



# Transformasi Gas Rumah Kaca: Mengubah CO<sub>2</sub> Menjadi Bahan Bernilai Tinggi Berupa *Precipitated Calcium Carbonate* (PCC)

Nuryoto<sup>1\*</sup>, Heri Heriyanto<sup>2</sup>, Leli Rahmawati<sup>3</sup>, Herliza Julvita<sup>4</sup>



<sup>1,2,3,4</sup> Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Banten, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received March 28, 2024

Accepted July 13, 2024

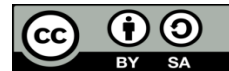
Available online July 25, 2024

### Kata Kunci:

CO<sub>2</sub>, Air, Kalsit, Vaterit, Aragonit.

### Keywords:

CO<sub>2</sub>, Water, Calcite, Vaterite, Aragonite.



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

## ABSTRAK

Gas CO<sub>2</sub> dapat mengakibatkan pemanasan global dan pada kadar tertentu mempengaruhi kesehatan manusia. Untuk menjaga kadar CO<sub>2</sub> di lingkungan dalam kondisi normal, penelitian ini mencoba mengonversi CO<sub>2</sub> menjadi produk berupa *precipitated calcium carbonate* (PCC). Tujuan penelitian ini adalah menganalisa pengaruh kecepatan pengadukan, tekanan sistem reaksi, dan waktu interaksi pada pembuatan PCC menggunakan reaktor *semi-batch*. Pengumpulan data melibatkan 4 kali replikasi untuk setiap variabel, sehingga total subjek uji coba sebanyak 32. Penelitian ini dilakukan dengan metode karbonasi yaitu dengan cara mengontakkan gas CO<sub>2</sub> dengan Ca(OH)<sub>2</sub> untuk menghasilkan PCC, yang mana dilakukan pada tekanan hidrostatik 980-9800 Pa, kecepatan 400 dan 500 rpm, laju alir CO<sub>2</sub> 2 liter/menit, dan waktu interaksi 15-60 menit. Guna mengetahui jumlah produk yang dihasilkan dilakukan analisis menggunakan analisis gravimetri, sedangkan jenis produk PCC dianalisis menggunakan alat instrumentasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tekanan sistem reaksi, waktu interaksi, dan kecepatan pengadukan berpengaruh terhadap laju reaksi antara CO<sub>2</sub> dan Ca(OH)<sub>2</sub> serta produk PCC yang dihasilkan. Kondisi operasi optimum diperoleh pada tekanan 9800 Pa, kecepatan pengadukan 400 rpm, dan waktu interaksi 60 menit dengan massa PCC yang dihasilkan sebesar 7,99 gram, dengan produk PCC yang dihasilkan di dominasi oleh jenis kalsit. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi yang lebih efisien untuk mengonversi CO<sub>2</sub> menjadi produk yang berguna, seperti PCC, yang memiliki aplikasi luas di berbagai sektor industri.

## ABSTRACT

CO<sub>2</sub> gas can cause global warming and, at certain levels, affect human health. To maintain CO<sub>2</sub> levels in the environment under normal conditions, this research tries to convert CO<sub>2</sub> into a product of precipitated calcium carbonate (PCC). This research aims to analyze the effect of stirring speed, reaction system pressure, and interaction time on the manufacture of PCC using a semi-batch reactor. Data collection involved four replications for each variable, resulting in 32 test subjects. This research was conducted using the carbonation method by contacting CO<sub>2</sub> gas with Ca(OH)<sub>2</sub> to produce PCC, which was carried out at a hydrostatic pressure of 980-9800 Pa, speeds of 400 and 500 rpm, the CO<sub>2</sub> flow rate of 2 litres/minute, and interaction time of 15-60 minutes. Analysis was carried out using gravimetric analysis to determine the amount of product produced, while the type of PCC product was analyzed using instrumentation. The results showed that the reaction system pressure, interaction time, and stirring speed affect the reaction rate between CO<sub>2</sub> and Ca(OH)<sub>2</sub> and the resulting PCC product. The optimum operating conditions were obtained at a pressure of 9800 Pa, a stirring speed of 400 rpm, and an interaction time of 60 minutes with a mass of PCC produced of 7.99 grams, with the resulting PCC product dominated by calcite. The results of this study are expected to contribute to the development of more efficient technologies for converting CO<sub>2</sub> into valuable products, such as PCC, which has wide applications in various industrial sectors.

## 1. PENDAHULUAN

CO<sub>2</sub> adalah gas alam yang terdapat secara alami di atmosfer, tetapi dalam konsentrasi yang lebih tinggi, gas ini dapat menjadi polutan yang merusak lingkungan (Chen et al., 2024; Hu et al., 2024; Liotta & Wu, 2024; Okeke-Ogbuafor et al., 2024; Valluri et al., 2022). Aktivitas manusia, terutama di sektor industri dan transportasi, merupakan sumber utama peningkatan emisi CO<sub>2</sub> yang signifikan. Gas ini terbentuk melalui proses pembakaran bahan bakar fosil, seperti minyak, batu bara, dan gas alam, yang digunakan untuk berbagai keperluan seperti produksi energi, operasi pabrik, dan penggerak kendaraan bermotor. Gas CO<sub>2</sub> dihasilkan sebagian besar oleh industri (20 Gton), transportasi (7 Gton), aktivitas digedung-gedung (3 Gton), agrikultura (4 Gton), dan penggunaan/pemanfaatan lahan (5 Gton). Jika dilakukan persentase posisi paling tinggi diduduki oleh industri yaitu sebesar 51,28.% dari total gas CO<sub>2</sub> yang ada. Aktivitas ini menyebabkan pelepasan gas CO<sub>2</sub> ke atmosfer dalam jumlah besar yang kemudian berkontribusi terhadap masalah lingkungan. Secara ideal, emisi gas CO<sub>2</sub> harus diatur dan dikelola dengan

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [nuryoto@untirta.ac.id](mailto:nuryoto@untirta.ac.id) (Nuryoto)

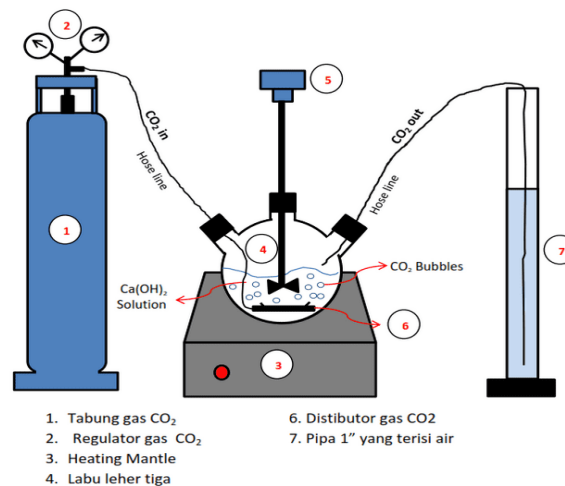
baik agar tidak berdampak negatif pada lingkungan. Pengelolaan CO<sub>2</sub> bisa dilakukan melalui penerapan teknologi yang mampu mengurangi atau mengubah emisi ini menjadi bentuk lain yang lebih ramah lingkungan. Salah satu contoh adalah teknologi penyimpanan dan pemanfaatan karbon (*Carbon Capture and Utilization*, CCU) yang menangkap CO<sub>2</sub> dari atmosfer atau dari proses industri untuk kemudian diolah menjadi produk baru yang bernilai, seperti bahan bakar sintetis atau material konstruksi (Abdullah et al., 2023; Arias et al., 2022; Legout et al., 2022; Ling et al., 2024; S. Ma et al., 2024; Munawaroh et al., 2019; Noor et al., 2024; Park et al., 2024; Pusparizkita et al., 2023; Rivera & Gerven, 2020; Rosseira et al., 2023; Salleh et al., 2021; Sari et al., 2023; Zevenhoven et al., 2019).

Jika tidak dikelola dengan baik, emisi CO<sub>2</sub> menyebabkan masalah lingkungan yang serius, seperti pemanasan global dan perubahan iklim (Hogan et al., 2024; Nunes, 2023; Rezvi et al., 2023; Slingo & Slingo, 2024). Pemanasan global adalah kenaikan suhu rata-rata bumi akibat peningkatan jumlah gas rumah kaca, terutama CO<sub>2</sub>, yang menjebak panas di atmosfer. Perubahan iklim melibatkan serangkaian fenomena yang lebih luas, seperti peningkatan suhu, perubahan pola cuaca, kenaikan permukaan laut, serta intensifikasi peristiwa cuaca ekstrem seperti banjir dan kekeringan. Selain itu, jika kadar CO<sub>2</sub> di udara melebihi ambang batas normal yaitu sebesar 600 ppm dan maksimal 5000 ppm akan berpengaruh negatif terhadap kesehatan manusia, yaitu dapat menyebabkan sakit kepala, kelelahan, kurang konsentrasi, dan sesak napas (Dasmen & Akbar, 2023; Junaedy et al., 2022; Küçüküşeyin, 2021; Wulandari & Yohandri, 2023). Pada konsentrasi tinggi, CO<sub>2</sub> di udara dapat menyebabkan gangguan kesehatan, seperti sakit kepala, kelelahan, dan kesulitan bernapas. Kondisi ini sering terjadi di lingkungan dengan ventilasi yang buruk atau di daerah dengan polusi udara tinggi. Jika tidak diatasi, paparan jangka panjang terhadap CO<sub>2</sub> dapat menyebabkan efek kesehatan yang lebih serius. Realitanya, kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer terus meningkat akibat aktivitas manusia yang belum sepenuhnya beralih ke teknologi ramah lingkungan (Ghosh et al., 2024; Hou et al., 2024; Kim et al., 2024; Lee et al., 2024; Livescu et al., 2024; Rodriguez-Navarro et al., 2023; Rojas-Buzo et al., 2024; Sari et al., 2023; Sun et al., 2024; Walerowski et al., 2024). Pada kondisi normal, kadar CO<sub>2</sub> di atmosfer adalah sekitar 400 ppm, tetapi dalam banyak lingkungan perkotaan dan industri, konsentrasinya bisa jauh lebih tinggi. Batas aman CO<sub>2</sub> adalah 600 ppm, dengan ambang batas maksimum yang diizinkan mencapai 5000 ppm. Peningkatan kadar ini menggambarkan adanya kesenjangan besar antara kondisi ideal yang diinginkan dan kenyataan di lapangan. Maka dari itu, untuk mengatasi kesenjangan tersebut, diperlukan solusi yang lebih inovatif dan berkelanjutan dalam pengelolaan CO<sub>2</sub>. Salah satu solusinya adalah mengonversi CO<sub>2</sub> menjadi produk yang bermanfaat melalui proses kimia tertentu. Proses karbonasi, misalnya, memungkinkan CO<sub>2</sub> bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) untuk membentuk Precipitated Calcium Carbonate (PCC), suatu senyawa yang memiliki banyak aplikasi di berbagai industri. PCC adalah produk turunan dari reaksi antara CO<sub>2</sub> dan Ca(OH)<sub>2</sub> yang memiliki nilai ekonomi tinggi. PCC banyak digunakan dalam industri kertas sebagai bahan pemutih, dalam industri karet dan plastik sebagai filler, dan dalam industri makanan, farmasi, dan kosmetik sebagai bahan pengisi atau penambah stabilitas produk (Cai et al., 2023; Khan et al., 2024; Leong & Chang, 2023; Y. Ma et al., 2024; Wulandari & Yohandri, 2023). Sehingga, dengan demikian, konversi CO<sub>2</sub> menjadi PCC menawarkan keuntungan tidak hanya dalam mengurangi emisi karbon, tetapi juga memberikan nilai ekonomi tambahan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa proses karbonasi dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, seperti laju CO<sub>2</sub> yang masuk ke dalam larutan, konsentrasi larutan kalsium hidroksida, durasi waktu interaksi antara CO<sub>2</sub> dan larutan, serta kecepatan pengadukan (Cai et al., 2023; Dhakshinamoorthy et al., 2024; Koch et al., 2023; Kuliyeve et al., 2023; Ling et al., 2024; Rizzetto et al., 2024; Sadig et al., 2023; Zimmerli et al., 2024). Semua faktor ini memainkan peran penting dalam menentukan efisiensi dan hasil akhir dari proses karbonasi. Namun, penelitian yang sudah ada masih terbatas pada kondisi atmosferik normal, dan belum banyak yang mengeksplorasi penggunaan sistem reaktor bertekanan untuk meningkatkan interaksi antara CO<sub>2</sub> dan larutan.

Penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengembangkan sistem reaktor bertekanan yang dilengkapi dengan pengadukan untuk meningkatkan efisiensi proses karbonasi. Reaktor bertekanan memungkinkan interaksi lebih intens antara CO<sub>2</sub> dan Ca(OH)<sub>2</sub>, sehingga diharapkan dapat menghasilkan PCC dengan kualitas yang lebih baik. Pendekatan ini berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya dilakukan pada tekanan atmosferik. Penelitian ini sangat mendesak dilakukan karena peningkatan emisi CO<sub>2</sub> menjadi salah satu isu lingkungan paling kritis saat ini. Dengan adanya inovasi dalam pengelolaan CO<sub>2</sub> yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga bernilai ekonomis, solusi ini dapat berkontribusi signifikan dalam mengurangi dampak perubahan iklim global. Tujuan utama dari penelitian ini adalah menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi proses karbonasi dalam sistem reaktor bertekanan, seperti kecepatan pengadukan, tekanan sistem reaksi, dan waktu interaksi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi yang lebih efisien untuk mengonversi CO<sub>2</sub> menjadi produk yang berguna, seperti PCC, yang memiliki aplikasi luas di berbagai sektor industri.

## 2. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan pengadukan, tekanan sistem reaksi, dan waktu interaksi dalam proses karbonasi. Desain penelitian yang digunakan adalah desain eksperimen laboratorium, yang bertujuan untuk mengukur variabel-variabel terkontrol yang mempengaruhi hasil reaksi. Penelitian ini melibatkan penggunaan larutan kalsium hidroksida ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) yang diperoleh dari CV. Kasugian Jaya, Cilegon, Banten-Indonesia sebanyak 200 ml dengan konsentrasi 19,1%, gas  $\text{CO}_2$  teknis dengan kemurnian 99,9%, serta peralatan penelitian seperti reaktor, pengaduk, dan oven. Variasi yang diuji mencakup kecepatan pengadukan (400 dan 500 rpm), waktu interaksi (15, 30, 45, dan 60 menit), dan ketinggian air dalam pipa (10-100 cm). Pengumpulan data melibatkan 4 kali replikasi untuk setiap variabel, sehingga total subjek uji coba sebanyak 32. Adapun peralatan penelitian yang digunakan disajikan pada [Gambar 1](#).



**Gambar 1.** Skematik Peralatan Penelitian (Metode Karbonasi)

Variabel penelitian yang terlibat pada penelitian ini adalah kecepatan pengadukan, waktu interaksi, dan ketinggian air di dalam pipa. Untuk pengumpulan data penelitian guna menganalisa pengaruh kecepatan pengadukan, tekanan sistem reaksi, dan waktu interaksi yang termaktub di dalam tujuan penelitian, dilakukan dengan cara gravimetri dan analisis instrumentasi. Adapun prosedur penelitian yang dilakukan dimulai dari tahap mengisi air pada ketinggian tertentu sesuai variasi (10- 100 cm) pada pipa 1", kemudian memasukkan 200 ml larutan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ke dalam reaktor. Langkah selanjutnya adalah menjalankan pengaduk pada kecepatan tertentu (400 dan 500 rpm), dan mengalirkan gas  $\text{CO}_2$  dengan laju alir 2 lpm (liter/menit) dengan waktu interaksi (waktu kontak) tertentu (15, 30, 45, dan 60 menit). Ketika proses reaksi telah mencapai waktu interaksi yang telah ditentukan, maka reaksi dihentikan. Tahap selanjutnya adalah memisahkan endapan PCC hasil reaksi menggunakan kertas saring, lalu dikeringkan di dalam oven pada suhu  $110^\circ\text{C}$  selama 2 jam. Serbuk PCC hasil pengeringan, ditimbang untuk mengetahui berat PCC yang dihasilkan pada setiap variabel yang diamati. Selain itu, serbuk PCC yang diperoleh dilakukan karakterisasi melalui uji *Fourier Transform Infrared* (FTIR) untuk memastikan bahwa benar terjadi reaksi antar reaktan ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), uji *x-ray diffraction* (XRD) dan uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui kandungan kristal dan morfologi permukaan kristal dari PCC yang terbentuk.

Selanjutnya, dilakukan tahap pengolahan data penelitian yang dimulai dengan pengukuran massa PCC yang dihasilkan dari setiap variabel yang diamati. Konversi ketinggian air dalam pipa terhadap tekanan sistem reaksi dapat dilihat [Gambar 1](#) terhadap tekanan sistem reaksi. Pendekatan perhitungan tekanan sistem reaksi menggunakan tekanan hidrostatik didasarkan pada konsep aksi -re-aksi ( hukum kekekalan energi). Pada saat tekanan hidrostatik air sebesar P (aksi), maka tekanan P (re-aksi) pada gas  $\text{CO}_2$  sama dengan tekanan hidrostatiknya ( $P_{\text{reaksi}} = P_{\text{hidrostatik}}$ ). Pendekatan ini diperkuat dengan hukum 1 termodinamika (Smith et. al, 2018) terkait "*mechanical energy balance*". Jika perubahan tekanan sistem hanya dipengaruhi oleh perubahan ketinggian dan densitas air, maka perubahan tekanan dapat dihitung sesuai dengan kondisi tersebut, sehingga pendekatan ini cukup logis. Namun, validasi menggunakan alat pengukur tekanan (*pressure gauge*) perlu dilakukan di masa mendatang untuk memastikan nilai tekanan yang lebih akurat. Adapun hasil konversi ketinggian air pada pipa penelitian disajikan pada [Tabel 1](#).

**Tabel 1.** Hasil Konversi Ketinggian Air pada Pipa Penelitian ke dalam Tekanan Hidrostatik

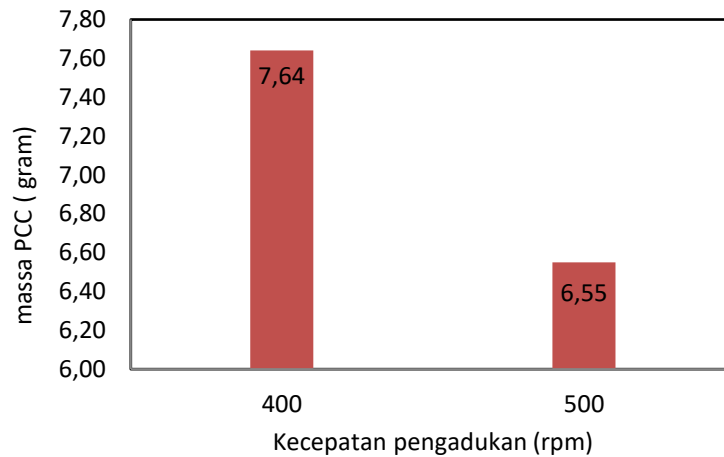
No.	Ketinggian air dari ujung selang luaran reaktor, h (m)	Tekanan sistem reaksi,P (Pa)
1	0,10	980
2	0,30	2940
3	0,60	5880
4	1,00	9800

Tahap selanjutnya adalah membandingkan massa PCC yang dihasilkan pada setiap variabel yang berpengaruh (kecepatan pengadukan, waktu interaksi, dan tekanan), serta mempelajari fenomena yang terjadi selama proses reaksi dengan merujuk pada literatur yang relevan. Analisis instrumen dilakukan untuk menentukan jenis kristal PCC yang terbentuk, apakah kalsit, aragonite, atau vaterite (Nunes, 2023; Nuryoto et al., 2021).

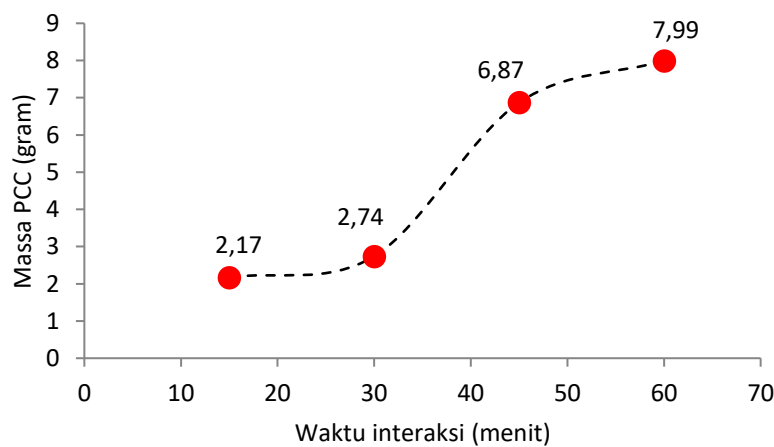
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil

Pengaruh kecepatan pengadukan terhadap produk PCC terlihat bahwa peningkatan kecepatan pengadukan yang dilakukan pada sistem reaksi justru berdampak pada penurunan produk PCC yang dihasilkan. Pada kecepatan pengadukan 400 rpm produk PCC yang dihasilkan sebesar 7,99 gram dan menjadi 6,55 gram pada 500 rpm. Berikut merupakan diagram hasil perhitungan dari pengaruh kecepatan pengadukan terhadap produk PCC disajikan pada Gambar 2.

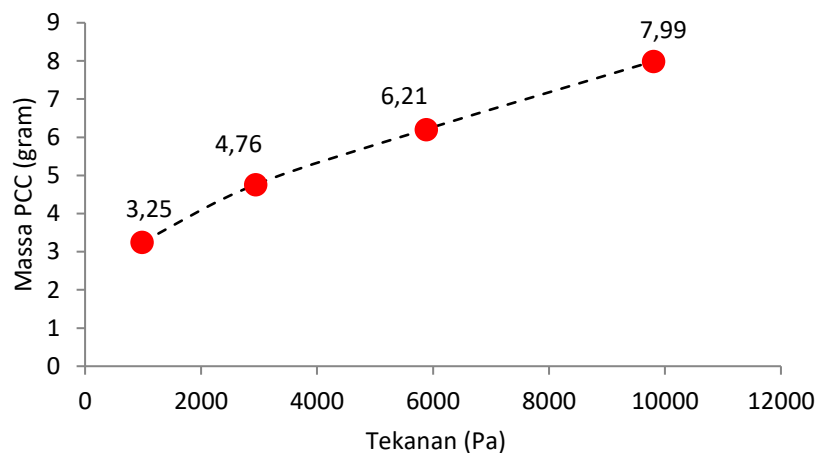


**Gambar 2.** Pengaruh Kecepatan Pengadukan Terhadap Produk PCC pada Tekanan 9800 Pa dan Waktu Interaksi 60 Menit



**Gambar 3.** Pengaruh Waktu Interaksi Terhadap Produk PCC pada Tekanan 9800 Pa dan Kecepatan Pengadukan 400 rpm

Pengaruh Waktu Interaksi terhadap produk PCC menunjukkan bahwa peningkatan waktu interaksi yang diberikan pada reaksi antara  $\text{CO}_2$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ternyata diikuti dengan peningkatan produk PCC yang dihasilkan. Pada waktu interaksi 15, 30, 45 dan 60 menit secara berurutan produk PCC yang dihasilkan sebanyak 2,17; 2,74; 6,87; dan 7,99 gram. Berikut merupakan diagram hasil perhitungan dari pengaruh waktu interaksi disajikan pada Gambar 3. Pengaruh tekanan terhadap produk PCC, terlihat bahwa peningkatan tekanan sistem reaksi, diikuti dengan peningkatan produk PCC yang dihasilkan. Produk PCC yang dihasilkan pada tekanan 980, 2940, 5880, dan 9800 Pa secara berurutan adalah 3,25; 4,76; 6,21; dan 7,99 gram. Berikut merupakan diagram hasil perhitungan dari pengaruh tekanan disajikan pada Gambar 4.



**Gambar 4.** Pengaruh Tekanan Terhadap Produk PCC pada Waktu Interaksi 60 Menit dan Kecepatan Pengadukan 400 rpm

### Pembahasan

Peningkatan kecepatan pengadukan yang dilakukan berakibat terhadap penurunan produk PCC yang dihasilkan sesuai dengan Gambar 2. Pengaruh kecepatan pengadukan terhadap produk PCC. Jika mengacu pada Persamaan (6), peningkatan kecepatan pengadukan seharusnya akan berdampak pada peningkatan *interfacial area* ( $a$ ) yang akan meningkatkan interaksi reaksi yang (Conejo, 2020; Madhania et al., 2020). Hasil pengamatan yang dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan bahwa, peningkatan kecepatan pengadukan dari 200 menjadi 420 rpm, berpengaruh pada peningkatan *interfacial area* ( $a$ ) yaitu dari 24,8 menjadi 75,7  $\text{m}^2/\text{m}^3$ . Peningkatan *interfacial area* ( $a$ ) terjadi karena proses pengadukan yang dilakukan akan memecah gelembung-gelembung  $\text{CO}_2$  yang berukuran lebih besar yang keluar dari distributor menjadi gelembung-gelembung yang lebih kecil, sehingga luas bidang kontak (*interfacial area*) mengalami peningkatan. Tetapi semuanya ada titik maksimal, yang mana pada kecepatan pengadukan tertentu, peningkatan kecepatan pengadukan yang dilakukan justru akan menimbulkan *vortex* (pusaran) yang akan menyebabkan difusi gas terganggu.

Jika fenomena ini terjadi maka gas  $\text{CO}_2$  akan lolos begitu saja melalui pusaran tersebut tanpa berinteraksi dengan cairan. Pada penelitian ini (pada kecepatan pengadukan 500 rpm), terlihat secara visual pusaran ditengah cairan terlihat lebih besar dibandingkan pada 400 rpm, dan jumlah gelembung  $\text{CO}_2$  yang seharusnya kontak dengan larutan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  keluar dari lubang distributor menuju pusat pusaran. Akibatnya gas yang kontak dengan cairan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  semakin sedikit, dan berimbas turunnya produk PCC yang dihasilkan. Ketika dibandingkan dengan referensi yang ada menunjukkan bahwa produk PCC yang dihasilkan pada penelitian masih ini cenderung lebih banyak. Observasi dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan bahwa, dengan pengadukan 900 rpm, produk PCC yang dihasilkan hanya 3,85 gram PCC dan hampir setara dengan yang dilakukan tanpa pengaduk yaitu 2,44 gram yang dilakukan oleh (Khine et al., 2022; Madhania et al., 2020). Berdasarkan data tersebut, maka observasi kecepatan pengadukan perlu tetap dilakukan jika ingin melakukan sintesis PCC dengan kondisi reaksi yang berbeda, misalnya berbeda laju  $\text{CO}_2$ , konsentrasi larutan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  atau viskositas. Hal ini perlu dilakukan karena perbedaan kondisi operasi akan berpengaruh pada kecepatan pengadukan optimal yang dihasilkan. Fenomena yang terjadi pada Gambar 3 terjadi karena probabilitas atau kemungkinan yang mana antar reaktan untuk saling berinteraksi guna saling bertumbuk antara ion reaktan ( $\text{CO}_2$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) akan semakin meningkat. Hasil pada penelitian ini memiliki persamaan dengan penelitian peneliti lain (Khine et al.,

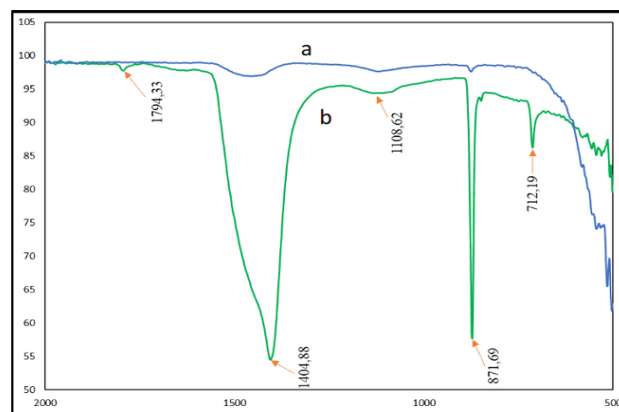


2022; Madhania et al., 2020). Pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain pada rentang waktu interaksi 25-44 menit, produk PCC yang dihasilkan 2,09 gram untuk waktu interaksi 30 menit dan 2,44 gram untuk waktu interaksi 44 menit. Sedangkan pada penelitian oleh peneliti kedua yang melakukan penelitian pada rentang waktu interaksi 0-500 jam, terjadi peningkatan rasio massa antara massa akhir reaksi/massa awal sebelum reaksi, yang artinya terjadi peningkatan produk PCC, yaitu dari 1 menjadi 1,77 (dari 0 ke 500 jam). Sebenarnya terbentuknya produk PCC pada proses reaksi dapat secara visual dari perubahan warna *powder* yang dihasilkan. Hasil kajian yang dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan bahwa, bahan baku yang awalnya mempunyai kecerahan 96% menjadi 98,99% setelah terbentuk produk PCC. Hasil uji secara visual pada penelitian. Pada Gambar 5 juga menunjukkan fenomena serupa, yaitu terjadi perubahan warna *powder* dari bahan baku sampai pada waktu interaksi 15-60 menit. Adapun produk PCC disajikan pada Gambar 5.



**Gambar 5.** Pengaruh Peningkatan Produk PCC Terhadap Warna *Powder*: (a) Bahan Baku, (b) 15 menit, (c) 30 Menit, (d) 45 Menit, dan (e) 60 Menit

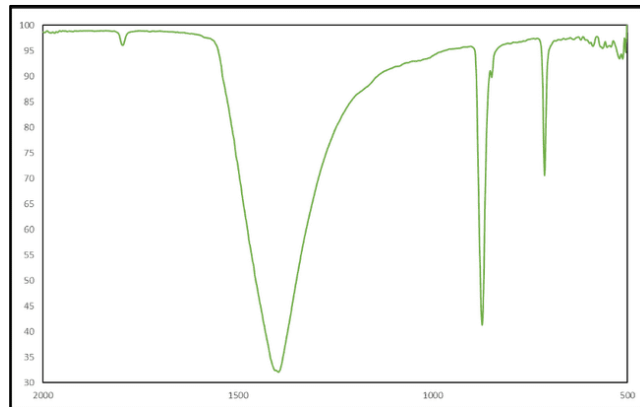
Warna bahan baku yang awalnya berwarna putih kekuningan menjadi lebih putih dan lebih cerah seiring bertambahnya waktu interaksi (Gambar 5). Bila diurutkan berdasarkan tingkat kecerahan dari putih kekuningan sampai warna putih paling cerah adalah (a) < (b) < (c) < (d) < (e). Menurut peneliti lain warna kekuningan yang terlihat khususnya pada bahan baku akibat adanya *impurities* Fe yang terkandung di dalam bahan baku  $\text{Ca(OH)}_2$  yang bersumber dari CaO, dan warna kekuningan akan cenderung memudar seiring berkurang konsentrasi Fe karena semakin banyak produk PCC yang terbentuk. Maka dari itu, untuk meyakinkan bahwa memang produk PCC terbentuk dilakukan uji FTIR, yang tersaji pada Gambar 6 berupa hasil uji FTIR). Adapun gambar grafik hasil perhitungan uji FTIR disajikan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Hasil Uji FTIR : (a) Bahan Baku  $\text{Ca(OH)}_2$  dan (b) Produk PCC yang Dihasilkan pada Tekanan 9800 Pa, Waktu Interaksi 60 Menit, dan Kecepatan Pengadukan 400 rpm

Pada Gambar 6 terlihat terjadi perubahan *peak-peak* yang sangat signifikan. Bahan baku  $\text{Ca(OH)}_2$  yang awalnya ditunjukkan pada peak (a) menjadi peak (b) setelah dilakukan kontak dengan  $\text{CO}_2$ . Setelah dilakukan komparasi dari uji FTIR standar PCC yang ditunjukkan pada Gambar 7 (Hasil Uji FTIR

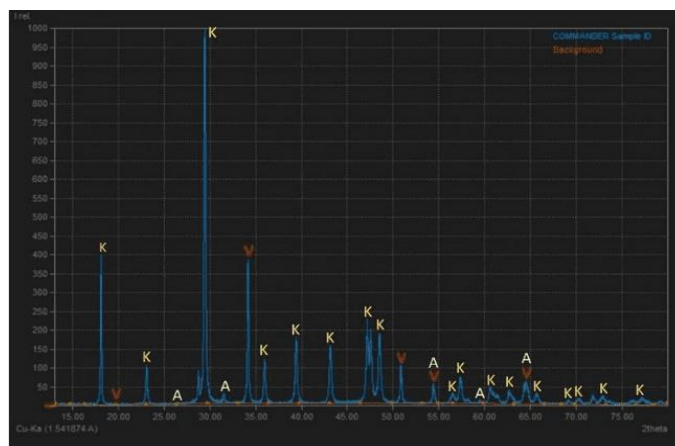
standar PCC) terdapat kemiripan. Oleh karena itu dapat dipastikan bahwa produk PCC pada penelitian ini terbentuk.



**Gambar 7.** Hasil Uji FTIR Standar PCC ( $\text{CaCO}_3$ )

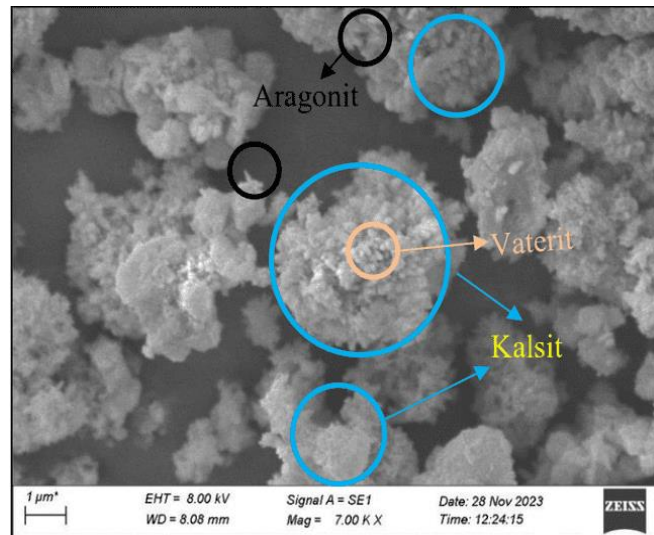
Peningkatan tekanan sistem reaksi yang diberikan berdampak positif terhadap perolehan produk yang dihasilkan mengacu pada persamaan (2) – (5), hal ini terjadi karena semakin tinggi tekanan sistem, maka kelarutan  $\text{CO}_2$  ( $X_{\text{CO}_2}$ ) akan semakin besar, dan akan diikuti dengan semakin besarnya interaksi dan laju reaksi kimia yang terjadi antara  $\text{CO}_2$ - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Efeknya produk PCC yang dihasilkan akan semakin meningkat. Hasil serupa juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh (Cai et al., 2023; Chen et al., 2024). Pada penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan bahwa, pada proses pengkonversian  $\text{CO}_2$  menjadi etanol, yang mana pada tekanan 0,8 produk etanol yang dihasilkan adalah 0,1156 gram/liter, dan mengalami kenaikan menjadi 0,2780 gram/liter pada tekanan 1,6 bar. Pada penelitian yang berbeda yang dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan bahwa menjerap gas  $\text{NO}_x$  pada larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , terlihat pada tekanan 200 psia mempunyai kelarutan gas  $\text{NO}_x$  lebih besar dibandingkan pada tekanan 100 Psia (Cihanoglu et al., 2022; Conejo, 2020).

Maka dari itu, untuk menentukan jenis kristal dari produk PCC yang dihasilkan, pada penelitian ini juga dilakukan uji XRD dan SEM. Berdasarkan pada pengolahan data hasil uji XRD pada Gambar 8 menggunakan *Math software* dan dibandingkan dengan data analisa sampel serta dibandingkan dengan data *Standar International Centre for Diffraction Data (ICDD)* terlihat bahwa produk PCC yang dihasilkan pada penelitian ini terdiri dari Kalsit (K), Vaterit (V), dan Aragonit (A), dengan komposisi 72,4% kalsit, 20% vaterit, dan 7,6% aragonit. Persentase ini didasarkan pada frekuensi munculnya peak-peak yang ada. Pada Gambar 9 terkait hasil uji SEM pada Produk PCC terlihat bahwa peak yang muncul lebih banyak didominasi oleh kristal kalsit yang mempunyai sudut difraksi ( $2\theta$ ) 23,1°, 29,4°, 31,6°, 36°, 39,4°, 43,2°, 47,5°, 48,5°. Untuk aragonit memiliki sudut difraksi 26,2°, 27,2°, 33,1°, 45,8°, 50,2°, 52,5°, 52,9°; dan vaterit memiliki sudut difraksi 21°, 24,9°, 27,1°, 32,7°, 43,8°, 50,1°, 55,6° (Cihanoglu et al., 2022; Luo et al., 2020).

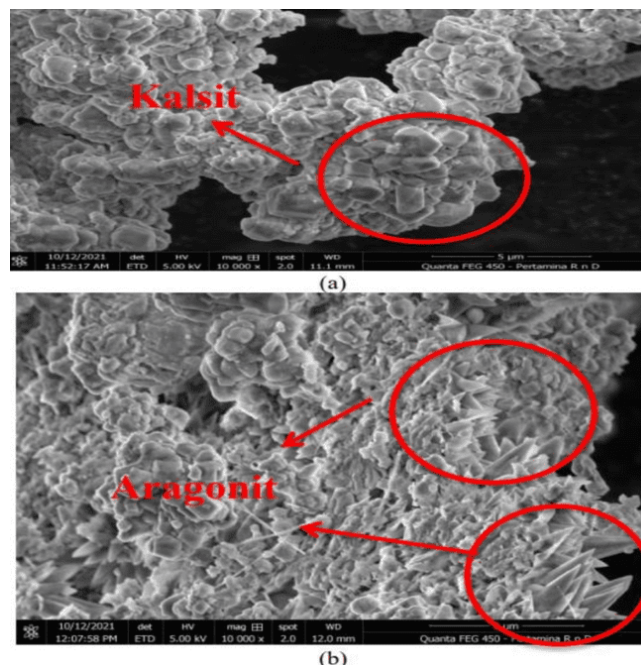


**Gambar 8.** Hasil Pengolahan Data Uji XRD PCC yang Dilakukan pada Sampel yang Diambil pada Tekanan 9800 Pa, Waktu Interaksi 60 menit, dan Kecepatan Pengadukan 400 rpm

Hasil olah data pada **Gambar 8** diperkuat juga dengan hasil uji morfologi menggunakan uji SEM. Hasil komparasi antara penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain menunjukkan adanya kemiripan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain yang telah dilakukan identifikasi (yang mana kalsit memiliki bentuk rhombohedral, kubus scalenohedral, dan prismatic, sedangkan aragonite memiliki bentuk orthorhombic, dan vaterite memiliki bentuk hexagonal, produk PCC yang dihasilkan pada penelitian oleh peneliti lain terdapat 3 jenis kristal yaitu kalsit, aragonit, dan vaterit. Hasil serupa juga dihasilkan pada penelitian ini, yang mana terdapat jenis kristal yaitu kalsit, aragonite, dan vaterite ([Sari et al., 2023](#); [Zimmerli et al., 2024](#)). Jadi Hasil olah data pada cukup valid guna menentukan komposisi produk PCC, pada penelitian ini terdiri dari jenis kristal kalsit, aragonit, dan vaterit. Berikut merupakan hasil uji SEM penelitian ini disajikan pada **Gambar 9**, sedangkan hasil uji SEM yang dilakukan oleh peneliti lain disajikan pada **Gambar 10**.



**Gambar 9.** Hasil Uji SEM pada Produk PCC yang Dilakukan pada Tekanan 9800 Pa, Waktu Interaksi 60 menit, dan Kecepatan Pengadukan 400 rpm



**Gambar 10.** Hasil Uji SEM pada Penelitian yang Dilakukan oleh Naldi et. al., 2023.

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan menganalisis pengaruh signifikan dari kecepatan pengadukan, waktu interaksi, dan tekanan terhadap pembentukan PCC, memberikan wawasan baru mengenai kondisi optimal untuk sintesis PCC. Hasil penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam bidang sintesis PCC, khususnya dalam optimasi kondisi reaksi untuk meningkatkan efisiensi produksi.



Penemuan ini dapat menjadi acuan bagi industri yang menggunakan PCC dalam proses produksinya. Temuan penelitian ini dapat diterapkan dalam industri yang membutuhkan produk PCC dengan kualitas tinggi, serta memberikan dasar bagi penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan kondisi reaksi yang lebih kompleks. Penelitian ini masih terbatas pada rentang kecepatan pengadukan dan tekanan tertentu, sehingga diperlukan penelitian lanjutan dengan variasi kondisi yang lebih luas. Selain itu, studi mengenai pengaruh parameter lain seperti konsentrasi larutan dan jenis gas lain juga perlu dilakukan untuk memperluas aplikasi hasil penelitian ini.

#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan, faktor tekanan, waktu interaksi, dan pengadukan yang diberikan memiliki pengaruh terhadap laju reaksi antara reaktan ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), dan berdampak pada mssa PCC yang dihasilkan. Kecepatan pengadukan yang diberikan tidak selalu berdampak positif terhadap produk PCC yang dihasilkan, dan ada titik maksimalnya. Ketika vortex atau pusaran pada sistem reaksi telah terjadi, maka berpotensi menurunkan interaksi gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  dan menurunkan massa produk PCC yang dihasilkan. Berdasarkan hasil olah data XRD dan diperkuat dari uji SEM jenis kristal PCC yang dihasilkan pada penelitian ini didominasi oleh kalsit dengan sedikit vaterit dan aragonit. Pada dasarnya penelitian ini masih terdapat kelemahan, khususnya pada indikasi tekanan. Jadi peneliti yang akan mengembangkan lebih lanjut, maka perlu memasang indikator tekanan (*pressure gauge*) agar besarnya tekanan yang ditunjukkan pada sistem reaksi lebih valid dan informatif.

#### 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih atas pendanaan melalui Hibah Penelitian Dasar Internal LPPM Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, sesuai SK Rektor No. 253/UN43/KP.HK.02/2024 dan Kontrak Penelitian No.: B/294/UN.43.9/PT.01.03/2024, sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan dapat terpublish. Semoga penelitian bermanfaat untuk perkembangan ilmu dan teknologi khususnya pemanfaatan gas  $\text{CO}_2$  menjadi PCC.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, S. N., Hamzah, F., Husain, N. C., Veny, H., Rodhi, M. N. M., & Mohidem, N. A. (2023). Effect of Temperature and  $\text{CO}_2$  Flowrate on the Formation of  $\text{CaCO}_3$  in the Hydration Reaction of  $\text{CO}_2$  Catalyzed by Immobilized Carbonic anhydrase into PVDF Membrane. *Chemical Engineering Transactions*, 106(170), 1015–1020. <https://doi.org/10.3303/CET23106170>.
- Arias, B., Criado, A., Y., P., B., & Abanades, J. C. (2022). Carbonation kinetics of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  under conditions of entrained reactors to capture  $\text{CO}_2$ . *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(9), 3272–3277. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04888>.
- Cai, J., Zhao, Q., Hsu, W. Y., Choi, C., Liu, Y., Martinez, J. M. P., & Huang, Y. (2023). Highly selective electrochemical reduction of  $\text{CO}_2$  into methane on nanotwinned Cu. *Journal of the American Chemical Society*, 145(16), 9136–9143. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c00847>.
- Chen, Z., Wang, W., Forzieri, G., & Cescatti, A. (2024). Transition from positive to negative indirect  $\text{CO}_2$  effects on the vegetation carbon uptake. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45957-x>.
- Cihanoglu, G., Karabiyik, M., Odabasi, I., & Balkose, D. (2022). Composition, Morphology, Optical, Thermal and Mechanical Properties of Yogurt Containers. *European Journal of Technique*, 12(2), 145–151. <https://doi.org/10.36222/ejt.1054357>.
- Conejo, A. N. (2020). Physical and mathematical modelling of mass transfer in ladles due to bottom gas stirring: A review. *Processes*, 8(7), 750. <https://doi.org/10.3390/pr8070750>.
- Dasmen, R. N., & Akbar, R. (2023). Air Quality Monitoring System And Air Neutralizer In Hotel Rooms With Notification Via Telegram. *Tech-E*, 6(2), 17–24. <https://jurnal.buddhidharma.ac.id/index.php/te/article/view/1842>.
- Dhakshinamoorthy, A., Navalón, S., Primo, A., & García, H. (2024). Selective Gas-Phase Hydrogenation of  $\text{CO}_2$  to Methanol Catalysed by Metal-Organic Frameworks. *Angewandte Chemie*, 136(3), 202311241. <https://doi.org/10.1002/ange.202311241>.
- Ghosh, A., Nag, D., Chatterjee, R., Singha, A., Dash, P. S., Choudhury, B., & Bhaumik, A. (2024).  $\text{CO}_2$  to dimethyl ether (DME): structural and functional insights of hybrid catalysts. *Catalysis Science & Technology*.
- Hogan, J. A., Domke, G. M., Zhu, K., Johnson, D. J., & Lichstein, J. W. (2024). Climate change determines the sign of productivity trends in US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(4),

2311132121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2311132121>.
- Hou, G., Wang, Q., Xu, D., Fan, H., Liu, K., Li, Y., & Ding, M. (2024). Dimethyl Carbonate Synthesis from CO<sub>2</sub> over CeO<sub>2</sub> with Electron-enriched Lattice Oxygen Species. *Angewandte Chemie International Edition*, e202402053. <https://doi.org/10.1002/anie.202402053>.
- Hu, H., Chen, J., Zhou, F., Nie, M., Hou, D., Liu, H., & Liang, Y. (2024). Relative increases in CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emissions from wetlands under global warming dependent on soil carbon substrates. *Nature Geoscience*, 1–6(17), 1. <https://www.nature.com/articles/s41561-023-01345-6>.
- Junaedy, S., Dan, Z. A., & Idaryani. (2022). Rancang Bangun Alat Kontroling Kadar Udara Bersih Dan Gas Berbahaya Co, Co<sub>2</sub> Dalam Ruangan Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Teknologi Dan Komputer (JTEK)*, 2(02), 216–222. <https://doi.org/10.56923/jtek.v2i02.104>.
- Khan, S., Das, P., Thaher, M., Abdulquadir, M., Faisal, M., Hawari, A. H., & Al-Jabri, H. (2024). Application note—A novel, low-cost pH-controlled solenoid-based CO<sub>2</sub> dosing device for microalgal and cyanobacterial cultivation systems. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100373. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100373>.
- Khine, E. E., Koncz-Horvath, D., Kristaly, F., Ferenczi, T., Karacs, G., Baumli, P., & Kaptay, G. (2022). Synthesis and characterization of calcium oxide nanoparticles for CO<sub>2</sub> capture. *Journal of Nanoparticle Research*, 24(7), 139. <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05518-z>.
- Kim, S., Lee, S. G., & Jeong, D. H. (2024). Direct Synthesis of Dimethyl Carbonate from CO<sub>2</sub>: From the Perspective of Dimethyl-Carbonate, A Promising Material for the Future. *Chemical Engineering Research and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.02.010>.
- Koch, C. J., Suhail, Z., Goepfert, A., & Prakash, G. S. (2023). CO<sub>2</sub> capture and direct air CO<sub>2</sub> capture followed by integrated conversion to methane assisted by metal hydroxides and a Ru/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *ChemCatChem*, 15(23), 202300877. <https://doi.org/10.1002/cctc.202300877>.
- Küçükhüseyni, Ö. (2021). CO<sub>2</sub> monitoring and indoor air quality. *REHVA Eur. HVAC J*, 58, 54–59.
- Kuliyev, S., Tas, Y. E., & Selim Cogenli, M. (2023). Control of CO<sub>2</sub> Absorption by NaOH Solution Using pH, Conductivity, and Titration Measurement. *Chemical Problems/Kimya Problemleri*, 21(2). <https://doi.org/10.32737/2221-8688-2023-2-123-131>.
- Lee, Y. G., Lee, H. U., Lee, J. M., Kim, N. Y., & Jeong, D. H. (2024). Design of Dimethyl Carbonate (DMC) Synthesis Process Using CO<sub>2</sub>, Techno-economic Analysis, and Life Cycle Assessment. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 41(1), 1–17. <https://orcid.org/0000-0002-4005-3153>.
- Legout, P., Lefebvre, G., Bonnin, M., Gimel, J. C., Benyahia, L., Gibaud, A., & Calvignac, B. (2022). Reactive precipitation of vaterite calcium carbonate microspheres in supercritical carbon dioxide-water dispersion by microfluidics. *The Journal of Supercritical Fluids*, 188, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105678>.
- Leong, Y. K., & Chang, J. S. (2023). Waste stream valorization-based low-carbon bioeconomy utilizing algae as a biorefinery platform. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178, 113245. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113245>.
- Ling, L. L., Guan, X., Liu, X., Lei, X. M., Lin, Z., & Jiang, H. L. (2024). Promoted hydrogenation of CO<sub>2</sub> to methanol over single-atom Cu sites with Na<sup>+</sup> decorated microenvironment. *National Science Review*, 11(6). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae114>.
- Liotta, L. F., & Wu, H. (2024). CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage: Catalysts Design. *Catalysts*, 14(1), 80. <https://doi.org/10.3390/catal14010080>.
- Livescu, A., Navar, R., Mangalindan, J. R., Mahnaz, F., Ge, Y., Shetty, M., & Yang, X. (2024). Catalysts for Clean Energy: A Review on Current Progress for the Catalyzed Recycling of CO<sub>2</sub> into Dimethyl Ether. In *Topics in Catalysis* (pp. 1–22). <https://doi.org/10.1007/s11244-024-01913-z>.
- Luo, X., Song, X., Cao, Y., & Bu, X. (2020). Investigation of calcium carbonate synthesized by steamed ammonia liquid waste without use of additives. *The Royal Society of Chemistry*, 10(13), 7976–7986. <https://doi.org/10.1039/C9RA10460G>.
- Ma, S., Huang, Y., Zhu, X., Xia, A., Zhu, X., & Liao, Q. (2024). Growth-based dynamic light transmission modeling and optimization in microalgal photobioreactors for high efficiency CO<sub>2</sub> fixation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 197, 114414. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114414>.
- Ma, Y., Zhang, X., Du, Z., Hou, H., & Zheng, Y. (2024). Research on Utilizable Calcium from Calcium Carbide Slag with Different Extractors and Its Effect on CO<sub>2</sub> Mineralization. *Materials*, 17(5), 1068. <https://doi.org/10.3390/ma17051068>.
- Madhania, S., Ihsana, Y., Rizaldy, M. Z., Afdiwibowo, A., Kusdianto, K., & Winardi, S. (2020). Preparation of precipitated calcium carbonate from carbon mineralization of raw biogas with Ca (OH)<sub>2</sub> solution using bubble column contactor. *AIP Conference Proceedings*, 2219(1). <https://doi.org/10.1063/5.0003060>.

- Munawaroh, F., Ahied, M., & Muharrami, L. K. (2019). The effect of Ca (OH)<sub>2</sub> slurry concentration on precipitated CaCO<sub>3</sub> product. *AIP Conference Proceedings*, 2202(1). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125259>.
- Noor, S., Rehman, A., Iqbal, S., Iqbal, M., & Rehman, E. W. U. (2024). Novel Applications Of Precipitated Calcium Carbonate In Food, Pharmaceutical, And Cosmetic Industry. *AND COSMETIC INDUSTRY. Journal of Population Therapeutics and Clinical Pharmacology*, 31(1), 529–543. <https://doi.org/10.53555/jptcp.v31i1.4039>.
- Nunes, L. J. (2023). The rising threat of atmospheric CO<sub>2</sub>: a review on the causes, impacts, and mitigation strategies. *Environments*, 10(4), 66. <https://doi.org/10.3390/environments10040066>.
- Nuryoto, N., Mas'ulunniah, N., Choerunnisa, A. S., & Suripno, S. (2021). Pemanfaatan Karbon Dioksida Untuk Sintesis Precipitated Calcium Carbonate (Pcc) Dengan Metode Karbonasi. *Jurnal Integrasi Proses*, 10(2), 90–95. <https://doi.org/10.36055/jip.v10i2.12286>.
- Okeke-Ogbuafor, N., Gray, T., Kamara, S., Sesay, E., Dauda, A., Stead, S. M., & Ani, K. J. (2024). Climate-smart fisheries: CO<sub>2</sub> emissions reduction and food security are complementary. *Marine Policy*, 159, 105926. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105926>.
- Park, J., Choi, W. Y., Jang, K., Lee, S., Kim, E., Moulay, I., & Lee, D. (2024). *Experimental And Integrated Computational Study On CCUS Technology Utilizing Desalinated Brine*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3690519/v1>.
- Pusparizkita, Y. M., Schmahl, W. W., Ambarita, M., Kholid, H. N., Sadewa, A. Y., Ismail, R., & Bayuseno, A. P. (2023). Mineralizing CO<sub>2</sub> and producing polymorphic calcium carbonates from bitumen-rock asphalt manufacturing solid residues. *Cleaner Engineering and Technology*, 12, 100602. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100602>.
- Rezvi, H. U. A., Tahjib-Ul-Arif, M., Azim, M. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M. H., Najnine, F., & Brestič, M. (2023). Rice and food security: Climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food and Energy Security*, 12(1), 430. <https://doi.org/10.1002/fes3.430>.
- Rivera, R. M., & Gerven, T. (2020). Production of calcium carbonate with different morphology by simultaneous CO<sub>2</sub> capture and mineralisation. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 41, 101241. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101241>.
- Rizzetto, A., Piumetti, M., Pirone, R., Sartoretti, E., & Bensaid, S. (2024). Study of ceria-composite materials for high-temperature CO<sub>2</sub> capture and their ruthenium functionalization for methane production. *Catalysis Today*, 429, 114478. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.114478>.
- Rodriguez-Navarro, C., Ilić, T., Ruiz-Agudo, E., & Elert, K. (2023). Carbonation mechanisms and kinetics of lime-based binders: An overview. *Cement and Concrete Research*, 173, 107301. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107301>.
- Rojas-Buzo, S., Salusso, D., Jouve, A., Bracciotti, E., Signorile, M., & Bordiga, S. (2024). CO<sub>2</sub> to dimethylcarbonate synthesis: Surface defects and oxygen vacancies engineering on MOF-derived CexZr1-xO2-y catalysts. *Applied Catalysis B: Environment and Energy*, 346(1), 123723. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2024.123723>.
- Rosseira, A. A., Hafizah, A. N., Fadzil, M. A., Faliq, M. B., Irfan, N. K., & Rohaya, O. (2023). Early CO<sub>2</sub> capturing mortar by incorporating a new potential carbide lime waste under controlled CO<sub>2</sub> curing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2521(1), 12007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2521/1/012007>.
- Sadig, K., Emre, T. Y., & Selim, C. M. (2023). Control Of Co<sub>2</sub> Absorption By Naoh Solution Using Ph, Conductivity And Titration Measurements. *Kimya Problemleri*, 21(2), 123–131. <https://cyberleninka.ru/article/n/control-of-co2-absorption-by-naoh-solution-using-ph-conductivity-and-titration-measurements>.
- Salleh, E. M., Othman, R., Mahim, Z., & Sabri, S. N. (2021). Effect of liquid feeding rate on carbonation of precipitated calcium carbonate via continuous method. *Journal of Physics*, 2080(1), 12017. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2080/1/012017>.
- Sari, E., Desmiarti, R., Arief, S., Rosadi, M. Y., Naldi, N., Hutagaol, H. A., & Kurniawan, E. (2023). Synthesis of precipitated calcium carbonate with the addition of aloe vera extract under different reaction temperatures. *International Journal of Applied Science and Engineering*, 20(1), 1–7. [https://doi.org/10.6703/IJASE.202303\\_20\(1\).007](https://doi.org/10.6703/IJASE.202303_20(1).007).
- Slingo, J. M., & Slingo, M. E. (2024). The science of climate change and the effect of anaesthetic gas emissions. *Anaesthesia*, 79(3), 252–260. <https://doi.org/10.1111/anae.16189>.
- Sun, C., Xia, Y., Ye, X., Xu, W., Shi, H., Gao, X., & Li, J. (2024). *Optimizing CO<sub>2</sub> Hydrogenation to DME through Tailored Interfacial Interactions: Weakening Synergy in CuZnZr and Al-Modified SBA-15 Catalysts*. Industrial & Engineering Chemistry Research. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03606>.
- Valluri, S., Claremboux, V., & Kawatra, S. (2022). Opportunities and challenges in CO<sub>2</sub> utilization. *Journal of*

- Environmental Sciences*, 113, 322–344. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.043>.
- Walerowski, M., Potter, M., Burke, E., Kyrimis, S., Armstrong, L. M., & Raja, R. (2024). *Designing Bifunctional Catalysts for the One-pot Conversion of CO<sub>2</sub> to Sustainable Marine Transportation Fuels*. *Catalysis Science & Technology*. <https://doi.org/10.1039/D4CY00020J>.
- Wulandari, V., & Yohandri. (2023). Design and Construction of Air Quality Monitoring System using NodeMCU IoT-Based. *Journal of Experimental and Applied Physics*, 1(2). <https://doi.org/10.24036/jeap.v1i2.23>.
- Zevenhoven, R., Legendre, D., Said, A., & Järvinen, M. (2019). Carbon dioxide dissolution and ammonia losses in bubble columns for precipitated calcium carbonate (PCC) production. *Energy*, 175, 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.112>.
- Zimmerli, N. K., Rochlitz, L., Checchia, S., Müller, C. R., Copéret, C., & Abdala, P. M. (2024). Structure and role of a Ga-promoter in Ni-based catalysts for the selective hydrogenation of CO<sub>2</sub> to Methanol. *JACS Au*, 4(1), 237–252. <https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00677>.