

Submitted : 31 Agustus 2021

Revised : 20 September 2021

Accepted : 15 November 2021

PEMANFAATAN KARBON DIOKSIDA UNTUK SINTESIS *PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE* (PCC) DENGAN METODE KARBONASI

Nuryoto^{1*}, Nia Mas'ulunniah¹, Alya Sholikhatul Choerunnisa¹, dan Suripno²

¹Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jl. Raya Jendral Sudirman Km. 3 Cilegon, Banten, Indonesia

²CV. Kasugihan Jaya, Cilegon, Banten

* Email: nuryoto@untirta.ac.id

Abstrak

Pada proses industri, khususnya di bagian pembakaran selalu menghasilkan gas buang karbon dioksida (CO₂), yang memicu pemanasan global. Langkah alternatif yang dapat diambil guna mengurangi kadar CO₂ adalah dengan menjadikan produk lain yang lebih bermanfaat. Tindakan ini akan berdampak baik pada lingkungan dan meningkatkan keekonomisan proses produksi itu sendiri. Secara teoritik, ketika CO₂ dikontakan dengan Ca(OH)₂ maka akan membentuk *precipitated calcium carbonate* (PCC). Tujuan penelitian ini difokuskan untuk observasi pengaruh waktu kontak dan laju alir gas CO₂ yang dipadukan terhadap kecepatan pengadukan tertentu di dalam sistem reaksi guna menghasilkan produk PCC yang maksimal. Penelitian dilakukan secara semi batch, yaitu CO₂ dialirkan secara kontinu dengan laju 1-3 liter/menit (lpm) dan waktu kontak 10-30 menit, dengan kecepatan pengadukan 300 rpm. Hasil riset menunjukkan bahwa seiring terjadi peningkatan laju gas CO₂ dan waktu kontak, diikuti dengan peningkatan produk PCC yang dihasilkan. Hasil produk PCC tertinggi diperoleh pada laju CO₂ 3 lpm dan waktu kontak 30 menit dengan massa PCC sebesar 12,11 gram.

Kata kunci: Karbon Dioksida, Kalsium, PCC, Karbonasi

Abstract

In the industrial processes, especially in the combustion section, carbon dioxide (CO₂) exhaust gases have been produced, which trigger global warming. CO₂ can be reduced by converting it into useful products. This action would have a good impact on the environment and increase the economical value of the production process itself. Theoretically, when CO₂ is in contact with the milk of limes, it will form Precipitated Calcium Carbonate (PCC). The purpose of this study was to focus on observing the effect of the contact time and flow rate of CO₂ gas that combined on a certain stirring speed in the reaction system to maximize PCC production. The study was conducted in a semi-batch reactor, in which CO₂ was flowed continuously at a rate of 1-3 liters/minutes (lpm) and contact time of 10-30 minutes, by stirring speed of 300 rpm. Observation results show that as the rate of CO₂ gas and contact time increases, it will be followed by an increase in the resulting PCC product. The highest PCC product was obtained at the CO₂ rate of 3 lpm and a contact time of 30 minutes by a PCC mass of 12.11 grams.

Keywords: Carbon Dioxide, Calcium, PCC, Carbonation

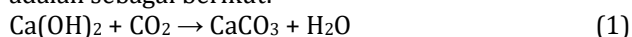
1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri di dunia dari tahun ke tahun menunjukkan peningkatan, begitu pula di Indonesia (Kemementrian Perindustrian RI, 2020; Yusof, 2011). Pada proses industri, seringkali menghasilkan gas buang seperti karbon dioksida (CO₂)

yang merupakan salah satu dari senyawa hasil pembakaran yang dapat mengakibatkan pemanasan global. Oleh karena itu gas CO₂ disebut juga dengan istilah gas rumah kaca. Untuk itu perlu diambil tindakan strategis guna mengurangi kadar CO₂ di

udara, dengan memanfaatkannya menjadi produk lain sebelum dibuang ke lingkungan.

Di dunia, banyak dijumpai batu kapur dengan cadangan yang sangat besar. Di Indonesia kandungan batu kapur kurang lebih sekitar 2.160 milyar ton (Aziz, 2010), tetapi keberadaan batu kapur yang melimpah belum dimanfaatkan dengan baik dan optimal. Batu kapur di Indonesia sebagian besar hanya digunakan untuk bahan bangunan, pengaspal jalan, dan ubin traso dengan harga jual yang rendah (Azkiya dkk., 2016). Padahal kandungan kalsium karbonat dalam batu kapur dapat dirubah menjadi kalsium oksida atau kalsium hidroksida untuk dimanfaatkan kalsiumnya. Dengan mereaksikan antara gas CO₂ dan Ca(OH)₂ maka akan menghasilkan produk berupa *precipitated calcium carbonate* (PCC) (Haryanto, 2011). Secara sederhana proses reaksi antara karbon dioksida dan Ca(OH)₂ adalah sebagai berikut:



Kalsium karbonat hasil reaksi pada persamaan (1) sering disebut PCC mempunyai tingkat kemurnian yang lebih tinggi dibandingkan *ground calcium carbonate* atau GCC (kalsium karbonat alami) karena PCC mempunyai kandungan pengotor yang jauh lebih kecil dibandingkan GCC. PCC mempunyai manfaat sebagai bahan pengisi dan pigmen pemutih yang dapat membuat kertas lebih cerah, pasta gigi, plastik, karet, obat, dan makanan (Purba dkk., 2015).

Penelitian terkait PCC sebenarnya telah cukup banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya dengan berbagai variabel yang diamati, seperti pengaruh suhu (Lailiyah dkk., 2012), laju alir gas CO₂ (Bang dkk., 2015); Hamzah, 2020), dan waktu kontak (Han dkk., 2006). Tetapi sebagian besar menggunakan bahan *grade* analisis yang harganya cukup mahal, dan seringkali untuk mendapatkan produk PCC yang maksimal dilakukan penambahan zat tertentu ke dalam sistem reaksi, seperti enzim 35 (Hamzah, 2020), aditif sukrosa (Madhania dkk., 2020), *modifier* (Chen dkk., 2013), dan gipsum (Bang dkk., 2015). Penelitian ini pada dasarnya mencoba mencari kondisi operasi yang efektif, efisien, namun ekonomis yaitu penelitian dilakukan tanpa zat tambahan, menggunakan senyawa Ca(OH)₂ *grade* teknis, dan dilakukan pengadukan agar proses kontak antara reaktan lebih maksimal. Tujuan penelitian ini difokuskan untuk observasi pengaruh waktu kontak dan laju alir gas CO₂ yang dipadukan terhadap kecepatan pengadukan tertentu di dalam sistem reaksi guna menghasilkan produk PCC yang maksimal. Sebenarnya metode pada penelitian ini mengacu pada penelitian Altiner (2018), tetapi yang membedakan adalah pada penelitian ini mencoba melakukan observasi menggunakan senyawa Ca(OH)₂ *grade* teknis dan pengadukan yang lebih rendah yaitu 300 rpm, sedangkan pada Altiner (2018) menggunakan bahan baku *analytical grade* dan pengadukan yang cukup tinggi yaitu 650 rpm. Metode ini dipilih, karena secara teori ketika gas CO₂ dimasukan ke reaktor maka terjadi proses *bubbling*, dan dengan ditambahkan proses pengadukan, maka turbulensi sistem reaksi lebih maksimal. Harapannya proses difusi akan terjadi

dengan maksimal, dan akan diikuti dengan maksimalnya laju reaksi yang terjadi.

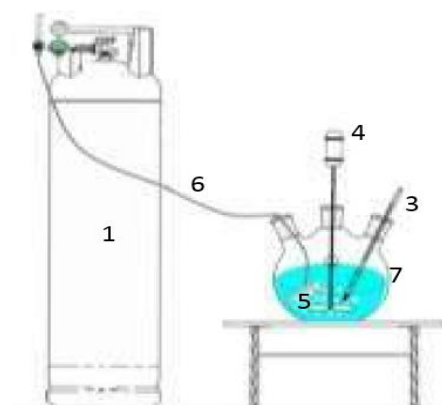
2. METODE PENELITIAN

2.1 Bahan

Ca(OH)₂ yang berasal dari CV Kasugihan Jaya, Cilegon, Banten dengan kadar 17,4% dan gas CO₂ dengan kadar 99,9 % dari agen di Cilegon yang berasal dari PT Aneka Gas Industri Tbk.

2.2 Prosedur Percobaan

200 ml Ca(OH)₂ dimasukkan ke dalam reaktor (Gambar 1), kemudian gas CO₂ dialirkan dengan variasi laju alir 1, 2, dan 3 liter/menit (lpm) sambil menjalankan pengaduk dengan kecepatan 300 rpm. Proses pengontakkan dihentikan pada waktu yang telah ditentukan yaitu 10, 20, dan 30 menit. Endapan PCC hasil reaksi dipisahkan menggunakan kertas saring, lalu dikeringkan dari kandungan air di dalam oven pada temperature 115°C selama 2 jam. Serbuk hasil pengeringan endapan, kemudian ditimbang untuk mengetahui berat produk PCC yang dihasilkan pada setiap variabel yang diamati.



Gambar 1. Reaktor pada pembuatan PCC

Keterangan: (1) Tabung gas CO₂, (2) Regulator katup gas, (3) Termometer, (4) Motor pengaduk dan batang pengaduk, (5) Distributor gas, (6) Selang gas, dan (7) Labu leher tiga.

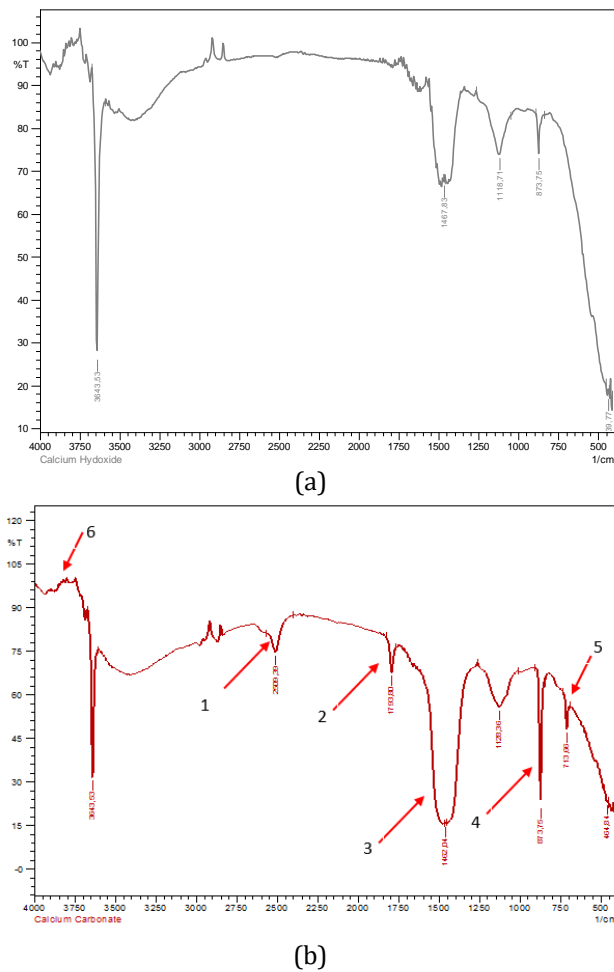
Serbuk PCC juga dilakukan uji *x-ray diffraction* (XRD) untuk mengetahui kandungan kristal dan uji *fourier-transform infrared spectroscopy* (FTIR) guna memastikan bahwa benar terjadi proses reaksi antara CO₂ dan Ca(OH)₂. Selain itu, pada kondisi tertentu juga dilakukan uji pH menggunakan pH meter guna mengetahui kecenderungan perubahan pH selama reaksi berlangsung dan uji visual perubahan warna.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengujian Awal

Terlihat pada Gambar 1, Puncak-puncak yang dihasilkan antara hasil uji FTIR bahan baku Ca(OH)₂ (Gambar 2.a) dan hasil reaksi (Gambar 2.b) terjadi perubahan puncak. Pada puncak yang ditandai dengan tanda panah (Gambar 2.b), nampak terbentuk puncak baru, yaitu no. 1, 2, dan 5, dan terjadi peningkatan intensitas yaitu no. 3 dan 4, serta penurunan intensitas

pada puncak no. 6. Ini memberikan arti bahwa reaksi terjadi dan produk PCC terbentuk jika mengacu pada Persamaan (1). Fenomena perubahan puncak-puncak tersebut menunjukkan terjadi perubahan jenis kristal pada PCC selama proses reaksi berlangsung (lihat pada Gambar 2).

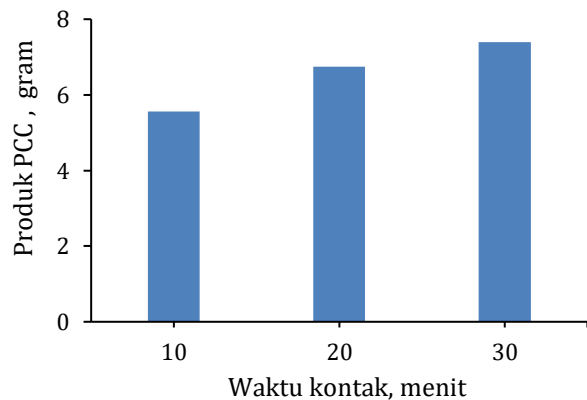


Gambar 2. Hasil Uji FTIR pada: (a) bahan baku Ca(OH)_2 dan (b) Ca(OH)_2 setelah dimasukkan gas CO_2

Pada saat dilakukan pengukuran pH menggunakan pH meter terjadi perubahan pH dari 12,31 menjadi 12,24. Pengukuran pH ini menguatkan hasil uji FTIR bahwa terjadi reaksi antara Ca(OH)_2 dan gas CO_2 . Perubahan PH terjadi karena gugus OH dari Ca(OH)_2 berkurang membentuk air (lihat persamaan (1)), dan berdampak pada penurunan pH. Hasil pada penelitian ini cenderung sama dengan hasil pengamatan yang dilakukan oleh Ramakrishna dkk. (2017), dan menurut Munawaroh (2019) sintesis PCC pada metode karbonasi bisa dihentikan ketika pH tidak lagi mengalami perubahan. Pada kondisi ini (pH tidak lagi mengalami perubahan) proses reaksi antara reaktan telah berjalan dengan maksimal. Penurunan pH maksimum sebenarnya terjadi pada rentang sekitar PH 8-9, karena pH CaCO_3 mengacu pada *material safety data sheet* (MSDS) CaCO_3 adalah 8-9. Hal ini memberikan informasi bahwa pada kondisi pH 8-9 seluruh Ca(OH)_2 telah terkonversi sempurna menjadi PCC.

3.2 Pengaruh Waktu Kontak

Produk PCC yang diperoleh berturut-turut adalah 5,56 6,75, dan 7,40 gram yaitu yang diperoleh pada waktu kontak 10, 20, dan 30 menit (lihat Gambar 3). Kondisi ini disebabkan karena probabilitas tumbukan ion reaktan akan meningkat dengan meningkatnya waktu kontak, sehingga massa dari PCC yang terbentuk akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu kontak. Tetapi jika mengacu pada keekonomisan proses, waktu kontak 10 menit lebih ekonomis dibandingkan waktu kontak yang lain. Hal ini terlihat dengan waktunya lebih singkat yaitu hanya 10 menit, tetapi jumlah produk PCC yang dihasilkan hanya mengalami perbedaan yang sangat kecil yaitu 1,19 gram dibandingkan dengan waktu kontak 20 menit dan 1,84 gram dibandingkan dengan waktu kontak 30 menit.



Gambar 3. Pengaruh waktu kontak terhadap massa PCC pada laju alir gas 1 liter/menit

Hasil pada penelitian ini menghasilkan kecenderungan yang lebih baik dibandingkan penelitian yang dilakukan oleh Madhania dkk. (2020), yang melakukan pada rentang 25–44 menit. Hasilnya produk PCC yang dihasilkan hanya 1,95 gram pada 25 menit dan 2,44 gram pada 44 menit.

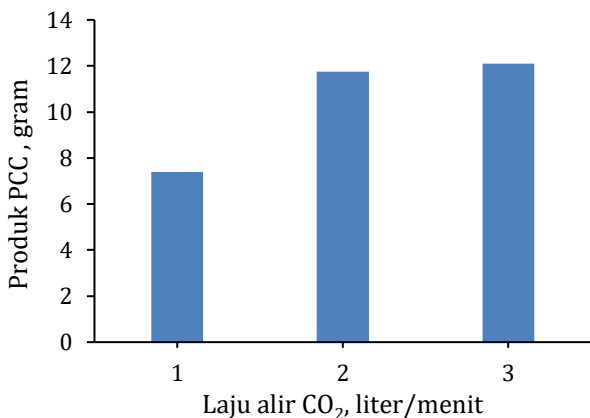
Pada saat dilakukan uji visualisasi (Gambar 4), ternyata warna produk PCC yang awalnya putih kekuningan menjadi semakin berwarna putih seiring meningkatnya jumlah produk PCC yang dihasilkan. Jika dilakukan perbandingan tingkat warna putihnya, maka dari yang kurang putih (kurang cerah) menjadi lebih putih (lebih cerah) adalah no.1 < no.2 < no.3 < no. 4. Hasil penelitian Altiner & Yildirim (2017) menunjukkan fenomena yang serupa, yang mana tingkat kecerahan produk PCC yang awalnya tingkat kecerahan 96% (bahan baku) menjadi 98-99% (produk). Warna kekuningan yang muncul khususnya yang terlihat di bahan baku (lihat Gambar 4), kemungkinan adalah dampak dari pengotor berupa Fe sebesar 0,05% yang terkandung di dalam bahan baku, dan dapat mengalami penurunan bersamaan dengan terbentuknya produk PCC (Aziz, 2010).



Gambar 4. Tingkat kecerahan produk PCC pada laju CO₂ 1 liter/menit

3.3 Pengaruh Laju Alir Gas

Peningkatan laju alir gas CO₂, berdampak cukup signifikan terhadap jumlah produk PCC yang dihasilkan (lihat Gambar 5). Produk PCC yang dihasilkan berturut-turut pada 1, 2, dan 3 L/min yaitu sebesar 7,40; 11,75; dan 12,11 gram (lihat Gambar 5). Kondisi ini terjadi karena semakin besar laju reaktan CO₂ yang dimasukkan ke dalam sistem reaksi akan memperbesar difusi reaktan CO₂ ke badan cairan, sehingga memperbesar proses kontak antara kedua reaktan yang terlibat (Fogler, 2010). Jika mengacu pada mekanisme reaksi, hal ini terjadi karena Ca(OH)₂ terionisasi menjadi ion Ca²⁺ dan 2OH⁻ akan lebih banyak, dan potensi untuk berkontak dengan gas CO₂ membentuk CaCO₃ dan air H₂O akan lebih besar (Jimoh dkk., 2017). Pada laju gas CO₂ dari 1 ke 2 L/menit terjadi peningkatan produk PCC yang cukup baik yaitu 4,35 gram atau 8,53%. Tetapi sebaliknya, produk PCC yang diperoleh pada laju 2 ke 3 L/min hanya meningkat 0,36 gram atau 0,63%. Ini artinya bahwa peningkatan laju aliran gas CO₂ dari 2 ke 3 L/min kemungkinan telah mendekati titik reaksi maksimalnya, sehingga peningkatan laju alir gas yang diberikan tidak mempunyai dampak signifikan (Munawaroh dkk., 2019).

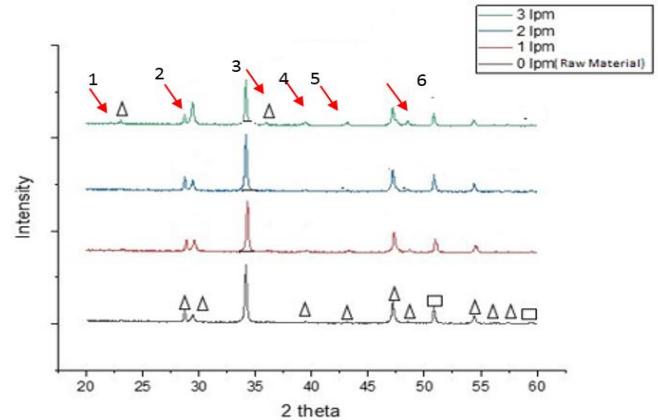


Gambar 5. Pengaruh laju alir gas CO₂ terhadap massa PCC pada waktu kontak 30 menit

3.4 Hasil Karakteristik Produk PCC

Pada produksi PCC, keberadaan jenis kristal mineral di dalam produk sangat berpengaruh

terhadap pengaplikasiannya. Kristal yang terkandung di dalam PCC terdiri atas 3 bentuk yaitu kalsit, aragonit, dan vaterit. Ketiganya memiliki sudut difraksi 2 theta (2θ) yang berbeda-beda. Vaterit memiliki karakteristik puncak 2θ: 20,9°; 24,9°; 27,0°; 32,8°; 43,8°, dan 49,9°, aragonit memiliki karakteristik puncak 2θ: 26,3°; 27,2°; 37,9°; 45,8°, 50,3°, dan 52,5°, sedangkan kalsit mempunyai karakteristik puncak 2θ : 23.02°, 29.33°, 31.36°, 35.92°, 39.43°, 43.15°, 47.05°, 47.41°, 48.43°, 56.50°, 56.60°, 57.34°, dan 57.47° (Chong dkk., 2014; Munawaroh dkk. 2019).



Gambar 6. Hasil analisis XRD pada waktu kontak 30 menit (Δ = kalsit, □ = Aragonit)

Hasil karakteristik melalui uji XRD dan setelah dilakukan identifikasi melalui software HighScore Plus (HSP) (lihat Gambar 6), ternyata hasil reaksi pada penelitian ini masuk ke dalam kategori kristal kalsit, walaupun terdapat fase kristal aragonit di dalamnya tetapi jumlahnya sangat sedikit. Hasil ini juga diperkuat dengan referensi yang ada yaitu 2 theta yang muncul identik dengan kalsit (Chong dkk., 2014; Munawaroh dkk. 2019). Fenomena ini terjadi karena kalsit merupakan fase kristal yang memiliki sifat termodinamik yang sangat stabil, dan memiliki struktur trigonal dengan kristal khas yaitu kubik yang mudah untuk disintesis dalam kondisi standar (Ukrainczyk dkk, 2006). Sementara itu, aragonit merupakan jenis fase kristal yang memiliki sifat termodinamik metastabil, dan cenderung terbentuk pada kondisi temperatur dan tekanan yang lebih tinggi dibandingkan kalsit (Apriliani, 2017). Tetapi menurut Ramakrishna dkk. (2017) pada suhu ruang hingga 80°C memungkinkan untuk terbentuk 2 fase kristal yaitu kalsit dan aragonit pada kondisi tertentu. Pada penelitian ini belum terbentuk kristal vaterit, kemungkinan karena belum mencapai kondisi jenuhnya. Menurut hasil observasi Kristal vaterit terbentuk pada saat sistem telah mencapai supersaturasi (kejenuhan tinggi) gas CO₂ di dalam Larutan Ca (OH)₂ (Altiner & Yildirim, 2017). Jika dinaikan lagi laju CO₂ atau diperlama waktu kontakannya maka besar kemungkinan akan terbentuk kristal vaterit. Menurut Altiner & Yildirim (2017) supersaturasi yang terjadi berbanding lurus dengan meningkatnya laju alir gas CO₂ yang diberikan.

Untuk memvalidasi bahwa memang benar produk pada penelitian ini merupakan kategori kristal jenis kalsit dapat lihat dari perubahan pH. Menurut Ramakrishna dkk. (2017) bahwa kalsit mempunyai pH di atas 12, aragonit sekitar pH 10, dan vaterit di bawah 10. Ketika dilakukan pengukuran pH, yang dilakukan pada kondisi laju CO₂ tertinggi (3 liter/menit) dan waktu kontak terlama (30 menit) dihasilkan pH yaitu sebesar 12,2. Jadi puncak baru yang terbentuk selama prose reaksi berlangsung merupakan pembentuk kristal kalsit baru (lihat Gambar 6) yaitu puncak no. 1 dan 3, dan juga semakin kuatnya ikatan kristal kalsit yang dihasilkan, yang ditandai dengan peningkatan intensitas puncak kalsit yaitu pada puncak no. 2, 4, 5, dan 6.

Ketika dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan Debye Scherrer (Persamaan 2) seperti yang dilakukan oleh Munawaroh dkk. (2019) terhadap produk PCC, ternyata peningkatan laju alir CO₂ berdampak pada penurunan ukuran partikel PCC dan sebaliknya, peningkatan waktu kontak memperbesar ukuran partikel PCC (lihat Tabel 1 dan 2).

$$D = \frac{k \times \xi}{\omega \cos \theta} \quad (2)$$

Dimana:

k = Faktor bentuk kristal (0.9-1)

ω = FWHM (rad)

θ = Sudut theta yang terbaca oleh grafik xrd (rad)

ξ = Panjang gelombang ,0.15406 nm (Fatimatul dkk,2018)

Tabel 1. Pengaruh laju alir CO₂ terhadap ukuran diameter partikel PCC

Waktu kontak (menit)	Laju alir gas (L/menit)	Ukuran PCC (nm)
30	1	58,124
30	2	52,616
30	3	48,050

Tabel 2. Pengaruh waktu kontak terhadap ukuran diameter partikel PCC

Waktu kontak (menit)	Laju alir gas (L/menit)	Ukuran PCC (nm)
10	3	37,492
20	3	40,977
30	3	48,050

Secara teori pada suhu reaksi yang rendah (0-40°C), laju nukleasi lebih besar dibandingkan laju pertumbuhan kristal, sehingga hasilnya ukuran partikel yang dihasilkan akan berukuran kecil. Sebaliknya, pada saat temperatur ditingkatkan (>40°C) laju pertumbuhan kristal akan lebih cepat dibandingkan laju nukleasinya, sehingga PCC akan cenderung menghasilkan partikel dengan ukuran yang lebih besar (Babou-Kammoe dkk. 2012). Dari Tabel 1 terlihat bahwa secara teori terbukti bahwa ternyata ketika laju alir CO₂ ditingkatkan produk PCC yang dilakukan pada suhu reaksi 30°C, ukuran partikel PCC

yang dihasilkan semakin kecil. Sementara itu, ketika waktu kontak antara reaktan dinaikkan dengan laju alir gas CO₂ yang tetap, nukleasi-nukleasi yang dihasilkan dengan ukuran yang lebih kecil, akan bergabung membentuk ukuran yang lebih besar (Han dkk., 2006).

Secara umum, jika dibandingkan dengan hasil penelitian Madhania dkk. (2020) yang dilakukan tanpa pengadukan ternyata hasilnya lebih baik. Pada penelitian ini mampu menghasilkan PCC dengan massa 7,40 gram pada laju alir gas CO₂ sebesar 1 liter/menit pada waktu kontak 30 menit, sedangkan pada Madhania dkk. (2020) jumlah jauh lebih kecil yaitu hanya 2,08 gram pada 30 menit dengan laju gas CO₂ 0,5 liter/menit, walaupun jumlah larutan yang digunakan jauh lebih besar yaitu 10 liter sedangkan pada penelitian ini hanya 0,2 liter atau 200 ml. Jika dibandingkan dengan penelitian Altiner (2018), kemungkinan jumlah produk yang dihasilkan masih jauh dibawahnya. Pada laju alir gas CO₂ 1 liter/menit dengan waktu kontak 23 menit saja, terjadi penurunan pH sampai dengan 8, sedangkan pada penelitian ini hanya mampu menurunkan menjadi pH 12,2. Data ini menunjukkan bahwa pada penelitian Altiner (2018), Ca(OH)₂ terkonversi sempurna menjadi PCC, sedangkan pada penelitian baru sebagian kecil saja. Kondisi ini terjadi kemungkinan disebabkan oleh perbedaan pengadukan dan kualitas bahan baku yang digunakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan data-data yang diperoleh, peningkatan laju alir gas CO₂ dan waktu kontak berdampak positif pada peningkatan produk PCC yang dihasilkan. Produk PCC tertinggi dihasilkan pada laju alir gas CO₂ 3 liter/menit pada waktu kontak 30 menit yaitu sebesar 12,11 gram. Peningkatan produk PCC signifikan diperoleh dari laju gas dari 1 ke 2 liter/menit yaitu meningkat 4,35 gram atau 8,53%, tetapi dari 2 ke 3 liter/menit PCC hanya meningkat 0,36 gram atau 0,63%. Oleh karena itu, secara keekonomisan proses, kondisi terbaik diperoleh pada laju 2 liter/menit dengan waktu kontak 30 menit yaitu sebesar 11, 75 gram. Selain itu, peningkatan produk PCC yang dihasilkan ternyata berdampak pada kecerahan produk PCC dan penurunan pH larutan hasil reaksi, serta berdampak pada ukuran partikel PCC yang dihasilkan. Secara umum modifikasi proses reaksi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu menggunakan bahan baku grade teknis dan perpaduan proses *bubbling* dan pengadukan berdampak baik pada reaksi yang terjadi, tetapi masih perlu disempurnakan agar proses reaksi berjalan dengan maksimal dengan pH yang dihasilkan mendekati pH 8-9.

5. DAFTAR PUSTAKA

Altiner, M. (2018). Influences of CO₂ bubbling types on preparation of calcite nanoparticles by carbonation process. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 62(2), 209-214.

- Altiner, M., & Yildirim, M. (2017). Production of precipitated calcium carbonate particles with different morphologies from dolomite ore in the presence of various hydroxide additives. *Physicochem. Probl. Miner. Process*, 53(1), 413-426.
- Apriliansi, N. F. (2017). Studi Literatur PCC (Precipitated Calcium Carbonate) Untuk Aplikasi Bidang Teknik. *Jurnal Teknik*, 8(1), 4.
- Aziz, M. (2010). Batu kapur dan peningkatan nilai tambah serta spesifikasi untuk industri. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 6(3), 116-131.
- Azkiya, N. I., Prasetya, F., Putri, E. D., Rosiana, A., & Wardhani, S. (2016). Sintesis Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari Batuan Kapur Alam dengan Metode Kaustik Soda (Kajian Konsentrasi HNO₃). *Jurnal ILMU DASAR*, 17(1), 31-34.
- Babou-Kammoe, R., Hamoudi, S., Larachi, F., & Belkacemi, K. (2012). Synthesis of CaCO₃ nanoparticles by controlled precipitation of saturated carbonate and calcium nitrate aqueous solutions. *The Canadian journal of chemical engineering*, 90(1), 26-33.
- Bang, J. H., Song, K., Park, S., Jeon, C. W., Lee, S. W., & Kim, W. (2015). Effects of CO₂ bubble size, CO₂ flow rate and calcium source on the size and specific surface area of CaCO₃ particles. *Energies*, 8(10), 12304-12313.
- Chen, A., Ma, P., Fu, Z., Wu, Y., & Kong, W. (2013). Crystallization and assembling behavior of calcium carbonate controlled by Ca-organic fibers. *Journal of crystal growth*, 377, 136-142.
- Chong, K. Y., Chia, C. H., & Zakaria, S. (2014, September). Polymorphs calcium carbonate on temperature reaction. In *AIP conference proceedings* (Vol. 1614, No. 1, pp. 52-56). American Institute of Physics.
- Fogler, H. S. (2010). *Essentials of Chemical Reaction Engineering: Essenti Chemica Reactio Engi*. Pearson Education.
- Hamzah, F. (2020). Effect of Different CO₂ Flow Rate and Calcium Chloride Concentration on CO₂ Sequestration using Immobilized Carbonic Anhydrase. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 66(2), 11-19.
- Han, Y. S., Hadiko, G., Fuji, M., & Takahashi, M. (2006). Factors affecting the phase and morphology of CaCO₃ prepared by a bubbling method. *Journal of the European Ceramic Society*, 26(4-5), 843-847.
- Haryanto, B (2011). Potensi Pembuatan PCC Dari Batu Kapur Di Sumatera Barat. *Teknik kimia Universitas Bung Hatta*. <http://www.scribd.com/doc/59914238/Potensi-Pembuatan-PCC-Dari-Batu-Kapur-Di-Sumatera-Barat>.
- <http://www.labchem.com/tools/msds/msds/75445.pdf>. Material Safety Data Sheet Calcium carbonate. Di unduh 27 Agustus 2021
- Jimoh, O. A., Otitoju, T. A., Hussin, H., Ariffin, K. S., & Baharun, N. (2017). Understanding the precipitated calcium carbonate (PCC) production mechanism and its characteristics in the liquid-gas system using milk of lime (MOL) suspension. *South African Journal of Chemistry*, 70, 1-7.
- Kemementrian Perindustrian RI (2020). *Kemenperin Bidik Sektor Industri Tumbuh 3,95% Tahun 2021*
- Lailiyah, Q., Baqiya, M. A., & Darminto, D. (2012). Pengaruh Temperatur dan Laju Aliran Gas CO₂ pada Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat dengan Metode Bubbling. *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 1(1), B6-B10.
- Madhania, S., Ihsana, Y., Rizaldy, M. Z., Afdiwibowo, A., Kusdianto, & Winardi, S. (2020, May). Preparation of precipitated calcium carbonate from carbon mineralization of raw biogas with Ca (OH) 2 solution using bubble column contactor. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2219, No. 1, p. 030004). AIP Publishing LLC.
- Munawaroh, F., Muharrami, L. K., & Arifin, Z. (2019). Synthesis and Characterization of Precipitated CaCO₃ from Ankerite Prepared by Bubbling Method. *KnE Engineering*, 98-104.
- Purba, P. D., Amun Amri, Zultiniar, & Yelmida (2015). Sintesa Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari Cangkang Kerang Darah (Anadara granosa) Dengan Variasi Suhu Kalsinasi dan Variasi Rasio CaO/HNO₃ (Doctoral dissertation, Riau University).
- Ramakrishna, C., Thenepalli, T., & Ahn, J. W. (2017). A brief review of aragonite precipitated calcium carbonate (PCC) synthesis methods and its applications. *Korean Chemical Engineering Research*, 55(4), 443-455.
- Ukrainczyk, N., Ukrainczyk, M., Šipušić, J., & Matusinović, T. (2006, June). XRD and TGA investigation of hardened cement paste degradation. In *Proceedings of the Conference on Materials, Processes, Friction and Wear*, Vela Luka, Croatia (pp. 22-24).
- Yusof, R. (2011). Perkembangan Industri Nasional dan Peran Penanaman Modal. *Jurnal Ekonomi dan Pendidikan*, 8(1).