

Sintesis dan Karakterisasi Kalsium Karbonat Presipitat dari Limbah Cangkang Telur melalui Metode Karbonasi

Ratri Sekaringsalih^{1*}, Alif Nur Laili Rachmah²⁾, Sonya Hakim Raharjo³⁾, Ansori⁴⁾

^{1),3),4)} Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Pattimura, Indonesia

*Email: ratri sekar@unej.ac.id

ABSTRACT

Precipitated Calcium Carbonate (PCC) is a synthetic form of CaCO_3 with a dominant calcite crystal structure, widely used as a filler in the paper, plastic, paint, and pharmaceutical industries. Currently, PCC production relies on non-renewable limestone, which raises environmental concerns. As a more sustainable alternative, eggshell waste—rich in calcium—has been explored, but studies optimizing the synthesis parameters, particularly acid concentration and carbonation time, remain limited. This study aims to synthesize PCC from chicken eggshell waste via the carbonation method, using variations in sulfuric acid (H_2SO_4) concentration (1 M, 1.5 M, 2 M) and carbonation time (60, 75, and 90 minutes). The process begins with the reaction between eggshell powder and H_2SO_4 to form CaSO_4 , which is then converted into $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and subsequently carbonated using CO_2 gas. The resulting PCC was characterized using FTIR, XRD, and XRF. The optimal condition was found at 2 M H_2SO_4 concentration and 90 minutes carbonation time. XRD analysis showed distinct diffraction peaks of calcite as the dominant crystal phase, FTIR confirmed strong carbonate (CO_3^{2-}) absorption in the range of $1400\text{--}870\text{ cm}^{-1}$, and XRF revealed a calcium content of 89.88%. These results indicate that chicken eggshell waste is a highly promising and environmentally friendly raw material for sustainable PCC production.

Keywords: Precipitated Calcium Carbonate (PCC), eggshell, carbonation method, H_2SO_4

PENDAHULUAN

Telur merupakan salah satu sumber protein hewani yang kaya akan nilai gizi dan ekonomis, sehingga menjadi komponen penting dalam pola konsumsi masyarakat. [1]. Oleh karena itu telur menjadi salah satu bahan pangan favorit yang kehadirannya nyaris tak terpisahkan dari pola konsumsi masyarakat, baik dalam bentuk utuh maupun olahan [2]. Tingginya konsumsi ini berdampak pada meningkatnya limbah cangkang telur setiap tahunnya, yang umumnya berakhir sebagai limbah di TPA. Limbah cangkang telur memiliki beberapa dampak negative bila tidak dimanfaatkan lebih lanjut. Dampak negatif yang ditimbulkan seperti pencemaran lingkungan, bau tidak sedap, infestasi lalat, permasalahan dalam penanganan tempat pembuangan, serta potensi adanya interaksi lintas spesies antara manusia dan hewan membuka celah terjadinya perpindahan agen penyakit (zoonosis). Karena dampak negative yang ditimbulkan ini, cangkang telur harusnya dapat dimanfaatkan sehingga dapat meminimalisir dampak negatifnya. Cangkang telur dapat dimanfaatkan sebagai sumber suplemen kalsium yang bermanfaat bagi kesehatan. Cangkang telur memiliki potensi besar sebagai sumber nutrisi kalsium karena mengandung sekitar 93% kalsium karbonat, 37,3% kalsium, dan 0,40% magnesium [3], dengan jumlah presentase kalsium yang tinggi cangkang telur dapat dimanfaatkan sebagai salah satu bahan pembuatan Precipitate Calcium Carbonate (PCC) selain hanya menjadikannya limbah.

CaCO_3 dikenal sebagai salah satu senyawa anorganik yang keberadaannya sangat melimpah di alam dan merupakan penyusun lebih dari 4% kerak bumi. Senyawa ini banyak dimanfaatkan dalam berbagai sektor industri, termasuk dalam produksi kertas, plastik, tinta, cat, pipa polimer dan bermanfaat di bidang pangan serta kesehatan [4]. Terdapat dua jenis sumber utama kalsium karbonat, yaitu Ground Calcium Carbonate (GCC) yang diperoleh secara alami melalui proses mekanis seperti penumbukan, dan Precipitated Calcium Carbonate (PCC) yang dihasilkan melalui proses kimia berupa pengendapan [5]. Dibandingkan dengan GCC, PCC memiliki tingkat kemurnian yang lebih tinggi dan kadar pengotor seperti silika, magnesium, dan timbal yang lebih rendah [6], [7].

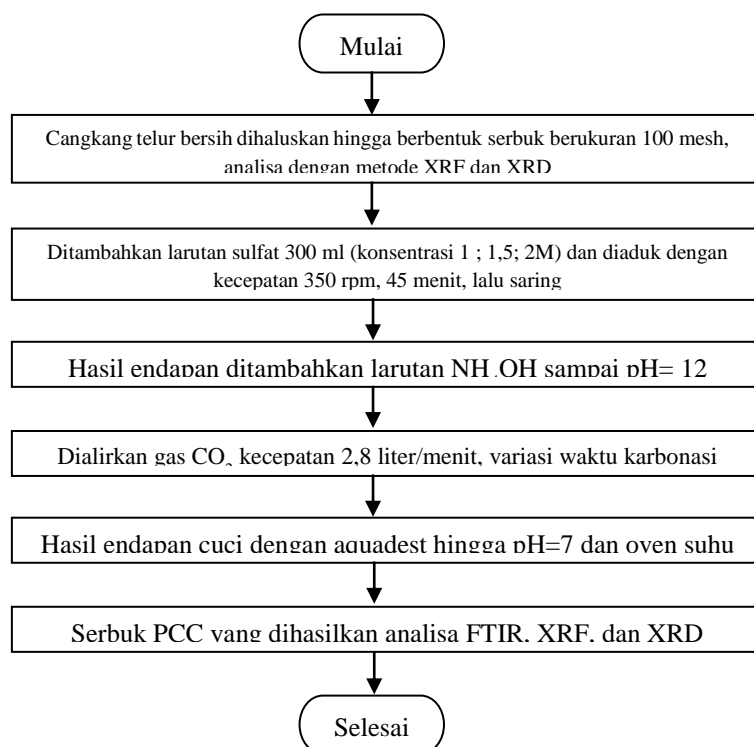
Kalsium Karbonat yang diendapkan (PCC) adalah bentuk sintetis kalsium karbonat (CaCO_3) yang dicirikan oleh ukuran partikel, morfologi, dan kemurniannya yang terkontrol [8]. Kalsium Karbonat

presipitat atau yang biasa disebut PCC telah banyak diteliti karena aplikasinya yang beragam, salah satunya dalam proses produksi kertas, plastik, karet, cat, obat-obatan, dan industry makanan [9]. Terdapat tiga bentuk kristal utama PCC—kalsit, aragonit, dan vaterit—yang masing-masing memiliki sifat morfologi dan stabilitas berbeda [10]. Dari ketiga bentuk tersebut, kalsit merupakan bentuk kristal yang paling stabil secara termodinamika pada suhu dan tekanan ruang [11]. Proses sintesis PCC umumnya dilakukan melalui metode karbonasi, yakni reaksi antara ion kalsium dan karbonat dengan bantuan gas karbon dioksida. Dalam konteks pemanfaatan cangkang telur sebagai sumber kalsium, metode ini dinilai ramah lingkungan dan ekonomis. Namun, hingga saat ini, masih terdapat keterbatasan dalam penelitian terkait optimasi parameter proses, seperti durasi karbonasi dan konsentrasi larutan asam, khususnya H_2SO_4 , dalam membentuk PCC dengan kemurnian dan bentuk kristal yang diinginkan.

Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pemanfaatan cangkang telur sebagai sumber kalsium tanpa mengevaluasi secara mendalam pengaruh kondisi proses terhadap kualitas PCC yang dihasilkan. Selain itu, hubungan antara parameter sintesis dan variasi bentuk kristal PCC masih belum banyak dikaji secara sistematis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyintesis PCC dari limbah cangkang telur menggunakan metode karbonasi dengan variasi waktu reaksi dan konsentrasi H_2SO_4 , serta melakukan karakterisasi menggunakan FTIR, XRD, dan XRF untuk mengevaluasi struktur kristal, gugus fungsi, dan komposisi kimianya. Studi ini diharapkan dapat mendukung pengembangan teknologi dalam mengolah limbah menjadi material fungsional yang bernilai tambah dan berwawasan lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Reaksi Kimia, Universitas Jember, yang berlokasi di Jalan Kalimantan Tegalboto No. 37, Krajan Timur, Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup sejumlah instrumen laboratorium standar, antara lain gelas beaker, hot plate magnetic stirrer, furnace (tungku pemanas), corong laboratorium, gelas ukur, pipet tetes, kaca arloji, kertas saring Whatman, oven pemanas, ayakan (sieve), labu Erlenmeyer, NH_4OH (ammonium hidroksida), H_2SO_4 (asam sulfat), aquadest dan gas karbondioksida.



Gambar 1. Diagram alir pembuatan PCC dari cangkang telur

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik Serbuk Cangkang Telur

Serbuk cangkang telur yang digunakan dalam penelitian ini memiliki warna putih sedikit kecoklatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2 (a). Warna ini dapat dipengaruhi oleh faktor genetik dan warna bulu ayam yang menghasilkan telur [12]. Sebelum dilakukan karakterisasi, sampel dicuci dan digiling hingga lolos ayakan 100 mesh (gambar 2 (b)). Proses penghalusan ini bertujuan untuk memperkecil ukuran partikel sehingga reaktivitasnya meningkat dan proses kimia selanjutnya dapat berlangsung lebih efektif [13]. Untuk mengetahui komposisi unsur dan struktur kristal dari serbuk cangkang telur, dilakukan analisis X-Ray Fluorescence (XRF) dan X-Ray Diffraction (XRD).

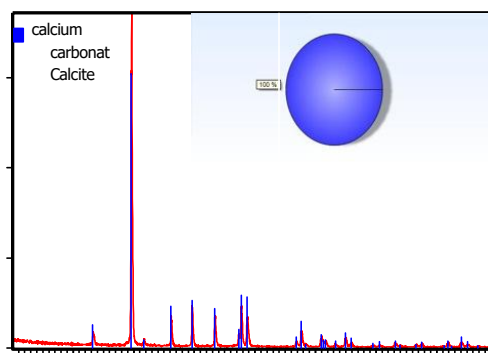


Gambar 2. Cangkang kulit telur (a) Bentuk cangkang dan (b) Serbuk cangkang

Tabel 1. Hasil uji XRF serbuk cangkang telur

Senyawa	Konsentrasi (%)
SO ₃	0,34
CaO	99,47
Fe ₂ O ₃	0,031
CuO	0,065
SrO	0,092

Dari tabel tersebut, dapat diketahui bahwa kandungan utama dalam serbuk cangkang telur adalah kalsium oksida (CaO) dengan konsentrasi sangat tinggi yaitu 99,47%. Kandungan ini menunjukkan bahwa cangkang telur merupakan sumber kalsium yang sangat potensial dan layak untuk dimanfaatkan dalam sintesis kalsium karbonat presipitasi (PCC) [14]. Kandungan unsur lain seperti SO₃, SrO, CuO, dan Fe₂O₃ sangat kecil, yang menandakan kemurnian bahan relatif tinggi dan tidak terkontaminasi oleh logam berat yang dapat mengganggu proses sintesis.



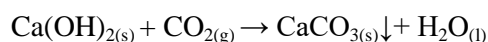
Gambar 3. Spektrum XRD serbuk cangkang telur

Gambar 3 merupakan hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD), pada pola difraksi ini terlihat puncak-puncak tajam yang mengindikasikan bahwa sampel memiliki struktur kristalin yang tinggi. Hasil XRD menunjukkan adanya puncak difraksi dominan pada sudut 2θ sekitar $\approx 29.4^\circ$, 39.4° , 43.1° , 47.5° , 48.6° , dan 57.4° . Pola puncak yang tajam dan simetris menunjukkan bahwa struktur material tersebut bersifat kristalin tinggi, dengan sedikit atau tanpa kontaminan dari fasa lain. Model bola biru

pada bagian kanan atas gambar mewakili struktur kristal trigonal dari kalsit (CaCO_3), yang memperkuat identifikasi fasa tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur kristalin yang tinggi dan kemurnian kalsium yang signifikan pada cangkang telur menjadikannya kandidat ideal untuk sintesis PCC melalui metode karbonasi [15]. Hal ini sejalan dengan tujuan penelitian, yaitu mengembangkan sumber kalsium alternatif dari limbah organik yang ramah lingkungan. Selain itu, keberadaan puncak-puncak tajam tanpa indikasi fasa lain menunjukkan bahwa proses awal persiapan bahan baku tidak merusak struktur kristal alami dan tidak menyebabkan pembentukan senyawa kontaminan. Dengan demikian, kombinasi hasil XRF dan XRD mengkonfirmasi bahwa limbah cangkang telur ayam tidak hanya layak, tetapi sangat potensial untuk digunakan sebagai bahan baku dalam produksi PCC dengan karakteristik kristal yang diinginkan.

2. Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat

Proses sintesis PCC umumnya dilakukan melalui metode karbonasi, di mana gas karbon dioksida (CO_2) direaksikan dengan larutan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) untuk menghasilkan kalsium karbonat (CaCO_3) yang terendapkan. Reaksi kimia yang terjadi adalah sebagai berikut:

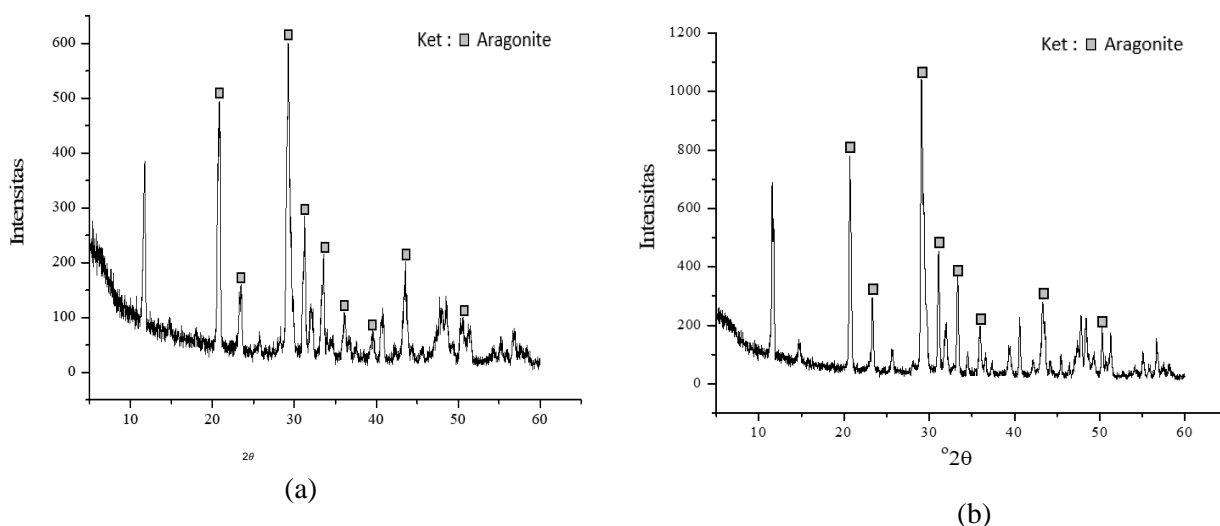


Reaksi ini menghasilkan endapan CaCO_3 yang dikenal sebagai PCC. Produk PCC memiliki keunggulan dibandingkan dengan Ground Calcium Carbonate (GCC) karena memiliki ukuran partikel yang lebih seragam dan kemurnian yang lebih tinggi [16].

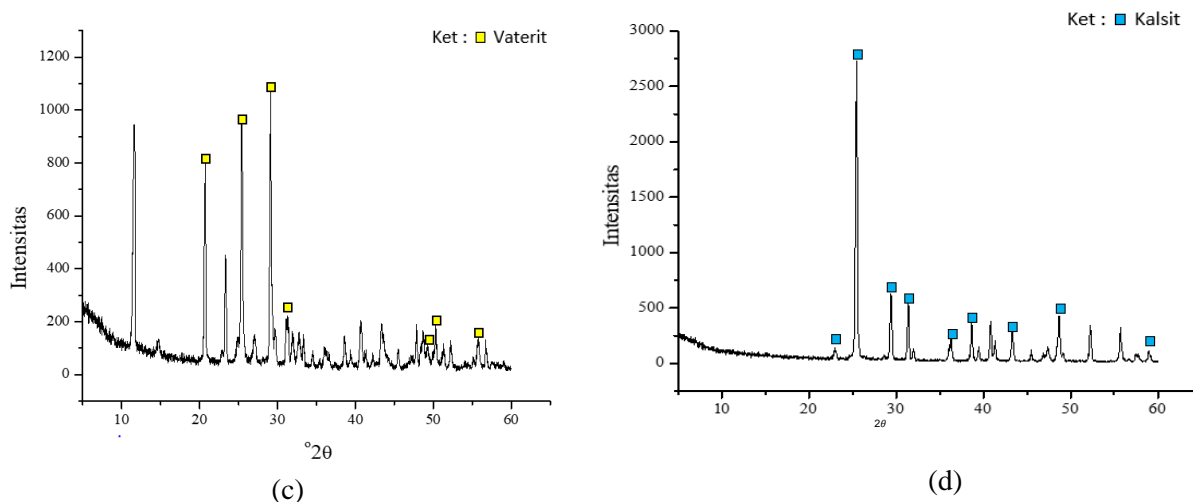
3. Identifikasi Hasil Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat

A. X-Ray Diffraction (XRD)

Analisa XRD dilakukan pada penelitian ini dengan tujuan untuk menentukan struktur kristal dengan mengidentifikasi jenis dan bentuk kristal [17] terutama kristal dari CaCO_3 yang terbentuk (fase kalsit, aragonit, atau vaterite).



Gambar 4. Spektrum XRD precipitated calcium carbonate (PCC) (a) konsentrasi 1 M karbonasi 60 menit, (b) konsentrasi 1 M karbonasi 90 menit,

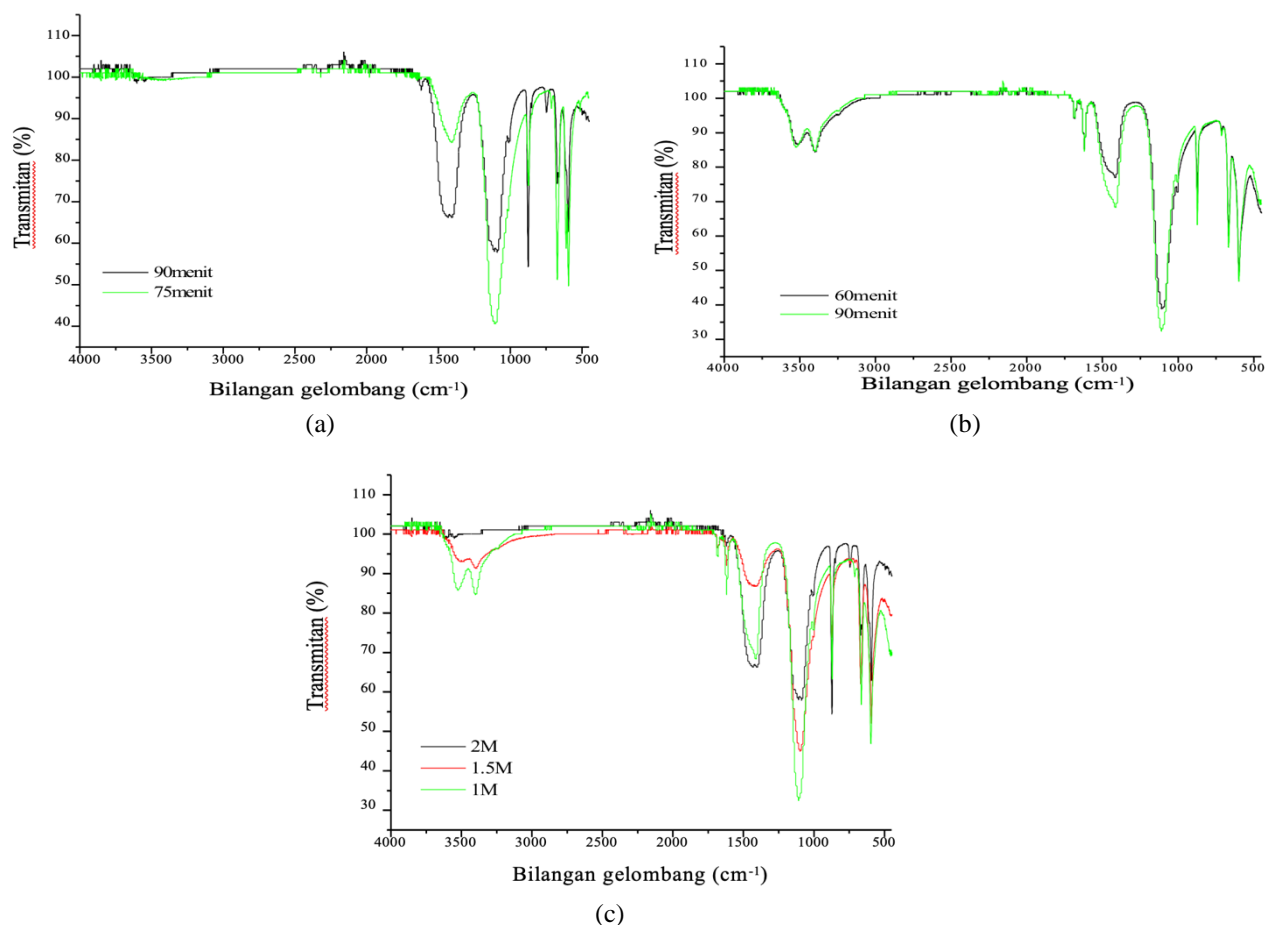


Gambar 5. Spektrum XRD precipitated calcium carbonate (PCC) (c) konsentrasi 1,5 M karbonasi 90 menit, (d) konsentrasi 2 M karbonasi 90 menit

Berdasarkan Gambar 3 (a) pola XRD memperlihatkan dominasi fase aragonit, yang dikenal sebagai bentuk metastabil dari CaCO_3 . Pembentukan aragonit pada kondisi ini kemungkinan besar disebabkan oleh waktu karbonasi yang masih relatif singkat, sehingga proses kristalisasi belum sepenuhnya berkembang menjadi fase yang lebih stabil seperti kalsit. Selain itu, konsentrasi asam yang rendah (1 M) menghasilkan larutan Ca^{2+} yang tidak terlalu jenuh, sehingga mendorong terbentuknya aragonite. Sedangkan pada Gambar 3 (b) pola XRD menunjukkan dominasi fase aragonit, namun dengan kristalinitas yang sedikit lebih tinggi dibanding Gambar 3 (a), hal ini menunjukkan bahwa perpanjangan waktu karbonasi dapat meningkatkan pembentukan kristal, namun pada konsentrasi asam yang masih rendah, sistem belum cukup jenuh untuk menghasilkan transformasi fase ke bentuk yang lebih stabil seperti kalsit. Pada Gambar 3 (c) pola XRD yang terbentuk yaitu fase vaterit. Vaterit merupakan bentuk kristal yang paling tidak stabil dari CaCO_3 , dan biasanya terbentuk pada kondisi supersaturasi tinggi serta laju nukleasi yang cepat. Pada kondisi ini, peningkatan konsentrasi asam mempercepat reaksi pelarutan CaCO_3 dari cangkang telur, sehingga menghasilkan larutan Ca^{2+} yang lebih jenuh. Jika karbonasi terjadi dengan kecepatan injeksi CO_2 yang tinggi atau tanpa pengadukan optimal, maka terbentuklah partikel vaterit sebelum mengalami transformasi lebih lanjut. Kemudian Gambar 3 (d) menunjukkan pola XRD yaitu di fase kalsit. Pada kondisi ini merupakan kondisi optimum, karena larutan memiliki cukup ion Ca^{2+} dari reaksi asam, dan waktu karbonasi cukup untuk memungkinkan transformasi kristal menjadi bentuk yang paling stabil, yaitu kalsit. Pola difraksi menunjukkan puncak tajam dan intens pada posisi khas kalsit (2θ sekitar 29° , 39° , dan 47°), yang mengindikasikan kristalinitas tinggi dan keberhasilan sintesis PCC murni dalam bentuk kalsit.

B. Fourier Transform Infrared (FTIR)

Analisa FTIR dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui keberadaan gugus fungsi khas [18] dalam senyawa yang menjadi indikator utama terbentuknya CaCO_3 serta memverifikasi pembentukan senyawa PCC dengan mendeteksi adanya pita serapan khas Ca-O dan CO_3^{2-} sebagai bukti keberhasilan sintesis PCC dari cangkang telur.



Gambar 5. Spektrum FTIR pada (a) waktu karbonasi 75 vs 90 menit, (b) waktu karbonasi 60 vs 90 menit, (c) konsentrasi 2M; 1,5M; dan 1M

Hasil perbandingan spektrum FTIR dari sampel hasil sintesis PCC pada berbagai waktu reaksi menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam intensitas dan ketajaman pita serapan gugus karbonat (CO_3^{2-}), yang menjadi indikator utama keberhasilan pembentukan Precipitated Calcium Carbonate (PCC). Spektrum FTIR pada gambar 5(a) menunjukkan bahwa pita serapan Ca-O muncul pada $594,66 \text{ cm}^{-1}$ (90 menit) dan $592,90 \text{ cm}^{-1}$ (75 menit). Keberadaan gugus karbonat (CO_3^{2-}) diperkuat oleh puncak pada $1088,36 \text{ cm}^{-1}$ dan $1404,81 \text{ cm}^{-1}$ (90 menit), serta $1104,30 \text{ cm}^{-1}$ dan $1406,91 \text{ cm}^{-1}$ (75 menit). Gugus -OH juga terdeteksi pada rentang $3601,37\text{--}3650,55 \text{ cm}^{-1}$. Sedangkan pada gambar 5(b) pita serapan Ca-O terdeteksi pada $597,14 \text{ cm}^{-1}$ (60 menit). Hasil analisis FTIR menunjukkan bahwa gugus karbonat (CO_3^{2-}) teridentifikasi dengan jelas melalui pita serapan pada bilangan gelombang $1107,72 \text{ cm}^{-1}$ dan $1411,00 \text{ cm}^{-1}$ pada waktu reaksi 60 menit. Intensitas pita serapan ini meningkat seiring bertambahnya waktu karbonasi, yang mengindikasikan peningkatan kandungan CaCO_3 dalam sampel [19]. Dibandingkan dengan waktu karbonasi 60 dan 75 menit, waktu karbonasi 90 menit menghasilkan puncak karbonat yang lebih tajam dan intens, menunjukkan pembentukan struktur kristal kalsium karbonat yang lebih sempurna. Dengan demikian, waktu reaksi berperan penting dalam mempengaruhi struktur kristal dan kuantitas CaCO_3 yang terbentuk [20].

Berdasarkan hasil analisa FTIR pada gambar di atas, spektrum menunjukkan adanya gugus fungsi khas dari kalsium karbonat (CaCO_3), terutama pada daerah bilangan gelombang sekitar $1400\text{--}1500 \text{ cm}^{-1}$ dan $870\text{--}710 \text{ cm}^{-1}$, yang merupakan ciri khas dari gugus karbonat (CO_3^{2-}). Puncak dengan intensitas tertinggi tampak pada sampel dengan konsentrasi asam 2 M, yang menunjukkan transmittansi paling tajam dan kuat dibandingkan dengan 1,5 M dan 1 M. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi intensitas penyerapan (absorbansi) pada daerah tersebut, maka semakin banyak kandungan karbonat yang terbentuk [21]. Selain itu, pada rentang 3400 cm^{-1} , terdapat pita serapan yang menunjukkan adanya gugus -OH, yang kemungkinan berasal dari kelembaban atau air yang

teradsorpsi [20]. Secara keseluruhan, spektrum FTIR ini mendukung bahwa kondisi terbaik untuk pembentukan kalsium karbonat dengan struktur kristal dominan adalah pada konsentrasi asam sulfat 2 M, karena menunjukkan puncak karbonat yang paling tajam, menandakan tingginya kandungan CaCO_3 pada sampel.

C. X-Ray Fluorescen

Analisa X-Ray Fluorescen dilakukan dengan tujuan untuk menentukan komposisi unsur dalam suatu bahan [22], dalam hal ini komposisi kalsium karbonat presipitat. Hasil terbaik diperoleh pada konsentrasi asam 2M dan waktu karbonasi 90 menit, karena terbentuk kristal kalsit yang menandakan terbentuknya CaCO_3 (Gambar 4(d)) dan menunjukkan puncak karbonat (CO_3^{2-}) paling tajam pada spektrum FTIR (Gambar 5(a)) yang menandakan kandungan CaCO_3 paling tinggi. Berikut adalah hasil analisa XRF-nya

Tabel 2. Hasil analisa XRF pada konsentrasi asam 2M dengan waktu karbonasi 90 menit

Senyawa	Konsentrasi (%)	Senyawa	Konsentrasi (%)
S	9.32 %	SO_3	18.8 %
Ca	89.88 %	CaO	80.89 %
Mn	0.063 %	MnO	0.047 %
Fe	0.058 %	Fe_2O_3	0.049 %
Co	0.06 %	Co_3O_4	0.04 %
Cu	0.036 %	CuO	0.026 %
Mo	0.4 %	Er_2O_3	0.07 %
Er	0.1 %	Lu_2O_3	0.08 %
Lu	0.12 %		


Berdasarkan tabel 2, komponen utama yang terdeteksi dalam sampel Precipitated Calcium Carbonate (PCC) adalah unsur kalsium (Ca) dengan konsentrasi sebesar 89,88%, yang dikonversi menjadi senyawa oksida berupa CaO sebesar 80,89%. Kandungan kalsium yang tinggi ini menunjukkan bahwa proses sintesis PCC dari cangkang telur dengan metode karbonasi berhasil menghasilkan produk yang kaya akan kalsium karbonat [23]. Selain kalsium, unsur sulfur (S) juga terdeteksi dengan konsentrasi sebesar 9,32%, yang berkorelasi dengan keberadaan senyawa SO_3 sebesar 18,8%. Keberadaan sulfur ini kemungkinan berasal dari penggunaan asam sulfat (H_2SO_4) dalam proses pelarutan kalsium dari cangkang telur. Unsur-unsur logam lain seperti Mn, Fe, Co, dan Cu ditemukan dalam jumlah yang sangat kecil (kurang dari 0,1%), menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat dalam produk akhir relatif rendah. Kandungan oksidanya juga kecil, masing-masing MnO 0,047%, Fe_2O_3 0,049%, Co_3O_4 0,04%, dan CuO 0,026%. Selain itu, terdeteksi pula unsur-unsur tanah jarang seperti erbium (Er) dan lutetium (Lu) dalam konsentrasi sangat kecil (0,1% dan 0,12%), dengan bentuk oksidanya Er_2O_3 0,07% dan Lu_2O_3 0,08%. Keberadaan unsur-unsur minor ini tidak mempengaruhi dominasi senyawa CaCO_3 dalam hasil akhir. Secara keseluruhan, hasil XRF mengonfirmasi bahwa cangkang telur merupakan sumber kalsium yang sangat potensial dan sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku alternatif ramah lingkungan dalam pembuatan PCC.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa XRF, XRD, dan FTIR, diperoleh bahwa Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari cangkang telur menggunakan metode karbonasi menunjukkan hasil optimum pada konsentrasi asam sulfat 2 M dan waktu karbonasi 90 menit. Pada kondisi ini, kandungan CaCO_3 mencapai 89,88%, dengan terbentuknya kristal kalsit (XRD) yang menandakan pembentukan kalsium karbonat dalam fase stabil. Spektrum FTIR juga menunjukkan puncak karbonat (CO_3^{2-}) paling tajam, mengindikasikan intensitas absorbansi yang tinggi dan kandungan CaCO_3 yang dominan. Hasil ini menunjukkan bahwa cangkang telur berpotensi besar sebagai sumber bahan baku PCC yang ramah lingkungan dan bernilai guna tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Sanlier and D. Üstün, "Egg consumption and health effects: A narrative review," *J. Food Sci.*, vol. 86, no. 10, pp. 4250–4261, 2021, doi: 10.1111/1750-3841.15892.
- [2] M. Farmasetika *et al.*, "Formulasi Tablet Kunyah Kombinasi Tepung Cangkang Telur dan Ekstrak Daun Kelor (*Moringa Oleifera* L.)," vol. 9, no. Suppl 1, pp. 83–96, 2024.
- [3] W. J. Stadelman and C. O. J., "Egg Science and Technology," *Poult. Sci.*, vol. 74, no. 12, p. 2061, 1995, doi: 10.3382/ps.0742061.
- [4] Z. Hu *et al.*, "Synthesis of needle-like aragonite from limestone in the presence of magnesium chloride," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 3, pp. 1607–1611, 2009, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.008.
- [5] N. F. Apriliani, M. a Baqiya, and Darminto, "Pengaruh Penambahan Larutan MgCl₂ pada Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat Berbahan Dasar Batu Kapur dengan Metode Karbonasi," *Sains dan Seni ITS*, vol. 1, no. 1, pp. B30–B34, 2012.
- [6] O. A. Jimoh, K. S. Ariffin, H. Bin Hussin, and A. E. Temitope, "Synthesis of precipitated calcium carbonate: a review," *Carbonates and Evaporites*, vol. 33, no. 2, pp. 331–346, 2018, doi: 10.1007/s13146-017-0341-x.
- [7] Z. Chen and Z. Nan, "Controlling the polymorph and morphology of CaCO₃ crystals using surfactant mixtures," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 358, no. 2, pp. 416–422, 2011, doi: 10.1016/j.jcis.2011.02.062.
- [8] N. Erdogan and H. A. Eken, "Precipitated Calcium Carbonate Production," *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, vol. 53, no. 1, pp. 57–68, 2017.
- [9] O. A. Jimoh, T. A. Otitoju, H. Hussin, K. S. Ariffin, and N. Baharun, "Understanding the precipitated calcium carbonate (PCC) production mechanism and its characteristics in the liquid-gas system using milk of lime (MOL) suspension," *South African J. Chem.*, vol. 70, no. January, pp. 1–7, 2017, doi: 10.17159/0379-4350/2017/v70a1.
- [10] B. ERCAN, Ç. M. ORAL, and D. KAPUSUZ, "Enhanced Vaterite And Aragonite Crystallization At Controlled Ethylene Glycol Concentrations," *Sak. Univ. J. Sci.*, vol. 23, no. 2, pp. 129–138, 2019, doi: 10.16984/saufenbilder.433985.
- [11] F. Liendo, M. Arduino, F. A. Deorsola, and S. Bensaid, "Factors controlling and influencing polymorphism, morphology and size of calcium carbonate synthesized through the carbonation route: A review," *Powder Technol.*, vol. 398, p. 117050, 2022, doi: 10.1016/j.powtec.2021.117050.
- [12] M. Zurairah *et al.*, "4 1,2,3," vol. 3, no. 7, pp. 651–656, 2024.
- [13] H. Arrizal, S. Maftukhah, and D. Agustine, "Potensi Limbah Cangkang Telur Ayam Sebagai Biosorben Logam Mangan (Mn) Dan Perbandingannya Dengan Koagulan Kimia," vol. 2, no. 2, pp. 0–5, 2024.
- [14] S. Sunardi and E. D. Krismawati, "Pengaruh Waktu Ekstraksi dan Konsentrasi HCL Terhadap Rendemen dan Kadar Kalsium pada Sintesis Nanokalsium Oksida dari Cangkang Telur Ayam," *Pros. Semin. Nas. Penelit. dan Pengabd. Kpd. Masy. (SNPPKM 2021)*, pp. 605–612, 2021.
- [15] N. Kaur and K. Singh, "A comparative study of Raman spectroscopic and photoluminescence properties of the eggshell powder and conventional calcium carbonate," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2426, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2426/1/012001.
- [16] N. Nuryoto, N. Mas'ulunniah, A. S. Choerunnisa, and S. Suripno, "Pemanfaatan Karbon Dioksida Untuk Sintesis Precipitated Calcium Carbonate (Pcc) Dengan Metode Karbonasi," *J. Integr. Proses*, vol. 10, no. 2, p. 90, 2021, doi: 10.36055/jip.v10i2.12286.
- [17] Endang Hartiningsih, "Identifikasi Jenis Mineral Industri Dengan Xrd Pada Sampel Batupasir Formasi Ekmai, Distrik Ertsberg, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua Tengah," *J. Sains dan Teknol.*, vol. 2, no. 2, pp. 169–180, 2023, doi: 10.58169/saintek.v2i2.208.
- [18] N. Nurfitriyana, Najma Annuria Fithri, Fitria, and Rini Yanuarti, "ANALISIS INTERAKSI KIMIA FOURIER TRANSFORM INFRARED (FTIR) TABLET GASTRORENTIF EKSTRAK DAUN PETAI (*Parkia speciosa* Hassk) DENGAN POLIMER HPMC-K4M DAN KITOSAN," *ISTA Online Technol. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 27–33, 2022, doi: 10.62702/ion.v3i2.69.

- ◆ 
- [19] R. Febrida, S. Setianto, E. Herda, A. Cahyanto, and I. M. Joni, “Structure and phase analysis of calcium carbonate powder prepared by a simple solution method,” *Heliyon*, vol. 7, no. 11, p. e08344, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08344.
- [20] G. Bin Cai *et al.*, “1,3-Diamino-2-hydroxypropane-N,N,N',N'-tetraacetic acid stabilized amorphous calcium carbonate: Nucleation, transformation and crystal growth,” *CrystEngComm*, vol. 12, no. 1, pp. 234–241, 2010, doi: 10.1039/b911426m.
- [21] D. G. Henry, J. S. Watson, and C. M. John, “Assessing and calibrating the ATR-FTIR approach as a carbonate rock characterization tool,” *Sediment. Geol.*, vol. 347, pp. 36–52, 2017, doi: 10.1016/j.sedgeo.2016.07.003.
- [22] Jamaluddin and E. Prasetyawati Umar, “Identifikasi Kandungan Unsur Logam Batuan Menggunakan Metode Xrf (X-Ray Fluorescence) (Studi Kasus: Kabupaten Buton),” *J. Geocелеbes*, vol. 2, no. 2, pp. 47–52, 2018.
- [23] L. Izzati, S. Rahayu, and D. W. Kurniawii, “IIDENTIFIKASI KARAKTERISTIK SERBUK KALSIUM KARBONAT (CaCO₃) DARI CANGKANG KERANG MUTIARA (Pinctada maxima),” *Indones. Phys. Rev.*, vol. 6, no. 1, pp. 114–123, 2023.