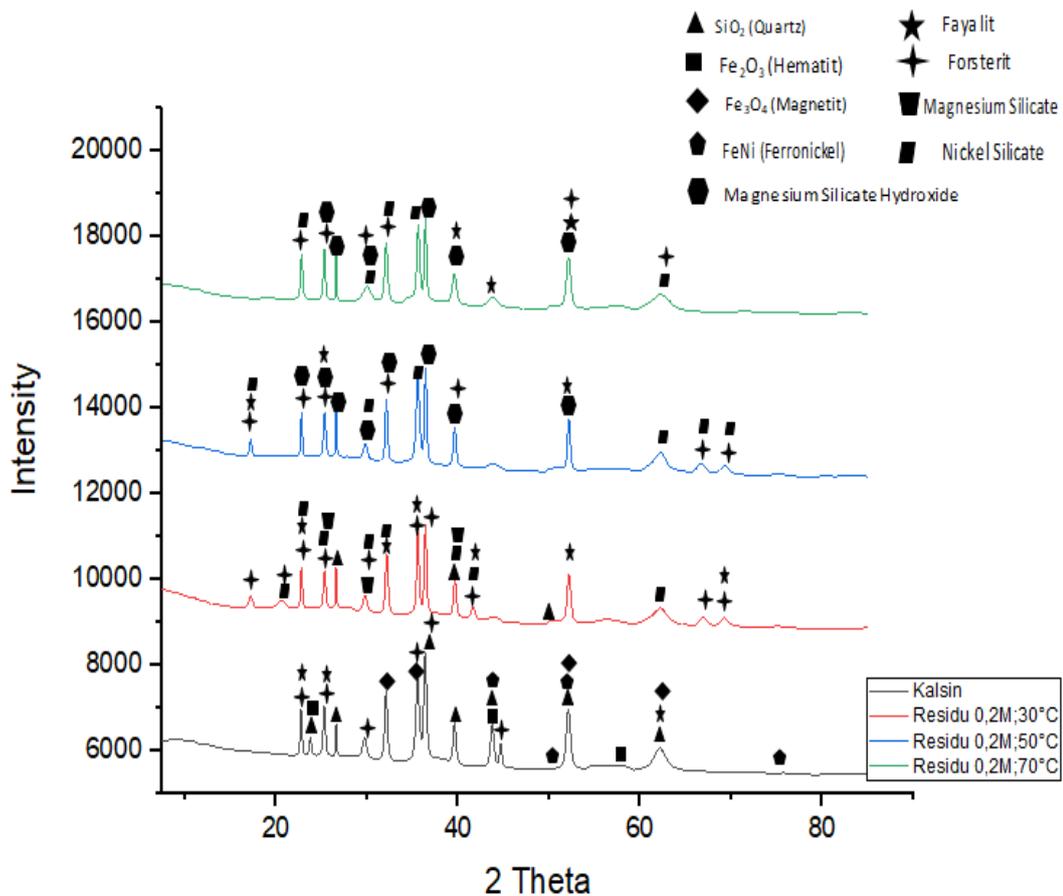
Gambar 4.6 menunjukkan hasil bahwa ekstraksi nikel meningkat seiring dengan peningkatan %S/L. Pada penelitian ini diperoleh persen ekstraksi nikel tertinggi pada %S/L 20% yaitu sebesar 91.2%. Oleh karena itu, %S/L 20% ditentukan sebagai %S/L yang paling baik.



Gambar 4.6 Grafik Pengaruh %S/L terhadap Persen Ekstraksi Nikel

4.5 Karakterisasi Residu Hasil dari Proses Pelindian

Pola difraksi yang dihasilkan dari residu hasil pelindian kalsin nikel saprolit dengan XRD ditampilkan pada gambar 4.7. Pola difraksi ini dianalisis dengan menggunakan *software high score plus*.



Gambar 4.7 Hasil XRD pada Residu Hasil Pelindian

Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan pola XRD dari kalsin nikel saprolit dan residu hasil pelindian yang diperoleh pada temperatur 30, 50, dan 70°C. Kalsin nikel saprolit tersusun dari beberapa mineral yaitu hematit, magnetit, *quartz*, ferronickel, forsterit, dan fayalit. Pada residu hasil pelindian ditemukan SiO₂, forsterit, fayalit, nikel silikat, magnesium silikat, dan magnesium silikat hidroksida.

Dari perbandingan pola difraksi antara kalsin nikel saprolit dan ketiga residu hasil pelindian, terdapat sedikit perbedaan. Namun, terlihat ada beberapa mineral yang sama dimiliki oleh kalsin dan ketiga residu. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh MacCarthy, Jennifer. dkk, tahun 2015, bahwa terdapat SiO₂ dan magnesium silikat di dalam residu hasil pelindian kalsin nikel saprolit.

Tabel 4.5 Data Pengujian XRD Kalsin dan Residu

Jenis mineral pada Kalsin	Jenis mineral pada Residu (0,2M;30°C)	Jenis mineral pada Residu (0,2M;50°C)	Jenis mineral pada Residu (0,2M;70°C)
Quartz (SiO ₂)	Quartz (SiO ₂)	Fayalit (Fe ₂ SiO ₄)	Fayalit (Fe ₂ SiO ₄)
Fayalit (Fe ₂ SiO ₄)	Fayalit (Fe ₂ SiO ₄)	Forsterit (Mg ₂ SiO ₄)	Forsterit (Mg ₂ SiO ₄)
Forsterit (Mg ₂ SiO ₄)	Forsterit (Mg ₂ SiO ₄)	Nikel Silikat (Ni ₂ SiO ₄)	Nikel Silikat (Ni ₂ SiO ₄)
Ferronickel (FeNi)	Nikel Silikat (Ni ₂ SiO ₄)	Magnesium Silikat	Magnesium Silikat
Hematit (Fe ₂ O ₃)	Magnesium Silikat	Hidroksida	Hidroksida
Magnetit (Fe ₃ O ₄)		(Mg ₃ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄)	(Mg ₃ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄)

Mineral pada kalsin seperti pada tabel 4.5 terdiri dari silika, fayalit, forsterit, FeNi, hematit, dan magnetit. Fayalit dihasilkan dari *goethite* yang bertransformasi menjadi FeO dan bereaksi dengan silika pada temperatur tinggi. Sedangkan forsterit dihasilkan dari dehidroksilasi lizardit, antigorit, atau mineral serpentin lainnya yang

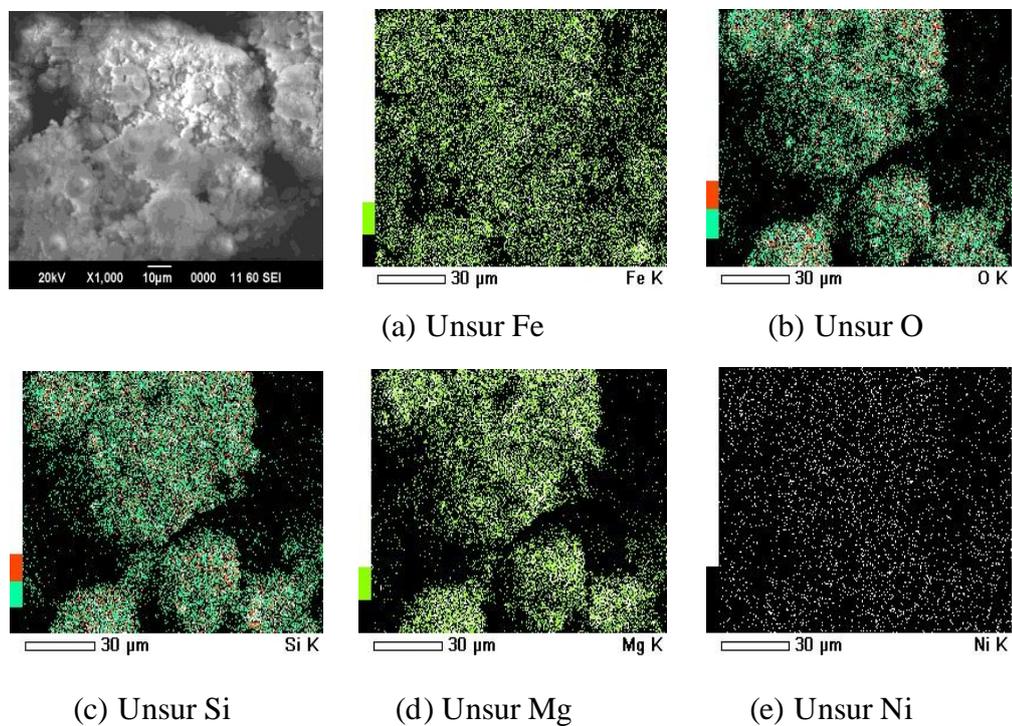
terbentuk pada temperatur reduksi yaitu sekitar 820°C. Hematit dan magnetit merupakan produk dehidroksilasi *goethite*. Ferronickel merupakan produk reduksi laterit dengan batu bara. (Setiawan *et al.*, 2019). Pada residu terdapat senyawa magnesium silikat hidroksida, terjadi dari hidrolisis magnesium silikat atau forsterit dengan adanya larutan asam.

Mineral pada kalsin seperti pada tabel 4.3 terdiri dari silika, fayalit, forsterit, FeNi, hematit, dan magnetit. Fayalit dihasilkan dari *goethite* yang bertransformasi menjadi FeO dan bereaksi dengan silika pada temperatur tinggi. Sedangkan forsterit dihasilkan dari dehidroksilasi lizardit, antigorit, atau mineral serpentin lainnya yang terbentuk pada temperatur reduksi yaitu sekitar 820°C. Hematit dan magnetit merupakan produk dehidroksilasi *goethite*. Ferronickel merupakan produk reduksi laterit dengan batu bara. (Setiawan *et al.*, 2019). Pada residu terdapat senyawa magnesium silikat hidroksida, terjadi dari hidrolisis magnesium silikat atau forsterit dengan adanya larutan asam.

Mineral ferronickel dalam kalsin mengalami perubahan struktur menjadi nikel silikat dalam residu karena disebabkan oleh beberapa faktor temperatur yang tinggi dan faktor pelarutan. Proses pelindian dengan asam sulfat biasanya melibatkan penggunaan temperatur tinggi. Asam sulfat adalah zat yang kuat dan dapat meresap ke dalam mineral-mineral dalam sampel. Ini dapat menyebabkan pelarutan mineral-mineral tertentu, yang kemudian dapat bereaksi dengan senyawa lain yang ada dalam sampel, termasuk logam nikel, untuk membentuk nikel silikat.

Gambar 4.8 merupakan hasil SEM pada residu yang menunjukkan persebaran unsur pada sampel dapat terlihat dari semakin berwarna hijau maka

semakin banyak unsur tersebut ditemukan. Pada Gambar 4.8 penyebaran unsur Ni sangat sedikit, dilihat dari intensitas warna yang tidak menghasilkan warna hijau. Hasil *mapping* pada Gambar 4.8 perbesaran 1000x menunjukkan bahwa terdapat intensitas warna yang cukup tinggi pada unsur Fe, O, Si, dan Mg. Hal ini menunjukkan unsur-unsur tersebut banyak tersebar pada residu hasil pelindian kalsin nikel saprolit.



Gambar 4.8 Hasil SEM pada Residu (perbesaran 1000x)

4.6 Kinetika Pelindian Kalsin Nikel Saprolit

Kinetika pelindian nikel mengacu pada perubahan konsentrasi nikel dalam larutan selama reaksi pelindian nikel. Kinetika reaksi ini dapat digambarkan dengan berbagai cara, salah satu cara yang umum digunakan adalah dengan menggunakan hukum laju reaksi. Studi kinetika pada pelindian kalsin saprolit bertujuan untuk

memperoleh informasi penting tentang kinetika pelarutan nikel dalam larutan asam sulfat sehubungan dengan mekanisme pelindian (Xiao *et al.*, 2020). Reaksi kimia yang terlibat dalam pelindian nikel menggunakan asam sulfat (H₂SO₄) adalah sebagai berikut:



Proses pelindian kalsin nikel saprolit dapat dijelaskan dengan *Shrinking Core Model* (SCM), langkah yang menentukan laju dapat menjadi reaksi kimia di permukaan inti atau proses difusi (Petrovski *et al.*, 2019). Pada penggunaan *shrinking core model*, laju pengendali pada proses pelindian dapat diketahui dengan melihat nilai energi aktivasi, sehingga dengan mengetahui laju pengendali maka dapat menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi proses pelindian. Pada penelitian ini menggunakan tiga variasi temperatur yang berbeda yaitu 30, 50, dan 70°C. Ketiga variasi temperatur pelindian yang berbeda tersebut dilakukan dengan interval waktu mulai dari 30, 45, 60, 90, dan 120 menit.

Pengaruh temperatur dalam kinetika dapat diketahui dengan mengacu pada model yang paling berguna untuk menggambarkan pergerakan molekul yaitu teori kinetika molekular. Persamaan yang dapat digunakan untuk menggambarkan pengaruh temperatur terhadap konstanta laju adalah persamaan Arrhenius.

$$k = A e^{\frac{-Ea}{RT}} \dots \dots \dots (4.6)$$

$$\ln k = \frac{-Ea}{RT} + \ln A \dots \dots \dots (4.7)$$

$$\ln k = \frac{-Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right) + \ln A \dots \dots \dots (4.8)$$

E_a adalah energi aktivasi, R adalah konstanta gas universal, T adalah temperatur (dalam kelvin), dan A adalah konstanta proporsional yang disebut faktor frekuensi atau faktor pre-eksponen. Saat E_a meningkat, k akan lebih kecil, dan konstanta laju yang lebih kecil sesuai dengan reaksi yang lebih lambat. Persamaan Arrhenius dapat digunakan untuk menentukan energi aktivasi secara eksperimental. Proses yang dikendalikan oleh *diffusion reaction controlled*, biasanya menghasilkan energi aktivasi yang rendah ($<20 \text{ kJ mol}^{-1}$), sementara untuk proses yang dikendalikan oleh *chemical reaction controlled*, energi aktivasinya tinggi atau lebih dari 40 kJ mol^{-1} (MacCarthy *et al.*, 2016).

Pada penelitian ini menggunakan tiga variasi temperatur, yaitu 30, 50, dan 70°C. Ketiga variasi temperatur pelindian tersebut dilakukan dengan interval waktu mulai dari 30, 45, 60, 90, dan 120 menit. Variasi temperatur dengan interval waktu ini digunakan untuk dapat menentukan nilai energi aktivasi dari pelindian yang dilakukan. Tabel 4.4 merupakan fraksi mol yang didapatkan untuk menentukan kinetika reaksi.

Tabel 4.6 Fraksi Mol Nikel yang Terekstrak

Waktu Pelindian (menit)	0,2M H ₂ SO ₄ ; %S/L 10%		
	Fraksi Mol Nikel		
	30°C	50°C	70°C
30	0,43	0,458	0,475
45	0,44	0,489	0,514
60	0,45	0,505	0,527
90	0,493	0,529	0,565
120	0,495	0,543	0,574

Setelah memperoleh fraksi mol, penentuan kinetika reaksi dihitung dengan menggunakan *shrinking core model* melalui persamaan berikut:

$$1 - (1 - x)^{1/3} = kt \dots\dots\dots(4.9)$$

$$1 + 2(1 - x) - 3(1 - x)^{2/3} = kt \dots\dots\dots(4.10)$$

Simbol x adalah fraksi mol nikel terlarut saat proses pelindian terhadap mol H₂SO₄ dan t adalah lama pelindian dalam menit. Persamaan (4.9) merupakan laju pelindian dikontrol oleh reaksi kimia (*chemical controlled*). Persamaan (4.10) merupakan laju pelindian yang dikontrol oleh difusi melalui lapisan produk (*diffusion controlled*). Data dari persamaan (4.9) dan (4.10) dibuat ke dalam persamaan garis lurus, sehingga dapat diperoleh nilai konstanta dari ketiga temperatur pelindian yang dilakukan.

$$y = mx + c \dots\dots\dots(4.11)$$

Tabel 4.7 menunjukkan hasil dari nilai $1 - (1 - x)^{1/3}$ terhadap waktu pelindian. Pada temperatur 70°C dan waktu pelindian 120 menit, diperoleh nilai *chemical controlled* yang tinggi dibandingkan dengan temperatur pelindian dan lama waktu yang rendah. Data tabel 4.7 diperoleh hasil bahwa semakin tinggi temperatur dan lama waktu pelindian maka nilai $1 - (1 - x)^{1/3}$ diperoleh juga semakin tinggi.

Selanjutnya, fraksi mol nikel terekstrak dimasukkan ke dalam persamaan (4.10). Tabel 4.8 menunjukkan hasil dari nilai $1 + 2(1 - x) - 3(1 - x)^{2/3}$ terhadap waktu pelindian. Pada temperatur 70°C dan waktu pelindian 120 menit, diperoleh nilai *diffusion controlled* yang tinggi dibandingkan dengan temperatur pelindian dan lama waktu yang rendah. Data tabel 4.8 diperoleh hasil bahwa semakin tinggi

temperatur dan lama waktu pelindian maka nilai $1+2(1-x)-3(1-x)^{2/3}$ diperoleh juga semakin tinggi.

Tabel 4.7 Nilai Model Kinetika *Chemical Reaction Controlled* dan R^2

Waktu Pelindian (menit)	0,2M H ₂ SO ₄ ; %S/L 10%					
	30°C		50°C		70°C	
	<i>Chemical controlled</i>	R^2	<i>Chemical controlled</i>	R^2	<i>Chemical controlled</i>	R^2
30	0,1719		0,183		0,1915	
45	0,1741		0,1988		0,212	
60	0,1792	0,9108	0,207	0,9346	0,2192	0,9188
90	0.2006		0.2202		0.24	
120	0.2018		0.2277		0.2453	

Dari data pada tabel 4.7 dan 4.8 kemudian dihitung nilai konstantanya, sehingga dapat digunakan untuk menghitung nilai energi aktivasi dari pelindian nikel saprolit yang dilakukan serta menentukan model kinetika pelindian yang terjadi.

Tabel 4.8 Nilai Model Kinetika *Diffusion Reaction Controlled* dan R^2

Waktu Pelindian (menit)	0,2M H ₂ SO ₄ ; %S/L 10%					
	30°C		50°C		70°C	
	<i>Diffusion controlled</i>	R^2	<i>Diffusion controlled</i>	R^2	<i>Diffusion controlled</i>	R^2
30	0,072		0,0816		0,0891	
45	0,0739		0,096		0,1087	
60	0,0782	0,9093	0,1039	0,9466	0,116	0,9306
90	0,0977		0,117		0,1378	
120	0,0988		0,1247		0,1437	

Konstanta yang diperoleh dimasukkan pada pembuatan grafik $\ln k$ terhadap $1/T$ sesuai dengan persamaan (4.8), kemudian dibuat grafik yaitu sumbu X merupakan $1/T$ dan sumbu Y merupakan $\ln k$.

Tabel 4.9 Nilai ln k terhadap Suhu pada Model Kinetika *Chemical Controlled*

Suhu (°C)	Suhu (K)	1/T (K ⁻¹)	k (L mol ⁻¹ s ⁻¹)	ln k
30	303	0,0033	0,0004	-7,82405
50	323	0,0031	0,0005	-7,6009
70	343	0,0029	0,0006	-7,41858

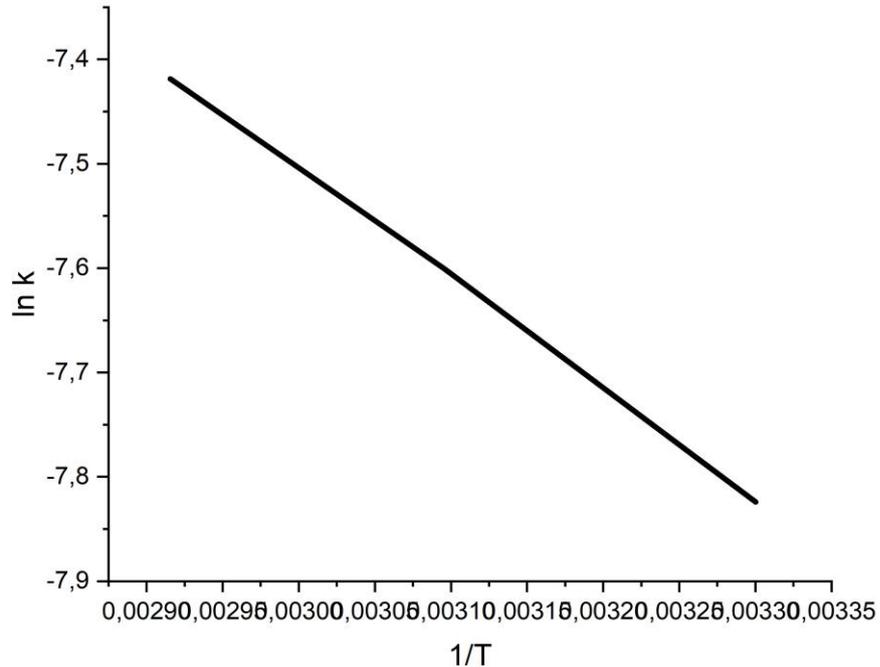
Tabel 4.10 Nilai ln k terhadap Suhu pada Model Kinetika *Diffusion Controlled*

Suhu (°C)	Suhu (K)	1/T (K ⁻¹)	k (L mol ⁻¹ s ⁻¹)	ln k
30	303	0,0033	0,0003	-8,11173
50	323	0,0031	0,0005	-7,6009
70	343	0,0029	0,0006	-7,41858

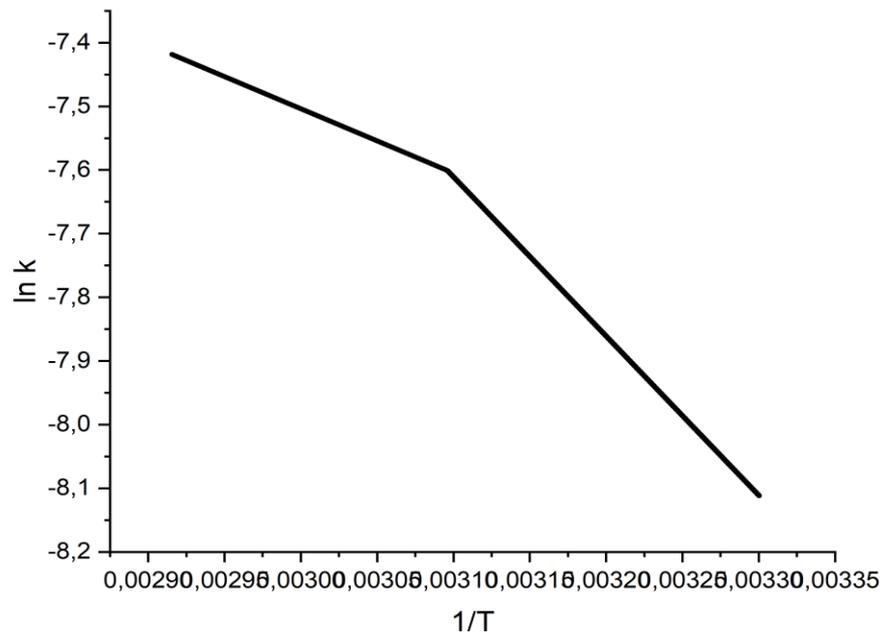
Setelah dilakukan perhitungan menggunakan persamaan Arrhenius, diperoleh nilai energi aktivasi. Energi aktivasi yang diperoleh pada model kinetika persamaan *chemical reaction controlled* sebesar 8,77 kJ/mol. Energi aktivasi yang diperoleh pada model kinetika persamaan *diffusion reaction controlled* sebesar 15,10 kJ/mol. Pada pelindian, *chemical reaction controlled* merupakan proses pelindian secara kinetika apabila kecepatan reaksi kimia jauh lebih lambat jika dibandingkan dengan kecepatan difusi. Sedangkan *diffusion reaction controlled* merupakan proses pelindian secara kinetika apabila kecepatan reaksi kimia jauh lebih cepat jika dibandingkan dengan kecepatan difusi.

Pada penelitian ini, menunjukkan bahwa laju pengendali yang mempengaruhi proses pelindian kalsin nikel saprolit dari Pulau Gebe adalah difusi melalui film fluida. Pada penelitian ini pelindian yang dilakukan memperoleh nilai energi aktivasi yang rendah, hal ini menunjukkan bahwa pelindian kalsin nikel saprolit dapat dilakukan dengan spontan. Apabila dibandingkan dengan penelitian menggunakan kalsin nikel limonit yang sebelumnya telah dilakukan oleh Annisa

Nabilah pada tahun 2022, penelitian tersebut dilakukan dengan durasi 4 jam memperoleh energi aktivasi berturut-turut sebesar 13,1768 kJ/mol; 17,4835 kJ/mol; 13,14 kJ/mol dengan konsentrasi H_2SO_4 0,2M; 0,5M; 1M pada persamaan *chemical controlled* dan untuk persamaan *diffusion controlled* energi aktivasi yang diperoleh pada konsentrasi H_2SO_4 0,2M; 0,5M; 1M berturut-turut adalah sebesar 24,7832 kJ/mol; 10,2869 kJ/mol; 14,99 kJ/mol. Sedangkan pada penelitian ini menggunakan kalsin nikel saprolit dengan durasi 2 jam memperoleh energi aktivasi sebesar 8,77 kJ/mol; pada persamaan *chemical controlled* dan untuk persamaan *diffusion controlled* energi aktivasi yang diperoleh sebesar 15,10 kJ/mol. Kedua penelitian ini laju pengendali reaksinya dikendalikan oleh difusi melalui film fluida.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan antara Nilai $\ln k$ dan $1/T$ pada Model Kinetika *Chemical Reaction Controlled*



Gambar 4.10 Grafik Hubungan antara Nilai $\ln k$ dan $1/T$ pada Model Kinetika *Diffusion Reaction Controlled*