

SKRIPSI

**STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂
BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN
UNTUK ADSORPSI CO₂**



Oleh:

RIDHO ADIPUTRA

03051282025031

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

SKRIPSI

**STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂
BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN
UNTUK ADSORPSI CO₂**

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



OLEH

RIDHO ADIPUTRA

03051282025031

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

HALAMAN PENGESAHAN

**STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂
BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK
ADSORPSI CO₂**

SKRIPSI

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

Oleh:

RIDHO ADIPUTRA

03051282025031

Mengetahui,

↳ **Ketua Jurusan Teknik Mesin**



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

Indralaya, 25 Maret 2024


Diperiksa dan disetujui oleh

Pembimbing Skripsi

Gunawan, S.T., M.T.
NIP. 197705072001121001

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No.
Diterima Tanggal
Paraf

: 091/Tm/AK/2024
: 19/06/2024
: 

SKRIPSI

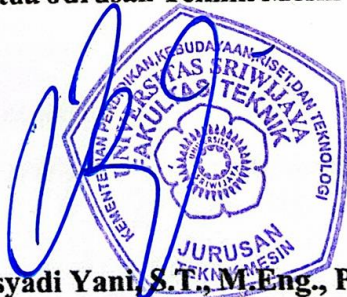
NAMA : RIDHO ADIPUTRA
NIM : 03051282025031
JURUSAN : TEKNIK MESIN
JUDUL SKRIPSI : STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT
HA/SIO₂ BERPORI MELALUI PROSES
SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO₂
DIBUAT TANGGAL : 18 NOVEMBER 2023
SELESAI TANGGAL : 27 MARET 2024

Palembang, 03 Juni 2024

Diperiksa dan disetujui oleh
Pembimbing Skripsi

Mengetahui,

 **Ketua Jurusan Teknik Mesin**



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

Gunawan, S.T., M.T.
NIP. 197705072001121001

HALAMAN PERSETUJUAN

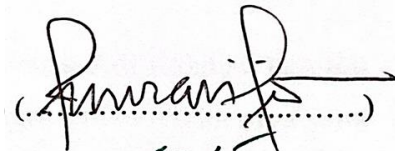
Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SiO₂ BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO₂” telah dipertahankan di hadapan Tim penguji karya tulis ilmiah Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 22 Mei 2024.

Palembang, 22 Mei 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Berupa Skripsi:

Ketua:


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



(.....)

Anggota:

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



(.....)

3. Nurhabibah Paramitha Eka Utami, S.T., M.T.
NIP. 198911172015042003



(.....)

Mengetahui,

 Ketua Jurusan Teknik Mesin



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

Dosen Pembimbing



Gunawan, S.T., M.T.
NIP. 197705072001121001

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Allah SWT, atas dengan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan baik yang berjudul “STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂ BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO₂”.

Skripsi ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Dalam penyusunan skripsi ini tentunya penulis tidak berkeja sendirian. Akan tetapi dapat bantuan serta dukungan dari orang-orang secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih pada pihak terkait, antara lain:

1. Terimakasih kepada kedua orang tua saya bapak Adi Rahmad dan ibu saya Yetri Maiza Ramli tak lupa juga adik serta teman-teman saya yang selalu memberi semangat dan dukungan agar saya mampu menyelesaikan kuliah ini dengan baik.
2. Terimakasih kepada Ketua Jurusan bapak Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM dan dosen-dosen serta staff Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya yang telah membekali saya dengan ilmu yang bermanfaat sebelum menyusun skripsi ini.
3. Terimakasih kepada bapak Gunawan, S.T., M.T. yang merupakan pengajar sekaligus dosen pembimbing saya.

Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi dalam dunia Pendidikan dan industri.

Indralaya, 25 Maret 2024



Ridho Adiputra
NIM 03051282025031

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ridho Adiputra

NIM : 03051282025031

Judul : STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂ BERPORI
MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI
CO₂

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.

Palembang, 10 Juni 2024



Ridho Adiputra
NIM. 03051282025031

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ridho Adiputra

NIM : 03051282025031

Judul : STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SIO₂ BERPORI
MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI
CO₂

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.



RINGKASAN

STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SiO₂ BERPORI MELALUI
PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO₂

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Karya tulis ilmiah berupa skripsi , 10 Juni 2024

Ridho Adiputra, dibimbing oleh Gunawan, S.T., M.T.

Xxxii + 89 halaman, 54 gambar, 8 tabel

RINGKASAN

Semakin berkembangnya zaman dan kemajuan teknologi, tentu saja semakin pula berkembangnya dunia industri yang dimana menghasilkan banyak sekali pabrik dan kendaraan yang membuat angka polusi udara atau kadar karbondioksida di udara meningkat pada tiap tahunnya. Peningkatan kadar karbondioksida pada udara membuat polusi pada udara dan tentu saja ini membuat angka gangguan kesehatan masyarakat akibat polusi meningkat dan ini cukup berbahaya jika dibiarkan. CCS (*Carbon Capture Storage*) dapat dimanfaatkan sebagai cara mengurangi angka peningkatan polusi udara. Manufaktur atau pembuatan alat filtrasi atau tepatnya adsorpsi karbon di udara untuk dunia industri seperti pabrik atau kendaraan dapat mencegah meningkatnya angka polusi udara dan masalah kesehatan akibat polusi udara. Keramik komposit Hidroksiapatit (HA) memiliki potensi sebagai material adsorpsi CO₂ dengan proses yang dinamakan *looping calcium*. Pemanfaatan limbah tulang sapi sebagai hidroksiapatit (HA) merupakan hal yang bagus karena dapat mengurangi limbah tulang sapi serta dapat dimanfaatkan sebagai matrix dari keramik komposit hidroksiapatit sebagai adsorben CO₂, Silika (SiO₂) dapat dimanfaatkan sebagai *reinforced* karena memiliki kekuatan yang tinggi sebagai bahan penguat. Proses pembuatan keramik komposit HA/SiO₂ sebagai adsorben CO₂ di udara dilakukan dengan proses *coldsintering* atau sintering dingin dengan suhu pada kompaksi 250°C pada *holding time* 15 menit dan tekanan yang

divariasikan 300 MPa ,400 MPa, dan 500 MPa serta variasi komposisi HA/SiO₂ 70%/30%, 80%/20% dan 90%/10%. Dari 9 variasi antara variasi komposisi dan tekanan menghasilkan sampel sebanyak 45 sampel dan dilakukan pengujian densitas dan perhitungan porositas terhadap seluruh sampel tersebut didapatkan hasil bahwa komposisi bahan HA/SiO₂ 80%/20% dengan tekanan 300 MPa merupakan variasi dengan nilai rata rata porositas tertinggi yaitu 21.60%. Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui kesesuaian dan isi kandungan material yang terdapat di spesimen dan menggunakan software “*match*” sebagai alat bantu analisa *peak* XRD dengan hasil kandungan material pada spesimen yang sudah dianalisa sesuai dengan persentase kandungan spesimen yang diujikan. Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui seberapa besar ukuran porositas yang ada didalam spesimen denngan perbesaraan 2000x didapatkan ukuran porositas yang terkandung bervariasi mulai dari 2.48µm sampai 11.38µm. Pengujian EDS dilakukan untuk mengetahui kandungan unsur spesimen dan mendapatkan hasil bahwa kandung unsur spesimen sesuai dengan unsur pembentuk HA dan SiO₂. Serta yang terakhir adalah melakukan pengujian *carbon capture* sebagai langkah untuk megetahui apakah spesimen benar benar dapat menangkap karbon yang dimana dilakukan 2 kali *running* , dengan hasil *running* 1 spesimen bekerja dan menangkap karbon selama 788 detik atau 13 menit 8 detik sampe spesimen tak menangkap karbon lagi dengan kemampuan adsorpsi karbon sebesar 61%. Sedangkan pada *running* 2 spesimen bekerja dan menangkap karbon selama 649 detik atau 10 menit 49 detik sampai spesimen tak menangkap karbon lagi dengan kemampuan adsorpsi karbon sebesar 60%.

KATA KUNCI : Hidroksiapatit, SiO₂, Penangkapan karbon, Sintering dingin.

SUMMARY

STUDY OF FABRICATION OF COMPOSITE CERAMIC HA/SiO₂ WITH POROUS STRUCTURE THROUGH COLD SINTERING PROCESS FOR CO₂ ADSORPTION.

SRIWIJAYA UNIVERSITY

Scientific writing in the form of a thesis, June 10th 2024

Ridho Adiputra, supervised by Gunawan, S.T., M.T.

Xxxii + 89 pages, 54 figures, 8 tables

SUMMARY

As time and technology continue to advance, the industrial world, which produces numerous factories and vehicles, inevitably leads to an increase in air pollution and carbon dioxide levels each year. The rise in carbon dioxide levels in the air causes air pollution and, in turn, increases the number of health problems caused by air pollution. This is a serious issue if left unchecked. Carbon Capture Storage (CCS) can be utilized as a method to reduce air pollution. The manufacture of air filtration devices or carbon adsorption devices for the industrial world, such as factories or vehicles, can prevent the increase in air pollution and health problems caused by air pollution. Hydroxyapatite (HA) composite ceramics have the potential to be used as a material for CO₂ adsorption through a process called calcium looping. Utilizing bone waste as hydroxyapatite (HA) is a good idea because it can reduce bone waste and can be used as a matrix for HA composite ceramics as a CO₂ adsorbent. Silica (SiO₂) can be used as a reinforcing material due to its high strength. The production of HA/SiO₂ composite ceramics as CO₂ adsorbents in the air is done through a cold sintering process at a temperature of 250°C, holding time of 15 minutes, and varying pressures of 300 MPa, 400 MPa, and 500 MPa, as well as varying HA/SiO₂ compositions of 70%/30%, 80%/20%, and 90%/10%. From the 9 variations of

composition and pressure, 45 samples were obtained and tested for density and porosity. The results showed that the composition of *HA/SiO₂* at 80%/20% with a pressure of 300 MPa had the highest average porosity value of 21.60%. XRD testing was conducted to determine the compatibility and material content of the specimens and used software "match" as an analytical tool for XRD peaks. The results showed that the material content of the specimens matched the composition of the tested specimens. SEM testing was conducted to determine the size of the pores in the specimens, with a magnification of 2000x, and the results showed that the pore size varied from 2.48 μ m to 11.38 μ m. EDS testing was conducted to determine the elemental composition of the specimens and found that the elemental composition matched the elements that form HA and SiO₂. Finally, carbon capture testing was conducted as a step to determine whether the specimens could truly capture carbon, which was done twice. The results of the first run showed that the specimen worked and captured carbon for 788 seconds or 13 minutes 8 seconds until it stopped capturing carbon, with a carbon adsorption capacity of 61%. In the second run, the specimen worked and captured carbon for 649 seconds or 10 minutes 49 seconds until it stopped capturing carbon, with a carbon adsorption capacity of 60%.

KEYWORDS : Hydroxyapatite, SiO₂, Carbon Capture Storage, Coldsintering.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	v
HALAMAN AGENDA.....	vii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	ixx
KATA PENGANTAR	xii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	xiii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	xv
RINGKASAN.....	xvii
SUMMARY.....	xix
DAFTAR ISI.....	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxv
DAFTAR TABEL.....	xxvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxix
DAFTAR SIMBOL.....	xxxixi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 <i>Carbon Capture</i>	7
2.2 <i>Carbon Capture Storage (CCS)</i>	9
2.3 Adsorpsi CO ₂	10
2.4 Material Komposit	11
2.5 Hidroksiapatit (HA)	12
2.5.1 Sifat Fisik Hidroksiapatit	14
2.5.2 Sifat Kimia Hidroksiapatit	14
2.5.3 Sifat Mekanik Hidroksiapatit.....	15

2.6	Tulang.....	15
2.7	Tulang Sapi	16
2.8	Silika (SiO ₂)	17
2.9	Sintesis Hidroksiapatit.....	18
2.9.1	Metode <i>Hidrotermal Alkali</i>	19
2.9.2	Metode <i>Sol – Gel</i>	19
2.9.3	Metode <i>Vibro – Milling</i>	19
2.9.4	Metode Kering.....	20
2.10	Proses Kalsinasi.....	20
2.11	Proses <i>Ballmilling</i>	22
2.12	Proses Pengayakan	23
2.13	Sintering	24
2.14	Sintering Konvensional	25
2.14.1	<i>Solid State Sintering</i>	25
2.14.2	<i>Liquid Phase Sintering</i>	26
2.14.3	<i>Viscous Sintering</i>	26
2.15	Sintering Dingin (<i>Cold Sintering</i>).....	26
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		29
3.1	Diagram Alir Penelitian	29
3.2	Alat dan Bahan	30
3.3	Prosedur Penelitian.....	30
3.3.1	Persiapan dan Pembuatan <i>Reinforced</i> (SiO ₂).....	31
3.3.2	Persiapan dan Pembuatan Serbuk Hidroksiapatit (HA)	33
3.3.3	Pembuatan Keramik Hidroksiapatit (HA) Berpori.....	39
3.4	Metode Pengujian.....	44
3.4.1	Pengukuran Dimensi	44
3.4.2	Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	44
3.4.3	Pengujian Densitas	45
3.4.4	Pengujiann <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS).....	47
3.4.5	Pengujian <i>Carbon Capture</i>	48
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Pengukuran Dimensi	51
4.2	Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	52

4.2.1	Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> Tulang Sapi.....	53
4.2.2	Hasil Pengujian <i>X-Ray Diffraction</i> SiO ₂	54
4.2.3	Hasil <i>X-Ray Diffraction</i> Keramik Berpori HA/SiO ₂	55
4.3	Pengujian dan Perhitungan Porositas.....	56
4.3.1	Pengujian Densitas dan Perhitungan Porositas.....	57
4.3.2	Data Hasil Pengujian Densitas dan Perhitungan Porositas.....	59
4.4	Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) dan <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS).....	64
4.4.1	Pengujian <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	65
4.4.2	Pengujian <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> (EDS).....	67
4.5	Pengujian <i>Carbon Capture</i>	68
4.5.1	Adsorpsi Secara Kimia.....	71
4.5.2	Adsorpsi Secara Fisika.....	72
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Saran.....	74
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN.....		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Grafik peningkatan emisi gas CO ₂	7
Gambar 2.2 Tulang paha atau femur	17
Gambar 2.3 <i>Furnace</i>	22
Gambar 2.4 <i>Ballmilling</i>	23
Gambar 2.5 Ayakan atau <i>Mesh</i>	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	29
Gambar 3.2 Kaca setelah dipecahkan menjadi bagian kecil	31
Gambar 3.3 Proses <i>ballmilling</i> kaca	31
Gambar 3.4 Kaca setelah dilakukan <i>ballmilling</i>	32
Gambar 3.5 Proses pengayakan serbuk kaca	32
Gambar 3.6 Serbuk kaca yang sudah siap digunakan	33
Gambar 3.7 Limbah tulang sapi	33
Gambar 3.8 Proses perebusan tulang sapi	34
Gambar 3.9 Proses penjemuran tulang sapi	34
Gambar 3.10 Proses pemotongan tulang sapi dengan gerinda	35
Gambar 3.11 Proses kalsinasi tulang sapi	36
Gambar 3.12 Tulang sapi setelah dikalsinasi	36
Gambar 3.13 Proses <i>ballmilling</i> tulang sapi	37
Gambar 3.14 Tulang sapi setelah dilakukan <i>ballmilling</i>	37
Gambar 3.15 Proses pengayakan serbuk tulang sapi	38
Gambar 3.16 Tulang sapi yang sudah menjadi hidroksiapatit dan siap digunakan	38
Gambar 3.17 Proses penimbangan serbuk <i>mixing</i> 70% HA dan 30% SiO ₂	40
Gambar 3.18 Proses penimbangan serbuk <i>mixing</i> 80% HA dan 20%	40
Gambar 3.19 Proses penimbangan serbuk <i>mixing</i> 90% HA dan 10% SiO ₂	40
Gambar 3.20 Proses <i>mixing</i> tiap varian dengan alat <i>ballmilling</i>	41
Gambar 3.21 Proses penimbangan serbuk untuk disintering dingin	41
Gambar 3.22 Memasukkan serbuk ke <i>molding</i> sintering dingin	42
Gambar 3.23 Proses sintering dingin variasi tekanan 400 Mpa	42

Gambar 3.24 Proses sintering dingin dengan variasi tekanan 500 Mpa.....	43
Gambar 3.25 Spesimen hasil sintering dingin	43
Gambar 3.26 Spesimen hasil sintering dingin 2	43
Gambar 3.27 Alat <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	45
Gambar 3.28 Skema pengujian densitas.....	46
Gambar 3.29 Alat <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	47
Gambar 3.30 Alat pengujian <i>carbon capture</i>	48
Gambar 3.31 Mekanisme alat pengujian <i>carbon capture</i>	49
Gambar 4. 1 Pengukuran dimensi 10 mm x 10 mm	51
Gambar 4. 2 Grafik hasil XRD tulang sapi kalsinasi	53
Gambar 4. 3 Grafik hasil XRD SiO ₂	54
Gambar 4. 4 Grafik hasil XRD spesimen HA/SiO ₂	55
Gambar 4. 5 Hasil analisa XRD HA/SiO ₂ dengan <i>software “match”</i>	55
Gambar 4. 6 <i>Report analysis</i> XRD HA/SiO ₂ pada <i>software “match”</i>	56
Gambar 4. 7 Seluruh varian sampel yang akan di uji densitas dengan total 45 sampel	57
Gambar 4. 8 Berat sampel di udara sebesar 1.6450gr	59
Gambar 4. 9 Berat sampel di air sebesar 0.9100gr.....	59
Gambar 4. 10 Densitas apparent sebesar 2.239g/cm ³	60
Gambar 4. 11 Grafik data hasil pengujian densitas dan perhitungan porositas.....	62
Gambar 4. 12 Hasil pengamatan SEM pada perbesaran 5000x	65
Gambar 4. 13 Hasil analisa SEM keramik berpori 80%HA/20%SiO ₂ pada tekanan 300Mpa dengan perbesaran 2000x serta ukuran porositasnya.	66
Gambar 4. 14 Grafik data hasil EDS	67
Gambar 4. 15 Alat dan mekanisme kerja pengujian <i>carbone capture</i>	68
Gambar 4. 16 Grafik hasil pengujian <i>carbon capture running</i> 1	69
Gambar 4. 17 Grafik hasil pengujian <i>carbon capture running</i> 2	69
Gambar 4. 18 Grafik kemampuan adsorpsi permenit.....	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat mekanik hidroksiapatit	15
Tabel 2.2 Karakteristik silika	18
Tabel 3.1 Variasi komposisi bahan, tekanan dan jumlah sampel pengujian.....	39
Tabel 4. 1 Data uji densitas varian komposisi HA 70% dan SiO ₂ 30%	61
Tabel 4. 2 Data uji densitas varian komposisi HA 80% dan SiO ₂ 20%	61
Tabel 4. 3 Data uji densitas varian komposisi HA 90% dan SiO ₂ 10%	62
Tabel 4. 4 Perbandingan rata rata porositas dari hasil variasi komposisi pada sintering konvensional dan sintering dingin	63
Tabel 4. 5 Data EDS.....	67

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Bentuk spesimen setelah <i>coldsintering</i>	79
Lampiran 2 Proses sintering dingin.....	79
Lampiran 3 Memasukan serbuk ke molding	80
Lampiran 4 Hasil analisa XRD dengan <i>software match</i>	80
Lampiran 5 Proses perhitungan porositas	81
Lampiran 6 Proses pengujian <i>carbon capture</i>	81
Lampiran 7 Kartu asistensi bimbingan.....	82
Lampiran 8 Surat pernyataan bebas plagiarisme.....	83
Lampiran 9 Surat pernyataan cek similaritas.....	84
Lampiran 10 Lembar cek similaritas.....	85
Lampiran 11 Respons perbaikan sidang.....	87
Lampiran 12 Lembar cek format.....	89

DAFTAR SIMBOL

$\rho_{apparent}$	= densitas aktual (g/cm ³)
W_{udara}	= berat spesimen di udara (g)
ρ_{fluida}	= densitas fluida (g/cm ³)
W_{fluid}	= berat spesimen di dalam fluida (g)
$\rho_{theoriti}$	= densitas teoritis (g/cm ³)
V_H	= berat matriks % (g)
V_{silika}	= berat reinforced % (g)
ρ_{HA}	= densitas matriks (g/cm ³)
ρ_{silika}	= densitas reinforced (g/cm ³)
Φ	= porositas
$\rho_{relative}$	= densitas relatif

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan kemajuan zaman dan inovasi yang sangat *trend*, baik di bidang industri maupun transportasi, ternyata hal tersebut berdampak pada kesejahteraan udara di Indonesia dan dunia. Kontaminasi udara luar dapat menyebabkan masalah pernapasan, kerusakan kardiovaskular, penyakit paru paru, dan bahkan kematian. Berdasarkan *Air Quality Life Index (AQLI)*, masyarakat Indonesia diperkirakan kehilangan rata-rata 2,5 tahun masa depan mereka karena kualitas udara yang tidak memenuhi ambang batas yang dilindungi sesuai aturan Asosiasi Kesejahteraan Dunia, khususnya WHO, untuk pengelompokan partikel halus PM2.5 (Lee dan Greenstone, 2021).

Menurut *International Energy Agency (IEA)*, pada tahun 2021, produk sampingan bahan bakar fosil (emisi karbon) secara keseluruhan akan mencapai rekor tertinggi, yaitu 36,3 gigaton CO₂. Sejalan dengan pemulihan ekonomi global, yang tumbuh sebesar 5,9% pada periode yang sama, emisi karbon meningkat sekitar 6% pada tahun tersebut dibandingkan tahun 2020. IEA mencatat bahwa sebagian besar produk sampingan bahan bakar fosil di seluruh dunia pada tahun 2021 berasal dari konsumsi batu bara. dan gas alam yang mudah terbakar (Purnami, 2023).

Emisi karbon dan polusi udara mempunyai hubungan yang erat. Karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar fosil, penggundulan hutan, dan produksi industri, merupakan salah satu gas rumah kaca yang paling banyak dihasilkan manusia. Fokus CO₂ di udara telah meningkat dan dalam waktu dekat akan mencapai tingkat yang membahayakan kehidupan di dunia (Weldekidan dkk., 2023). Penangkapan CO₂ langsung melalui udara adalah sistem yang menjanjikan untuk memperlambat perluasan

fiksasi CO₂ dan mengendalikan peningkatan suhu di seluruh bumi (Zhang dkk., 2023).

Pemanfaatan bahan penyerap padat yang kuat untuk menahan CO₂ telah diusulkan sebagai metode untuk mengurangi pembuangan yang berhubungan dengan pembakaran bahan bakar (Gorbounov dkk., 2024). Salah satu metode untuk menyerap CO₂ adalah dengan memanfaatkan biomaterial berupa komposit hidroksiapatit sebagai bahan adsorpsi karbon di udara..

Zat yang telah dikembangkan untuk berinteraksi dengan sistem biologis untuk tujuan mengobati, meningkatkan, memperbaiki, atau menggantikan kondisi medis dikenal sebagai biomaterial. Hidroksiapatit merupakan salah satu komponen biomaterial. Hidroksiapatit, juga disebut sebagai hidroksilapatit (HA), adalah mineral alami turunan kalsium apatit dengan rumus $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$ Namun, biasanya ditulis sebagai $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ untuk menggambarkan bahwa sel satuan kristal terdiri dari dua unsur. Hidroksiapatit adalah anggota akhir hidroksil dari kompleks tandan apatit. Partikel OH⁻ dapat digantikan oleh fluorida, klorida atau karbonat, menghasilkan fluorapatit atau klorapatit. Sistem kristal heksagonal terbentuk ketika senyawa ini mengkristal. Bubuk hidroksiapatit murni berwarna putih (Anthony, 2000). Hidroksiapatit (HA) adalah bahan keramik rekayasa yang digunakan dalam pemulihan tulang. HA adalah bahan bioaktif yang mirip dengan apatit organik, mineral yang ditemukan di tulang (Khalid dan Chaudhry, 2020). Hidroksiapatit yang direkayasa adalah bahan yang memiliki kreasi sintesis dan konstruksi sub-atom seperti tulang dan gigi. Bahan ini dalam banyak kasus digunakan dalam aplikasi klinis, termasuk sebagai bahan implan (Arifin dkk., 2020). Namun pada penelitian kali ini hidroksiapatit digunakan sebagai alat adsorpsi untuk karbon di udara.

Berbagai bahan dapat dimanfaatkan sebagai bahan dasar pembuatan hidroksiapatit, salah satunya adalah tulang sapi. Hidroksiapatit yang terbuat dari tulang sapi telah digunakan untuk membuat berbagai produk teknik, adsorben, katalis, dan aplikasi medis. Pemanfaatan katalis berbasis hidroksiapatit dalam industri masih sangat tinggi, termasuk katalis padat berpori dari komposit HA/SiO_2 (Arifin dkk., 2022). Penelitian terhadap bahan keramik komposit

hidroksiapatit telah banyak dilakukan untuk membantu kebutuhan di bidang klinis. Salah satu penelitian berencana untuk mendorong dan mengembangkan produksi keramik berpori dari komposit hidroksiapatit (G. Gunawan dkk., 2019).

Proses sintering atau *frittage* merupakan langkah penting dalam proses pembuatan keramik berpori dari komposit hidroksiapatit. Sintering adalah cara paling umum untuk membentuk massa kuat dari suatu material berdasarkan tegangan atau intensitas tanpa melarutkannya hingga titik cair. Proses ini penting untuk sistem perakitan yang digunakan dengan logam, tembikar, plastik, dan bahan lainnya. Partikel-partikel kecil dalam bahan yang disinter menyebar melintasi batas molekul, menyatu menjadi satu bagian yang kuat. Proses sintering ada dua macam, yaitu sintering konvensional dan sintering dingin. Temperatur yang digunakan pada sintering dingin antara 200°C hingga 400°C, sedangkan temperatur yang digunakan pada sintering konvensional minimal 1000°C (Guo dkk., 2021).

Berdasarkan uraian diatas tersebut penulis mengambil tugas akhir / skripsi dengan judul “STUDI FABRIKASI KERAMIK KOMPOSIT HA/SiO_2 BERPORI MELALUI PROSES SINTERING DINGIN UNTUK ADSORPSI CO_2 ”

1.2 Rumusan Masalah

Penciptaan inovasi di bidang industri dan transportasi telah meningkatkan tingkat polusi dan pencemaran udara dengan cepat. Kondisi medis yang berhubungan dengan udara telah menjadi isu perbincangan hangat akhir-akhir ini. Dalam kondisi seperti ini, penelitian mengenai penangkapan karbon di udara sangat diperlukan mengingat luasnya permasalahan medis yang disebabkan oleh kontaminasi udara yang disebabkan oleh peningkatan kadar CO_2 di udara. Untuk mengatasi permasalahan tersebut dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan membuat adsorben dengan menggunakan hidroksiapatit tulang sapi sebagai bahan dasarnya. Adsorben komposit HA ini dapat digunakan

sebagai perangkat adsorpsi yang memanfaatkan metode sintering dingin pada fabrikasi untuk menghemat penggunaan daya. Biasanya, keramik komposit hidroksiapatit dibuat dan dieksplorasi untuk dimanfaatkan sebagai biomaterial untuk digunakan sebagai implan tulang pada manusia. Belum banyak penelitian yang dilakukan terhadap keramik komposit hidroksiapatit sebagai alat adsorpsi, khususnya pada adsorpsi gas karbon di udara. Komposit keramik hidroksiapatit dapat dibuat dengan porositas yang memadai untuk digunakan sebagai adsorpsi gas karbon dengan memvariasikan komposisi material komposit dan mengendalikan tekanan dalam siklus pemadatan (Fadillah dkk., 2023).

Penelitian keramik komposit hidroksiapatit berpori biasanya menggunakan metode sintering konvensional dengan waktu sintering hingga tiga jam dalam oven listrik (*Furnace*) dan suhu relatif tinggi hingga 1200°C. Selain sintering konvensional ada juga sintering dingin (*Cold Sintering*) namun belum banyak penelitian yang melakukan pembuatan keramik berpori komposit hidroksiapatit dengan metode sintering dingin (*Cold Sintering*). Efisien dalam pembuatan keramik komposit hidroksiapatit berpori dengan menggunakan teknik sintering dingin lebih bagus dibandingkan dengan sintering biasa, karena siklus sintering dingin dapat menghemat penggunaan daya listrik karena pada proses sintering dingin suhu yang dibutuhkan adalah sekitar 200-400°C.

Pada penelitian ini, akan dibuat keramik berpori komposit hidroksiapatit dengan menggunakan limbah tulang sapi sebagai bahan dasar dan silika sebagai bahan penguat (*Reinforced*). Bahan baku akan diproses dengan menggunakan metode sintering dingin (*Cold Sintering*) dengan beberapa rasio komposisi bahan baku dan tekanan yang berbeda pada tiap spesimennya. Dari penelitian kali ini spesimen yang sudah dibuat dengan beragam rasio komposisi bahan dan tekanan akan dipilih satu jenis spesimen dengan porositas yang cukup baik dengan harapan spesimen dapat digunakan sebagai alat adsorpsi emisi karbon di udara.

Beberapa pengujian dilakukan untuk membantu pengumpulan data pada penelitian kali ini, seperti pengukuran dimensi, pengujian XRD, pengujian densitas dan porositas, pengujian SEM dan EDS, serta pengujian *carbon capture*.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup yang akan dibahas pada penelitian ini, sebagai berikut:

1. Material yang digunakan berasal dari limbah tulang sapi sebagai bahan utama uji penelitian
2. Menggunakan metode *cold sintering* / sintering dingin pada temperatur 250°C dan ditahan selama 15 menit
3. Variasi komposisi bahan yang digunakan 70% Hidroksiapatit dan 30% SiO₂ , 80% Hidroksiapatit dan 20% SiO₂ , 90% Hidroksiapatit dan 10% SiO₂
4. Variasi tekanan kompaksi 300 MPa, 400 MPa dan 500 MPa
5. Emisi gas CO₂ berasal dari gas buang pembakaran dalam sepeda motor matic tipe vario 150 CC dalam kondisi idle.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan pengujian yang dilakukan oleh penulis yaitu sebagai berikut:

1. Untuk menghasilkan keramik berpori komposit hidroksiapatit (HA) dari limbah tulang sapi dengan menggunakan metode *cold sintering* / sintering dingin.
2. Untuk menganalisa pengaruh tekanan kompaksi pada proses sintering dingin pada pembuatan keramik berpori dari komposit hidroksiapatit tulang sapi.
3. Untuk menganalisa pengaruh komposisi bahan pada pembuatan keramik berpori dari komposit hidroksiapatit tulang sapi.
4. Untuk menganalisa sampel data tes uji emisi dan adsorpsi karbon sebagai tanda adanya *carbon capture* oleh spesimen yang telah di buat.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh pada penelitian ini adalah:

1. Mempelajari dan membuat keramik berpori komposit hidroksiapatit sebagai percobaan biomaterial adsorpsi karbon di udara.
2. Mempelajari pengaruh perbedaan komposisi bahan campuran dan rasio tekanan terhadap sifat fisik (densitas dan porositas) keramik berpori komposit hidroksiapatit.
3. Sebagai langkah awal pengembangan penelitian mengenai penangkapan karbon di udara dengan menggunakan keramik berpori komposit hidroksiapatit dari tulang sapi serta membantu peneliti lainnya terkhusus pada pembuatan keramik berpori komposit hidroksiapatit dengan metode sintering dingin.

DAFTAR PUSTAKA

- Amalia, V., Hadisantoso, E. P., Hidayat, D., Diba, R. F., Dermawan, M. F., dan Tsaniyah, S. W. (2017). Isolasi dan karakterisasi hidroksiapatit dari limbah tulang hewan. *ALCHEMY: Journal of Chemistry*, 5(4), 114-119.
- Amin, M. (2020). Studi Pembuatan Komposit HA/SiO₂ Berpori Menggunakan Space Holder Ubi Jalar Ungu. Universitas Sriwijaya.
- Amin, M., dan Irawan, R. B. (2008). Pengaruh Tekanan Kompaksi Terhadap karakterisasi Keramik Kaolin yang Dibuat Dengan Proses Pressureless Sintering. *Traksi*, 7(2).
- Anastasescu, C., Anastasescu, M., Teodorescu, V., Gartner, M., dan Zaharescu, M. (2010). SiO₂ nanospheres and tubes obtained by sol-gel method. *Journal of non-crystalline solids*, 356(44-49), 2634-2640.
- Andrews, J., Button, D., dan Reaney, I. M. (2020). Advances in cold sintering: improving energy consumption and unlocking new potential in component manufacturing. *Johnson Matthey Technology Review*, 64(2), 219-232.
- Anthony, J. W. B., Richard A.; Bladh, Kenneth W.; Nichols, Monte C., ed. (2000). "Hydroxylapatite". *Handbook of Mineralogy*.
- Arifin, A., Gunawan, Amin, M. W., Mardhi, A., Trycahyono, G., dan Burlian, F. (2022, 2022//). Characterization Porous HA/SiO₂ Composite Prepared Using Natural Space Holder. *Human-Centered Technology for a Better Tomorrow*, Singapore.
- Arifin, A., Gunawan, Priyadi, A., dan Sanjaya, F. A. (2020). Development and characterization of porous hydroxyapatite-Alumina composite for engineering application. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 857(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/857/1/012005>
- ASTM. (1991). *Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement*. United States: West Conshohocken.
- Barakat, N. A., Khalil, K., Sheikh, F. A., Omran, A., Gaihre, B., Khil, S. M., dan Kim, H. Y. (2008). Physiochemical characterizations of hydroxyapatite extracted from bovine bones by three different methods: extraction of biologically desirable HAp. *Materials Science and Engineering: C*, 28(8), 1381-1387.
- Bintoro, A. R. W. (2012). Studi Sitokompabilitas Nano-Komposit Hidroksiapatit/Kitosan (n-HA/CS) Universitas Airlangga.
- Blamey, J., Anthony, E., Wang, J., dan Fennell, P. (2010). The calcium looping cycle for large-scale CO₂ capture. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(2), 260-279.
- Budihartono, S. (2012). Pengaruh Pressureless Sintering Komposit Al-Kaolin Terhadap Densitas, Kekerasan Dan Struktur Mikro. *Traksi*, 12(1).
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S.,

- Fennell, P. S., Fuss, S., Galindo, A., dan Hackett, L. A. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*, 11(5), 1062-1176.
- Cachola, C. d. S., Ciotta, M., Azevedo dos Santos, A., dan Peyerl, D. (2023). Deploying of the carbon capture technologies for CO₂ emission mitigation in the industrial sectors. *Carbon Capture Science & Technology*, 7, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100102>
- Chairunnisa, P. S., dan Wardhana, Y. W. (2016). Karakterisasi Kristal Bahan Padat Aktif Farmasi. *Farmaka*, 14(1), 17-32.
- Darwis, D., dan Warastuti, Y. (2008). Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite (HA) Composite as Synthetic Bone Graft; Sintesis dan Karakterisasi Komposit Hidroksiapatit (HA) Sebagai Graft Tulang Sintetik. *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 4.
- Fadhilah, N., Irhamni, I., dan Jalil, Z. (2016). Synthesis of Natural Hydroxyapatite from Aceh's Bovine Bone. *Journal of Aceh Physics Society*, 5(2), 19-21.
- Fadillah, M. Y. (2024). Studi Pembuatan Komposit HA/SiO₂ Berpori Menggunakan Space Holder Kacang Hijau Sebagai Material Adsorpsi CO₂ Universitas Sriwijaya].
- Fadillah, M. Y., Rifo Falah, A. T., Aprilo, F., Shafarani, Ardyansah, E., Gunawan, Arifin, A., dan Adanta, D. (2023). Development of Porous Ceramic Filters for Carbon Dioxide Capture Using Hydroxyapatite/SiO₂ Composite Sriwijaya International Conference on Engineering and Technology (SICETO), Palembang.
- Funahashi, S., Guo, H., Guo, J., Baker, A. L., Wang, K., Shiratsuyu, K., dan Randall, C. A. (2017). Cold sintering and co - firing of a multilayer device with thermoelectric materials. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(8), 3488-3496.
- Gorbounov, M., Diaz-Vasseur, E., Danaci, D., dan Masoudi Soltani, S. (2024). Chemical activation of porous carbon extracted from biomass combustion bottom ash for CO₂ adsorption. *Carbon Capture Science & Technology*, 10, 100151. <https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100151>
- Grasso, S., Biesuz, M., Zoli, L., Taveri, G., Duff, A. I., Ke, D., Jiang, A., dan Reece, M. J. (2020). A review of cold sintering processes. *Advances in Applied Ceramics*, 119(3), 115-143.
- Gunawan, Arifin, A., Yani, I., dan Arian, S. D. (2019). The Fabrication Porous hydroxyapatite Scaffold Using Sweet Potato Starch as a Natural Space Holder. *Journal of Physics: Conference Series*, 1198(4), 042020. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/4/042020>
- Gunawan, Sopyan, I., Nurfaezah, S., dan 'Ammar, M. (2013). Development of triphasic calcium phosphate-carbon nanotubes (HA/TCP-CNT) composite: A preliminary study. *Key Engineering Materials*, 531, 258-261.
- Gunawan, G., Arifin, A., Yani, I., dan Indrajaya, M. (2019). Characterization of porous hydroxyapatite-alumina composite scaffold produced via powder

- compaction method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 620(1), 012107. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/620/1/012107>
- Gunawan, G., Wijayanto, I. G., Arifin, A., Trycahyono, G., dan Octapia, A. (2023). Study of the effect manufacturer of hydroxyapatite ceramic through cold sintering process. *AIP Conference Proceedings*,
- Guo, N., Shen, H.-Z., Jin, Q., dan Shen, P. (2021). Hydrated precursor-assisted densification of hydroxyapatite and its composites by cold sintering. *Ceramics International*, 47(10, Part A), 14348-14353. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.294>
- Henggu, K. U., Ibrahim, B., dan Suptijah, P. (2019). Hidroksiapatit dari cangkang sotong sebagai sediaan biomaterial perancah tulang. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 22(1), 1-13.
- Iler, R. K. (1979). *The chemistry of silica, Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*, 866.
- Khalid, H., dan Chaudhry, A. A. (2020). 4 - Basics of hydroxyapatite—structure, synthesis, properties, and clinical applications. In A. S. Khan dan A. A. Chaudhry (Eds.), *Handbook of Ionic Substituted Hydroxyapatites* (pp. 85115). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102834-6.00004-5>
- Khoirudin, M. (2015). Sintesis dan karakterisasi hidroksiapatit (Hap) dari kulit kerang darah (*Anadara granosa*) dengan proses hidrotermal Riau University].
- Lee, K., dan Greenstone, M. (2021). *Polusi Udara Indonesia dan Dampaknya Terhadap Usia Harapan Hidup*.
- Liu, J., Thallapally, P. K., McGrail, B. P., Brown, D. R., dan Liu, J. (2012). Progress in adsorption-based CO₂ capture by metal–organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 41(6), 2308-2322.
- Lu, P., German, R., dan Xu, X. (2001). Microstructural evolution and macroscopic behaviour during solid state sintering. *Powder metallurgy*, 44(4), 363-368.
- Ningsih, R. P., Wahyuni, N., dan Destiarti, L. (2014). Sintesis hidroksiapatit dari cangkang kerang kepah (*Polymesoda erosa*) dengan variasi waktu pengadukan. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*, 3(1).
- Noviyanti, A. R., Yusuf, A., Hartati, Y. W., dan Adiperdana, B. (2021). Study of the Interaction Carbondioxide Gas with Hydroxyapatite Using Density Functional Theory. *Indonesian Journal of Industrial Research*, 30(2), 57-65.
- Ooi, C., Hamdi, M., dan Ramesh, S. (2007). Properties of hydroxyapatite produced by annealing of bovine bone. *Ceramics International*, 33(7), 1171-1177.
- Priyana, A. (2007). Peran pertanda tulang dalam serum pada tatalaksana osteoporosis. *Universa Medicina*, 26(3), 152-159.
- Purnami, N. M. S. (2023). Pengaruh Tata Kelola Perusahaan, Ukuran Perusahaan, dan Sertifikasi ISO 14001 Terhadap Pengungkapan Emisi Karbon Universitas Pendidikan Ganesha].
- Rahayu, S., Alaa, S., Handayani, D., dan Kurniawidi, D. W. (2022). Pengolahan Limbah Cangkang Kerang Mutiara (*Pinctada Maxima*) Sebagai

- Adsorben Logam Berat Fe. *Jurnal Pertambangan Dan Lingkungan*, 3(2), 10-15.
- Rubin, E. S., Mantripragada, H., Marks, A., Versteeg, P., dan Kitchin, J. (2012). The outlook for improved carbon capture technology. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(5), 630-671. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecs.2012.03.003>
- Ruksudjarit, A., Pengpat, K., Rujijanagul, G., dan Tunkasiri, T. (2008). Synthesis and characterization of nanocrystalline hydroxyapatite from natural bovine bone. *Current applied physics*, 8(3-4), 270-272.
- Sidiqa, A. N., Djustiana, N., Sunendar, B., dan 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), 43-46.
- Thompson, J. C. (2009). *Netter's concise orthopaedic anatomy*. Elsevier Health Sciences.
- Wardani, N. S., Fadli, A., dan Irdoni, I. (2015). Sintesis Hidroksiapatit dari Cangkang Telur dengan Metode Presipitasi Riau University].
- Weldekidan, H., Patel, H., Mohanty, A., dan Misra, M. (2023). Synthesis of porous and activated carbon from lemon peel waste for CO₂ adsorption. *Carbon Capture Science & Technology*, 100149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100149>
- Wickramasinghe, D., dan Rowell, D. (2006). The release of silicon from amorphous silica and rice straw in Sri Lankan soils. *Biology and Fertility of Soils*, 42(3), 231-240.
- Wilberforce, T., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Elsaid, K., dan Abdelkareem, M. A. (2021). Progress in carbon capture technologies. *Science of The Total Environment*, 761, 143203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143203>
- Yanti, P. H., dan Gandi, Y. (2020). Pengaruh Waktu Kalsinasi Terhadap Sifat Fisika-Kimia Hidroksiapatit Dari Cangkang Geloina Coaxans. *Chemistry Progress*, 13(2).
- Yu, C.-H., Huang, C.-H., dan Tan, C.-S. (2012). A Review of CO₂ Capture by Absorption and Adsorption. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 745-769. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.05.0132>
- Zhang, X., Zhao, H., Yang, Q., Yao, M., Wu, Y.-n., dan Gu, Y. (2023). Direct air capture of CO₂ in designed metal-organic frameworks at lab and pilot scale. *Carbon Capture Science & Technology*, 9, 100145. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccst.2023.100145>