

**SKRIPSI**

**STUDI FABRIKASI KOMPOSIT *HA/ HNT* BERPORI  
MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK  
ADSORPSI CO<sub>2</sub>**



**FADHLAN ZUHAIR**

**03051282025068**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2024**



**SKRIPSI**

**STUDI FABRIKASI KOMPOSIT *HA/HNT* BERPORI  
MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK  
ADSORPSI CO<sub>2</sub>**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana  
Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**



**OLEH**

**FADHLAN ZUHAIR**

**03051282025068**

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

**2024**



HALAMAN PENGESAHAN

STUDI FABRIKASI KOMPOSIT *HA/HNT* BERPORI  
MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI  
 $\text{CO}_2$

SKRIPSI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin  
Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:

FADHLAN ZUHAIR

03051282025068

Palembang, 4 April 2024

Diperiksa dan disetujui oleh

Pembimbing Skripsi

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Irsyad Yani, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.  
NIP. 197112251997021001



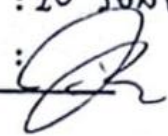
Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197909272003121004



JURUSAN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No.  
Diterima Tanggal  
Paraf

: 098/TH/AK/202  
: 20 JUNI 2024



SKRIPSI

NAMA : FADHLAN ZUHAIR  
NIM : 03051282025068  
JURUSAN : TEKNIK MESIN  
JUDUL SKRIPSI : STUDI FABRIKASI KOMPOSIT HA/HNT  
BERPORI MELALUI PROSES SINTERING  
DINGIN UNTUK ADSORPSI CO<sub>2</sub>  
DIBUAT TANGGAL : 18 NOVEMBER 2023  
SELESAI TANGGAL : 22 MEI 2024

Palembang, Juni 2024

Diperiksa dan disetujui oleh:  
Pembimbing Skripsi

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin



Irsyad Yani, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.  
NIP. 197112251997021001



Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197909272003121004





## HALAMAN PERSETUJUAN


Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “STUDI FABRIKASI KOMPOSIT HA/HNT BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO<sub>2</sub>” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 22 Mei 2024.

Indralaya, 22 Mei 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Skripsi:

Ketua:

1. Barlin, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 198106302006041001



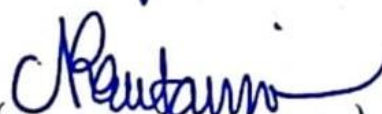
(.....)

Anggota:

2. Gunawan, S.T., M.T., Ph.D.  
NIP. 197705072001121001
3. Nurhabibah Paramitha Eka Utami, S.T., M.T.  
NIP. 198911172015042003



(.....)



(.....)

Mengetahui,  
Ketua Jurusan Teknik Mesin



Irsyad Yani, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM.  
NIP. 197112251997021001

Dosen Pembimbing



Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197909272003121004



## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Allah Swt. Atas ridha-Nya. Penulis dapat menyelesaikan penyusunan proposal skripsi ini. Adapun judul skripsi yang penulis ajukan adalah “Studi Fabrikasi Komposit *HA/HNT* Berpori Melalui Proses Sintering Dingin Untuk Adsorpsi CO<sub>2</sub>”

Skripsi ini diajukan untuk memenuhi syarat kelulusan sidang sarjana di jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya . Tidak dapat disangkal bahwa butuh usaha yang keras dalam penyelesaian pengerjaan skripsi ini. Namun, karya ini tidak akan selesai tanpa orang-orang tercinta di sekeliling saya yang mendukung dan membantu. Terima kasih saya sampaikan kepada:

1. Mama dan Papa serta seluruh keluarga yang telah mendukung, menyemangati dan selalu membantu penulis.
2. Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dan selaku Dosen Pembimbing Skripsi yang telah banyak sekali memberikan arahan, saran serta nasihat dalam menyelesaikan Proposal Skripsi ini.
3. Irsyadi Yani, S.T, M.Eng, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya.
4. Gunawan, S.T., M.T. selaku Pembina Mahasiswa Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dan selaku Dosen Pengarah yang membantu dalam pembuatan Proposal Skripsi ini.
5. Seluruh tenaga pendidik dan kependidikan di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, yang telah memberikan ilmu dan pelajaran yang bermanfaat kepada Penulis selama masa perkuliah.
6. Seluruh pihak yang telah mendukung Penulis dalam pembuatan Proposal Skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak sekali kekurangan, karena keterbatasan ilmu yang penulis miliki. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan supaya dapat lebih baik lagi

dikemudian hari. Akhir kata penulis berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan di masa yang akan datang.

Indralaya, 4 April 2024

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Fadhlán Zuháir', with a large, stylized initial 'F'.

Fadhlán Zuháir  
NIM. 03051282025068

## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fadhlan Zuhair

NIM : 03051282025068

Judul : Studi Fabrikasi Komposit *HA/HNT* Berpori Melalui Proses Sintering  
Dingin Untuk Adsorpsi CO<sub>2</sub>

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*corresponding author*).

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.

Indralaya, 10 Juni 2024



Fadhlan Zuhair  
NIM. 03051282025068



## HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fadhlan Zuhair

NIM : 03051282025068

Judul : Studi Fabrikasi Komposit *HA/HNT* Berpori Melalui Proses Sintering Dingin Untuk Adsorpsi CO<sub>2</sub>

Menyatakan bahwa skripsi saya merupakan hasil karya saya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai dengan aturan yang berlaku.

Demikian pernyataan saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari pihak manapun.



Indralaya, 10 Juni 2024



Fadhlan Zuhair  
NIM. 03051282025068





## RINGKASAN

STUDI FABRIKASI KOMPOSIT *HA/HNT* BERPORI MELALUI PROSES  
SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO<sub>2</sub>

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Karya tulis ilmiah berupa skripsi, 10 Juni 2024

Fadhlan Zuhair, dibimbing oleh Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.

Xxxi + 82 halaman, 46 gambar, 8 tabel

### RINGKASAN

Belakangan ini, dunia menghadapi masalah serius terkait perubahan iklim dan pemanasan global akibat berbagai faktor seperti bencana alam, pertumbuhan populasi, eksploitasi sumber daya alam, industrialisasi, dan mobilitas transportasi. Aktivitas-aktivitas tersebut berkontribusi pada peningkatan gas rumah kaca (GRK), seperti Hydrofluorocarbon (HFCs), Perfluorokarbon (CFCs), Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>), Sulfur Heksafluorida (SF<sub>6</sub>), Metana (CH<sub>4</sub>), dan Nitrous Oksida (N<sub>2</sub>O). Emisi gas-gas ini melampaui batas alami, meningkatkan efek rumah kaca dan menyebabkan pemanasan global. Emisi CO<sub>2</sub>, meningkat signifikan sejak 1960, mencapai 421,08 ppm pada 2023, dengan sektor transportasi sebagai penyumbang utama. Untuk mengurangi emisi CO<sub>2</sub>, berbagai metode telah dikembangkan, termasuk adsorpsi, yang mudah diaplikasikan dan ramah lingkungan. Salah satu bahan adsorben potensial adalah keramik berpori berbasis hidroksiapatit (HA), yang dapat dibuat dari sumber kalsium alami seperti tulang sapi. Hidroksiapatit memiliki potensi besar sebagai adsorben CO<sub>2</sub> karena strukturnya yang berpori. Limbah tulang sapi dipilih sebagai bahan dasar biokeramik karena melimpah dan kurang dimanfaatkan. Selain itu, *halloysite nanotube* (HNT), bahan nano alami berbasis tanah liat, juga menunjukkan potensi sebagai adsorben dan penguat matriks karena struktur mikroporinya dan kemampuan memperbaiki matriks. Penelitian ini menggunakan metode sintering dingin (*cold sintering*) untuk

pembuatan keramik komposit hidroksiapatit, yang lebih hemat energi dibandingkan metode sintering konvensional. Metode ini memungkinkan penyinteran pada suhu rendah dengan waktu kompaksi singkat dan tekanan sedang, menjadikannya lebih ekonomis dan efisien. Matriks HA yang digunakan berbentuk serbuk dengan spesifikasi ukuran 200 *mesh* (0,074 mm). Proses pembuatannya melibatkan beberapa tahap yaitu, kalsinasi tulang sapi menggunakan tungku pembakaran (*furnace*), *ball milling*, penyaringan dengan *sieving* 200, pencampuran menggunakan *ball milling*, dan fabrikasi spesimen dengan metode sintering dingin (*cold sintering*) menggunakan variasi tekanan 300 MPa, 400 MPa, dan 500 MPa selama 15 menit pada suhu 250°C. Pengujian yang dilakukan meliputi, pengujian densitas untuk mengetahui persentase porositas yang terbentuk pada keramik komposit berpori dengan komposisi 95%, 96%, dan 97% HA/5%, 4%, dan 3% HNT, pengujian *X-ray diffraction* (XRD) untuk menunjukkan fasa yang terbentuk pada komposit, pengujian *scanning electron microscopy* (SEM) untuk memvisualisasikan bentuk, interkoneksi, dan ukuran pori yang terbentuk, serta pengujian *carbon capture* untuk mengetahui kemampuan keramik komposit berpori HA/HNT dalam mengadsorpsi CO<sub>2</sub>. Hasil pengujian densitas mengungkapkan bahwa porositas rata-rata menurun seiring dengan peningkatan komposisi HNT dan peningkatan tekanan kompaksi pada saat sintering dingin. Analisis difraksi sinar X menunjukkan bahwa setelah sintering dingin, fasa yang terbentuk tetap tidak berubah, yaitu fasa hidroksiapatit dan fasa *halloysite nanotube*. Pengujian SEM menunjukkan bahwa pori yang terbentuk pada perbesaran 2000x, 3000x, dan 5000x berukuran antara 0,36 µm hingga 4,10 µm. Pengujian *carbon capture* menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi adsorben menurun pada aplikasi kedua, dengan rata-rata adsorpsi sebesar 59% (926,65 ppm).

**Kata kunci:** *carbon capture*, hidroksiapatit, *halloysite nanotube*, sintering dingin, porositas

## SUMMARY

### FABRICATION STUDY OF POROUS HA/HNT COMPOSITES THROUGH COLD SINTERING PROCESS FOR CO<sub>2</sub> ADSORPTION

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Scientific Paper in the Form of a Thesis, June 10<sup>th</sup>, 2024

Fadhlan Zuhair, supervised by Prof. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D.

Xxxi + 82 pages, 46 images, 8 tables

#### SUMMARY

Recently, the world has been facing serious issues related to climate change and global warming due to various factors such as natural disasters, rapid population growth, over-exploitation of natural resources, industrialization, and transportation mobility. These activities contribute to the increase in greenhouse gases (GHGs), such as Hydrofluorocarbons (HFCs), Perfluorocarbons (PFCs), Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>), Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>), Methane (CH<sub>4</sub>), and Nitrous Oxide (N<sub>2</sub>O). The emission of these gases exceeds natural limits, enhancing the greenhouse effect and causing global warming. CO<sub>2</sub> emissions, which have increased significantly since 1960, reached 421.08 ppm in 2023, with the transportation sector being a major contributor. To reduce CO<sub>2</sub> emissions, various methods have been developed, including adsorption, which is easy to apply and environmentally friendly. One potential adsorbent material is porous hydroxyapatite (HA) based ceramics, which can be made from natural calcium sources such as bovine bones. Hydroxyapatite has significant potential as a CO<sub>2</sub> adsorbent due to its porous structure. Bovine bone waste is chosen as the raw material for bioceramics because it is abundant and underutilized. Additionally, halloysite nanotube (HNT), a natural nano clay-based material, also shows potential as an adsorbent and matrix reinforcement due to its microporous structure and ability to improve the matrix. This research employs the cold sintering method for the production of hydroxyapatite composite ceramics,

which is more energy efficient compared to conventional sintering methods. This method allows sintering at low temperatures with short compaction times and moderate pressure, making it more economical and efficient. The HA matrix used is in powder form with a particle size specification of 200 mesh (0.074 mm). The fabrication process involves several steps: calcination of bovine bones using a furnace, ball milling, sieving with a 200 mesh sieve, mixing using ball milling, and specimen fabrication using the cold sintering method with varying pressures of 300 MPa, 400 MPa, and 500 MPa for 15 minutes at a temperature of 250°C. The tests conducted include density testing to determine the porosity percentage of the porous composite ceramics with compositions of 95%, 96%, and 97% HA/5%, 4%, and 3% HNT; X-ray diffraction (XRD) testing to show the phases formed in the composite, scanning electron microscopy (SEM) testing to visualize the shape, interconnection, and size of the pores formed; and carbon capture testing to determine the CO<sub>2</sub> adsorption capacity of the HA/HNT porous composite ceramics. The density tests revealed that the average porosity decreased with increasing HNT composition and compaction pressure during cold sintering. X-ray diffraction analysis indicated that the phases formed after cold sintering remained unchanged, specifically the hydroxyapatite and halloysite nanotube phases. SEM testing showed that the pores formed at magnifications of 2000x, 3000x, and 5000x ranged in size from 0.36 μm to 4.10 μm. Carbon capture testing indicated that the adsorption capacity of the adsorbent decreased on the second application, with an average adsorption rate of 59% (926.65 ppm).

**Keywords:** carbon capture, hydroxyapatite, halloysite nanotube, cold sintering, porosity

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	v
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	xiii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	xiv
RINGKASAN .....	xvii
SUMMARY .....	xix
DAFTAR ISI.....	xx
DAFTAR GAMBAR .....	xxv
DAFTAR TABEL.....	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxix
DAFTAR SIMBOL.....	xxxi
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang.....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	4
1.3    Ruang Lingkung Penelitian .....	5
1.4    Tujuan Penelitian .....	6
1.5    Manfaat Penelitian .....	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	7
2.1    Emisi Gas Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ).....	7
2.2    Teknologi Penangkapan dan Penyimpanan Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ).....	9
2.2.1    Metode Absorpsi.....	10
2.2.2    Metode Kriogenik .....	10
2.2.3    Metode Membran.....	10
2.2.4    Metode Adsorpsi.....	11
2.3    Adsorpsi CO <sub>2</sub> pada Material Berpori .....	11
2.3.1    Chemisorpsi CO <sub>2</sub> ke Adsorben .....	14
2.3.2    Fisorpsi CO <sub>2</sub> ke Adsorben .....	14
2.4    Material Komposit .....	15
2.4.1    Klasifikasi Material Komposit.....	15

2.5	Keramik Berpori ( <i>Porous Ceramic</i> ).....	16
2.6	Limbah Tulang Sapi .....	18
2.7	Hidroksiapatit .....	19
2.7.1	Hidroksiapatit Sebagai Adsorben.....	20
2.8	Sintesis Hidroksiapatit.....	23
2.8.1	Metode Kalsinasi.....	23
2.8.2	Metode <i>Mechanochemical</i> .....	24
2.8.3	<i>Solid State</i> .....	24
2.8.3	Metode Hidrotermal ( <i>Hydrothermal Method</i> ).....	24
2.8.4	Metode Sol-Gel .....	25
2.8.5	Metode Presipitasi ( <i>Precipitation Method</i> ) .....	25
2.8.6	Emulsi Beragam ( <i>Multiple Emulsion</i> ).....	26
2.9	<i>Halloysite Nanotube</i> .....	26
2.10	Kompaksi .....	28
2.11	Sintering .....	29
2.12	<i>Cold Sintering</i> .....	30
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN .....		33
3.1	Rancangan Penelitian .....	33
3.2	Persiapan Keramik Hidroksiapatit/ <i>Halloysite Nanotube</i> Berpori ....	34
3.3	Persiapan Alat dan Bahan .....	34
3.4	Prosedur Penelitian.....	35
3.4.1	Proses Persiapan Hidroksiapatit (Tulang Sapi) .....	35
3.4.2	Persiapan <i>Reinforced</i> .....	36
3.4.3	Persiapan Keramik Hidroksiapatit .....	36
3.4.4	Pembuatan Keramik Hidroksiapatit/ <i>Halloysite Nanotube</i> Berpori ..	39
3.5	Metode Pengujian.....	40
3.5.1	Pengujian Densitas .....	41
3.5.2	Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	42
3.5.3	Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	43
3.6	Uji <i>Carbon Capture</i> .....	44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....		47
4.1	Pembuatan HA/HNT Berpori.....	47
4.2	Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	48
4.2.1	Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> Kalsinasi Tulang Sapi .....	49

4.2.2	Hasil <i>X-Ray Diffraction Halloysite Nanotube</i> .....	50
4.2.3	Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> Keramik Komposit HA/HNT Berpori .....	51
4.3	Pengujian Densitas dan Porositas .....	52
4.4	Pengujian SEM .....	57
4.6	Hasil Pengujian <i>Carbon Capture</i> .....	60
5.1	Kesimpulan .....	63
5.2	Saran .....	64
DAFTAR PUSTAKA .....		65
LAMPIRAN.....		73





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Emisi CO <sub>2</sub> Global Berdasarkan Sektor dan Wilayah, 2022-2023.....	7
Gambar 2.2	Emisi CO <sub>2</sub> Terkait Energi Global dan Perubahan Tahunannya .....	8
Gambar 2.3	Teknologi yang Berbeda Untuk Menangkap CO <sub>2</sub> .....	9
Gambar 2.4	Skema Representasi Proses Adsorpsi yang Berbeda.....	12
Gambar 2.5	Pembesaran Satu Pori Terbuka Pada Badan Keramik Alumina .....	17
Gambar 2.6	Porositas Komposit HA/SiO <sub>2</sub> melalui Pengamatan SEM .....	18
Gambar 2.7	Struktur Kimia Hidroksiapatit.....	20
Gambar 2.8	Struktur Kristal Hidroksiapatit (HA).....	20
Gambar 2.9	Model HA dengan Ruang Permukaan Pori.....	21
Gambar 2.10	Karbonasi/Kalsinasi Reaksi.....	22
Gambar 2.11	Skema Menunjukkan Struktur Kristal, dan Gambar Pemindaian SEM dari <i>Halloysite Nanotube</i> (HNT) .....	27
Gambar 2.12	Skema Proses Kompaksi .....	28
Gambar 2.13	Berbagai Tahapan Proses Sintering.....	29
Gambar 2.14	Parameter yang Mempengaruhi Proses Sintering Dingin .....	30
Gambar 2.15	Skema Rute Sintering Dingin.....	31
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian .....	33
Gambar 3.2	Hasil Pengumpulan Limbah Tulang Sapi.....	34
Gambar 3.3	<i>Halloysite Nanotube</i> .....	36
Gambar 3.4	Tulang Sapi yang Telah Dipotong dan Siap Diolah.....	36
Gambar 3.5	<i>Electric Furnace</i> Untuk Proses Kalsinasi .....	37
Gambar 3.6	Tulang yang Telah Dikalsinasi.....	37
Gambar 3.7	Penghalusan Menggunakan Mortar.....	37
Gambar 3.8	Proses Penghalusan Menggunakan <i>Ball Milling</i> .....	38
Gambar 3.9	Serbuk Hidroksiapatit.....	38
Gambar 3.10	Penimbangan Serbuk dengan Timbangan Digital .....	39
Gambar 3.11	Gambar Alat Kompaksi Sintering Dingin.....	40

Gambar 3.12	Skema Pengujian Densitas.....	42
Gambar 3.13	Alat <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	43
Gambar 3.14	Alat Uji <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) .....	43
Gambar 3.15	Alat Uji <i>Carbon Capture</i> .....	44
Gambar 3.16	Rangkaian Alat Uji <i>Carbon Capture</i> .....	44
Gambar 4.1	Skema Kompaksi <i>Cold Sintering</i> .....	47
Gambar 4.2	Gambar Cetakan Kompaksi Sintering Dingin .....	48
Gambar 4.3	Sampel Komposit HA/HNT .....	48
Gambar 4.4	Grafik Hasil XRD Tulang Sapi .....	49
Gambar 4.5	Spektrum Hasil XRD <i>Halloysite Nanotube</i> .....	50
Gambar 4.6	Referensi Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> HNT.....	51
Gambar 4.7	Pola Difraksi sinar-X Keramik Komposit HA/HNT Berpori.....	51
Gambar 4.8	Berat Keramik Berpori di Udara (A) dan (B).....	53
Gambar 4.9	Grafik Porositas Keramik Berpori HA/HNT.....	56
Gambar 4.10	Hasil Analisis SEM Keramik Berpori 96% HA/4% HNT dengan perbesaran 2000x .....	58
Gambar 4.11	Hasil Analisis SEM Keramik Berpori 96% HA/4% HNT dengan perbesaran 3000x .....	58
Gambar 4.12	Hasil Analisis SEM Keramik Berpori 96% HA/4% HNT dengan Perbesaran 5000x .....	59
Gambar 4.13	Grafik Data Hasil Adsorpsi CO <sub>2</sub> ke-1 .....	60
Gambar 4.14	Grafik Data Hasil Adsorpsi CO <sub>2</sub> ke-2.....	61
Gambar 4.15	Grafik Data Hasil CO <sub>2</sub> yang Teradsorpsi .....	61

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Proses Fisisorpsi dan Kemisorpsi CO <sub>2</sub> .....	13
Tabel 2.2 Parameter fisik <i>Halloysite Nanotube</i> .....	27
Tabel 3.1 Tabel Rasio, Variasi Tekanan, <i> Holding Time</i> dan Suhu HA/HNT .....	39
Tabel 3.2 Jumlah Sampel Pengujian .....	41
Tabel 4.1 Data Nilai Densitas dan Porositas Keramik Berpori dengan Komposisi HA 95% dan HNT 5% .....	55
Tabel 4.2 Data Nilai Densitas dan Porositas Keramik Berpori dengan Komposisi HA 96% dan HNT 4% .....	55
Tabel 4.3 Data Nilai Densitas dan Porositas Keramik Berpori dengan Komposisi HA 97% dan HNT 3% .....	55
Tabel 4.4 Data Hasil Pembacaan Penangkapan CO <sub>2</sub> . .....	62



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses Kompaksi Sintering Dingin .....	73
Lampiran 2. Proses Uji <i>Carbon Capture</i> .....	73
Lampiran 3. Referensi Grafik Pola Difraksi Hidroksiapatit .....	74
Lampiran 4. Referensi Grafik Pola Difraksi <i>Halloysite Nanotube</i> .....	74
Lampiran 5. Hasil Analisa Uji XRD HA/HNT .....	75
Lampiran 6. Hasil Analisa Uji XRD HNT.....	75
Lampiran 7. Hasil Analisa Uji XRD HA .....	75
Lampiran 8. Form Formulir Konsultasi Tugas Akhir .....	76
Lampiran 9. Hasil Akhir Similaritas (Turnitin) .....	77
Lampiran 10. Surat Pernyataan Bebas Plagiarisme .....	79
Lampiran 11. Surat Keterangan Pengecekan Similaritas .....	80
Lampiran 12. Respon Perbaikan Sidang Sarjana .....	81
Lampiran 13. Form Pengecekan Format Tugas Akhir.....	83



## DAFTAR SIMBOL

$W_{udara}$	:	Berat specimen di udara (g)
$W_{fluida}$	:	Berat benda uji di dalam fluida
$\rho_{apparent}$	:	Densitas aktual ( $g/cm^3$ )
$\rho_{fluida}$	:	Densitas fluida ( $g/cm^3$ )
$\rho_{teoritis}$	:	Densitas teoritis ( $g/cm^3$ )
$\rho_{relatif}$	:	Densitas relatif ( $g/cm^3$ )
$V_m$	:	Berat matriks % (g)
$V_f$	:	Berat <i>reinforced</i> % (g)
$\rho_m$	:	Densitas matriks ( $g/cm^3$ )
$\rho_f$	:	Densitas <i>reinforced</i> ( $g/cm^3$ )
$\Phi$	:	Porositas





# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Akhir-akhir ini, dunia dihadapkan pada masalah serius terkait perubahan iklim dan pemanasan bumi, yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti bencana alam, pertumbuhan populasi yang pesat, eksploitasi berlebihan terhadap sumber daya alam, industrialisasi, dan mobilitas transportasi (Sudarman dkk., 2019). Aktivitas di berbagai sektor tersebut berkontribusi pada peningkatan gas rumah kaca (GRK). UNFCCC, badan PBB yang mengurus perubahan iklim, menetapkan ada enam jenis GRK yang menyebabkan pemanasan global, yaitu Hydrofluorocarbon (HFCs), Perfluorokarbon (CFCs), Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>), Sulfur Heksafluorida (SF<sub>6</sub>), Metana (CH<sub>4</sub>), dan Nitrous Oksida (N<sub>2</sub>O), gas-gas ini secara alami ada di atmosfer. Permasalahan utama muncul ketika emisi gas-gas tersebut melampaui batas yang seharusnya, dan meningkatkan efek rumah kaca alami dengan menyerap radiasi melebihi standar biasanya (Kweku dkk., 2018).

Efek rumah kaca merupakan keadaan di mana suhu permukaan bumi meningkat secara signifikan karena adanya gas-gas tertentu di atmosfer. Jika konsentrasi gas rumah kaca tersebut berlebihan dan berlangsung dalam jangka waktu yang lama, dapat mengakibatkan pemanasan bumi yang ekstrem, yang dikenal sebagai pemanasan global. Emisi CO<sub>2</sub> telah menjadi perhatian khusus pada era sekarang ini. Pada tahun 1960 Rata-rata konsentrasi CO<sub>2</sub> mencapai sekitar 316,68 ppm, sementara pada tahun 2023, konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer mencapai sekitar 421,08 ppm (NOAA, 2023). Peningkatan emisi CO<sub>2</sub> ini menunjukkan signifikansinya dibandingkan dengan gas rumah kaca lainnya. Salah satu penyumbang utama CO<sub>2</sub> adalah emisi dari sektor transportasi, khususnya kendaraan bermotor. Secara garis besar, emisi yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil terdiri 14% karbon monoksida, 50-60% karbon dioksida dan hidrokarbon serta sekitar 30%

menghasilkan emisi nitrogen oksida (Hwang, 2007). Jika jumlah kendaraan melebihi batas yang ditetapkan, emisi yang dihasilkan akan meningkat secara signifikan, menyebabkan konsentrasi gas rumah kaca naik dan menimbulkan efek rumah kaca. Studi yang dilakukan oleh Samidjo dan Suharso (2017) menunjukkan bahwa peningkatan emisi gas, seperti karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), menghalangi udara panas untuk dipantulkan ke angkasa luar.

Berdasarkan laporan terbaru dari *International Energy Agency* (2023), sektor transportasi menempati posisi pertama penyumbang tertinggi dalam hal emisi CO<sub>2</sub>, bersaing dengan sektor pembangkit listrik dan industri. Salah satu jenis transportasi kendaraan bermotor, yakni kendaraan roda dua, telah menjadi opsi transportasi yang diminati di berbagai negara, terutama di wilayah perkotaan yang padat penduduk. Kontribusinya terhadap emisi gas CO<sub>2</sub> tidak dapat diabaikan. Meskipun ukuran yang lebih kecil daripada kendaraan bermotor lainnya, jumlahnya yang besar dan penggunaannya yang luas menyebabkan dampak yang signifikan terhadap lingkungan, terutama di Indonesia. Dalam beberapa tahun terakhir, peningkatan jumlah kendaraan roda dua telah meningkatkan emisi gas CO<sub>2</sub>. Dalam beberapa tahun terakhir, jumlah kendaraan roda dua di Indonesia meningkat secara signifikan. Berdasarkan data terbaru jumlah kendaraan roda dua di Indonesia mencapai 125.305.332 juta unit pada tahun 2022, meningkat sebanyak 4,38% dibandingkan dengan tahun sebelumnya. Dengan demikian, transportasi, termasuk kendaraan roda dua, memiliki peran yang signifikan dalam peningkatan emisi CO<sub>2</sub> dan perubahan iklim global (Badan Pusat Statistik, 2022).

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mengurangi emisi gas CO<sub>2</sub>, termasuk berbagai metode penanganan seperti pemisahan dengan membran, absorpsi, dan adsorpsi. Diantara berbagai metode penanganan emisi gas CO<sub>2</sub>, metode adsorpsi dianggap paling mudah diaplikasikan karena biayanya relatif murah, prosesnya sederhana, dan bersahabat dengan lingkungan. (Klinthong dkk., 2015). Salah satu metode yang perlu diteliti dan dikembangkan adalah metode adsorpsi CO<sub>2</sub> dengan adsorben berbasis keramik berpori. Media ini harus memiliki struktur berpori yang optimal agar mampu menyerap CO<sub>2</sub> secara efektif. Keramik berpori untuk digunakan dalam aplikasi penyaringan gas buang

adalah tindakan yang sesuai untuk meningkatkan kapabilitas katalisasi dan penyerapan gas emisi CO<sub>2</sub> dari pembakaran bahan bakar. Dengan pembuatan bahan berstruktur pori, akan memperluas area kontak, sehingga meningkatkan efisiensi dalam mengurangi kadar gas emisi (Al-Naib, 2018).

Hidroksiapatit (HA) adalah bahan biokeramik berpori dengan potensi sebagai adsorben gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Pembuatannya dapat menggunakan sumber kalsium alami, seperti sumber anorganik yang berasal dari batu-batuan fosfat atau sumber organik seperti cangkang telur ayam, cangkang kerang, tulang ikan, dan tulang sapi (Gunawan dkk., 2019). Dengan rumus kimia Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub>, Hidroksiapatit memiliki ikatan kimia kuat dan termasuk ke dalam komponen penyusun tulang organisme (Gunawan dkk., 2013). Hidroksiapatit merupakan komponen senyawa anorganik yang dapat dijadikan adsorben melalui reaksi pertukaran ion (Lim dkk., 2012).

Limbah tulang sapi dipilih sebagai bahan dasar biokeramik sumber kalsium alami karena melimpah dan mudah ditemukan. Masih banyak sisa makanan yang tidak dikelola dengan baik, termasuk limbah tulang sapi. Menurut Badan Pusat Statistik (2022) di Indonesia, konsumsi daging sapi pada tahun 2022 mencapai 498.923,14 Ton setara dengan jumlah limbah tulang yang dihasilkan oleh sapi. Namun pemanfaatan tulang tersebut kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan alternatif lain untuk meningkatkan nilai ekonomis dan daya guna. Salah satu contohnya adalah pemanfaatan tulang sapi sebagai material media penjerap (adsorben) pada proses adsorpsi.

Diantara jenis-jenis adsorben yang ada, *halloysite nanotube* bahan nano alami, berbahan dasar tanah liat, dan ramah lingkungan, telah menjadi sangat penting dalam industri lingkungan. Struktur mikroporinya menjadikannya adsorben yang sangat baik (Pandey dkk., 2020). Beberapa percobaan telah dilakukan untuk menunjukkan fenomena adsorpsi pada permukaan HNT. Ia bekerja sebagai nano-adsorben untuk mengolah air limbah dengan menyerap polutan kationik (Fakhrudin dkk., 2021). Secara kimia, permukaan luar *halloysite nanotube* memiliki sifat yang mirip dengan SiO<sub>2</sub> sedangkan inti silinder bagian dalam berhubungan dengan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang bersama-sama dapat memperbaiki matriks (Farzadnia dkk., 2013). Ketika ditambahkan sebagai bahan

pengisi, *halloysite nanotube* menghasilkan peningkatan yang signifikan dalam sifat mekanik dan fisik matriksnya. Perlakuan terhadap bahan ini memungkinkan pembentukan ikatan kimia dengan matriks, yang bertujuan untuk memperkuat struktur dan meningkatkan karakteristik mekaniknya. Sehingga *halloysite nanotube* pada penelitian ini dapat digunakan sebagai adsorben dan penguat matriks dapat diandalkan.

Proses pembuatan keramik komposit hidroksiapatit dalam penelitian ini memanfaatkan metode sintering dingin (*cold sintering*) yang mengkonsumsi energi listrik yang rendah, yang memungkinkan untuk menghemat 50% energi dari pada sintering konvensional (Galotta & Sglavo, 2021). Pada metode sintering dingin (*cold sintering*) bahan baku akan mengalami penyinteran pada suhu rendah dengan waktu kompaksi yang singkat dan tekanan yang sedang. Sintering dingin merupakan opsi yang lebih ekonomis karena memerlukan konsumsi energi yang lebih sedikit daripada metode sintering konvensional. Karena alasan tersebut, dalam penelitian ini, digunakan metode *cold sintering* untuk menghasilkan keramik hidroksiapatit menggunakan bahan komposit dari tulang sapi yang disintesis menjadi hidroksiapatit dan *halloysite nanotube* untuk adsorpsi CO<sub>2</sub>. Berdasarkan uraian diatas tersebut penulis mengambil tugas akhir/skripsi **“STUDI FABRIKASI KOMPOSIT HA/HNT BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO<sub>2</sub>”**.

## 1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini mengeksplorasi alternatif metode sintering untuk material dengan menggantikan fokus dari sintering pada suhu tinggi, yang umumnya memiliki kekurangan seperti efisiensi energi rendah dan potensi perubahan komposisi pada material (Ndayishimiye dkk., 2020). Keputusan untuk menggunakan sintering dingin dipertimbangkan sebagai pilihan yang membutuhkan daya yang lebih rendah dan secara ekonomis lebih efisien. Pada penelitian sebelumnya yang menggunakan serbuk bahan baku hidroksiapatit (HA) tanpa menerapkan sintering dingin dan menggunakan material komposit

yang berbeda yaitu silika ( $\text{SiO}_2$ ) untuk menghasilkan *specimen* adsorben *carbon capture* (Fadillah dkk., 2023), penelitian ini secara khusus mengaplikasikan sintering dingin untuk serbuk hidroksiapatit dan memperkenalkan *halloysite nanotube* sebagai bahan komposit. Pada penelitian ini akan mengevaluasi dampak penggunaan metode sintering dingin, rasio komposisi bahan HA/HNT, dan variasi tekanan pada proses sintering dingin terhadap karakteristik fisik (densitas dan mikrostruktur) serta kemampuan adsorpsi *carbon* dari material komposit HA/HNT berpori sebagai adsorben.

### 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penulis dalam penelitian ini adalah:

1. Matriks yang digunakan untuk penelitian ini adalah hidroksiapatit (HA) dengan variasi berat 95%, 96%, dan 97%.
2. *Reinforced* yang digunakan adalah *halloysite nanotube* (HNT) dengan variasi berat 3%, 4%, dan 5%.
3. *Mixing time* material HA/HNT selama 15 menit.
4. Menggunakan *ball milling* dan mortar untuk menghancurkan tulang menjadi bentuk serbuk dengan ukuran yang diinginkan dan diayak dengan *mesh* 200.
5. Menggunakan metode *cold sintering* pada suhu  $250^\circ\text{C}$ .
6. Menggunakan variasi tekanan kompaksi 300 MPa, 400 MPa dan 500 MPa selama 15 menit.
7. Variasi pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pengujian *density*, pengujian XRD, pengujian SEM, dan uji *carbon capture*.
8. Sumber gas emisi  $\text{CO}_2$  berasal dari gas buang hasil pembakaran motor matic vario 150 cc dalam kondisi *idle*.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk membuat material komposit keramik berpori sebagai adsorben dari hidroksiapatit/*halloysite nanotube* dengan metode sintering dingin (*cold sintering*).
2. Untuk mengetahui pengaruh perbedaan tekanan kompaksi pada pembuatan keramik hidroksiapatit/*halloysite nanotube*.
3. Untuk mengetahui pengaruh perbedaan variasi komposisi bahan hidroksiapatit/*halloysite nanotube* pada pembuatan keramik.
4. Mengkarakterisasi mengenai densitas morfologi, dan fasa yang terbentuk pada keramik hidroksiapatit/*halloysite nanotube* dengan metode sintering dingin (*cold sintering*).
5. Untuk mengetahui kemampuan adsorpsi keramik komposit hidroksiapatit/*halloysite nanotube* berpori sebagai adsorben terhadap gas emisi CO<sub>2</sub>.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mempelajari cara pembuatan keramik komposit hidroksiapatit/*halloysite nanotube* berpori.
2. Sebagai metode inovatif dalam pembuatan katalis adsorben menggunakan kombinasi hidroksiapatit dan *halloysite nanotube*.
3. Memberikan informasi mengenai sifat fisik dan kimia keramik komposit hidroksiapatit/*halloysite nanotube* berpori.
4. Sebagai sumber referensi bagi peneliti lainnya mengenai keramik komposit hidroksiapatit/*halloysite nanotube* berpori dengan metode sintering dingin (*cold sintering*) sebagai adsorben penjerap CO<sub>2</sub>.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd, A. A., Naji, S. Z., Hashim, A. S., & Othman, M. R. (2020). Carbon Dioxide Removal Through Physical Adsorption Using Carbonaceous and Non-Carbonaceous Adsorbents: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104142.
- Abdullah, A., & Mohammed, A. (2019). Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review. *Proceedings Of 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics - HERVEX. Băile Govora, Romania (Vol. 2018, pp. 7-9)*
- Afifah, F., & Cahyaningrum, S. E. (2020). Sintesis Dan Karakterisasi Hidroksiapatit Dari Tulang Sapi (Bos Taurus) Menggunakan Teknik Kalsinasi Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite from Cow Bones (Bos Taurus) Using Calcination Techniques. *UNESA Journal of Chemistry*, 9(3), 189-196.
- Akhtar, N., Yazan, Y., Fındık, M., Ve İki, Y., Karşıtı, Y., Kozmetik, M., Emülsiyon, Ç., Halinde, S., Ve Karakterizasyonu, F., Akhtar, N., & Yazan, Y. (2005). Formulation and Characterization of a Cosmetic Multiple Emulsion System Containing Macadamia Nut Oil and Two Antiaging Agents. *Turkish J. Pharm. Sci*, 2(3).
- Aledya, S. P., Fadli, A., & Zultiniar, Z. Sintesis Serbuk Hidroksiapatit Menggunakan Metode Mechanochemical. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains*, 6, 1-4.
- Al-Naib, U. M. B. (2018). Introductory Chapter: A Brief Introduction to Porous Ceramic. In *Recent Advances in Porous Ceramics*.
- Amalia, V., Hadisantoso, E. P., Hidayat, D., Diba, R. F., Dermawan, M. F., & Tsaniyah, S. W. (2018). Isolasi dan Karakterisasi Hidroksiapatit dari Limbah Tulang Hewan. *Alchemy*, 5(4).
- Arrafiqie, M. F., Azis, Y., & Zultiniar. (2016). Sintesis Hidroksiapatit dari Limbah Kulit Kerang Lokan (*Geloina expansa*) dengan Metode Hidrothermal. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 1(3).
- Badan Pusat Statistik. (2022). *Produksi Daging Sapi menurut Provinsi (Ton), 2020-2022*.
- Ba, T. Le, Alkurdi, A. Q., Lukács, I. E., Molnár, J., Wongwises, S., Gróf, G., & Szilágyi, I. M. (2020). A Novel Experimental Study on The Rheological Properties and Thermal Conductivity of Halloysite Nanofluids.
- Benedetti, V., Cordioli, E., Patuzzi, F., & Baratieri, M. (2019). CO<sub>2</sub> Adsorption Study on Pure and Chemically Activated Chars Derived from Commercial Biomass Gasifiers. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 33.

- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Bamidele, O. E., Basha, M., Qasem, N. A. A., Peedikakkal, A., Laoui, T., & Ali, M. (2016). Carbon Capture by Physical Adsorption: Materials, Experimental Investigations and Numerical Modeling and Simulations - A Review. In *Applied Energy* (Vol. 161).
- Berger, A. H., & Bhowan, A. S. (2011). Comparing Physisorption And Chemisorption Solid Sorbents for Use Separating CO<sub>2</sub> from Flue Gas Using Temperature Swing Adsorption. *Energy Procedia*, 4.
- Boanini, E., Gazzano, M., & Bigi, A. (2010). Ionic Substitutions in Calcium Phosphates Synthesized at Low Temperature. In *Acta Biomaterialia* (Vol. 6, Issue 6).
- Botahala, L. (2022). Adsorpsi Arang Aktif (Kimia Permukaan-Kimia Zat Padat-Kimia Katalis).
- Budihartono, S. (2012). Pengaruh Pressureless Sintering Komposit Al-Kaolin Terhadap Densitas, Kekerasan dan Struktur Mikro (Vol. 12, Issue 1).
- Cabriga, C. K. C., Clarete, K. V. B., Zhang, J. A. T., Pacia, R. M. P., Ko, Y. S., & Castro, J. C. (2023). Evaluation of Biochar Derived from The Slow Pyrolysis of Rice Straw as A Potential Adsorbent for Carbon Dioxide. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(9).
- Chatterjee, R., Sajjadi, B., Chen, W. Y., Mattern, D. L., Hammer, N., Raman, V., & Dorris, A. (2020). Effect of Pyrolysis Temperature on Physicochemical Properties and Acoustic-Based Amination of Biochar for Efficient CO<sub>2</sub> Adsorption. *Frontiers in Energy Research*, 8.
- Cox, S. C., Walton, R. I., & Mallick, K. K. (2015). Comparison of Techniques for The Synthesis of Hydroxyapatite. *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials*, 4(1).
- De Vries, N., Zhang, S., Wang, X., & Lu, Y. (2014). Experimental Studies of CO<sub>2</sub> Absorption into Concentrated Carbonate Solutions with Promoters at Elevated Temperatures. *Preprints - American Chemical Society, Division of Energy & Fuels*, 59(1).
- Fadillah, M. Y., Falah, R., Tarmizi, A., Shafarani, F. A., Ardyansah, E., Gunawan, Arifin, A., & Adanta, D. (2023, November). Development of Porous Ceramic Filters for Carbon Dioxide Capture Using Hydroxyapatite/SiO<sub>2</sub> Composite. *Sriwijaya International Conference on Engineering and Technology (SICETO)*.
- Fakhrudin, K., Hassan, R., Khan, M. U. A., Allisha, S. N., Razak, S. I. A., Zreaqat, M. H., Latip, H. F. M., Jamaludin, M. N., & Hassan, A. (2021). Halloysite Nanotubes and Halloysite-Based Composites for Biomedical Applications. *Arabian Journal of Chemistry*, 14(9).
- Farzadnia, N., Abang Ali, A. A., Demirboga, R., & Anwar, M. P. (2013). Effect of Halloysite Nanoclay On Mechanical Properties, Thermal Behavior and Microstructure of Cement Mortars. *Cement and Concrete Research*, 48.



- Ferreira, R. C., Dias, D., Fonseca, I., Bernardo, M., Willmann Pimenta, J. L. C., Lapa, N., & De Barros, M. A. S. D. (2022). Multi-Component Adsorption Study by Using Bone Char: Modelling and Removal Mechanisms. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 43(6).
- Galotta, A., & Sglavo, V. M. (2021). The cold sintering process: A review on processing features, densification mechanisms and perspectives. In *Journal of the European Ceramic Society (Vol. 41, Issue 16)*.
- Ganie, A. S., Bano, S., Bashar, N., Sabir, S., Khan, M. Z., & Rahman, M. M. (2022). Piezoelectric Ceramics: Advanced Applications in Electrochemical and Electronic Fields. In *Advanced Ceramics for Versatile Interdisciplinary Applications*.
- German, R. (2003). An Update on The Theory of Supersolidus Liquid Phase Sintering. *Proceedings Sintering*.
- Gunawan, G., Arifin, A., Yani, I., & Indrajaya, M. (2019). Characterization of Porous Hydroxyapatite-Alumina Composite Scaffold Produced Via Powder Compaction Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 620(1).
- Gunawan, Sopyan, I., Naqshbandi, A., & Ramesh, S. (2013). Synthesis of Zinc Doped-Biphasic Calcium Phosphate Nanopowder Via Sol-Gel Method. *Key Engineering Materials*, 531–532.
- Gunawardene, O. H. P., Gunathilake, C. A., Vikrant, K., & Amaraweera, S. M. (2022). Carbon Dioxide Capture Through Physical and Chemical Adsorption Using Porous Carbon Materials: A Review. In *Atmosphere (Vol. 13, Issue 3)*.
- Gunawan, G., Wijayanto, I. G., Arifin, A., Trycahyono, G., & Octapia, A. (2023, July). Study of The Effect Manufacturer of Hydroxyapatite Ceramic Through Cold Sintering Process. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2689, No. 1)*. AIP Publishing.
- Haaf, M., Anantharaman, R., Roussanaly, S., Ströhle, J., & Epple, B. (2020). CO<sub>2</sub> Capture from Waste-To-Energy Plants: Techno-Economic Assessment of Novel Integration Concepts of Calcium Looping Technology. *Resources, Conservation and Recycling*, 162.
- Haris, A., Fadli, A., & Yenti, S. R. (2016). Sintesis Hidroksiapatit dari Limbah Tulang Sapi Menggunakan Metode Presipitasi dengan Variasi Rasio Ca/P dan Konsentrasi H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>. In *JOM FTEKNIK (Vol. 3, Issue 2)*.
- Hartono, Alfauzi, A. S., Carli, & Khotimah, A. H. (2018). Rancang Bangun Alat Pencetak Elektroda EDM (Electrical Discharge Machine) Dengan Tenaga Hidrolik dari Bahan Serbuk Tembaga. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 12(2), 51-56.
- Hussain, F., Alshahrani, S., Abbas, M. M., Khan, H. M., Jamil, A., Yaqoob, H., Soudagar, M. E. M., Imran, M., Ahmad, M., & Munir, M. (2021). Review Waste Animal Bones as Catalysts for Biodiesel Production; A Mini

- Review. In *Catalysts* (Vol. 11, Issue 5).
- Hutabarat, G. S., Qodir, D. T., Setiawan, H., Akbar, N., & Noviyanti, A. R. (2019). Sintesis Komposit Hidroksiapatit-Lantanum Oksida (HA-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dengan Metode Hidrotermal Secara In-Situ dan Ex-Situ. *ALCHEMY Jurnal Penelitian Kimia*, 15(2).
- Hwang, K. P., & Tseng, P. S. (2007). CO<sub>2</sub> Emission: Status, Reduction Policy and Management Strategy of Taiwan Transportation Sector. In *Proceedings of The Eastern Asia Society for Transportation Studies Vol. 6 (The 7th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2007)* (Pp. 161-161). Eastern Asia Society for Transportation Studies.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2021–The Physical Science Basis*. In *Climate Change 2021–The Physical Science Basis*.
- International Energy Agency. (2023). *Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions In 2023–Analysis-IEA*. *Global Energy Review: CO<sub>2</sub> Emissions In 2023*.
- Kamble, R., Ghag, M., Gaikawad, S., & Panda, B. K. (2012). Review Article Halloysite Nanotubes and Applications: A Review. *Journal of Advanced Scientific Research*, 3(2).
- Kermani, M., Biesuz, M., Dong, J., Deng, H., Bortolotti, M., Chiappini, A., Reece, M. J., Sglavo, V. M., Hu, C., & Grasso, S. (2020). Flash Cold Sintering: Combining Water and Electricity. *Journal of The European Ceramic Society*, 40(15).
- Kimura, I. (2007). Synthesis of Hydroxyapatite by Interfacial Reaction in A Multiple Emulsion. *Research Letters in Materials Science*, 2007.
- Klinthong, W., Yang, Y. H., Huang, C. H., & Tan, C. S. (2015). A Review: Microalgae and Their Applications in CO<sub>2</sub> Capture and Renewable Energy. In *Aerosol and Air Quality Research* (Vol. 15, Issue 2).
- Kosachan, N., Jaroenworarluck, A., Jiemsirilers, S., Jinawath, S., & Stevens, R. (2017). Hydroxyapatite Nanoparticles Formed Under A Wet Mechanochemical Method. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 105(3).
- Kumar, L., Deshmukh, R. K., Hakim, L., & Gaikwad, K. K. (2024). Halloysite Nanotube as A Functional Material for Active Food Packaging Application: A Review. In *Food and Bioprocess Technology* (Vol. 17, Issue 1).
- Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., Quachie, A., & Adormaa, B. (2018). Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. *Journal of Scientific Research and Reports*, 17(6).
- Lampropoulou, P., & Papoulis, D. (2021). Halloysite In Different Ceramic Products: A Review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 19).

- Leung, D. Y., Caramanna, G., & Maroto-Valer, M. M. (2014). An Overview of Current Status of Carbon Dioxide Capture and Storage Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 426-443.
- Lim, H. K., Teng, T. T., Ibrahim, M. H., Ahmad, A., & Chee, H. T. (2012). Adsorption and Removal of Zinc (II) From Aqueous Solution Using Powdered Fish Bones. *APCBEE Procedia*, 1.
- Malla, K. P., Regmi, S., Nepal, A., Bhattarai, S., Yadav, R. J., Sakurai, S., & Adhikari, R. (2020). Extraction and Characterization of Novel Natural Hydroxyapatite Bioceramic By Thermal Decomposition of Waste Ostrich Bone. *International Journal of Biomaterials*, 2020.
- Martono, M. (2015). Fenomena Gas Rumah Kaca. *Swara Patra*, 5(2).
- Masruhin, M., Rasyid, R., & Yani, S. (2018). Penjerapan Logam Berat Timbal (Pb) Dengan Menggunakan Lignin Hasil Isolasi Jerami Padi. *Journal of Chemical Process Engineering*, 3(1).
- Mclaughlin, H., Littlefield, A. A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B. K., Bazilian, M. D., Kim, J., & Griffiths, S. (2023). Carbon Capture Utilization and Storage in Review: Sociotechnical Implications for A Carbon Reliant World. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 177).
- Mene, R. U., Mahabole, M. P., Mohite, K. C., & Khairnar, R. S. (2014). Fe Doped Hydroxyapatite Thick Films Modified Via Swift Heavy Ion Irradiation for CO and CO<sub>2</sub> Gas Sensing Application. *Journal of Alloys and Compounds*, 584.
- Miedzińska, D. (2020). Influence of Grains Shape Irregularity in Porous Ceramics-Numerical Study. *Materials*, 13(8).
- Misyura, S. Y. (2016). The Influence of Porosity and Structural Parameters on Different Kinds of Gas Hydrate Dissociation. *Scientific Reports*, 6.
- Nandi, M., & Uyama, H. (2014). Exceptional CO<sub>2</sub> Adsorbing Materials Under Different Conditions. *Chemical Record*, 14(6).
- Nasrollahzadeh, M., Soheili Bidgoli, N. S., Shafiei, N., Soleimani, F., Nezafat, Z., & Luque, R. (2020). Low-Cost and Sustainable (Nano) Catalysts Derived from Bone Waste: Catalytic Applications and Biofuels Production. In *Biofuels, Bioproducts And Biorefining* (Vol. 14, Issue 6).
- Ndayishimiye, A., Sengul, M. Y., Bang, S. H., Tsuji, K., Takashima, K., Hérisson De Beauvoir, T., Denux, D., Thibaud, J. M., Van Duin, A. C. T., Elissalde, C., Goglio, G., & Randall, C. A. (2020). Comparing Hydrothermal Sintering and Cold Sintering Process: Mechanisms, Microstructure, Kinetics and Chemistry. *Journal of The European Ceramic Society*, 40(4).
- NOAA. (2023). Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide. NOAA Climate.Gov. Climate.Gov.

- Noviyanti, A. R., Yusuf, A., Hartati, Y. W., & Adiperdana, B. (2022). Study of The Interaction Carbondioxide Gas with Hydroxyapatite Using Density Functional Theory. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 30(2), 57-65.
- Ojeda-Niño, O. H., Blanco, C., & Daza, C. E. (2017). High Temperature CO<sub>2</sub> Capture of Hydroxyapatite Extracted from Tilapia Scales. *Universitas Scientiarum*, 22(3).
- Osman, A. I., Deka, T. J., Baruah, D. C., & Rooney, D. W. (2023). Critical Challenges in Biohydrogen Production Processes from The Organic Feedstocks. In *Biomass Conversion and Biorefinery* (Vol. 13, Issue 10).
- Pandey, G., Tharmavaram, M., & Rawtan, D. (2020). Functionalized Halloysite Nanotubes: An “Ecofriendly” Nanomaterial in Environmental Industry. In *Handbook of Functionalized Nanomaterials for Industrial Applications*.
- Perwitasari, D. S. (2008). Hidrolisis Tulang Sapi Menggunakan Hcl untuk Pembuatan Gelatin. Makalah Seminar Nasional Soebardjo Brotohardjono “Pengolahan Sumber Daya Alam dan Energi Terbarukan.”
- Pinangsih, A. C., Wardhani, S., & Darjito. (2014). Sintesis Biokeramik Hidroksiapatit ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) dari Limbah Tulang Sapi Menggunakan Metode Sol-Gel. *Kimia Student Journal*, 1(2).
- Querejeta, N., Gil, M. V., Pevida, C., & Centeno, T. A. (2018). Standing Out the Key Role of Ultramicroporosity To Tailor Biomass-Derived Carbons for CO<sub>2</sub> Capture. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 26.
- Rawtani, D., Satish, S., & Rao, P. (2023). Flame Retardancy Of Nanocomposites with Emphasis on Halloysite Nanotubes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 125, 1-13.
- Sadat-Shojai, M., Atai, M., & Nodehi, A. (2011). Design of Experiments (DOE) For the Optimization of Hydrothermal Synthesis of Hydroxyapatite Nanoparticles. *Journal of The Brazilian Chemical Society*, 22(3).
- Saif, M. J., Asif, H. M., & Naveed, M. (2018). Properties and Modification Methods of Halloysite Nanotubes: A State-Of-The-Art Review. In *Journal of The Chilean Chemical Society* (Vol. 63, Issue 3).
- Samidjo, J., & Suharso, Y. (2017). Memahami Pemanasan Global dan Perubahan Iklim. *Jurnal Pawiyatan*, 24(2).
- Sidiqa, A. N., Djustiana, N., Sunendar, B., & Febrida, R. (2013). Surface Modification of Multilayer Coatings Ti-Al-Cr And Hydroxyapatite on Calcium Phosphate Cement with Sol-Gel Method. *Journal of Dentistry Indonesia*, 19(2).
- Singh, J., & Dhar, D. W. (2019). Overview if Carbon Capture Technology: Microalgal Biorefinery Concept and State-Of-The-Art. In *Frontiers in Marine Science* (Vol. 6, Issue FEB).
- Song, K. (2017). Micro-and Nano-Fillers Used in The Rubber Industry. In

- Progress in Rubber Nanocomposites (Pp. 41-80). Woodhead Publishing.
- Songolzadeh, M., Ravanchi, M. T., & Soleimani, M. (2012). Carbon Dioxide Capture and Storage: A General Review on Adsorbents. *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 70, 225–232.
- Songolzadeh, M., Soleimani, M., Takht Ravanchi, M., & Songolzadeh, R. (2014). Carbon Dioxide Separation from Flue Gases: A Technological Review Emphasizing Reduction in Greenhouse Gas Emissions. *The Scientific World Journal*, 2014.
- Statistik, B. P. (2023). Perkembangan Jumlah Kendaraan Bermotor Menurut Jenis (Unit), 2021-2022.
- Statistik, B. P. (2023). Populasi Sapi Potong Menurut Provinsi (Ekor) 2020-2022.
- Suci, I. A., & Ngapa, Y. D. (2020). Sintesis dan Karakterisasi Hidroksiapatit dari Cangkang Kerang Ale-Ale Menggunakan Metode Presipitasi Double Stirring. *Cakra Kimia*, 8(2).
- Sudarman, S., Saputra, D. D., Karnowo, K., & Febrian, F. (2019). Minimalisasi Pencemaran Udara Melalui Penyetelan Perangkat Pembakaran Motor Sesuai dengan Baku Mutu Emisi. *Rekayasa*, 16(2).
- Tagliabue, M., Farrusseng, D., Valencia, S., Aguado, S., Ravon, U., Rizzo, C., Corma, A., & Mirodatos, C. (2009). Natural Gas Treating by Selective Adsorption: Material Science and Chemical Engineering Interplay. In *Chemical Engineering Journal* (Vol. 155, Issue 3).
- Tang, M., Shen, J., Xia, X., Jin, B., Chen, K., & Zeng, T. (2022). A Novel Microbial Induced Synthesis of Hydroxyapatite with Highly Efficient Adsorption of Uranyl (VI). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 635.
- Tjahjanti, P. H. (2018). *Buku Ajar Teori dan Aplikasi Material Komposit dan Polimer*. Umsida Press, 1-24.
- Tseng, R. L., Wu, P. H., Wu, F. C., & Juang, R. S. (2014). A Convenient Method to Determine Kinetic Parameters of Adsorption Processes by Nonlinear Regression of Pseudo-Nth-Order Equation. *Chemical Engineering Journal*, 237.
- Vakifahmetoglu, C., & Karacasulu, L. (2020). Cold Sintering of Ceramics and Glasses: A Review. In *Current Opinion in Solid State and Materials Science* (Vol. 24, Issue 1).
- Wang, M., Yao, L., Wang, J., Zhang, Z., Qiao, W., Long, D., & Ling, L. (2016). Adsorption and Regeneration Study of Polyethylenimine-Impregnated Millimeter-Sized Mesoporous Carbon Spheres for Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture. *Applied Energy*, 168.
- Warastuti, Y., & Abbas, B. (2011). Sintesis dan Karakterisasi Pasta *Injectable Bone Substitute* Iradiasi Berbasis Hidroksiapatit. *Jurnal Ilmiah Aplikasi*

Isotop dan Radiasi, 7(2).

Yao, M., Wang, L., Hu, X., Hu, G., Luo, M., & Fan, M. (2015). Synthesis of Nitrogen-Doped Carbon with Three-Dimensional Mesostructures For CO<sub>2</sub> Capture. *Journal of Materials Science*, 50(3).

Yurkov, A. (2015). Refractories for Aluminium: Electrolysis and The Cast House. In *Refractories for Aluminium: Electrolysis and The Cast House*.