

SINTESIS DAN KARAKTERISASI PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE (PCC) DARI LIMBAH EKSTRAKSI ASPAL BUTON MENGGUNAKAN PELARUT ASAM ASETAT (CH_3COOH) DENGAN METODE KARBONASI

Arvy Yudha Sadewa^{a*}, A.P. Bayuseno, Rifky Ismail^c

^{a,b,c}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, S.H., Semarang 50275, Indonesia

*E-mail: arvysadewa@gmail.com

Abstrak

Precipitated calcium carbonate (PCC) merupakan salah satu sumber kalsium karbonat yang terkandung di alam. PCC mampu disintesis dengan bahan dasar yang mengandung kalsium karbonat di dalamnya, seperti limbah ekstraksi asbuton. Limbah ekstraksi asbuton merupakan produk sisa yang dihasilkan dari batuan aspal Buton yang dipisahkan kandungan bitumen dan mineralnya. Limbah ekstraksi asbuton memiliki potensi sebagai bahan baku pembuatan PCC sekaligus mengurangi pencemaran akibat limbah yang belum dimanfaatkan. Limbah ekstraksi asbuton diuji menggunakan XRF untuk mengetahui kandungan kalsium (Ca), dan menunjukkan bahwa kandungan Ca pada limbah asbuton sebesar 25.5%. Penelitian ini dilakukan untuk sintesis PCC menggunakan metode karbonasi berbasis bahan dasar limbah asbuton dengan tiga variasi laju aliran gas CO_2 yang berbeda. Hasil sintesis PCC limbah asbuton dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, dan SEM untuk mengetahui derajat kristalinitas, morfologi, ukuran kristal, struktur kristal, persentase kristalinitas, *wavenumber*, dan morfologi partikel PCC. Metodologi penelitian dilakukan secara kuantitatif dengan metode eksperimen dan analisis data bersifat kuantitatif/statistic, dengan tujuan untuk menguji dan membuktikan landasar teori yang telah ditetapkan. Proses sintesis PCC dilakukan dengan mencampurkan limbah asbuton terkalsinasi dengan asam asetat (CH_3COOH) dan ammonia (NH_4OH) untuk mendapatkan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dialiri dengan gas CO_2 dengan variasi laju aliran gas 1, 1.5, dan 2 L/menit pada suhu ruangan (30°C). Hasil yang diperoleh menunjukkan persentase kristalinitas tertinggi dihasilkan pada variasi laju aliran 1 L/menit dengan persentase 99.4% vaterit. Massa produk tertinggi yang dihasilkan sebesar 12.65gram pada variasi laju aliran 2 L/menit, dan ukuran kristal paling kecil di antara ketiga variasi. Polimorf yang dihasilkan pada semua variasi adalah dominan vaterit dengan sedikit kalsit dan aragonit. Morfologi vaterit berbentuk bulat.

Kata kunci: karbonasi, limbah asbuton, *precipitated calcium carbonate*

Abstract

Precipitated calcium carbonate (PCC) is one of the natural sources of calcium carbonate. PCC can be synthesized with basic materials containing calcium carbonate in it, such as asbuton extraction waste. Asbuton extraction waste is a residual product produced from Buton asphalt rock which is separated from its bitumen and mineral content. Asbuton extraction waste has the potential as a raw material for PCC manufacturing while reducing pollution due to unused waste. Asbuton extraction waste was tested using XRF to determine the calcium (Ca) content and showed that the Ca content in asbuton waste was 25.5%. This research was conducted for PCC synthesis using carbonation method based on asbuton waste with three different variations of CO_2 gas flow rate. The results of PCC synthesis of asbuton waste were characterized using XRD, FTIR, and SEM to determine the degree of crystallinity, morphology, crystal size, crystal structure, percentage of crystallinity, wavenumber, and particle morphology of PCC. The research methodology was carried out quantitatively with experimental methods and quantitative/statistical data analysis, with the aim of testing and proving the established theoretical basis. The PCC synthesis process was carried out by mixing calcined asbuton waste with acetic acid (CH_3COOH) and ammonia (NH_4OH) to obtain calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). $\text{Ca}(\text{OH})_2$ was flowed with CO_2 gas with various gas flow rates of 1, 1.5, and 2 L/min at room temperature (30°C). The results showed that the highest percentage of crystallinity was produced at a flow rate variation of 1 L/min with a percentage of 99.4% vaterite. The highest product mass produced was 12.65 grams at a flow rate variation of 2 L/min, and the smallest crystal size among the three variations. The polymorphs produced in all variations were spherical-vaterite dominant with a small amount of calcite and aragonite.

Keywords: asbuton waste, carbonation, precipitated calcium carbonate

1. Pendahuluan

Pemerintah Indonesia terus berusaha dan berkomitmen dalam upaya pengelolaan limbah hasil industri. Limbah hasil industri sendiri merupakan permasalahan yang serius di era industrialisasi seperti saat ini (1) Banyaknya limbah yang dihasilkan terus meningkat seiring dengan bertumbuhnya populasi manusia dan proses industrialisasi. Pengelolaan limbah merupakan salah satu perhatian utama di dunia (2). Maka dari itu pengolahan limbah merupakan solusi yang dapat ditawarkan dalam upaya mengurangi limbah industri serta dapat menghasilkan suatu produk yang bernilai. Nagali dkk. (3) menjelaskan bahwa aspal merupakan campuran kompleks yang tersusun dari berbagai macam senyawa organik dan kemungkinan mengandung bahan beracun sebagai bagian dari *polycyclic aromatic hydrocarbons* (PAHs), dimana PAH memiliki karsinogen yang tinggi. Sehingga pembuangan limbah aspal yang tidak tepat dapat menyebabkan meningkatnya kekhawatiran tentang dampak lingkungan dan kesehatan bagi makhluk hidup.

Aspal Buton (asbuton) merupakan cadangan aspal alam yang dihasilkan di daerah Buton, Sulawesi Tenggara, Indonesia. Indonesia sendiri dikenal sebagai negara penghasil aspal alam terbesar di dunia dengan jumlah cadangan mencapai 600 juta ton. Limbah padat asbuton adalah produk limbah hasil dari proses pembuatan aspal yang mengandung sumber mineral karbonat dan masih belum banyak dimanfaatkan (4). Aspal Buton memiliki kandungan CaCO_3 dan MgCO_3 cukup tinggi yang dapat dimanfaatkan menjadi produk bernilai. CaCO_3 adalah mineral serbaguna yang diaplikasikan di berbagai industri, antara lain digunakan sebagai *filler* pada kertas, cat, pigmen, *coating*, plastik, *sealant*, makanan, keramik, karpet, kosmetik, farmasi, semen (5).

Kalsium karbonat (CaCO_3) merupakan senyawa organik yang banyak ditemukan di alam. Sebanyak lebih dari 4% kalsium karbonat terdapat di kerak bumi. Kalsium karbonat banyak digunakan di berbagai jenis perindustrian seperti pembuatan kertas, plastik, tinta, cat, dan pipa polimer, serta dimanfaatkan juga di bidang kesehatan dan makanan (6). Kalsium karbonat diperoleh dari dua sumber yaitu *ground calcium carbonate* (GCC) ada secara alami yang diperoleh secara mekanik atau menggunakan tumbukan, dan *precipitated calcium carbonate* (PCC) yang diperoleh dari cara pengendapan (7). PCC yang telah diproduksi bersifat lebih murni daripada GCC, serta memiliki kandungan silika, magnesium dan timbal lebih rendah. Morfologi dan ukuran PCC berbeda dengan GCC. GCC terlihat berbentuk rombohedral tidak teratur di bawah perbesaran, sedangkan morfologi kristal PCC bergantung pada produk akhir, dan partikelnya hampir semua seragam dan beraturan dibanding GCC (8,9).

Secara natural PCC memiliki kristal polimorf yang berbeda yaitu kalsit, aragonit, dan vaterit (10). Kalsit merupakan bentuk polimorf yang paling stabil secara termodinamika dan dapat dijumpai dalam bentuk trigonal di alam bebas. Aragonit merupakan bentuk yang lebih larut dan lebih padat dibandingkan dengan *calcite* dan sering ditemukan dalam bentuk kristal ortorombik seperti jarum. Vaterit merupakan polimorf berbentuk kristal heksagonal yang paling tidak stabil secara termodinamika dibandingkan dengan bentuk lainnya dan sangat jarang ditemukan secara natural (11,12). PCC dapat disintesis dari bahan yang mengandung kalsium karbonat dengan tiga metode yaitu metode karbonasi, metode kaustik soda, dan metode *solway* (13).

Emisi gas CO_2 yang berlebihan dapat mengakibatkan permasalahan iklim global yang serius. Maka dari itu, diperlukan upaya dalam mengurangi emisi CO_2 . Salah satu upaya dalam mengurangi konsentrasi CO_2 yang berlebih di atmosfer yaitu dengan mengolah emisi gas CO_2 . Menurut John dkk. (14), salah satu langkah dalam memperlambat perubahan iklim yaitu dengan melenyapkan pencemaran antropogenik emisi gas karbon dioksida dari lokasi industri yang ada. Mereka juga menjelaskan dalam mengurangi sisa karbon dioksida diperlukan konseptualisasi multi-cabang seperti penangkapan dan pemanfaatan CO_2 , simbiosis antar industri, *heat integration*, serta penggunaan sumber daya terbarukan. Sehingga pembuatan PCC dengan bahan dasar asbuton menggunakan metode karbonasi dapat dikembangkan.

Penelitian mengenai sintesis *precipitated calcium carbonate* (PCC) telah banyak dilakukan. Beberapa penelitian dilakukan menggunakan metode karbonasi dan juga menggunakan metode kaustik soda. Bahan baku yang digunakan pun bermacam-macam untuk mengetahui karakteristik dan properti PCC yang dihasilkan. Octavianty dkk (15) melakukan penelitian sintesa PCC menggunakan cangkang kerang darah dengan variasi konsentrasi asam dan rasio CaO/HNO_3 , dimana hasil rendemen PCC terbaik sebesar 84,88% dengan jenis kristal *vaterite*. Ramadhani dkk (16) meneliti karakterisasi PCC dari cangkang rajungan dengan metode karbonasi sebagai biomaterial, dan variasi terbaik yang dihasilkan yaitu dengan fasa *calcite* sebesar 75% dan *vaterite* 25%. Sedangkan Velts dkk (17) menggunakan bahan baru sebagai sumber kalsium dalam pembuatan PCC. Mereka meneliti karakteristik PCC berbahan limbah abu *oil shale* dan PCC yang dihasilkan mengandung kurang lebih 96% CaCO_3 dengan formasi *calcite* dan *vaterite* bervariasi tergantung dari kondisi karbonasi. Penelitian jenis material ini sudah pernah dilakukan sebelumnya (18,19)

Berlandaskan dari penjabaran di atas, limbah padat asbuton yang memiliki kandungan kalsium (Ca) akan diteliti sebagai bahan dasar baru dalam sintesis *precipitated calcium carbonate* (PCC). Diharapkan dari penelitian berikut, limbah asbuton dapat dimanfaatkan hingga memiliki nilai komersial tinggi dan mampu membantu pemerintah Indonesia dalam mengurangi pencemaran lingkungan akibat limbah industri.

2. Material dan metodologi

Metodologi penelitian yang dilakukan terdiri dari tiga langkah yaitu proses reduksi butir limbah asbuton, proses kalsinasi limbah asbuton, dan proses sintesis PCC dari limbah asbuton terkalsinasi. Proses sintesis PCC dilakukan dengan mencampurkan limbah asbuton dengan asam asetat dan amonia untuk meningkatkan kelarutan ion Ca^{2+} pada oksida kalsium (CaO) sehingga membentuk garam yang mudah larut (20). Proses sintesis PCC menggunakan

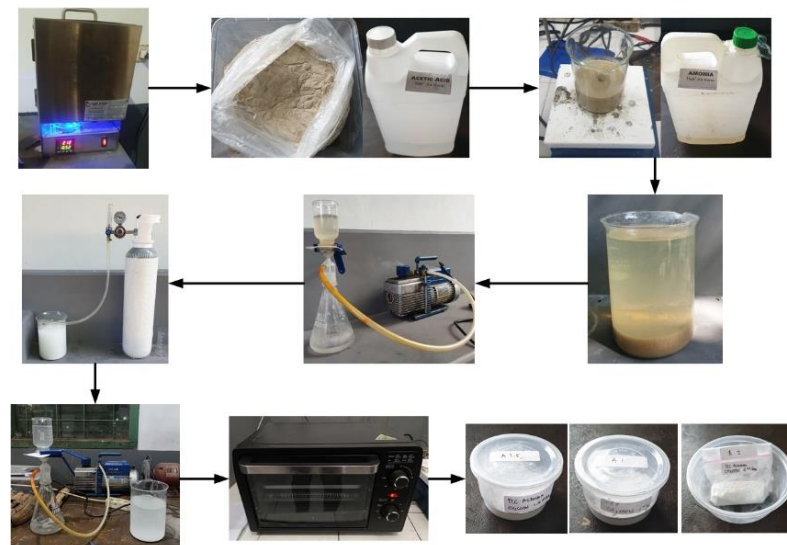
metode karbonasi dengan variasi laju aliran gas CO₂ 1, 1,5, dan 2 L/menit. Hasil serbuk PCC kemudian dilakukan karakterisasi menggunakan pengujian XRD, FTIR, dan SEM.

2.1 Bahan dan alat penelitian

Proses sintesis PCC memerlukan beberapa bahan antara lain limbah *dry solid* asbuton, asam asetat 2M, larutan amonia, akuades, dan gas CO₂. Adapun alat dalam proses sintesis dan karakterisasi PCC limbah asbuton antara lain *mesh* 100, *furnace*, *magnetic stirrer*, gelas beaker, tabung *Erlenmeyer*, pompa vakum, pH meter digital, kertas saring Whatman 42, mortar, oven, mesin uji SEM, mesin uji XRD, dan mesin uji FTIR.

2.2 Proses sintesis PCC

Penelitian ini diawali dengan menyiapkan bahan berupa limbah Aspal Buton atau asbuton. Asbuton kemudian diperhalus menggunakan *mesh* 100. Asbuton yang telah lolos *mesh* 100 dilakukan proses kalsinasi dengan suhu 900°C dengan waktu penahanan (*holding time*) selama 5 jam. Langkah selanjutnya yaitu sintesis *precipitated calcium carbonate* (PCC). Sintesis dimulai dengan pencampuran hasil kalsinasi limbah asbuton dengan larutan asam asetat (CH₃COOH) yang diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 15 dengan kecepatan magnet 1200 rpm pada suhu 60°C. Menurut Ahn dkk. (21), pencampuran asam nitrat dapat meningkatkan kelarutan ion kalsium pada Ca(OH)₂ dan pada penelitian ini menggunakan asam asetat yang merupakan asam seperti asam nitrat untuk meningkatkan kelarutan ion kalsium pada limbah asbuton terkalsinasi (CaO). Campuran kalsinasi dengan larutan asam kemudian dicampurkan dengan larutan amonia (NH₄OH) hingga mencapai pH 12, kemudian disaring menggunakan *vacuum filtration* melalui gelas *Erlenmeyer* 2 L. Cairan hasil saringan (Ca(OH)₂) diambil dan kemudian dialiri dengan gas CO₂ dengan variasi kecepatan aliran gas 1 L/menit, 1.5 L/menit, 2 L/menit hingga pH cairan turun menjadi 8. Cairan yang telah dialiri disaring menggunakan *vacuum filtration* dan diambil serbuk putih susu yang mengendap yang merupakan endapan kalsium karbonat (CaCO₃). Serbuk kemudian dicuci dengan akuades secara berkala hingga pH larutan stabil. Serbuk PCC kemudian dioven pada suhu 110°C selama 2 jam untuk menghilangkan kandungan air (H₂O). PCC yang telah disintesis dilakukan karakterisasi berupa *x-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy* (SEM) dan *fourier transform infrared* (FTIR) *spectroscopy*. Lebih jelasnya, prosedur sintesis PCC ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Prosedur sintesis PCC

2.3 Karakterisasi PCC

Serbuk PCC kemudian dikarakterisasi menggunakan metode XRD, FTIR, dan SEM. Pengujian XRD yang dipakai menggunakan difraktometer PANalytical Empyrean dengan jenis software PANalytical X'Pert High ScorePlus Version 3.0e. dengan radiasi Cu K α , 1.54 Å; 40 kV dan 40 mA. Jumlah sampel yang diuji pada karakterisasi XRD sebanyak 17 gram, kemudian dimasukkan kedalam holder yang berukuran (2x2) cm² pada difraktometer. Sudut awal diambil pada 10° dan sudut akhir pada 80° dengan kecepatan baca 4° per menit. Pengujian SEM menggunakan JEOL JSM – 6510LA dengan jangkauan energi 0 – 5 kV. Pengujian FTIR, XRD dan SEM dilakukan di Laboratorium UPT Terpadu Universitas Diponegoro.

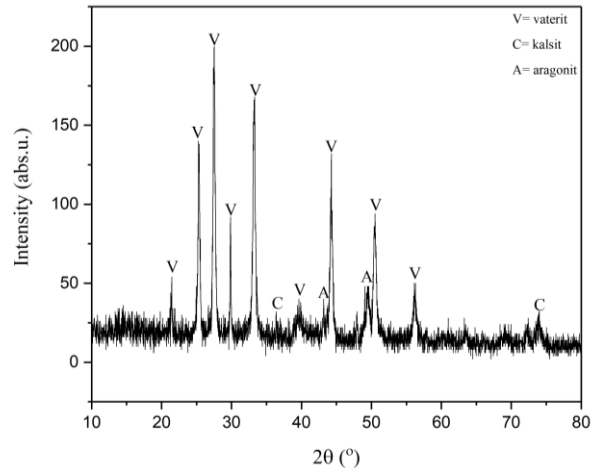
3. Hasil dan pembahasan

3.1 Karakterisasi XRD

Serbuk PCC limbah asbuton diuji menggunakan metode XRD untuk mengetahui persentase kristalinitas, ukuran kristal, dan volume kristal yang dihasilkan. Data yang didapatkan dianalisa menggunakan *software PANalytical*

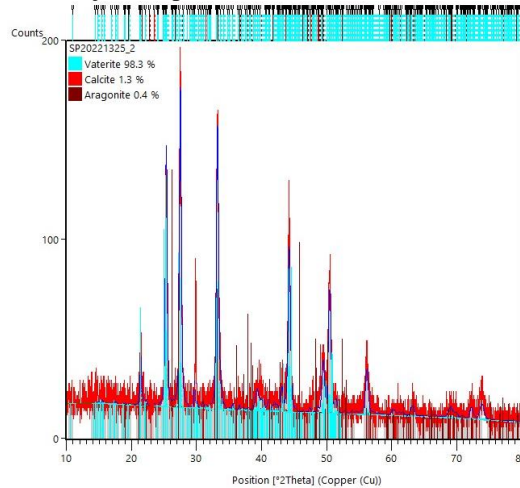
HighScore Plus untuk mengetahui persentase kristalinitas dan ukuran kristal PCC, dan *software OriginLab* untuk memperoleh grafik difraktogram serbuk PCC limbah asbuton.

Persentase kristalinitas dari PCC limbah asbuton laju aliran 1,5 L/menit menunjukkan peaks dominan berada pada $2\theta = 27.5278^\circ$, 25.3629° , dan 33.2365° dengan intensitas relatif sebesar 116, 73, dan 99. Data hasil pengujian XRD PCC berbahan limbah asbuton dibandingkan terhadap peak 2θ dan intensitas relatif pada Joint Committee for Powder Diffraction Data Standards (JCPDS) dengan kode 96-150-8972, JCPDS kode 96-901-3802, dan JCPDS kode 96-900-0969. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa fasa kristal yang dihasilkan dari PCC berbahan limbah asbuton sebagian besar berupa kristal vaterit, dengan sedikit porsi kristal kalsit dan aragonit. Grafik difraktogram PCC 1,5 L/menit ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik difraktogram PCC limbah asbuton

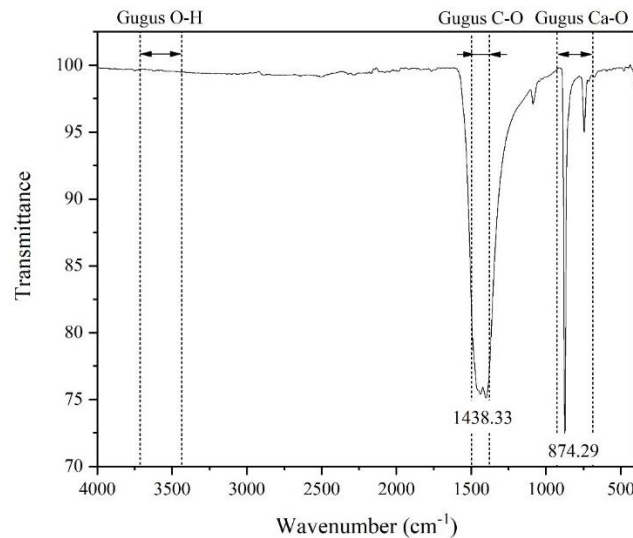
Menggunakan analisis *Rietveld*, diketahui bahwa persentase kristalinitas yang terkandung pada PCC limbah asbuton dengan laju aliran gas CO_2 1.5 L/menit adalah 98.4% kristal vaterit, 1.2% kristal kalsit, dan 0.4% kristal aragonit. Diketahui juga rata-rata ukuran kristal yang dihasilkan yaitu 320.8 \AA atau 32.08 nm dan volume kristal sebesar 1130.586 \AA^3 . Grafik analisis *Rietveld* ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis *Rietveld* PCC 1,5 L/menit

3.2 Karakterisasi FTIR

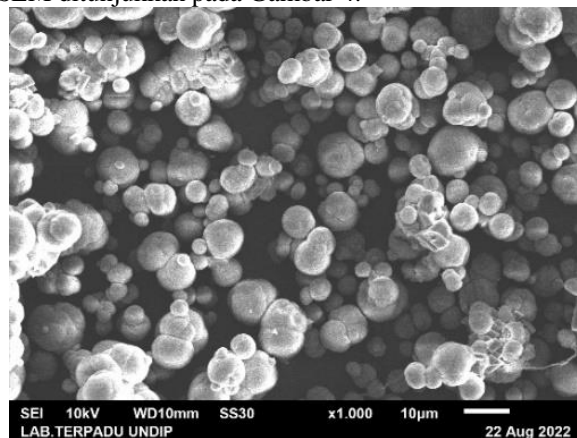
Karakterisasi berikutnya yang dilakukan adalah analisis spektra inframerah (FTIR) terhadap PCC limbah asbuton. Pengujian FTIR dilakukan di Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro. Pengujian FTIR dilakukan pada interval *wavenumber* $4000 \text{ cm}^{-1} - 400 \text{ cm}^{-1}$. Berdasarkan hasil pengujian FTIR, sampel PCC limbah asbuton dengan laju aliran gas 1.5 L/menit menunjukkan titik puncak pada *wavenumber* 1438.33 cm^{-1} dan 874.29 cm^{-1} . Puncak yang berada pada *wavenumber* 1438.33 cm^{-1} menunjukkan vibrasi gugus C–O yang ada pada CaCO_3 , dan pada *wavenumber* 874.29 cm^{-1} menunjukkan vibrasi gugus Ca–O yang ada pada CaCO_3 . Hasil pengujian FTIR PCC limbah asbuton dengan laju aliran gas CO_2 1.5 L/menit tidak menunjukkan adanya puncak getaran pada gugus O–H yang menunjukkan bahwa PCC limbah asbuton variasi ini telah dikeringkan dengan baik sehingga tidak mengandung air (H_2O) maupun sisa kalsium hidroksida (Ca(OH)_2). Spektra FTIR PCC limbah asbuton dengan laju aliran gas CO_2 1.5 L/menit ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik spektra FTIR PCC 1,5 L/menit

3.3 Karakterisasi SEM

Karakterisasi (SEM) dilakukan untuk mengetahui bentuk morfologi dari partikel (PCC) berbahan limbah asbuton yang telah disintesis. Hasil pengujian SEM PCC limbah asbuton. Gambar morfologi PCC limbah asbuton 1,5 L/menit yang telah dilakukan pengujian SEM ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Morfologi SEM PCC 1,5 L/menit

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, limbah asbuton terbukti mampu digunakan sebagai alternatif bahan baku dalam sintesis PCC. PCC yang dihasilkan menggunakan metode karbonasi menunjukkan persentase kristalinitas dengan kristal dominan jenis kristal vaterit dan ukuran kristal PCC berkisar pada 29 – 32 nm. Berdasarkan uji SEM, kristal vaterit yang terbentuk memiliki bentuk *spherical*.

5. Daftar Pustaka

1. Başaran B. What makes manufacturing companies more desirous of recycling? *Management of Environmental Quality: An International Journal*. 2012;24(1):107–22.
2. Demirbas A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. *Energy Convers Manag*. 2011 Feb;52(2):1280–7.
3. Nagalli A, Schneider ED, Aparecida M, Porfírio S, Schroh MR, Schamne AN, dkk. Potential of Environmental Contamination Associated with Disposal of Asphalt Waste in Soil. *European Journal of Government and Economics*. 2015;20(14):5957–68.
4. Nuryanto A. ASPAL BUTON (ASBUTON) SEBAGAI BAHAN BAKAR ROKET PADAT. *Jurnal Teknologi Dirgantara*. 2009 Jul;7(1):36–45.
5. Elfina S, Renedi W. Pembuatan dan analisis precipitate calcium carbonate dari batu kapur dengan metode karbonasi. *Majalah Ilmiah Teknologi Industri (SAINTI)*. 2019;16(1):7–12.
6. Hu Z, Shao M, Cai Q, Ding S, Zhong C, Wei X, dkk. Synthesis of needle-like aragonite from limestone in the presence of magnesium chloride. *J Mater Process Technol*. 2009 Feb 1;209(3):1607–11.

7. Apriliyani FN, Baqiya MA, Darminto. Pengaruh penambahan larutan $MgCl_2$ pada sintesis kalsium karbonat presipitat berbahan dasar batu kapur dengan metode karbonasi. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 2012 Sep;1(1):30–4.
8. Jimoh OA, Ariffin KS, Hussin H bin, Temitope AE. Synthesis of precipitated calcium carbonate: A review. *Carbonates Evaporites*. 2018 Jun 1;33(2):331–46.
9. Chen Z, Nan Z. Controlling the polymorph and morphology of $CaCO_3$ crystals using surfactant mixtures. *J Colloid Interface Sci*. 2011 Jun 15;358(2):416–22.
10. Berger C, Dandeu A, Carteret C, Humbert B, Muhr H, Plasari E, dkk. Relations for the determination of the polymorphic composition of calcium carbonate precipitated in saturated sodium chloride solutions. *Chem Eng Trans*. 2009;17:681–6.
11. Dizaj SM, Barzegar-Jalali M, Zarrintan MH, Adibkia K, Lotfipour F. Calcium Carbonate Nanoparticles; Potential in Bone and Tooth Disorders. *Pharmaceutical Sciences [Internet]*. 2015;20:175–82. Available from: <http://journals.tbzmed.ac.ir/PHARM>
12. Piskin S, Ozgul DO. Effect of Process Conditions on Crystal Structure of PCC from Fly Ash: Na_2CO_3 Preparation Conditions. *International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences (IJBEES)*. 2012;1(6):192–5.
13. Jamarun N, Yulfitri, Arief S. Pembuatan Precipitated Calcium Carbonate (PCC) Dari Batu Kapur Dengan Metoda Kaustik Soda. *Jurnal Riset Kimia*. 2007 Sep;1(1):20–4.
14. John JM, Wan Alwi SR, Liew PY, Omoregbe DI, Narsingh U. A comprehensive carbon dioxide reduction framework for industrial site using pinch analysis tools with a fuel cell configuration. *J Clean Prod*. 2022 Agu 15;362.
15. Octavianty D, Amri A, Zultiniar, Yelmida. SINTESA PRECIPITATED CALCIUM CARBONATE (PCC) DARI KULIT KERANG DARAH (*Anadara granosa*) DENGAN VARIASI KONSENTRASI ASAM DAN RASIO CaO/HNO_3 . *JOM FTEKNIK*. 2015 Okt;2(2):1–6.
16. Ramadhani MS, Abrianto D, Muljani S. Karakterisasi Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dari Cangkang Rajungan dengan Metode Karbonasi sebagai Biomaterial. *Journal of Chemical and Process Engineering Jurnal ChemPro [Internet]*. 2021;2(1):13–7. Available from: www.chempro.upnjatim.ac.id
17. Velts O, Uibu M, Kallas J, Kuusik R. Waste oil shale ash as a novel source of calcium for precipitated calcium carbonate: Carbonation mechanism, modeling, and product characterization. *J Hazard Mater*. 2011 Nov 15;195:139–46.
18. Rahman A, Nurhidayat S, Bayuseno AP, Ismail R, Taqriban RB. Review of the temperature and holding time effects on hydroxyapatite fabrication from the natural sources. *Journal of Biomedical Science and Bioengineering [Internet]*. 2021 Apr 17 [dikutip 2023 Jan 23];1(1):27–31. Available from: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jbiomes/article/view/10669>
19. Prasetya AY, Darmanto D, Dzulfikar M. The Effect of Plasma Nitridation on Surface Hardness of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) for Artificial Knee Joint Applications. *Journal of Biomedical Science and Bioengineering [Internet]*. 2022 Jan 3 [dikutip 2023 Jan 23];1(2):49–53. Available from: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jbiomes/article/view/12666>
20. Zikri A, Amri A, Zultiniar, Yelmida. Sintesa precipitated calcium carbonate (PCC) dari cangkang kerang darah (*Anadara granosa*) dengan variasi jenis asam dan waktu karbonasi. *JOM FTEKNIK*. 2015 Okt;2(2):1–6.
21. Ahn JW, Kim JH, Park HS, Kim JA, Han C, Kim H. Synthesis of single phase aragonite precipitated calcium carbonate in $Ca(OH)_2-Na_2CO_3-NaOH$ reaction system. *Korean J Chem Eng*. 2005;22:852–6.