

Strategi Pengkonversian Batu Gamping Nusa Tenggara Timur menjadi Kalsium Oksida: Pengaruh Suhu dan Waktu Kalsinasi

Yusuf Rumbino^{1*}, Lorenzo Caetano Manek De Tita¹, dan Nuryoto²

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Indonesia; e-mail: yusufrumbino@staf.undana.com

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

ABSTRAK

Masyarakat NTT telah memanfaatkan batu gamping (CaCO_3) dalam bentuk kapur tohor (CaO). Keberhasilan konversi CaCO_3 menjadi CaO dipengaruhi oleh suhu kalsinasi, waktu kalsinasi, dan ukuran partikel batu gamping itu sendiri. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa dan mengetahui fenomena yang terjadi terhadap kolaborasi suhu dan waktu kalsinasi terhadap produk CaO yang dihasilkan. Observasi dilakukan pada ukuran diameter 5 cm dengan massa 80 gram, suhu kalsinasi 800-1000°C, dan waktu kalsinasi 1- 4 jam. Hasil observasi menunjukan bahwa seiring semakin lama waktu kalsinasi dan semakin tinggi suhu kalsinasi, maka produk CaO mengalami peningkatan namun reaktivitasnya terhadap air yang ada di udara menjadi menurun, hal ini terlihat dari semakin turunnya jumlah kristal Ca(OH)_2 yang terbentuk (40% pada suhu 800oC; 23,5% pada suhu 900oC dan 17% pada suhu 1000oC). Hasil difraksi pada suhu 800oC menunjukkan masih terdapat fasa kristal CaCO_3 sebesar 35%, hal ini menunjukkan proses kalsinasi belum dapat mengubah semua CaCO_3 menjadi CaO . Hasil XRD menunjukkan pula peningkatan pembentukan mineral larnite yaitu fasa kristal dari reaksi SiO_2 yang ada di batu gamping dengan CaO yang terbentuk sehingga semakin tinggi suhu kalsinasi menghasilkan CaO murni makin sedikit. Kondisi operasi paling ekonomis diperoleh pada waktu kalsinasi 1 jam dan suhu kalsinasi 1000oC, dengan konversi CaCO_3 sebesar 90,63%. Implementasi hasil penelitian kepada mitra produsen batu kapur CaO adalah perbaikan waktu pembakaran yang semula 8 jam dapat dilakukan dengan waktu 4 jam pada suhu 900oC. Hal ini tentunya dapat mengurangi konsumsi bahan bakar tanpa mengurangi kualitas batu kapur CaO yang dihasilkan.

Kata kunci: batu gamping, kristal, konversi, kalsinasi, nusa tenggara timur

ABSTRACT

The people of NTT have used limestone (CaCO_3) by converting it to quicklime (CaO). Several variables, including calcination temperature, duration, and particle size influence the conversion of CaCO_3 . The research seeks to investigate the connection between temperature and calcination duration in relation to the CaO produced. With calcination temperatures ranging from 800 to 1000 °C and time durations of 1 to 4 hours, measurements were conducted utilizing limestone with a weight of 80 grams and a diameter of 5 cm. The results show that higher temperatures and a longer calcination time result in more CaO produced; nevertheless, the reactivity of this CaO with air moisture decreases. The 40% at 800°C, 23.5% at 900°C, and 17% at 1000°C decrease in Ca(OH)_2 crystal formation demonstrates this. X-ray diffraction data at 800°C showed that 35% of the crystalline included CaCO_3 , therefore the calcination was not completely successful in converting all CaCO_3 to CaO . The XRD analysis revealed an increase in the occurrence of larnite minerals, produced when CaO interacts with SiO_2 in limestone, therefore less pure CaO at more higher calcination temperatures. Achieving a CaCO_3 conversion rate of 90. 63%, the most cost-effective conditions were determined as a calcination temperature of 1000 °C and a duration of 1 hour. The implementation of the research results for CaO limestone manufacturing partners is to reduce the firing time from 8 hours to 4 hours at a temperature of 900°C. This change will decrease fuel consumption without reducing the quality of the CaO limestone.

Keywords: limestone, crystal, conversion, calcination, east nusa Tenggara

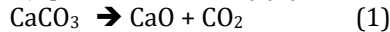
Citation: Rumbino, Y., Tita, L. C. M. D., dan Nuryoto (2025). Strategi Pengkonversian Batu Gamping Nusa Tenggara Timur menjadi Kalsium Oksida: Pengaruh Suhu dan Waktu Kalsinasi. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(4), 1123-1130, doi:10.14710/jil.23.4.1123-1130

1. PENDAHULUAN

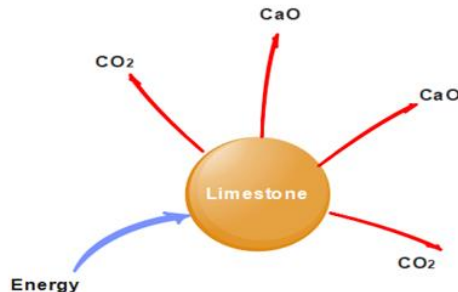
Kalsium oksida (CaO) merupakan senyawa yang mempunyai peranan yang penting dalam berbagai industri. Pemanfaatan CaO sangat luas yaitu pada pembuatan semen (Ju et al., 2024), pengolahan air (Skels et al. 2011), dan katalis dalam proses kimia (Wang et al, 2024, Maafa et al., 2024). CaO umumnya

dihasilkan dari batu gamping atau kalsium karbonat (CaCO_3) melalui proses kalsinasi (Cai & Li, 2024; Malau et al., 2024). Secara sederhana proses kalsinasi dapat dideskripsikan pada Gambar 1 (mengacu pada Martinez et. al, 2024). Pada Gambar 1 terlihat bahwa ketika limestone (batu gamping) yang kaya akan CaCO_3 diberikan energi berupa energi panas maka

akan terdisosiasi menjadi CaO dan CO_2 seperti yang tersaji pada Persamaan (1) (Wu et al., 2024).



Energi yang memenuhi kebutuhan proses kalsinasi akan mampu menghasilkan pengkonversian limestone (CaCO_3) menjadi kalsium oksida (CaO) yang efektif, efisien, dan ekonomis.



Gambar 1. Ilustrasi Proses Disosiasi Batu Gamping (mengacu pada Martinez et. al, 2024)

Di Nusa Tenggara Timur (NTT) banyak ditemukan sumber daya batu gamping, (Amheka, 2019) dengan total cadangannya sekitar 132,82 juta ton dari total batu gamping di Indonesia yaitu 2.156 miliar ton (Aziz, 2010), sehingga Cadangan batu gamping di NTT cukup besar. Masyarakat sekitar di NTT sebenarnya sudah cukup kreatif mengolah batu gamping menjadi CaO melalui proses yang penduduk kenal dengan istilah pembakaran (lihat Gambar 2). Proses kalsinasi skala komersial dilakukan menggunakan *rotary kiln*, *multiple hearth furnace* atau *flash kiln* pada temperature 1000°C sampai 1200°C (Wulandari, 2018). Tetapi hasil pengamatan di lapangan menunjukkan bahwa keterbatasan pemahaman akan proses kalsinasi sehingga pembakaran hanya mengacu pada kebiasaan, serta kondisi operasi tidak terkontrol sehingga berpengaruh pada produk CaO yang dihasilkan. Banyak batu gamping tidak terkonversi menjadi CaO atau dapat terjadi *overburning* (Zhang et al 2023) sehingga dibuang begitu saja. Pengukuran suhu menggunakan termokopel menunjukkan suhu pembakaran di lapangan mencapai 1500°C . Pembakaran dilakukan selama 8 jam di area terbuka tanpa tungku pembakaran. Setelah pembakaran dan produk kapur sudah bersuhu normal kemudian kapur yang sudah berbentuk bubuk dikemas dalam kantong. Setiap kali pembakaran 1ton batu gamping (30 karung dengan berat per karung sekitar 35 kg) membutuhkan kayu bakar sekitar 2m^3 . Asal kayu bakar yang digunakan adalah kayu yang diambil dari hutan di sekitar lokasi pembakaran, sehingga secara jangka panjang proses pembakaran batu gamping ini dapat mempengaruhi lingkungan di sekitarnya.

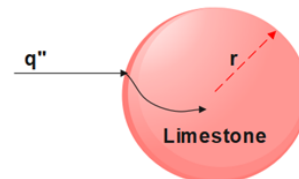


Gambar 2. Ilustrasi Pembuatan CaO dari Batu Gamping secara Tradisional di NTT

Fenomena tersebut membuktikan bahwa proses proses kalsinasi merupakan proses yang krusial dan sangat mempengaruhi keberhasilan konversi batu gamping menjadi kalsium oksida serta kualitas CaO itu sendiri. Secara teori proses kalsinasi dipengaruhi oleh suhu, waktu pembakaran, dan ukuran partikel *limestone* (batu gamping). Pengaruh suhu dan ukuran *limestone* pada dasarnya berpengaruh langsung terhadap laju transfer panas seperti yang dapat dituliskan pada Persamaan (2) (Redosado Leon et al., 2024) dan Gambar 3.

$$q'' = -K \frac{dT}{dr} \quad (2)$$

dengan: q'' = fluks panas (W/m^2), $dT/(dr)$ = gradien suhu (K/m), K = konstanta konduktivitas (W/m K)



Gambar 3. Proses Perpindahan Panas Pada Batu Gamping (*Limestone*) secara Konduksi

Terlihat pada Persamaan 2 dan Gambar 3 bahwa semakin tinggi suhu dan semakin kecil ukuran partikel limestone, maka perpindahan panas (q'') semakin cepat. Ukuran partikel yang dinyatakan dengan notasi r merupakan salah satu hambatan pada perpindahan panas, dan semakin kecil ukuran partikel maka semakin kecil hambatan transfer panasnya. Kecepatan transfer panas secara langsung nantinya berpengaruh pada kecepatan laju reaksi disosiasi CaCO_3 menjadi CO_2 dan CaO , yang secara sederhana dapat dituliskan seperti pada Persamaan (3)-(4) (mengacu pada Fogler, 2006)

$$\frac{dC_{\text{CaCO}_3}}{dt} = k C_{\text{CaCO}_3}^n \quad (3)$$

$$k = A \exp^{E_a/RT} \quad (4)$$

dengan: $\frac{dC_{\text{CaCO}_3}}{dt}$ = laju reaksi CaCO_3 terhadap waktu ($\text{mol/m}^3\text{s}$), C_{CaCO_3} = konsentrasi CaCO_3 (mol/m^3), n = orde reaksi, k konstanta kecepatan reaksi [$(\text{mol/m}^3\text{s})/(\text{mol}^n/\text{m}^3\text{s})$], A = faktor frekuensi ($\text{S}^{-1} \text{mol}^{1-n} \text{m}^3(1-n)$), E_a = Energi aktivasi (J/mol), R = konstanta gas (J/mol K), T = suhu (K).

Atas dasar Persamaan (2)-(4), maka penelitian ini mencoba mengelaborasi faktor suhu, waktu, dan ukuran partikel pada investigasi disosiasi *limestone* melalui proses kalsinasi. Konsep disosiasi CaCO_3 menjadi CaO dan CO_2 sebenarnya mengikuti konsep reaksi *shrinking core* (Gambar 4), yang mana laju reaksi CaCO_3 dapat ditentukan dengan berkurangnya ukuran atau massa dari CaCO_3 itu sendiri. Oleh karena itu pendekatan konsentrasi C_{CaCO_3} dapat didekati dengan perubahan massa CaCO_3 .



Gambar 4. Ilustrasi Berkurang Massa CaCO_3 Fungsi Waktu dan Suhu Selama Proses Disosiasi (Mengacu pada Sinitsyna et al., 2024)

Kajian penelitian terkait proses kalsinasi sebenarnya telah dilakukan oleh peneliti terdahulu seperti tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian Terkait Kalsinasi Batu Gamping (5 Tahun Terakhir)

Kondisi Operasi	Konversi, Produk yang Dihasilkan Optimal	Referensi
Massa batu karang, 5 gram, Suhu 700°C , 2 jam, ukuran partikel 100 mesh, dengan variasi porositas batu karang (kecil-besar).	Produk tertinggi diperoleh pada batu karang berpori besar sebesar 11,2%.	Komis, 2024
Batu Gamping, Tanjung karang Dongala, suhu 950°C , waktu kalsinasi 4, 5, 6 jam, ukuran partikel 80 mesh	Berurutan produk yang dihasilkan adalah 98,83%, 98,11%, 97,87% (menurun dengan lamanya waktu kalsinasi)	Tasari 2019
Batu Gamping Benawa, suhu kalsinasi 850°C , 900°C , 950°C dan 1000°C , 5 jam, 80 mesh	Suhu optimum 950°C dengan konversi 96,59%	Suhardin, 2018
Batu kapur Papua, suhu optimum 1280°C , 200 mesh, waktu tidak terkonfirmasi	Koversi 99.57 (Lokasi 1) dan 99.69 (Lokasi 2)	Sinaga, 2020

Terlihat dari Tabel 1 bahwa penelitian dilakukan pada rentang suhu $700\text{-}1280^{\circ}\text{C}$ dan waktu kalsinasi 2 – 6 jam dan ukuran batu gamping atau batu karang berkisar 80-100 mesh. Secara konsep ukuran semakin kecil semakin baik transfer panas yang terjadi (mengacu Persamaan (2)), tetapi ukuran partikel terlalu kecil berdampak pada porositas atas partikel (*bulk porosity*) terlalu kecil, panas sulit menembus pada sela-sela antar partikel dan transfer panas menjadi terhambat seperti yang terjadi pada Komis, 2024. Penelitian ini dilakukan dengan maksud menjadi solusi terhadap masyarakat di daerah NTT yang melakukan perubahan batu gamping menjadi CaO , maka penelitian ini dilakukan dengan ukuran yang mudah untuk didapatkan dan dikondisikan yaitu

5 cm dengan mengkolabrosikan kondisi operasi terbaik pada Tabel 1 tersebut. Oleh karena itu tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa dan mengetahui fenomena yang terjadi terhadap kolaborasi suhu dan waktu kalsinasi terhadap produk CaO yang dihasilkan. Harapannya penelitian ini dapat menjadi solusi bagi masyarakat, melengkapi kondisi operasi pada peneliti sebelumnya, dan bermanfaat bagi kemajuan ilmu dan teknologi.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material dan Peralatan

Bahan baku yang digunakan berasal dari Desa Saenam, Kecamatan Miomaffo Barat, Kabupaten Timor Tengah Utara, Nusa Tenggara Timur-Indonesia (lihat Gambar 5). Batu gamping sebelum digunakan pengeringan menggunakan oven pada suhu sekitar $\pm 100^{\circ}\text{C}$ selama 4 jam, untuk menghilangkan kadar air yang terkandung didalamnya.



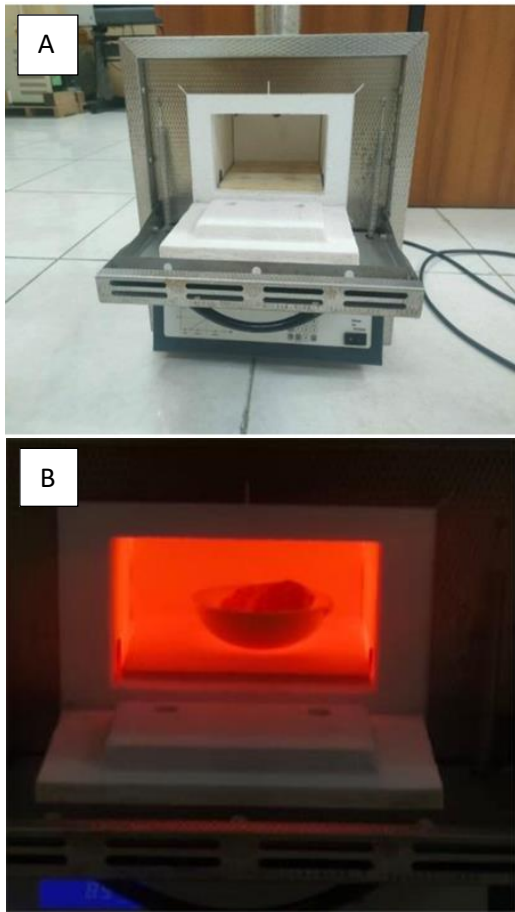
Gambar 5. Batu Gamping yang Digunakan untuk Penelitian

Hasil pengujian 4 sampel secara random pada tempat yang berbeda menunjukkan bahwa batu gamping didominasi oleh senyawa Ca dalam bentuk CaO jenis kalsit (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil Uji Spesifikasi Batu Gamping Menggunakan Uji XRF X-Ray Fluorescent (XRF) Tipe Bruker S2 PUMA

Nama Senyawa	Sampel A	Sampel B	Sampel C	Sampel D
Al_2O_3	2,70%	2,80%	2,90%	2,70%
CaO	84,50%	85,00%	83,90%	84,70%
Cl	0,20%	0,10%	0,10%	0,20%
Fe_2O_3	1,50%	1,50%	1,50%	1,50%
K_2O	0,40%	0,30%	0,50%	0,80%
MgO	1,00%	0,90%	1,00%	0,90%
MnO	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
Sc_2O_3	0,30%	0,30%	0,30%	0,20%
SiO_2	8,60%	8,20%	9,10%	8,30%
SO_3	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
SrO	0,30%	0,20%	0,30%	0,30%
Tb_4O_7	0,10%	0,10%	0,10%	0,10%
TiO_2	0,10%	0,10%	0,20%	0,20%

Peralatan penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah berupa tanur skala laboratorium seperti tersaji pada Gambar 6.



Gambar 6. Tanur Tempat Kalsinasi Batu Gamping: (A) Saat Belum Digunakan, (B) Saat Proses Kalsinasi

2.2. Prosedur Penelitian

Batu gamping dengan ukuran diameter 5cm dengan massa 80gram dimasukan ke dalam tanur pada suhu yang telah ditentukan (800°C, 900°C, dan 1000°C), sampai waktu yang telah ditetapkan yaitu 1 dan 4 jam. Sampel diambil pada waktu yang telah ditentukan yaitu 1 dan 4 Jam. Persentasi CO₂ yang terlepas selama kalsinasi dihitung menggunakan Persamaan (5). Setelah selesai proses kalsinasi dan dingin, produk hasil kalsinasi dihancurkan dan diayak menggunakan ayakan 200 mesh untuk dilakukan uji XRD ke PT. Greenlabs Indonesia untuk mengetahui perubahan struktur yang terjadi.

$$\% \text{ w/w CO}_2 = \frac{M_{s0} - M_{st}}{M_{s0}} \times 100\% \quad (5)$$

dengan: % w/w CO₂ = persentasi CO₂ yang terlepas (5 w/w%), M_{s0} = massa sampel mula-mula (gram), M_{st} = massa sampel pada t tertentu (gram).

Upaya mengetahui respon fenomena yang terjadi selama proses kalsinasi, dilakukan pengujian secara lengkap perubahan massa CaCO₃ setiap 30 menit selama 4 jam untuk tiap-tiap suhu kalsinasi. Pada percobaan ini juga dilakukan permodelan matematika menggunakan konsep kecepatan reaksi disosiasi pada kondisi terbaiknya yaitu pada suhu operasi optimum yang menunjukkan konversi terbesar, sehingga digunakan sebagai acuan dalam pemodelan matematis yang digunakan untuk menggambarkan perilaku reaksi selama proses kalsinasi. Model

matematika yang dipakai merupakan model matematika sederhana agar mudah dalam penggunaan nantinya guna memprediksi lepasnya CO₂ pada waktu dan suhu tertentu. Untuk keperluan perhitungan model, maka dilakukan pengujian secara lengkap perubahan massa CaCO₃ setiap 30 menit selama 4 jam untuk tiap-tiap suhu kalsinasi khususnya kondisi operasi terbaiknya. Model yang digunakan merupakan model pada Persamaan (3) yang dispesifikan menjadi order 0, 1, dan 2. Dengan memanfaatkan Microsoft excel maka nilai k (konstanta kecepatan reaksi) akan diperoleh. Model matematika yang baik dan dapat menggambarkan fenomena yang terjadi selama proses kalsinasi yang mempunyai nilai R² mendekati 1. Pendekatan dan penjabaran model matematika dituliskan seperti pada Persamaan (6)-(11)

$$\text{Orde 0 } \frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = k C_{CaCO_3}^0 \quad (6)$$

Diintegralkan menjadi

$$C_{CaCO_3} = C_{CaCO_3 o} + k \cdot t \quad (7)$$

$$\text{Orde 1 } \frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = k C_{CaCO_3} \quad (8)$$

Diintegralkan menjadi

$$\ln C_{CaCO_3} = \ln C_{CaCO_3 o} + k \cdot t \quad (9)$$

$$\text{Orde 2 } \frac{dC_{CaCO_3}}{dt} = k C_{CaCO_3}^2 \quad (10)$$

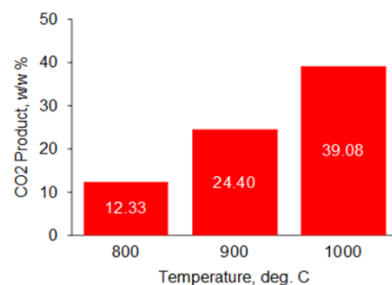
Diintegralkan menjadi

$$\frac{1}{C_{CaCO_3}} = \frac{1}{C_{CaCO_3 o}} + k \cdot t \quad (11)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Suhu Kalsinasi

Hubungan antara suhu kalsinasi dan jumlah gas CO₂ yang terbentuk menjadi salah satu fokus utama dalam analisis hasil. Seiring peningkatan suhu kalsinasi diikuti dengan peningkatan produk gas CO₂ yang dihasilkan, yaitu berurutan produk CO₂ yang dihasilkan adalah 12,33; 24,40; dan 39,08 w/w% (Gambar 6). Hasil ini membuktikan fenomena pada konsep Persamaan (2) terjadi pada penelitian ini. Ketika suhu kalsinasi dinaikan maka fluks panas (q") yang masuk ke dalam pori-pori batu gamping semakin besar, sehingga energi yang diterima batu gamping semakin besar pula. Peningkatan energi tersebut akan meningkatkan suhu di sepanjang jarak ke pusat batu gamping (r), sehingga konstanta kecepatan reaksi mengalami peningkatan yaitu 0,27/jam pada suhu 800°C, 0,7/jam pada suhu 900°C dan 0,82/jam pada suhu 1000°C pada orde 1 (Tabel 4) dan berpengaruh kepada peningkatan laju reaksi disosiasi.

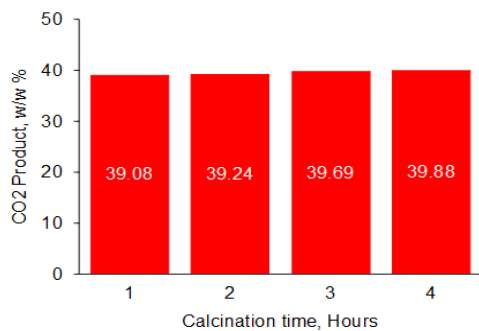


Gambar 7. Pengaruh Suhu Kalsinasi terhadap Produk Samping CO₂ dengan Waktu Kalsinasi 1 Jam

Gambar 7 menunjukkan bahwa peningkatan suhu kalsinasi dari 800°C hingga 1000°C menyebabkan peningkatan kadar CO₂ yang dihasilkan, dari 12,33 menjadi 39,08 w/w%. Hal ini menunjukkan bahwa suhu berperan penting dalam mempercepat reaksi disosiasi CaCO₃ menjadi CaO dan CO₂. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Basu et al. (2011) dengan kadar CO₂ mencapai 92,95% pada suhu 1000°C. Perbedaan ini terjadi karena ukuran partikel saat kalsinasi yang bervariasi serta perbedaan porositas dan kadar batu gamping yang digunakan.

3.2. Pengaruh Waktu Kalsinasi

Terlihat pada Gambar 8, peningkatan waktu kalsinasi berdampak pada jumlah produk samping CO₂ yang dihasilkan. Secara beurutuan untuk waktu kalsinasi 1, 2, 3, dan 4 jam adalah sebesar 39,08%, 39,24%, 39,69%, dan 39,88%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan waktu kalsinasi berdampak positif terhadap proses reaksi disosiasi (lihat Persamaan 3). Tetapi jika diperhatikan peningkatan tidak signifikan dari ke 4 jam hanya berbeda 0,8%. Jadi berdasarkan hasil pada Gambar 8, waktu disosiasi paling ekonomis terjadi pada waktu kalsinasi 1 jam.



Gambar 8. Pengaruh Waktu Kalsinasi terhadap Produk Samping CO₂ dengan Suhu Kalsinasi 1000°C

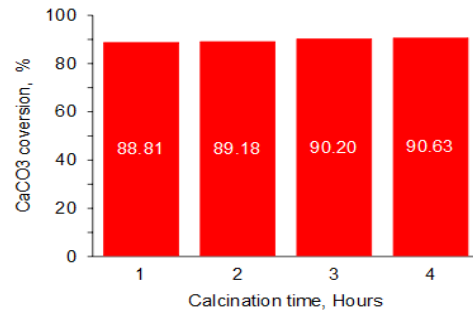
Kecenderungan produk CO₂ yang dihasilkan dihitung menggunakan Persamaan (13), maka konversi CaCO₃ dapat ditentukan.

$$X_{CaCO_3} = \frac{m_{CO_2} \times BM_{CaCO_3}}{m_{CaCO_3 o} \times BM_{CO_2}} \times 100\% \quad (13)$$

dengan, X_{CaCO_3} = konversi CaCO₃ (%), $m_{CaCO_3 o}$ = massa CaCO₃ awal (80 gram), BM_{CaCO_3} = berat molekul CaCO₃ (100 gram/mol), BM_{CO_2} = berat molekul CO₂ (44 gram/mol), m_{CO_2} = massa CO₂ yang dihasilkan tiap waktu (gram).

Terlihat pada Gambar 9, konversi CaCO₃ mengalami peningkatan dengan meningkatnya waktu kalsinasi, dengan hasil berurutan adalah 88,81, 89,18, 90,20, dan 90,63%. Tetapi jika diperhatikan peningkatannya tidak signifikan. Jadi dari data ini waktu kalsinasi bukan faktor yang sangat mempengaruhi proses kalsinasi CaCO₃ menjadi CaO dan CO₂. Jika dibandingkan antara Gambar 7 dan Gambar 8, faktor suhu kalsinasi lebih besar pengaruhnya terhadap performa kalsinasi. Hasil

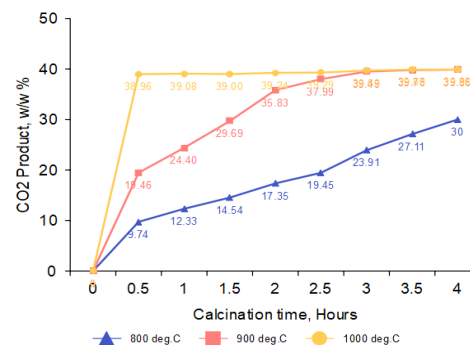
kajian yang dilakukan pada penelitian Basu et al (2011) menunjukkan fenomena tersebut. kalsinasi yang dilakukan pada suhu 800°C waktu kalsinasi 30 menit hanya mampu menghasilkan produk CO₂ sebesar 7.58%, sedangkan suhu 1000°C dengan waktu yang sama mampu menghasilkan CO₂ sebesar 92.95%.



Gambar 9. Pengaruh Waktu Kalsinasi terhadap Konversi CaCO₃ dengan Suhu Kalsinasi 1000°C

3.3. Interaksi Suhu dan Waktu terhadap produk CO₂

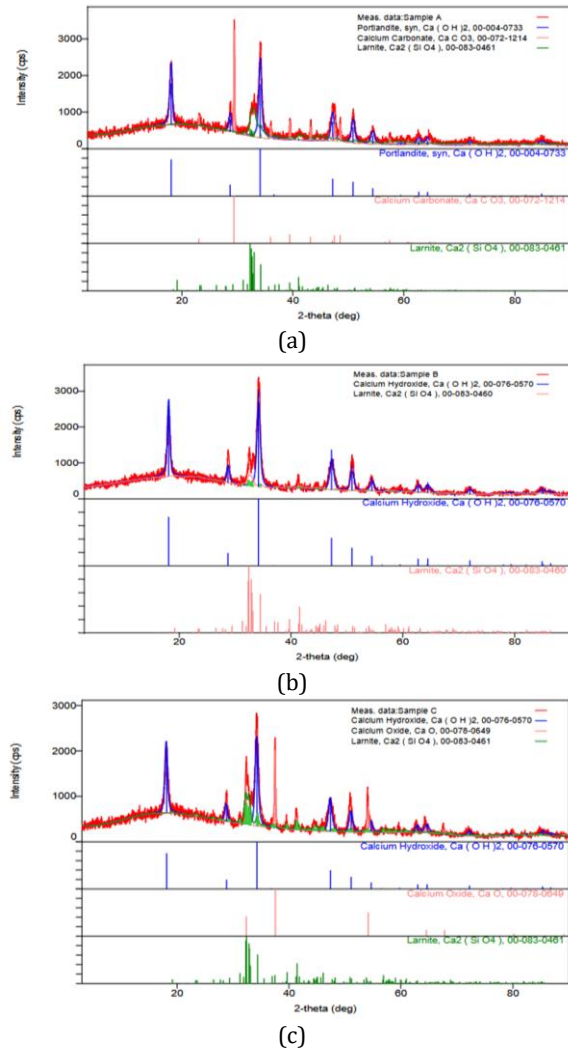
Upaya untuk memperoleh informasi dari fenomena yang terjadi secara detail, maka pada penelitian ini dilakukan analisis terkait perubahan waktu dan suhu seperti yang tersaji pada Gambar 10. Pada Gambar 10 terlihat bahwa pada suhu yang lebih tinggi lebih cepat terjadinya reaksi disosiasi. Pada waktu kalsinasi 30 menit saja pada suhu 1000°C mampu menghasilkan persentase produk CO₂ sebesar 38.96%, sedangkan pada waktu yang sama suhu kalsinasi 800°C dan 900°C hanya mampu menghasilkan CO₂ sebesar 9.74% dan 19.46% saja.



Gambar 10. Interaksi Suhu Kalsinasi dan Waktu Kalsinasi terhadap Produk Samping CO₂ yang Dihasilkan

Produk CO₂ maksimal yang dihasilkan pada waktu kalsinasi 4 jam 800°C hanya 30%, sedangkan untuk waktu kalsinasi 900°C dan 1000°C menghasilkan produk CO₂ yang cenderung sama yaitu 39.66%. Tetapi jika memperhatikan keekonomian proses, karena energi kaitannya dengan biaya operasional, maka dapat dikatakan suhu 1000°C dan waktu kalsinasi 1 jam merupakan kondisi operasi yang paling efektif dan efisien.

3.4. Karakteristik Produk CaO Hasil Kalsinasi



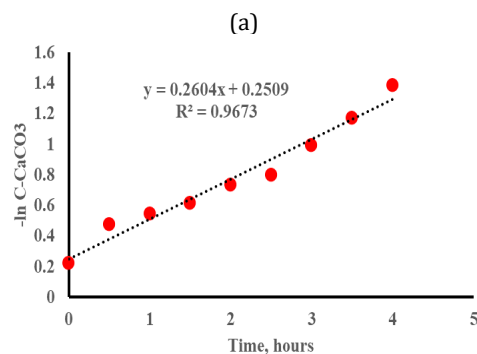
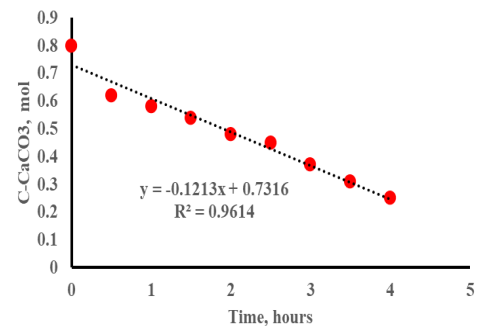
Gambar 11. Hasil Uji XRD Hasil Kalsinasi: (a) Suhu 800°C, (b) Suhu 900°C, dan (c) Suhu 1000°C

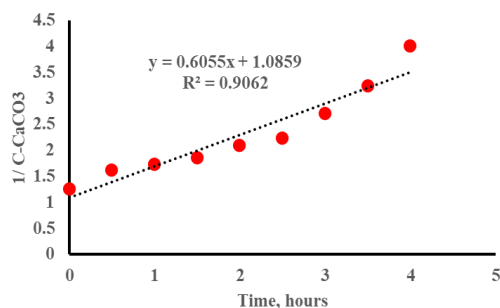
Berdasarkan hasil analisis XRD pada suhu 800°C (Gambar 11.a) menunjukkan bahwa terjadi pembentukan fasa kristal kalsium hidroksida (Ca(OH)₂). Pembentukan ini terjadi akibat reaksi hidrasi antara kalsium oksida (CaO) dengan uap air yang berada di udara selama proses pengangkutan sampel. Reaksi ini terjadi karena sifat higroskopis CaO yang mudah menyerap kelembapan (Sulistiyono et al., 2022). Kalsium hidroksida yang terbentuk memiliki tingkat kristalinitas sebesar 40%. Pola difraksi juga menunjukkan terdapat fasa kalsium karbonat (CaCO₃) dengan kristalinitas sebesar 35% yang belum terdekomposisi secara sempurna saat proses kalsinasi terjadi. Terdapat juga pembentukan *larnite* (Ca₂SiO₄) dengan presentase kristalinitas sebesar 44,3%. Pembentukan *larnite* diakibatkan karena reaksi termal antara CaO dalam sampel dan SiO₂ yang memiliki kadar tertinggi kedua dalam sampel. Pada suhu 900°C (Gambar 11. b) kalsium karbonat sepenuhnya telah terdekomposisi menjadi larnite (Ca₂SiO₄) dan Kalsium Oksida (CaO) yang mana CaO sendiri telah berubah menjadi (Ca(OH)₂). Pembentukan larnite pada suhu ini semakin banyak

dibandingkan suhu yang lebih rendah namun kristalinitasnya pada suhu 900°C lebih rendah yaitu sebesar 25% sedangkan untuk kalsium hidroksida pembentukannya menurun begitu pula dengan kristalinitasnya yang juga menurun menjadi 23,5%. Sedangkan pada Gambar 11. c yaitu pada suhu 1000°C ada sedikit CaO murni yang tidak berubah menjadi (Ca(OH)₂) yang menunjukkan bahwa tidak semua CaO bereaksi dengan uap air selama pengangkutan sampel. Hal ini diduga akibat proses sintering yang mengurangi reaktivitas CaO terhadap uap air. Akibatnya produk CaO yang dihasilkan kualitasnya menurun karena kurangnya sifat reaktivitas dari produk. Pembentukan CaO murni dalam sampel memiliki kristalinitas sebesar 6,8%. Sedangkan untuk CaO yang telah menjadi (Ca(OH)₂) kristalinitasnya adalah 17%. Untuk larnite sendiri, Pembentukannya semakin meningkat dibandingkan suhu-suhu sebelumnya tetapi kristalinitasnya lebih kecil dari pada 2 suhu sebelumnya. Tingkat kristalinitas *larnite* pada suhu 1000°C sebesar 22,3%. Jadi berdasarkan hasil analisis XRD tersebut, pada dasarnya pada suhu 800°C proses kalsinasi belum terjadi secara sempurna karena masih tersisa kalsium karbonat yang belum terdekomposisi. Sedangkan suhu 900°C menunjukkan proses kalsinasi yang telah berjalan secara sempurna namun dengan *larnite* yang mendominasi sampel. Untuk suhu 1000°C terdapat penurunan kualitas produk namun memiliki pembentukan larnite terbanyak diantara 2 suhu sebelumnya.

3.5. Uji model Matematika kinetika Reaksi Proses Kalsinasi CaCO₃

Pengujian model kinetika reaksi dilakukan pada orde 0, orde 1 dan orde 2. Model kinetika untuk suhu 800°C pada Gambar 12.





(c)

Gambar 12. Hasil Perhitungan Model Matematika: (a) Orde 0, (b) Orde 1, dan (c) Orde 2 pada Suhu Reaksi 800°C

Analog dengan Gambar 12, maka untuk suhu 900°C dan 1000°C diperoleh harga R^2 pada masing-masing order reaksi seperti tersaji pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai R^2 dari Perhitungan Model Matematika pada Order 0,1, dan 2

Suhu, oC	R^2		
	Orde 0	Orde 1	Orde 2
800	0.9614	0.9673	0.9062
900	0.9916	0.9826	0.8202
1000	0.9654	0.9778	0.8573

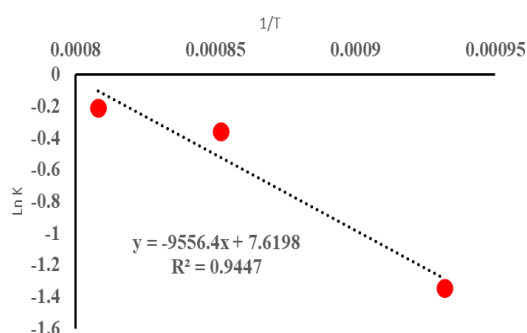
Pada Tabel 3 terlihat bahwa diperoleh rerata R^2 terbaik dihasilkan pada model matematika order order 1. Selanjutnya untuk menentukan energi aktivasi, maka data yang akan dipakai adalah data konstanta kecepatan reaksi (k) pada model matematika order 1. Harga k yang diperoleh pada order 1 untuk masing-masing suhu, dan hasil kalkulasi $1/T$ dan $\ln k$ untuk penentuan energi ativasi (Ea) tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Perhitungan Konstanta Kecepatan Reaksi

Suhu (°C)	Suhu (K)	K (1/jam)	1/T	Ln K
800	1073.15	0.2604	0.000932	-1.34554
900	1173.15	0.7	0.000852	-0.35667
1000	1237.15	0.8117	0.000808	-0.20862

Berdasarkan Tabel 4 dengan membuat hubungan $\ln k$ versus $1/T$ maka harga Ea/R akan diperoleh. Berdasarkan Gambar 13 diperoleh harga Ea/R sebesar -9556.4. Pada harga konstanta kecepatan gas sebesar 8.314 J/mol K, maka diperoleh harga Ea sebesar:

$$9556.4 \times 8.314 = 79451.91 \text{ J/mol.}$$



Gambar 13. Hubungan antara $\ln k$ Versus $1/T$

Harga Ea sebesar 79451.91 J/mol termasuk kategori besar, dan masuk kategori reaksi yang berjalan lambat, terbukti untuk melakukan disosiasi diperlukan suhu yang tinggi yaitu di atas 800°C. Pada penelitian Basu et al (2011) pada suhu kalsinasi di bawah 800°C produk CO_2 belum terbentuk sama sekali.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan observasi yang dilakukan parameter suhu dan waktu kalsinasi berdampak baik terhadap reaksi disosiasi CaCO_3 menjadi CaO dan CO_2 . Tetapi parameter suhu dampaknya lebih dominan dibandingkan waktu kalsinasi, terbukti ketika dilakukan pada waktu kalsinasi 1000°C, dalam waktu 1 jam telah menghasilkan produk CO_2 sebesar 39.08% atau setara dengan konversi CaCO_3 88.81%. Kondisi operasi pada suhu kalsinasi 900°C dan 1000°C, waktu kalsinasi 4 jam diperoleh persentase CO_2 yang sama yaitu sebesar 39,86% atau setara dengan konversi 90.63%. Hasil karakteristik yang dilakukan menggunakan XRD menunjukkan bahwa pada suhu 800°C proses kalsinasi belum terjadi secara sempurna, suhu 900°C menunjukkan proses kalsinasi yang telah berjalan secara sempurna namun dengan *larnite* yang mendominasi sampel, serta suhu 1000°C terdapat penurunan kualitas produk namun memiliki pembentukan *larnite* terbanyak diantara 2 suhu sebelumnya. Tetapi jika dikaitkan dengan energi yang diperlukan, maka kondisi operasi paling ekonomis diperoleh pada waktu operasi 1 jam dan suhu kalsinasi 1000°C dengan CO_2 yang dihasilkan sebesar 39.08%. Secara umum hasil kalsinasi pada penelitian ini sudah cukup baik karena mampu mengkonversi CaCO_3 mencapai 90.63% dengan ukuran batu gamping yang terkalsinasi boleh dikatakan cukup besar yaitu 5 cm. Tetapi jika melihat fenomena yang terjadi maka untuk penelitian selanjutnya perlu dilakukan investigasi suhu di atas atau sama dengan 1000°C dengan ukuran gamping diperkecil di bawah 5cm agar proses reaksi disosiasi menjadi maksimal dan proses kalsinasi berjalan sempurna dan tidak justru membentuk *larnite*. Data hasil penelitian ini selanjutnya dapat digunakan oleh mitra pemilik pembakaran batu gamping agar dapat mengontrol pembakaran agar tidak melebihi suhu 1000°C dan waktu pembakaran pada kisaran 1 jam sehingga kebutuhan bahan bakar berupa kayu dapat dikurangi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amheka A, Tuati N.F, Rumbino Y., 2019, Kajian Lingkungan Potensi dan Pemanfaatan Batu Karang Pulau Timor Propinsi Nusa Tenggara Timur, Jurnal Ilmiah Teknologi FST Undana, Vol. 13, No.1.
- Aziz, M. (2010). Batu Kapur Dan Peningkatan Nilai Tambah Serta Spesifikasi Untuk Industri. Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara, 06(3), 116–131.
- Basu, P., Achayra, B., & Dutta, A. (2011). Study of calcination-carbonation of calcium carbonate in different fluidizing mediums for chemical looping gasification in circulating fluidized beds.

- Cai, J., & Li, Z. (2024). First Principle-based Rate Equation Theory for the Calcination Kinetics of CaCO_3 in Calcium Looping. *Energy & Fuels*, 38(9), 8145-8156.
- Fogler H. S. (2006), *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Fourth Edition, Prentice Hall International Series in The Physical and Chemical Engineering Sciences
- Ju, J., Cao, H., Guo, W., Luo, N., Zhang, Q., & Wang, Y. (2024). Experimental Study on Calcination of Portland Cement Clinker Using Different Contents of Stainless-Steel Slag. *Materials*, 17(10), 2305.
- Komis dkk, 2024, Analisis Kadar Kalsium Oksida (CaO) Pada Batu Karang Di Pulau Kelagian Kecil Lampung, Volume 9, Nomor 2, Juli – Desember
- Maafa, I. M., Alahl, A. A. S., Abd El-Magied, M. O., Cui, X., & Dhmees, A. S. (2024). Eco-friendly self-terminated process for preparation of CaO catalyst based on chitosan production wastes for biodiesel production. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 1217-1227.
- Malau, N. D., & Sianturi, M. (2024). Efficiency of Shell Waste as a Source of Calcium Carbonate to Produce Calcium Oxide through Calcination Process. *Asian Journal of Advanced Research and Reports*, 18(5), 164-169.
- Martinez, J., Wardini, J. L., Zheng, X., Moghimi, L., Rakowsky, J., Means, J., ... & Bowman, W. J. (2024). Precision Calcination Mechanism of CaCO_3 to High-Porosity Nanoscale CaO CO_2 Sorbent Revealed by Direct In Situ Observations. *Advanced Materials Interfaces*, 11(14), 2300811.
- Redosado Leon, K. A., Lyulin, A., & Geurts, B. J. (2024). Computational Requirements for Modeling Thermal Conduction in Polymeric Phase-Change Materials: Periodic Hard Spheres Case. *Polymers*, 16(7), 1015.
- Sinaga E.S, Ngaderman H., 2020, Penentuan Senyawa Dan Pemodelan Suhu Pada Saat Pemanasan Batu Kapur Untuk Mendapatkan CaO Murni Dari Batu Kapur Papua, Jurnal Photon Vol.11No.1
- Sinitsyna, P., Engblom, M., & Hupa, L. (2024). Analysis and modelling of in vitro bioactivity for bioactive glass microspheres and granules in continuous fluid flow conditions. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 637, 123029.
- Skels, P., Ingeman-Nielsen, T., Jørgensen, A. S., Bondars, K., & Skele, E. (2011). Quicklime (CaO) stabilization of fine-grained marine sediments in low temperature areas. In *3rd International Conference Civil Engineering*.
- Suhardin A., Ulum M.S, Darwis D. 2018, Penentuan Komposisi Serta Suhu Kalsinasi Optimum CaO Dari Batu Kapur Kecamatan Banawa, Journal of Science and Technology Vol 7 (1) : 30 – 35
- Sulistiyono E., Lallasari L.H., 2022, Karakteristik Perubahan Fasa pada Proses Kalsinasi Dolomit dengan Metode Kalkulasi Match!3, Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2022, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, 2 November 2022.
- Tasari S, Iqbal, Badaruddin, 2019, Penentuan Lama Kalsinasi Kalsium Karbonat CaCO_3 dari Batu Kapur Tanjung Karang Donggala, Jurnal Gravitasi, Vol.18 No.2 Juli–Desember
- Wang, D., Na, Q., Liu, Y., Feng, Y., Zhang, Q., & Chen, Q. (2024). Hydration process and fluoride solidification mechanism of multi-source solid waste-based phosphogypsum cemented paste backfill under CaO modification. *Cement and Concrete Composites*, 154, 105804.
- Wu, R., Carrejo, E., Reza, M. S., Woods, E., Razavi, S., Park, S., & Sagues, W. J. (2024). Kinetic assessment of pulp mill-derived lime mud calcination in high CO_2 atmosphere. *Fuel*, 373, 132372
- Wulandari W. Subagio, Rio A., Istiadi P.,(2018), Karakterisasi dan Kinetika Kalsinasi Dolomit, Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik, Vol.8, No. 2, hal 71-76.
- Zhang K., Wang S., Li C., Sun H., Zhang Y., (2023), Decomposition Mechanism and Calcination Properties Small-Sized Limestone at Steelmaking Temperature, Processes, MDPI.