

**Pembuatan PMC UHMWPE yang didoping Nano Zirkonia
(ZrO₂) Untuk Aplikasi Material Implan**

*Preparation of Nano Zirconia (ZrO₂)-doped UHMWPE PMCs for
Implant Material Applications*

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Muhammad Fakhrizal Anwar

NPM: 213030041



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2025**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Muhammad Fakhrizal Anwar

Nomor Pokok Mahasiswa : 213030041

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa: -

1. Dalam Skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarism.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 19 November 2025

Penulis,



Muhammad Fakhrizal Anwar

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a: Muhammad Fakhrizal Anwar

NPM: 213030041

Program Studi: Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya: Skripsi, makalah, laporan magang kerja, karya profesi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pembuatan PMC UHMWPE yang didoping Nano Zirkonia (ZrO_2) Untuk Aplikasi Material Implan.

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 4 Februari 2025

Yang menyatakan,



METERAI
TEMPEL
7654DANX270800319

Muhammad Fakhrizal Anwar

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**Pembuatan PMC UHMWPE yang didoping nano zirkonia (ZrO_2)
untuk aplikasi material implan**



**Nama: Muhammad Fakhrizal Anwar
NPM: 213030041**

Pembimbing Utama

Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Pembuatan PMC UHMWPE yang didoping nano zirkonia (ZrO_2) untuk aplikasi material implan



Nama: Muhammad Fakhrizal Anwar
NPM: 213030041

Tanggal sidang skripsi: 9 Januari 2026

Ketua : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Djoko Hadi Prajitno, MSME.

Anggota : Mohammad Reza Hermawan, S.T M.T.

Anggota : Ir. Agus Sentana, M.T.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, laporan usulan penelitian ini dapat disusun sebagai langkah awal untuk mendukung pengembangan ilmu pengetahuan dalam bidang yang menjadi fokus kajian. Penelitian ini dirancang untuk menjawab permasalahan yang telah diidentifikasi secara mendalam, serta memberikan kontribusi teoritis maupun praktis yang relevan dengan kebutuhan masyarakat atau perkembangan teknologi saat ini.

Penulis mengenal banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama penyelesaian laporan usulan penelitian skripsi ini. Oleh karena itu, patutlah penulis dengan hormat mengucapkan rasa syukur dan berdoa semoga Allah SWT memberikan balasan yang terbaik untuk:

1. Ibu dan Kakak saya yang selalu berkorban dan mendukung untuk kelancaran selama proses perkuliahan.
2. Bapak Dr. Ir Muki Satya Permana, MT., selaku dosen pembimbing utama.
3. Bapak Dr. Ir. Djoko H. Prajitno, MS.ME., selaku dosen pembimbing pendamping.
4. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, MT., selaku Ketua Jurusan Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan.
5. Dosen-dosen Fakultas Teknik Mesin Universitas Pasundan.
6. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Mesin Universitas Pasundan.

Peneliti berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan menjadi referensi untuk pengembangan selanjutnya. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan keberkahannya kepada kita semua.

Bandung, 15 April 2025

Penulis,



Muhammad Fakhri Anwar

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VI
DAFTAR GAMBAR.....	VIII
DAFTAR TABEL	X
ABSTRAK	XI
ABSTRACT	XII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah.....	2
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	3
5. Lingkup masalah.....	3
6. Sistematika penulisan	3
BAB II STUDI LITERATUR	5
1. Biomaterial	5
2. Klasifikasi Biomaterial	6
3. Implan Tulang.....	7
4. UHMWPE	8

5.	Nano Zirkonia (ZrO ₂)	9
6.	Graphene Nanoplatelet (GNP).....	10
7.	Planetary Ball Mill.....	11
8.	Kompaksi.....	12
9.	Sintering.....	12
10.	Pengujian Metalografi.....	12
11.	Pengujian Durometer Shore D	13
12.	Pengujian SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy).....	13
13.	Pengujian Pin On Disk	14
14.	Penelitian Terdahulu Terkait UHMWPE-ZrO ₂ untuk Aplikasi Implan	14
BAB III METODOLOGI		15
1.	Tahapan penelitian.....	15
2.	Tahapan eksperimen	17
3.	Tempat penelitian	18
4.	Peralatan dan bahan yang digunakan.....	19
5.	Metode pengujian yang dilakukan.....	20
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		24
1.	Hasil pengukuran/pengujian dan pembahasan.....	24
2.	Resume hasil perbandingan dan analisis hasil penelitian	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		47
1.	Kesimpulan.....	47
2.	Saran	47
DAFTAR PUSTAKA		48
LAMPIRAN.....		50
1.	Proses pembuatan spesimen	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Implan Tulang	8
Gambar 2. Diagram alir penelitian.....	15
Gambar 3. Set-up penelitian	17
Gambar 4. Lokasi FT Universitas Pasundan.....	18
Gambar 5. Lokasi PSTNT Batan Bandung.....	19
Gambar 6. a) Muffle furnace b). Ceramic engineering furnace manufactures	20
Gambar 7. Mikroskop optik Meiji MT8530	21
Gambar 8. <i>Durometer shore D</i>	22
Gambar 9. Spesimen hasil sintering.....	24
Gambar 10. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% ZrO ₂ (10 ton, 271°C, 10 menit)	35
Gambar 11. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO ₂ (24,891%).....	35
Gambar 12. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% ZrO ₂ (6 ton, 271°C, 10 menit)	36
Gambar 13. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO ₂ (39,399%).....	36
Gambar 14. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% ZrO ₂ (10 ton, 266°C, 10 menit)	37
Gambar 15. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO ₂ (39,803%).....	37
Gambar 16. Grafik nilai kekerasan (UHMWPE-ZrO ₂)	38
Gambar 17. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% GNP (10 ton, 271°C, 10 menit)	40
Gambar 18. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (20,647%)	41
Gambar 19. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% GNP (6 ton, 271°C, 10 menit)	42
Gambar 20. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (31,316%)	42
Gambar 21. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% GNP (10 ton, 266°C, 10 menit)	43
Gambar 22. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (50,819%)	43
Gambar 23. Grafik nilai kekerasan (UHMWPE-GNP).....	45
Gambar 24. Penimbangan komposisi.....	50
Gambar 25. Mesin planetary ball mills.....	50
Gambar 26. Spesimen hasil kompaksi	51

Gambar 27. Spesimen hasil sintering.....	51
Gambar 28. a) proses grinding b)proses polishing.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis biomaterial dan aplikasinya	5
Tabel 2. Desain eksperimen komposisi UHMWPE-ZrO ₂ -GNP	18
Tabel 3. Peralatan yang digunakan	19
Tabel 4. Bahan yang digunakan	19
Tabel 5. Hasil pengujian metalografi komposisi UHMWPE- ZrO ₂	25
Tabel 6. Hasil pengujian metalografi komposisi UHMWPE- GNP.....	28
Tabel 7. Hasil pengukuran komposisi UHMWPE- ZrO ₂	31
Tabel 8. Hasil pengukuran komposisi UHMWPE- GNP	32
Tabel 9. Hasil pengujian kekerasan komposisi UHMWPE-ZrO ₂	33
Tabel 10. Hasil pengujian kekerasan komposisi UHMWPE-GNP	39

ABSTRAK

Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) merupakan material yang banyak digunakan sebagai bantalan pada aplikasi implan ortopedi, namun memiliki keterbatasan sifat mekanik ketika menerima beban tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh penambahan nano zirkonia sebagai penguat material terhadap karakteristik komposit UHMWPE melalui proses pencampuran, kompaksi, dan sintering. Variasi komposisi nano zirkonia dan parameter sintering digunakan untuk mengubah sifat material. Karakterisasi yang dilakukan meliputi pengamatan struktur mikro menggunakan metalografi optik, pengukuran dimensi spesimen berupa tinggi, diameter, dan volume, serta pengujian kekerasan menggunakan durometer Shore D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses sintering berpengaruh terhadap perubahan dimensi spesimen dan nilai kekerasan komposit. Selain itu, pengamatan metalografi menampilkan perbedaan homogenitas dan porositas permukaan akibat variasi perlakuan sintering. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa penambahan nano zirkonia dan proses sintering memberikan kontribusi terhadap peningkatan karakteristik fisik dan mekanik komposit UHMWPE, sehingga berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai material bantalan pada aplikasi Total Hip Prosthesis.

Kata kunci: graphene nanoplatelet, Kekerasan Shore D, material implant, Nano Zirkonia (ZrO_2), Polymer Matrix Composite (PMC), UHMWPE.

ABSTRACT

Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) is widely used as a bearing material in orthopedic implant applications; however, it has limitations in mechanical performance when subjected to high loads. This study aims to investigate the effect of adding nano-zirconia as a reinforcing material on the characteristics of UHMWPE composites through mixing, compaction, and sintering processes. Variations in nano-zirconia composition and sintering parameters were applied to evaluate changes in material properties. The characterization methods employed include microstructural observation using optical metallography, dimensional measurements of the specimens in terms of height, diameter, and volume, as well as hardness testing using a Shore D durometer. The results indicate that the sintering process significantly influences dimensional changes and hardness values of the composites. In addition, metallographic observations reveal differences in surface homogeneity and porosity due to variations in sintering conditions. Based on these findings, it can be concluded that the addition of nano-zirconia and the sintering process contribute to improvements in the physical and mechanical characteristics of UHMWPE composites, indicating their potential for further development as bearing materials in Total Hip Prosthesis applications.

Keywords: graphene nanoplatelet, implant material, Nano Zirconia (ZrO₂), Polymer Matrix Composite (PMC), Shore D Hardness, UHMWPE.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Osteoarthritis merupakan penyakit yang terjadi akibat penurunan fungsi jaringan pada tubuh. Penyakit *Osteoarthritis* merupakan penyakit yang menyerang sendi-sendi yang terletak di berbagai bagian tubuh, terutama di sendi pinggul. Gejala yang timbul dapat berupa nyeri hebat dan seringkali berujung pada gangguan gerak serta ketergantungan terhadap alat bantu atau bantuan orang lain. Salah satu dari perawatan yang dilakukan adalah operasi untuk mengganti sendi pinggul dengan bahan buatan yang dipasang secara permanen.

Osteoarthritis adalah penyakit yang menyebabkan penurunan fungsi jaringan tubuh, terutama pada sendi-sendi, termasuk sendi pinggul. Gejala umum yang muncul berupa rasa nyeri hebat, yang seringkali mengganggu pergerakan dan membuat penderita tergantung pada alat bantu atau bantuan orang lain. Salah satu penanganan yang dilakukan adalah melalui operasi penggantian sendi pinggul dengan implan buatan yang dipasang secara permanen. Namun, tantangan utama dalam penggunaan implan adalah memastikan material yang digunakan memiliki ketahanan tinggi terhadap keausan, kekuatan mekanik yang cukup, serta biokompatibilitas yang baik, agar dapat bertahan dalam jangka panjang tanpa menimbulkan masalah pada jaringan tubuh [1].

Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) adalah salah satu bahan yang sering digunakan untuk implan sendi karena memiliki ketahanan aus yang cukup baik. Namun, UHMWPE masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti pelepasan partikel mikro akibat gesekan antar komponen, yang bisa menyebabkan peradangan jaringan dan osteolisis. Oleh karena itu, berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan kinerja UHMWPE, salah satunya dengan doping **Nano Zirkonia (ZrO_2)**.

Dengan menambahkan Nano Zirkonia ke dalam matriks UHMWPE, terbentuklah **Polymer Matrix Composite (PMC)** yang memiliki sifat mekanik lebih baik dan ketahanan aus yang lebih tinggi. Nano Zirkonia memiliki kekerasan yang tinggi, stabilitas termal yang sangat baik, serta biokompatibilitas yang unggul, menjadikannya bahan yang sangat cocok untuk aplikasi medis. Penambahan Nano Zirkonia memungkinkan distribusi partikel yang lebih merata dalam matriks UHMWPE, meningkatkan daya tahan material terhadap deformasi selama penggunaan jangka panjang. Selain itu, Nano Zirkonia juga

meningkatkan ketahanan terhadap korosi di lingkungan tubuh, sehingga menjadi bahan yang ideal untuk implan sendi panggul.[2]

Dengan pengembangan ini, diharapkan implan berbahan dasar PMC UHMWPE yang didoping Nano Zirkonia dapat mengatasi masalah keausan, mengurangi pelepasan partikel mikro, dan memperpanjang masa pakai implan. Material ini juga dapat meningkatkan kualitas hidup pasien dengan osteoarthritis dengan mengurangi rasa sakit, memperbaiki fungsi sendi, dan mengurangi kemungkinan perlunya operasi ulang. Penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk mengoptimalkan bahan dan proses produksinya agar dapat digunakan secara lebih luas dalam aplikasi klinis.

2. Rumusan masalah

UHMWPE merupakan material polimer yang banyak digunakan pada aplikasi biomaterial, khususnya sebagai bantalan pada implan ortopedi, namun masih memiliki keterbatasan pada sifat mekanik dan stabilitas dimensinya. Penambahan partikel nano zirkonia diharapkan dapat meningkatkan karakteristik material tersebut, namun pengaruh proses pembuatan terhadap sifat fisis dan mekanik komposit perlu dikaji lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh proses sintering terhadap perubahan dimensi dan pepadatan komposit UHMWPE–nano zirkonia, serta karakteristik struktur mikro dan porositas yang terbentuk. Selain itu, perlu dianalisis perubahan ukuran spesimen yang meliputi tinggi, diameter, dan volume setelah proses sintering, serta nilai kekerasan material berdasarkan hasil pengujian durometer Shore D sebagai indikator peningkatan awal sifat mekanik komposit.

3. Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh proses sintering terhadap perubahan dimensi dan tingkat pepadatan komposit UHMWPE–nano zirkonia, yang ditinjau melalui pengukuran tinggi, diameter, dan volume spesimen setelah proses sintering. Penelitian ini juga bertujuan untuk menganalisis karakteristik struktur mikro serta porositas yang terbentuk sebagai akibat dari proses sintering pada komposit tersebut. Selain itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi sifat mekanik awal material komposit UHMWPE–nano zirkonia melalui pengujian kekerasan durometer Shore D sebagai indikator peningkatan performa material setelah penambahan partikel nano zirkonia.

4. Manfaat

Keuntungan yang mungkin diperoleh dari hasil penelitian ini melibatkan:

- a. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang lebih komprehensif mengenai karakteristik mikrostruktur, tingkat kekerasan, serta perilaku keausan dari komposit PMC UHMWPE-ZrO₂. Pengetahuan tersebut sangat penting sebagai acuan dalam upaya pengembangan material untuk komponen Total Hip Prosthesis sehingga mampu bekerja lebih andal dan tahan lama.
- b. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar bagi penelitian lanjutan terkait pengembangan material implan untuk sendi lutut maupun pinggul. Informasi yang diperoleh dapat membantu menciptakan material implan yang lebih aman, lebih efektif, dan lebih sesuai untuk digunakan dalam prosedur medis modern.

5. Lingkup masalah

Pentingnya membatasi cakupan topik dalam penelitian adalah untuk menghindari pembahasan yang terlalu luas. Berikut adalah batasan masalah yang telah dirangkum:

- a. Penelitian ini pembuatan Polimer Matrik Composite yang dilakukan untuk pembuatan implan tulang dengan material UHMWPE yang didoping Nano Zirkonia (ZrO₂) dari bahan lokal, tidak berupa produk implan yang siap digunakan.
- b. Material yang digunakan yaitu PMC paduan UHMWPE-10% Nano Zirkonia (ZrO₂) dan UHMWPE-5% Nano Zirkonia (ZrO₂).
- c. Pengujian yang dilakukan adalah metalografi dan uji kekerasan shore D.

6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terdiri dari empat bab, dengan konten masing-masing bab dan daftar pustaka. Bab yang tercantum mencakup Pendahuluan, Studi Literatur, Metodologi, Rencana Kegiatan dan Anggaran yang akan digunakan.

BAB I: PENDAHULUAN

Bab pertama membahas latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II: STUDI LITERATUR

Pada bab kedua ini, terdapat uraian mengenai tentang teori dasar yang relevan, mencakup topik seperti biomaterial, implan tulang, UHMWPE, Nano Zirkonia (ZrO₂) dan Heat Treatment.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ketiga mencakup tahapan penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan, metode pengujian, lokasi penelitian dan anggaran yang telah digunakan.

BAB IV: PENGOLAHAN DATA

Bab terakhir ini membahas prosedur penelitian dan hasil dari pengujian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II STUDI LITERATUR

1. Biomaterial

Biomaterial didefinisikan sebagai material sintetis yang digunakan untuk membuat alat kesehatan (alkes) dan berinteraksi dengan sistem biologis selama penggunaannya. Biomaterial dimanfaatkan dalam pembuatan implan dan perangkat medis (surgical implants and devices) yang berfungsi menggantikan bagian tubuh atau memperbaiki fungsi organ dengan aman dan efisien. Berbagai jenis material dapat digunakan sebagai biomaterial, termasuk logam, keramik, polimer, hingga komposit. Tabel 1 merangkum jenis-jenis material yang umum digunakan sebagai biomaterial [3].

Tabel 1. Jenis biomaterial dan aplikasinya

Material	Keunggulan	Kelemahan	Aplikasi
Logam: stainless steel, paduan titanium, paduan kobalt-khrom, dsb.	Kuat, tangguh, ulet	Non bioaktif	Implan ortopedik, implan gigi, sendi buatan, ring jantung (stent), dsb.
Keramik: zirconia, alumina, bioglass, hidroksiapatit, dsb.	Bioaktif, inert	Getas	Implan ortopedik dan gigi
Polimer: nilon, poliaktid, polietilen, polyester, dsb.	Bioaktif, elastis	Kurang kuat	Graft pembuluh darah, benang jahit, soket sendi

			buatan, dsb.
Komposit: amalgam, semen tulang diperkuat fiber, dsb.	Dibuat khusus	Relatif sukar dibuat	Semen tulang, resin gigi, dsb.

Pada aplikasi tertentu, keramik dan polimer telah menggantikan logam sebagai biomaterial karena memiliki keunggulan dalam hal biokompatibilitas dan biofungsionalitas. Namun, untuk implan yang membutuhkan kekuatan, ketangguhan, dan daya tahan tinggi, logam tetap menjadi pilihan yang tidak tergantikan. Dengan pengembangan biofungsionalitas dan inovasi seperti implan biodegradabel, logam diperkirakan akan terus digunakan sebagai biomaterial di masa depan. Tren pengembangannya mengarah pada kombinasi keunggulan mekanis logam dengan biofungsionalitas keramik dan polimer untuk mencapai kinerja klinis yang optimal pada implan. Melalui kolaborasi antara para ahli, industri lokal, dan pemerintah, Indonesia memiliki potensi untuk mencapai kemandirian nasional dalam produksi biomaterial dan alat kesehatan berteknologi tinggi berbasis penelitian.

2. Klasifikasi Biomaterial

Biomaterial dapat diklasifikasikan berdasarkan cara material tersebut berinteraksi dengan jaringan biologis di dalam tubuh, yaitu menjadi bioinert, bioaktif, dan biodegradable. Klasifikasi ini penting karena respons biologis yang ditimbulkan akan sangat menentukan keberhasilan suatu material ketika digunakan sebagai implan medis. Biomaterial bioinert merupakan material yang menunjukkan interaksi minimal dengan jaringan tubuh, sehingga tidak menimbulkan reaksi biologis yang signifikan dan cenderung mempertahankan sifat fisik serta kimianya selama masa pemakaian. Contoh biomaterial bioinert yang banyak digunakan adalah UHMWPE, titanium, dan alumina, yang umum diaplikasikan sebagai komponen bantalan dan struktur implan ortopedi.

Biomaterial bioaktif memiliki kemampuan untuk berinteraksi secara langsung dengan jaringan biologis dan membentuk ikatan kimia atau biologis dengan jaringan

sekitarnya. Material ini dapat merangsang respon biologis positif, seperti pertumbuhan tulang baru pada permukaannya. Contoh biomaterial bioaktif meliputi hidroksiapatit dan bioactive glass yang sering digunakan pada aplikasi rekayasa jaringan tulang. Sementara itu, biomaterial biodegradable dirancang untuk mengalami degradasi secara bertahap di dalam tubuh seiring dengan proses penyembuhan jaringan. Material jenis ini umumnya digunakan untuk aplikasi implan sementara atau scaffold jaringan, sehingga tidak memerlukan prosedur pengangkatan setelah fungsi biologisnya tercapai.

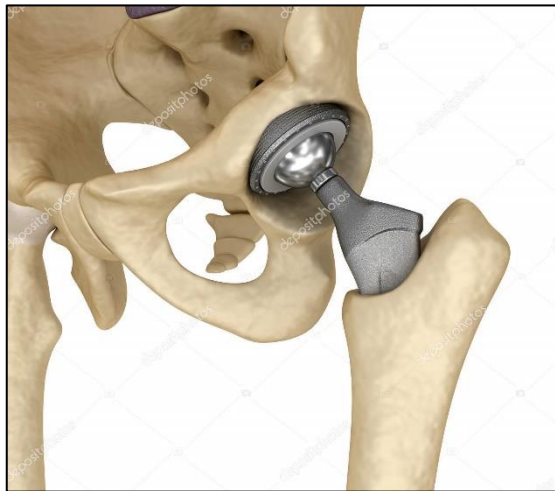
Klasifikasi biomaterial berdasarkan interaksi biologis ini telah banyak dibahas dalam literatur dan menjadi dasar dalam pengembangan material implan modern, khususnya untuk aplikasi ortopedi dan biomedis.

3. Implan Tulang

Saat ini, material yang digunakan untuk implan tulang dan gigi masih didominasi oleh produk impor. Selain membutuhkan devisa yang besar, produk impor ini sering kali tidak sesuai dengan spesifikasi dimensi yang cocok untuk profil tubuh masyarakat Indonesia. Perkembangan teknologi *rapid prototyping* hadir sebagai solusi untuk masalah tersebut. Dalam beberapa tahun terakhir, permintaan akan biomaterial terus meningkat, dipengaruhi oleh bertambahnya jumlah penduduk usia lanjut, tingginya angka kecelakaan, dan berbagai penyakit yang membutuhkan penanganan khusus. Sebagai ilustrasi, nilai pasar biomaterial global pada tahun 2008 tercatat sebesar US\$ 212,8 juta, dan diproyeksikan bahwa penggunaan implan pengganti tulang pangkal paha akan mencapai 272.000 unit pada tahun 2030 [4].

Orthopedi merupakan cabang ilmu medis yang berfokus pada masalah kesehatan dan gangguan pada tulang rangka manusia. Dalam penanganan kasus akut atau gangguan pada anggota tubuh, biasanya digunakan implan. Salah satu contohnya adalah arthritis, yaitu kerusakan pada permukaan tulang yang saling bergesekan, menyebabkan rasa sakit akibat kurangnya pelumas. Penyakit ini sering dialami oleh orang lanjut usia atau penderita obesitas. Gangguan pada anggota tubuh juga dapat terjadi akibat kecelakaan atau olahraga ekstrim. Implan dirancang untuk menggantikan fungsi anggota tubuh yang rusak. Keberadaan implan semakin penting, terutama untuk penggantian anggota tubuh bagian bawah, seperti sendi panggul, lutut, dan tumit.

Dalam prosedur pembedahan untuk mengganti total sendi pinggul, bagian sendi yang mengalami kerusakan akan diganti dengan sendi buatan. Sendi buatan ini terdiri dari tiga komponen utama, yaitu mangkuk (*acetabular*), bola, dan batang (*stem*). Bagian luar mangkuk dibuat dari logam, sedangkan bagian dalamnya menggunakan material plastik. Ketika bola dipasang pada mangkuk, pergerakan sendi menjadi lebih halus dengan gesekan yang minim. Proses penggantian sendi pinggul ini bertujuan untuk menggantikan tulang rawan yang telah mengalami kerusakan. Pada prosedur ini, diperlukan implan yang dirancang sedemikian rupa sehingga logam dan plastik dapat saling bergesekan secara halus dengan risiko kerusakan yang sangat rendah.



Gambar 1. Implan Tulang

4. UHMWPE

Material utama yang digunakan dalam komponen sendi pinggul buatan meliputi *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE), keramik, paduan titanium, dan paduan kobalt-krom. Beberapa logam paduan yang sering digunakan antara lain paduan kobalt-krom-molibdenum (CoCrMb) dan paduan aluminium-vanadium-titanium (TiAlV). UHMWPE telah lama digunakan sebagai biomaterial dalam aplikasi klinis, seperti sendi pinggul, lutut, dan sejak 1980-an, pada implan tulang belakang. Secara historis, komponen penggantian sendi dibuat dari resin "GUR", yang diproduksi oleh Ticona. Resin ini kemudian diproses menjadi semi-bentuk oleh perusahaan seperti Quadrant dan Orthoplastics, sebelum dikerjakan menjadi komponen implan yang siap disterilisasi oleh produsen perangkat medis [1].

Penggunaan UHMWPE dalam bidang klinis pertama kali diperkenalkan oleh Sir John Charnley pada tahun 1962 sebagai bahan untuk penggantian sendi pinggul. Pada tahun

1970-an, material ini menjadi pilihan utama untuk digunakan sebagai bantalan pada prosedur penggantian total sendi pinggul dan lutut. Selama beberapa dekade berikutnya, berbagai upaya dilakukan untuk meningkatkan performa klinis UHMWPE, meskipun banyak yang tidak berhasil. Namun, inovasi yang signifikan dalam pengembangan UHMWPE baru mulai terlihat pada akhir tahun 1990-an [1].

5. Nano Zirkonia (ZrO_2)

Nano-zirkonia (ZrO_2) merupakan material keramik unggul dengan kombinasi sifat mekanik dan biologis yang membuatnya ideal sebagai komponen tambahan untuk implan sendi panggul. Sifatnya yang mencakup kekerasan tinggi, ketahanan aus, stabilitas termal, dan biokompatibilitas menjadikannya solusi inovatif untuk meningkatkan performa material implan. Ketika digunakan sebagai doping pada Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) atau paduan logam seperti titanium (Ti) dan cobalt chromium (CoCr), nano-zirkonia mampu meningkatkan ketahanan aus, kekuatan mekanik, dan stabilitas korosi. Partikel nano-zirkonia, dengan ukuran yang sangat kecil (1–100 nm), memastikan distribusi yang seragam dalam matriks material, menghasilkan peningkatan signifikan dalam ketangguhan dan stabilitas dimensi selama penggunaan jangka panjang [2].

Keunggulan lainnya adalah biokompatibilitas tinggi dari nano-zirkonia, yang membuatnya aman untuk kontak langsung dengan jaringan biologis tanpa memicu reaksi peradangan atau toksisitas. Penambahan nano-zirkonia pada UHMWPE, misalnya, secara signifikan mengurangi pelepasan partikel mikro akibat gesekan antara komponen implan. Pelepasan partikel mikro ini merupakan salah satu penyebab utama osteolisis (penghancuran tulang di sekitar implan) yang dapat memicu kegagalan implan. Pada paduan logam seperti titanium dan CoCr, nano-zirkonia juga berfungsi sebagai lapisan pelindung yang meningkatkan ketahanan korosi dan mempertahankan permukaan halus untuk mengurangi gesekan.

Namun, meskipun menunjukkan potensi besar, penerapan nano-zirkonia pada implan medis menghadapi beberapa tantangan. Salah satunya adalah biaya produksi yang relatif tinggi. Proses pembuatan partikel nano memerlukan teknologi mutakhir dengan kontrol presisi yang rumit, terutama untuk memastikan partikel tidak menggumpal (agglomerate) dan tetap seragam. Metode produksi seperti sol-gel atau sintering membutuhkan bahan baku berkualitas tinggi dan peralatan khusus. Selain itu, integrasi nano-zirkonia ke dalam matriks material atau pelapisan pada logam memerlukan teknologi

manufaktur lanjutan seperti hot isostatic pressing (HIP), yang juga meningkatkan biaya keseluruhan.

Tantangan lain adalah kestabilan fasa nano-zirkonia selama proses manufaktur dan penggunaan jangka panjang. Pada suhu tinggi atau dalam kondisi tertentu, nano-zirkonia dapat mengalami transformasi fasa yang memengaruhi sifat mekaniknya. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian proses yang ketat untuk memastikan material tetap stabil dan mempertahankan performanya.

Meski demikian, dengan perkembangan teknologi dan peningkatan efisiensi dalam proses manufaktur, potensi penggunaan nano-zirkonia dalam aplikasi implan sendi panggul sangat besar. Material ini tidak hanya memperpanjang masa pakai implan, tetapi juga meningkatkan kenyamanan dan kualitas hidup pasien dengan mengurangi risiko kegagalan implan. Nano-zirkonia menjadi solusi yang menjanjikan untuk memenuhi tuntutan akan implan ortopedi yang lebih kuat, aman, dan andal.

6. Graphene Nanoplatelet (GNP)

Graphene Nanoplatelet (GNP) merupakan salah satu material berbasis karbon yang dikenal memiliki karakteristik unggul, terutama dalam hal kekuatan mekanik yang sangat tinggi, kemampuan menghantarkan panas secara efisien, serta stabilitas kimia yang sangat baik. Kombinasi sifat-sifat tersebut membuat GNP banyak dimanfaatkan dalam beragam aplikasi berteknologi maju. Dalam konteks biomaterial, GNP sering digunakan untuk meningkatkan performa mekanik suatu material dan memperbaiki ketahanannya terhadap keausan. Selain itu, GNP juga memiliki kemampuan antimikroba yang secara alami dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme. Sifat ini menjadikan GNP sangat potensial untuk digunakan pada berbagai jenis implan medis karena dapat membantu menurunkan risiko terjadinya infeksi pascaoperasi [5].

Graphene Nanoplatelet (GNP) memiliki karakteristik struktur berlapis dua dimensi dengan ketebalan berskala nanometer, sehingga menghasilkan rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat besar. Konfigurasi struktural seperti ini memungkinkan GNP untuk terdispersi dengan lebih merata di dalam matriks polimer, karena tiap lapisan memberi area kontak yang luas dengan material penyusunnya. Distribusi yang homogen tersebut berkontribusi pada peningkatan ketahanan komposit ketika menerima beban mekanis, terutama dalam menahan tekanan atau deformasi. Selain penguatan secara mekanik, keberadaan GNP juga memberikan efek positif terhadap performa termal komposit. Peningkatan kemampuan penghantaran panas ini menjadi aspek penting pada

material implan, mengingat komponen tersebut harus mampu mempertahankan kestabilan sifat material ketika mengalami variasi suhu di dalam tubuh manusia [6].

Dalam studi yang dilakukan oleh Andrijanto dan rekan-rekan (2018), peneliti berhasil mensintesis material grafena dari grafit dengan memanfaatkan larutan asam fosfat (H_3PO_4) sebagai salah satu komponen utama dalam proses oksidasi. Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan teknik X-Ray Diffraction (XRD), terlihat adanya perubahan yang signifikan pada posisi puncak difraksi (2-theta). Sampel grafit murni menunjukkan puncak karakteristik pada sekitar 28° , sedangkan setelah proses oksidasi dan pembentukan grafena, puncaknya mengalami pergeseran ke posisi sekitar 15° . Pergeseran sudut 2-theta ini mengindikasikan bahwa jarak antar-lapisan (interlayer spacing) meningkat, yang merupakan tanda khas bahwa struktur grafit telah mengalami pemisahan lapisan selama proses oksidasi sehingga terbentuk material grafena [7].

7. Planetary Ball Mill

Proses ini merupakan teknik pencampuran sekaligus penghalusan material yang memanfaatkan gerakan bola-bola baja di dalam sebuah wadah silinder yang berputar. Selama operasi berlangsung, bola-bola tersebut bergerak mengikuti putaran tabung sehingga menghasilkan kombinasi gaya tumbukan berenergi tinggi, gesekan intensif, dan tekanan berulang yang bekerja pada material di dalamnya. Mekanisme ini memungkinkan serbuk mengalami pengurangan ukuran secara bertahap sekaligus memperoleh distribusi ukuran yang lebih seragam. Dengan demikian, metode ini sangat efektif untuk mencapai homogenitas campuran awal, terutama ketika diperlukan ukuran partikel yang lebih halus untuk meningkatkan kualitas proses pembentukan berikutnya seperti sintering.

Penerapan planetary ball mill pada material komposit terbukti memberikan peningkatan signifikan terhadap keseragaman penyebaran antara matriks dan partikel penguat. Homogenitas campuran yang lebih baik berdampak langsung pada kualitas struktur internal dan sifat mekanik material hasil pencetakan atau sintering. Sebagai ilustrasi, penelitian yang dilakukan oleh Rahmanullah et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan planetary ball mill dengan kecepatan putar mencapai 600 rpm selama durasi penggilingan dua jam mampu menghasilkan campuran serbuk yang lebih merata pada pembuatan komposit logam matriks Cu-C yang diberi tambahan unsur Titanium (Ti). Kondisi pencampuran tersebut berkontribusi pada penurunan tingkat porositas setelah proses sintering, sehingga kualitas komposit yang dihasilkan menjadi lebih baik [8].

8. Kompaksi

Kompaksi merupakan tahapan penting dalam proses pembuatan material berbasis serbuk, di mana serbuk dimasukkan ke dalam suatu cetakan kemudian diberikan tekanan tertentu agar butiran-butiran tersebut saling mendekat dan mengisi ruang kosong di antara partikel. Pada tahap ini, serbuk yang awalnya longgar dipadatkan menjadi bentuk awal benda kerja dengan tingkat kerapatan tertentu sebelum memasuki proses sintering. Tujuan utama dari proses pemadatan ini adalah meningkatkan luas bidang kontak antar partikel sehingga ikatan mekanis maupun kontak fisik antar butiran menjadi lebih baik. Selain itu, kompaksi juga berfungsi untuk menurunkan jumlah pori atau rongga yang terdapat dalam struktur serbuk, sehingga menghasilkan green body yang lebih stabil. Dua parameter yang sangat berpengaruh dalam langkah ini adalah besarnya tekanan yang diberikan selama pengepresan serta keseragaman distribusi serbuk di dalam cetakan, karena keduanya sangat menentukan kualitas kepadatan awal dan bentuk akhir produk [9].

9. Sintering

Proses sintering merupakan tahapan pemanasan pada material yang sebelumnya telah dipadatkan melalui kompaksi, di mana pemanasan dilakukan hingga mencapai kondisi mendekati titik leleh material tersebut dengan tujuan meningkatkan kerapatan dan memperbaiki karakteristik mekaniknya melalui pengurangan jumlah pori. Berbagai teknik dapat digunakan dalam proses ini, seperti sintering konvensional, spark plasma sintering (SPS), maupun *high frequency induction heated sintering* (HFIHS), yang masing-masing memberikan mekanisme pemanasan berbeda namun tetap berfokus pada peningkatan ikatan antar partikel. Selama berlangsungnya sintering, material mengalami perpindahan atom—atau difusi—yang memungkinkan partikel saling mendekat dan mengisi kekosongan di antara mereka. Menurut penjelasan Sulistyio (2018), pada tahap ini atom-atom bergerak ke daerah berpori untuk menutup ruang kosong akibat difusi, sementara bahan pengikat maupun pembentuk porositas akan menguap, sehingga menyebabkan perubahan ukuran pada benda kerja serta menghasilkan peningkatan kekuatan mekanik akibat struktur material yang menjadi lebih padat [10].

10. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi merupakan metode karakterisasi yang dilakukan untuk mempelajari kondisi struktur mikro pada suatu material, termasuk menilai tingkat keseragaman fasa, ukuran butir, sebaran filler atau partikel penguat, serta mendeteksi adanya cacat internal

seperti porositas maupun delaminasi. Prosedur ini dimulai dengan tahap persiapan sampel yang mencakup proses pemotongan, perataan, pengampelasan, dan pemolesan hingga permukaan spesimen cukup halus untuk diamati. Setelah itu, material dianalisis menggunakan mikroskop optik atau mikroskop elektron, yang memungkinkan pengamatan detail terhadap bagaimana partikel penguat tersebar dalam matriks polimer serta bagaimana struktur mikro terbentuk akibat proses fabrikasi. Melalui rangkaian tahapan tersebut, pengujian metalografi memberikan gambaran komprehensif mengenai kualitas internal material, terutama terkait homogenitas dan konsistensi struktur yang dihasilkan dari proses pembuatan komposit [11].

11. Pengujian Durometer Shore D

Pengujian kekerasan menggunakan durometer bertujuan untuk menentukan tingkat kekerasan dari material polimer yang termasuk dalam kategori keras, seperti UHMWPE, ABS, maupun Nylon. Metode pengukuran ini bekerja dengan cara memberikan gaya tekan melalui sebuah indenter atau jarum penekan, sehingga menghasilkan nilai numerik yang menggambarkan kemampuan material tersebut menahan deformasi akibat tekanan tersebut. Skala yang digunakan adalah durometer Shore D dengan rentang nilai 0 hingga 100; semakin tinggi angka yang terukur, maka semakin besar pula tingkat kekerasan dan ketahanan material terhadap penetrasi maupun perubahan bentuk. Pengujian ini sangat penting untuk mengetahui performa polimer saat menerima pembebanan mekanis dalam aplikasi nyata [12].

12. Pengujian SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan metode karakterisasi yang digunakan untuk mengamati tampilan morfologi permukaan dan detail struktur mikro polimer hingga pada tingkat yang mendekati skala nanometer. Dalam beberapa analisis, SEM sering dikombinasikan dengan Energy Dispersive Spectroscopy (EDS), yaitu teknik yang berfungsi untuk mengidentifikasi komposisi kimia dan distribusi elemen yang terkandung pada material. Melalui kedua metode ini, penelitian dapat mengevaluasi bagaimana struktur mikro terbentuk, seberapa baik filler menyatu atau tersebar di dalam matriks, serta elemen kimia apa saja yang ada pada setiap titik pengamatan. Hasil pengujian berupa gambar beresolusi tinggi dan spektrum unsur memberikan informasi komprehensif

mengenai distribusi material penguat serta kualitas ikatan antara matriks dan penguat dalam komposit polimer [13].

13. Pengujian Pin On Disk

Pengujian *pin-on-disk* merupakan metode karakterisasi tribologi yang digunakan untuk menilai sejauh mana suatu material mampu menahan keausan serta mengukur besarnya gaya gesek yang timbul ketika permukaan material tersebut bersentuhan dan bergerak relatif terhadap material lain. Prosedur ini bertujuan untuk memperoleh gambaran kuantitatif mengenai tingkat ketahanan aus dan respons friksi dari polimer saat dikenai beban geser dalam kondisi terkontrol. Selama pengujian, nilai koefisien gesek dicatat sebagai indikator utama; nilai koefisien gesek yang lebih rendah biasanya menunjukkan bahwa material memiliki perilaku gesek yang lebih stabil dan tahan terhadap deformasi akibat geseran. Selain itu, pengujian ini juga menghasilkan data terkait laju keausan, di mana angka keausan yang tinggi menandakan bahwa material tersebut kurang mampu mempertahankan integritas permukaannya dan berpotensi mengalami degradasi lebih cepat ketika digunakan dalam aplikasi jangka panjang [14].

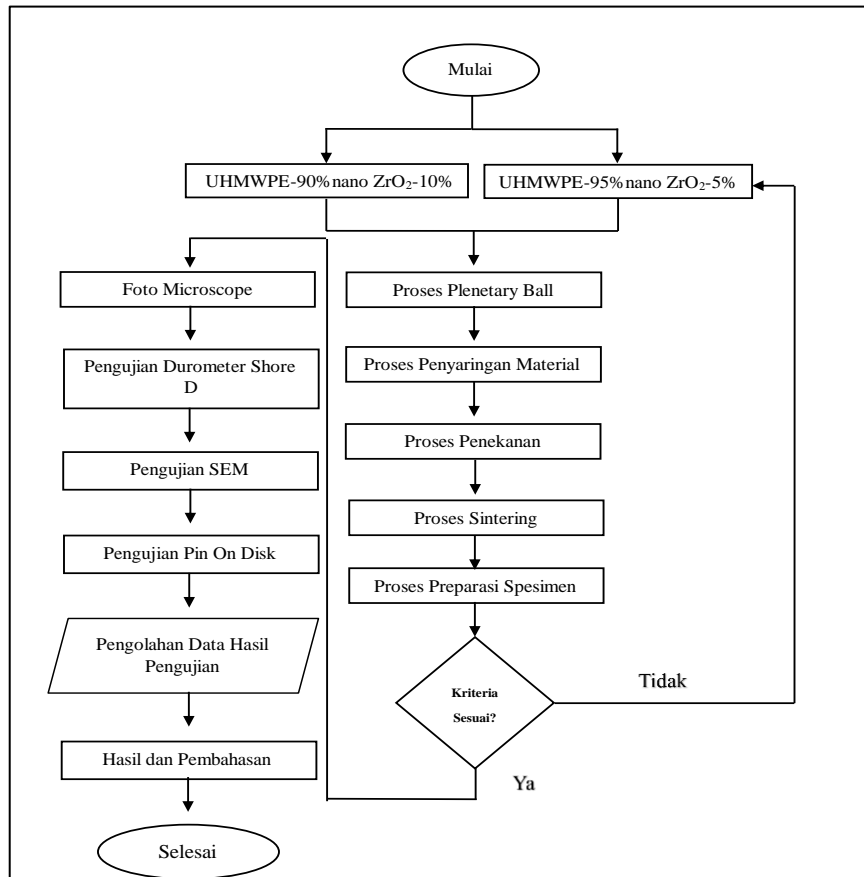
14. Penelitian Terdahulu Terkait UHMWPE-ZrO₂ untuk Aplikasi Implan

Salah satu penelitian yang relevan dengan pengembangan material UHMWPE untuk aplikasi implan ortopedi dilakukan oleh Xiong dan Yuan (2007) yang mengkaji sifat biotribologi UHMWPE setelah diperkuat dengan partikel nano zirconia (ZrO₂). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan nano-ZrO₂ pada matriks UHMWPE mampu meningkatkan kekerasan permukaan serta ketahanan aus secara signifikan dibandingkan UHMWPE murni. Peningkatan ini terjadi karena partikel nano zirconia berperan sebagai penguat yang memperbaiki kemampuan material dalam menahan beban kontak dan mengurangi deformasi plastis selama proses gesekan. Hasil penelitian tersebut menjadi dasar bahwa modifikasi UHMWPE dengan nano-ZrO₂ merupakan pendekatan yang potensial untuk meningkatkan performa bantalan pada implan sendi seperti Total Hip Prosthesis, terutama dalam memperpanjang umur pakai material dan menurunkan risiko kegagalan akibat keausan [15].

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Berikut ini merupakan tahapan penelitian yang dilakukan.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Adapun penjelasan mengenai diagram alir diatas sebagai berikut:

a. *Material balance*

Langkah awal dari keseluruhan rangkaian penelitian ini dimulai dengan melakukan penimbangan dan penyesuaian komposisi material yang akan digunakan. Pada tahap ini, serbuk UHMWPE dan nano-zirconia dipersiapkan sesuai proporsi yang telah ditentukan sebelumnya. Komposisi tersebut dibagi menjadi dua variasi, yakni campuran UHMWPE sebesar 90% dengan ZrO_2 sebesar 10%, serta campuran kedua berupa UHMWPE 95% dengan ZrO_2 5%. Tujuan langkah ini adalah memastikan material dasar memiliki perbandingan massa yang tepat sebelum masuk ke tahap proses berikutnya.

b. Proses *planetary ball mill*

Setelah komposisi material ditentukan, campuran tersebut kemudian diproses menggunakan *planetary ball mill*. Dalam tahap ini, campuran bahan dimasukkan ke dalam wadah milling bersama bola-bola *stainless steel* sebagai media penghancur. Proses milling bertujuan untuk memperhalus ukuran partikel sekaligus meningkatkan homogenitas campuran sehingga distribusi nano zirconia di dalam matriks UHMWPE menjadi lebih merata.

c. Proses penyaringan material

Tahap berikutnya adalah proses penyaringan, yang berfungsi memisahkan serbuk hasil milling berdasarkan ukuran partikelnya. Penyaringan ini dilakukan untuk mendapatkan serbuk dengan tingkat kehalusan yang konsisten sehingga hanya partikel-partikel yang berukuran halus yang digunakan untuk proses kompaksi. Langkah ini penting untuk meningkatkan keseragaman dan kualitas hasil akhir spesimen.

d. Proses penekanan (kompaksi)

Serbuk halus yang telah disaring kemudian dikompaksi menggunakan mesin hidrolik. Tekanan tinggi diterapkan pada serbuk yang berada di dalam cetakan untuk membentuk spesimen padat dengan bentuk yang seragam. Proses ini bertujuan meningkatkan kerapatan awal material sebelum melalui tahap sintering.

e. Proses sintering

Setelah terbentuk melalui proses kompaksi, spesimen selanjutnya dipanaskan pada proses sintering. Tahap ini dilakukan untuk mengubah serbuk terkompaksi menjadi material padat dengan ikatan antar partikel yang lebih kuat. Pemanasan menyebabkan terjadinya difusi antar partikel sehingga densitas meningkat dan pori-pori material berkurang.

f. Pengujian metalografi

Pengujian metalografi dilakukan untuk mempelajari struktur mikro dari komposit yang telah disinter. Melalui teknik ini dapat diamati karakteristik butiran, homogenitas distribusi zirconia, serta adanya cacat mikro seperti porositas atau retakan.

g. Pengujian kekerasan durometer shore D

Untuk mengetahui sifat mekanik material, dilakukan pengujian kekerasan menggunakan durometer shore D. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi resistansi permukaan spesimen terhadap gaya indentasi sehingga dapat diketahui seberapa keras material komposit yang dihasilkan.

h. Pengujian SEM–EDS

Tahap berikutnya adalah analisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang memberikan citra permukaan dengan resolusi tinggi. Teknik ini dikombinasikan dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS) untuk mengetahui komposisi unsur penyusun material. Pengujian ini dilakukan agar sebaran nano zirconia dalam matriks UHMWPE dapat diamati secara detail.

i. Pengujian *pin on disk*

Pengujian tribologi *pin-on-disk* dilakukan untuk mengukur ketahanan aus dan koefisien gesek material. Dengan pengujian ini dapat diketahui seberapa besar tingkat keausan yang terjadi ketika spesimen mengalami kontak geser dengan permukaan lain, sehingga performa komposit sebagai material aplikasi mekanis dapat dievaluasi.

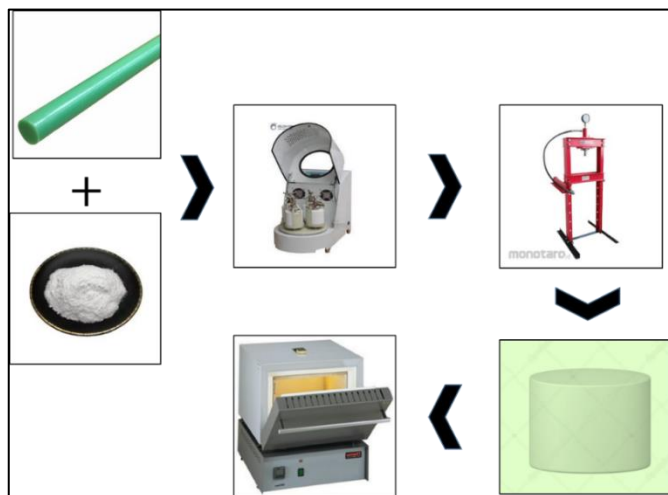
j. Pengolahan data hasil pengujian

Tahap terakhir adalah melakukan analisis dan pengolahan seluruh data dari berbagai pengujian yang telah dilakukan. Data kemudian disusun secara sistematis dan dijadikan dasar dalam penyusunan laporan penelitian.

2. Tahapan eksperimen

Tahapan penelitian ini dibuat untuk memperjelas penelitian yang akan dilakukan. Tahapan penelitian ini dibagi menjadi 2 (dua) bagian yaitu set-up penelitian dan desain eksperimen.

a. Set-up eksperimen



Gambar 3. Set-up penelitian

b. *Design of Experimen* (DoE)

Pada *DoE* akan dilakukan eksperimen dengan memvariasikan 4 variabel yaitu komposisi, tekanan, temperatur dan waktu. Dimana masing-masing variabel memiliki 2 level konfigurasi. Berikut ini adalah tabel *DoE*.

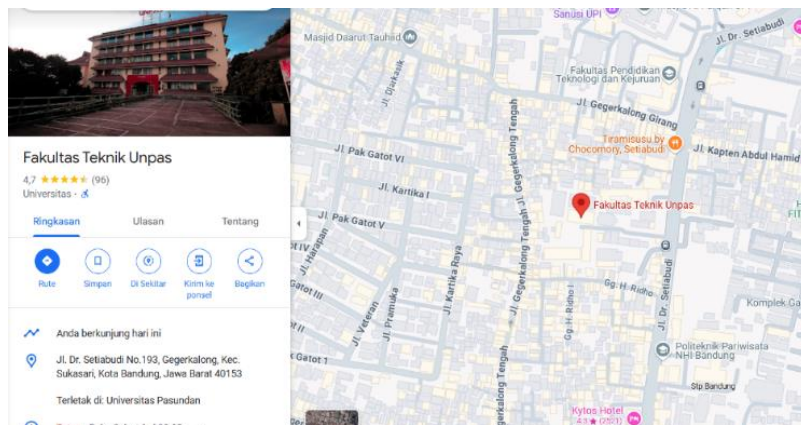
Tabel 2. Desain eksperimen komposisi UHMWPE-ZrO₂-GNP

No	Konfigurasi	Temperature	Time
1	9:1-6 Ton	266	5
2		266	10
3		271	5
4		271	10
5	9:1-10 Ton	266	5
6		266	10
7		271	5
8		271	10
9	9,5:0,5-6 Ton	266	5
10		266	10
11		271	5
12		271	10
13	9,5:0,5-10 Ton	266	5
14		266	10
15		271	5
16		271	10

3. Tempat penelitian

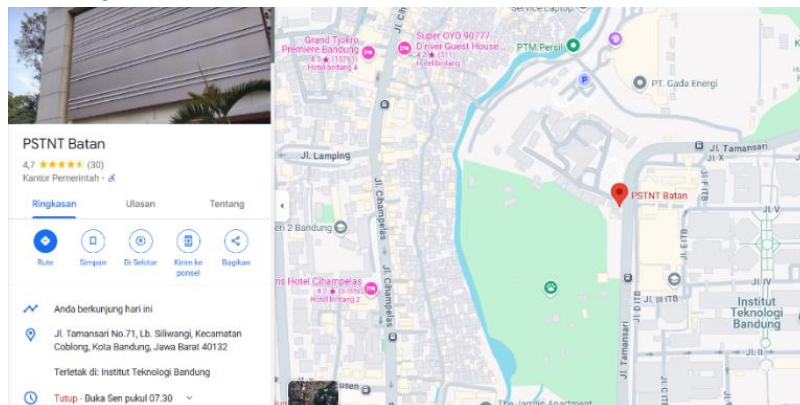
Penelitian ini dilakukan di 2 (dua) tempat, yaitu:

- a. Fakultas Teknik Universitas Pasundan Jalan Dr. Setiabudi No, 193, Gegerkalong, Kec. Sukasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40153.



Gambar 4. Lokasi FT Universitas Pasundan

- b. PSTNT Batan Bandung Jalan Tamansari No, 71, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132.



Gambar 5. Lokasi PSTNT Batan Bandung

4. Peralatan dan bahan yang digunakan

Dalam penelitian ini, dibutuhkan peralatan dan bahan sebagai berikut:

Tabel 3. Peralatan yang digunakan

NO	Peralatan	Jumlah
1	Ball Mills Stainless Steels	200 buah
2	Planetary Ball Mills Machine	1 buah
3	Timbangan	1 buah
4	Saringan	1 buah
5	Furnace	1 buah
6	Mortir stamper	1 set
7	Thermogun	1 buah

Tabel 4. Bahan yang digunakan

NO	Bahan	Jumlah
1	UHMWPE	1 Batang (60 cm)

2	Nano Zirkonia (ZrO_2)	25 gram
---	---------------------------	---------

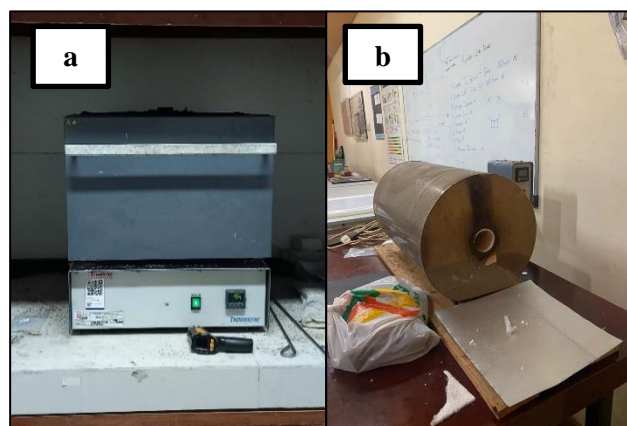
5. Metode pengujian yang dilakukan

Berikut pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini:

a. Proses sintering

Sintering merupakan suatu tahapan pemrosesan material berbasis serbuk yang bertujuan untuk mengubah kumpulan partikel halus menjadi suatu padatan yang lebih kompak melalui proses pemanasan pada temperatur yang berada di bawah titik lelehnya. Pada kondisi ini, panas yang diberikan memicu terbentuknya ikatan antar partikel dan mendorong terjadinya mekanisme penyusutan serta penurunan luas permukaan total. Ketika material serbuk yang telah dibentuk sebelumnya mengalami pemanasan bertahap, atom-atom atau partikel penyusunnya mulai bergerak dan melakukan difusi menuju area-area kosong di sekitarnya. Pergerakan ini menyebabkan partikel tersebut saling menempel, sehingga terjadilah proses pemadatan bertahap yang menghasilkan struktur padat dengan kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan bentuk awalnya.

Proses sintering dilakukan menggunakan tungku *muffle furnace* dan tungku *ceramic engineering furnace manufactures* merk Rodatherm tipe VTF6060, dipanaskan pada temperatur $266^\circ C$ dan $271^\circ C$ dalam waktu 5 menit dan 10 menit dengan *holding time* 5 menit.



Gambar 6. a) Muffle furnace b). Ceramic engineering furnace manufactures

b. Pengujian metalografi

Pengujian metalografi merupakan salah satu teknik karakterisasi material yang digunakan untuk menelaah susunan mikro dari suatu spesimen serta mengidentifikasi adanya cacat seperti pori-pori pada permukaan. Pemeriksaan ini dilakukan pada area permukaan spesimen dengan bantuan mikroskop optik tipe Meiji MT8530, yang dalam pengamatan ini dioperasikan pada tingkat pembesaran 10 kali. Metode tersebut memungkinkan peneliti melihat detail struktur mikro secara lebih jelas sehingga dapat menilai homogenitas, distribusi partikel, serta indikasi ketidakteraturan pada material.



Gambar 7. Mikroskop optik
Meiji MT8530

c. Pengujian *hardness durometer shore D*

Pengujian kekerasan *Shore D* merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan untuk mengevaluasi tingkat kekerasan pada material jenis elastomer kaku maupun plastik berstruktur keras. Pada metode ini digunakan sebuah alat ukur bernama *durometer Shore D*, yang bekerja dengan cara menekan sebuah indenter atau jarum uji ke permukaan material untuk mengetahui seberapa besar ketahanan material terhadap terjadinya lekukan akibat gaya tekan tersebut. Selama pengujian, jarum penekan diberikan beban tertentu dan diaplikasikan tegak lurus pada permukaan yang rata agar pengukuran berlangsung konsisten. Nilai yang dihasilkan berada dalam skala 0 hingga 100, di mana angka yang rendah menunjukkan bahwa material bersifat lebih lentur atau mudah terdeformasi, sedangkan nilai mendekati 100 mengindikasikan bahwa material tersebut memiliki kekerasan tinggi dan lebih resisten terhadap deformasi akibat tekanan.

d. Pengujian SEM-EDS



Gambar 8. Durometer shore D

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik karakterisasi yang memanfaatkan pemindaian berkas elektron berenergi tinggi pada permukaan material sehingga terjadi interaksi antara elektron tersebut dengan struktur permukaan spesimen, dan interaksi ini menghasilkan berbagai sinyal seperti elektron sekunder maupun sinar-X. Citra yang diperoleh dari proses pemindaian tersebut memberikan informasi detail mengenai topografi serta morfologi permukaan karena berkas elektron yang dipantulkan menyajikan gambaran permukaan dengan resolusi yang sangat tinggi. Pada saat yang sama, teknik *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) digunakan secara bersamaan dengan SEM untuk mengidentifikasi komposisi unsur yang terdapat di dalam material melalui deteksi sinar-X karakteristik yang dipancarkan spesimen.

Sebelum pengujian dimulai, permukaan sampel terlebih dahulu diberi lapisan pelindung (*coating*) untuk meningkatkan konduktivitas listrik, sehingga sinyal sinar-X yang dihasilkan menjadi lebih optimal dan tidak menimbulkan distorsi. Pemeriksaan SEM-EDS dalam penelitian ini dilakukan pada dua tingkat pembesaran, yaitu 1000x untuk mengamati detail pori-pori atau cacat mikro pada permukaan, serta pembesaran 9x untuk memperoleh gambaran umum permukaan spesimen secara keseluruhan.

e. Pengujian *pin on disk*

Pengujian *pin on disk* merupakan metode yang digunakan untuk menilai perilaku gesek dan tingkat keausan suatu material. Pada teknik ini, spesimen berbentuk pin ditekan ke permukaan disk yang berputar, di mana disk biasanya terbuat dari material pembanding. Selama pengujian berlangsung, mesin menghasilkan gesekan terkontrol antara kedua permukaan tersebut sehingga memungkinkan evaluasi terhadap respons material terhadap kondisi kontak geser.

Selama prosedur pengujian, pin ditempatkan pada ujung lengan beban sehingga menyentuh disk, kemudian diberi tekanan melalui beban tertentu. Setelah motor dijalankan, disk berputar dan menciptakan gesekan terus-menerus antara kedua permukaan. Setelah waktu pengujian tercapai, pin diangkat dan ditimbang kembali untuk menghitung kehilangan massa sebagai indikator tingkat keausan yang terjadi akibat proses gesekan tersebut.

Pada penelitian ini, metode pengujian mengikuti standar ASTM F732, dengan pembebanan sebesar 2,5 kg dan durasi pengujian selama 30 menit. Kondisi ini digunakan untuk memastikan hasil pengujian keausan dapat dibandingkan secara konsisten sesuai standar pengujian material gesek.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil pengukuran/pengujian dan pembahasan

Hasil dari pelaksanaan penelitian ini mencakup data kuantitatif dan visual, seperti grafik, angka, serta gambar yang diperoleh melalui proses pengujian.

A. Hasil pengujian proses sintering

Pada tahap proses sintering, material dipanaskan menggunakan tungku *ceramic furnace manufactures*. Setelah sintering selesai, bentuk visual material diamati untuk melihat perubahan yang terjadi akibat proses tersebut.



Gambar 9. Spesimen hasil sintering


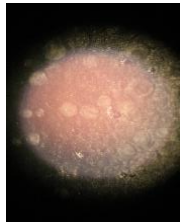

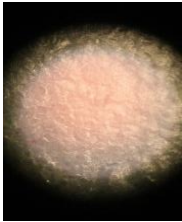

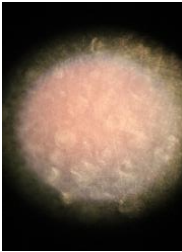

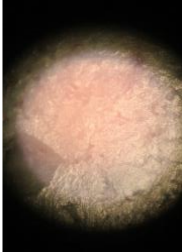

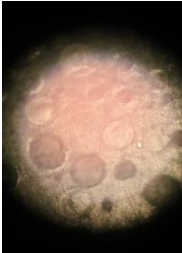
Berdasarkan hasil sintering, dapat disimpulkan bahwa temperatur pemanasan memengaruhi hasil bentuk dan nilai kekerasan spesimen. Rata-rata spesimen yang dipanaskan pada temperatur 266°C dan 271°C menunjukkan bentuk silinder yang sempurna serta nilai kekerasan yang relatif tinggi. Namun, beberapa spesimen terjadi perubahan bentuk, perbedaan bentuk tersebut muncul karena selama proses sintering posisi spesimen mengalami sedikit kemiringan. Selain itu, variasi waktu pemanasan tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kedua karakteristik tersebut.


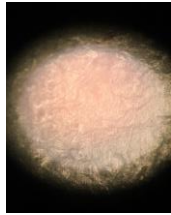

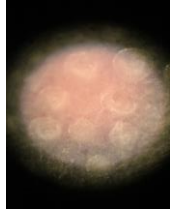

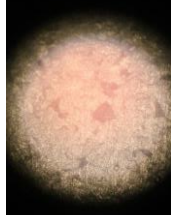



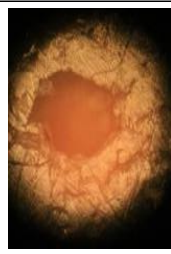


B. Hasil pengujian metalografi


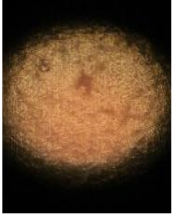

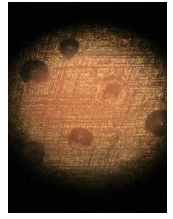



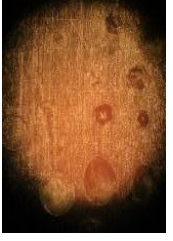


Metalografi pada penelitian ini dilakukan di Laboratorium PSTNT Batan Bandung menggunakan mikroskop optik tipe Meiji MT8530. Pemeriksaan ini bertujuan untuk

menilai struktur mikro serta mendeteksi pori-pori pada permukaan spesimen. Sebelum proses observasi dengan perbesaran 10x, spesimen terlebih dahulu disiapkan melalui penggerindaan dan pengamplasan bertahap dengan kertas amplas grit 600 sampai 2000 hingga diperoleh permukaan yang halus. Hasil dari pengujian tersebut tercantum pada tabel berikut.


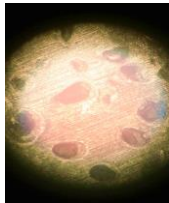



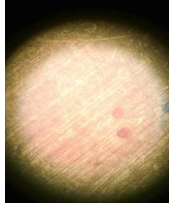

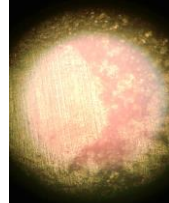

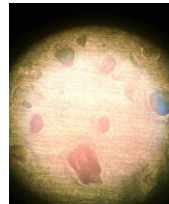

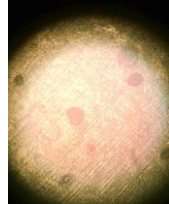

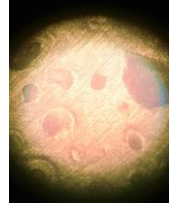
Tabel 5. Hasil pengujian metalografi komposisi UHMWPE- ZrO₂


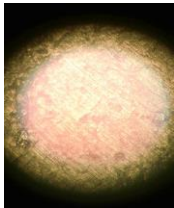



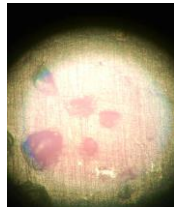

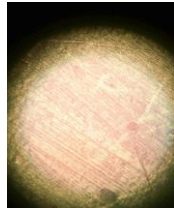

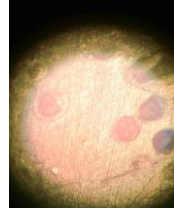

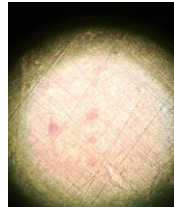

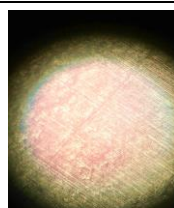
No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
1	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	266°C	6 ton	5 menit		
2	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	266°C	10 ton	5 menit		
3	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	266°C	6 ton	5 menit		
4	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	266°C	10 ton	5 menit		
5	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	271°C	6 ton	5 menit		


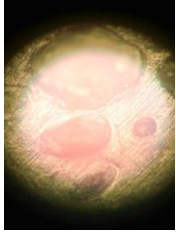

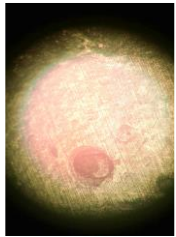
No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
6	UHMWPE 90% + ZrO2 10%	271°C	10 ton	5 menit		
7	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	271°C	6 ton	5 menit		
8	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	271°C	10 ton	5 menit		
9	UHMWPE 90% + ZrO2 10%	266°C	6 ton	10 menit		
10	UHMWPE 90% + ZrO2 10%	266°C	10 ton	10 menit		
11	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	266°C	6 ton	10 menit		

No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
12	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	266°C	10 ton	10 menit		
13	UHMWPE 90% + ZrO2 10%	271°C	6 ton	10 menit		
14	UHMWPE 90% + ZrO2 10%	271°C	10 ton	10 menit		
15	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	271°C	6 ton	10 menit		
16	UHMWPE 95% + ZrO2 5%	271°C	10 ton	10 menit		

Tabel 6. Hasil pengujian metalografi komposisi UHMWPE- GNP

No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
1	UHMWPE 90% + GNP 10%	266°C	6 ton	5 menit		
2	UHMWPE 90% + GNP 10%	266°C	10 ton	5 menit		
3	UHMWPE 95% + GNP 5%	266°C	6 ton	5 menit		
4	UHMWPE 95% + GNP 5%	266°C	10 ton	5 menit		
5	UHMWPE 90% + GNP 10%	271°C	6 ton	5 menit		
6	UHMWPE 90% + GNP 10%	271°C	10 ton	5 menit		
7	UHMWPE 95% + GNP 5%	271°C	6 ton	5 menit		

No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
8	UHMWPE 95% + GNP 5%	271°C	10 ton	5 menit		
9	UHMWPE 90% + GNP 10%	266°C	6 ton	10 menit		
10	UHMWPE 90% + GNP 10%	266°C	10 ton	10 menit		
11	UHMWPE 95% + GNP 5%	266°C	6 ton	10 menit		
12	UHMWPE 95% + GNP 5%	266°C	10 ton	10 menit		
13	UHMWPE 90% + GNP 10%	271°C	6 ton	10 menit		
14	UHMWPE 90% + GNP 10%	271°C	10 ton	10 menit		

No	Komposisi	Temperatur	Beban	Waktu Pemanasan	Gambar	Hasil Mikroskop
15	UHMWPE 95% + GNP 5%	271°C	6 ton	10 menit		
16	UHMWPE 95% + GNP 5%	271°C	10 ton	10 menit		

Hasil pengamatan metalografi pada spesimen dengan paduan nano zirconia menunjukkan bahwa permukaannya memiliki distribusi material yang lebih merata dibandingkan spesimen paduan GNP. Penyebaran fase nano zirconia terlihat lebih homogen dan tidak memperlihatkan aglomerasi signifikan, sehingga permukaan tampak lebih seragam secara mikro. Kondisi ini mengindikasikan bahwa nano zirconia mampu berikatan lebih stabil dengan matriks material selama proses sintering. Perbedaan ini menunjukkan bahwa nano zirconia memberikan efek penyebaran yang lebih baik dan mampu meningkatkan keseragaman struktur mikro pada spesimen.

C. Hasil pengukuran spesimen

Pengujian metalografi dilaksanakan di Laboratorium Fakultas Teknik Mesin Bandung dengan menggunakan alat ukur berupa jangka sorong. Pengukuran ini dilakukan untuk memperoleh data dimensi spesimen, yang mencakup tinggi, diameter, serta perhitungan volumenya. Data hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam analisis karakteristik spesimen pada penelitian ini.

Tabel 7. Hasil pengukuran komposisi UHMWPE- ZrO₂

No	Temperatur	Komposisi	Waktu	Beban (P)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Volume (mm ³)	Volume (cm ³)
1	266°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	5 menit	6 ton	13,55	10,85	1563,788	1,56
2	266°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	5 menit	10 ton	14	9,95	1530,907	1,53
3	266°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	5 menit	6 ton	13,45	11,35	1611,796	1,61
4	266°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	5 menit	10 ton	13,85	8,55	1287,465	1,29
5	271°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	5 menit	6 ton	13	11,75	1558,814	1,56
6	271°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	5 menit	10 ton	13,45	12	1704,102	1,70
7	271°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	5 menit	6 ton	13,75	9,85	1461,879	1,46
8	271°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	5 menit	10 ton	13,25	11,65	1605,563	1,61
9	266°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	10 menit	6 ton	16,55	8,85	1902,869	1,90
10	266°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	10 menit	10 ton	15,55	9,75	1850,696	1,85
11	266°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	10 menit	6 ton	18,15	8	2068,773	2,07
12	266°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	10 menit	10 ton	17,45	7,25	1733	1,73
13	271°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	10 menit	6 ton	15,55	8,75	1660,881	1,66
14	271°C	UHMWP E 90% + ZrO ₂ 10%	10 menit	10 ton	14,65	9,45	1592,123	1,59
15	271°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	10 menit	6 ton	15,55	9,75	1850,696	1,85
16	271°C	UHMWP E 95% + ZrO ₂ 5%	10 menit	10 ton	17	8,45	1917,009	1,92

Tabel 8. Hasil pengukuran komposisi UHMWPE- GNP

No	Temperatur	Komposisi	Waktu	Beban (P)	Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Volume (mm ³)	Volume (cm ³)
1	266°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	5 menit	6 ton	10,85	9,95	919,501	0,92
2	266°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	5 menit	10 ton	15,95	8,25	1647,574	1,65
3	266°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	5 menit	6 ton	13,85	11,05	1663,916	1,66
4	266°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	5 menit	10 ton	15,15	12,65	2279,216	2,28
5	271°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	5 menit	6 ton	14,75	10,55	1801,798	1,80
6	271°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	5 menit	10 ton	14,65	9,45	1592,123	1,59
7	271°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	5 menit	6 ton	14,55	9,4	1562,153	1,56
8	271°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	5 menit	10 ton	13,95	13,85	2115,767	2,12
9	266°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 menit	6 ton	14,75	9,55	1631,012	1,63
10	266°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 menit	10 ton	14,45	10,15	1663,686	1,66
11	266°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 menit	6 ton	13,85	10,95	1648,858	1,65
12	266°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 menit	10 ton	14,55	11,85	1969,31	1,97
13	271°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 menit	6 ton	14,65	9,25	1558,428	1,56
14	271°C	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 menit	10 ton	14,55	10,95	1819,742	1,82
15	271°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 menit	6 ton	14,4	9,55	1554,526	1,55
16	271°C	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 menit	10 ton	15,15	14,15	2549,479	2,55

D. Hasil pengujian hardness *durometer shore D*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan *Durometer Shore D* yang tersedia di Laboratorium PSTNT BATAN Bandung. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi bagaimana penambahan komposit penguat, variasi temperatur sintering, serta besarnya beban kompaksi memengaruhi sifat kekerasan material komposit. Setiap spesimen diuji pada lima titik berbeda di permukaan untuk memperoleh nilai kekerasan yang lebih representatif.

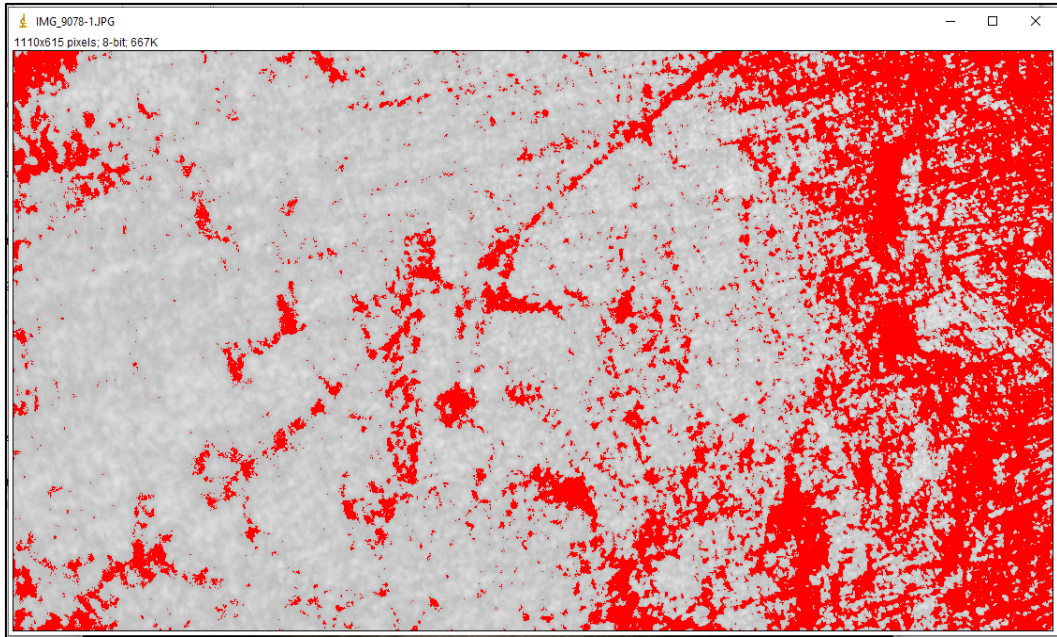
Tabel 9. Hasil pengujian kekerasan komposisi UHMWPE-ZrO₂

No	Komposisi	Beban	Temperatur	Waktu	Kekerasan					Rata-rata Nilai Kekerasan
					1	2	3	4	5	
1	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	6 ton	266°C	5 menit	33	34	35	34	34	34
2	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	10 ton	266°C	5 menit	36	37	36	37	37	36,6
3	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	6 ton	266°C	5 menit	30	31	32	31	31	31
4	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	10 ton	266°C	5 menit	33	34	34	34	34	33,8
5	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	6 ton	271°C	5 menit	36	37	37	36	38	36,8
6	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	10 ton	271°C	5 menit	38	39	38	38	38	38,2
7	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	6 ton	271°C	5 menit	32	33	33	34	33	33
8	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	10 ton	271°C	5 menit	34	35	35	36	35	35
9	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	6 ton	266°C	10 menit	37	38	37	38	37	37,4
10	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	10 ton	266°C	10 menit	39	39	40	38	39	39
11	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	6 ton	266°C	10 menit	34	35	34	34	34	34,2
12	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	10 ton	266°C	10 menit	36	36	37	35	36	36
13	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	6 ton	271°C	10 menit	39	40	39	39	39	39,2
14	UHMWPE 90% + ZrO ₂ 10%	10 ton	271°C	10 menit	41	41	42	41	40	41

No	Komposisi	Beban	Temperatur	Waktu	Kekerasan					Rata-rata Nilai Kekerasan
					1	2	3	4	5	
15	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	6 ton	271°C	10 menit	36	37	36	37	37	36,6
16	UHMWPE 95% + ZrO ₂ 5%	10 ton	271°C	10 menit	38	38	39	38	37	38

Hasil pengujian kekerasan Shore D menunjukkan bahwa peningkatan fraksi nano ZrO₂, beban kompaksi, temperatur, dan waktu sintering berkontribusi langsung terhadap mekanisme densifikasi komposit UHMWPE–ZrO₂. Spesimen dengan kandungan ZrO₂ 10% menghasilkan kekerasan lebih tinggi dibandingkan 5% akibat efek penguatan partikel keramik yang meningkatkan hambatan penetrasi indenter dan membatasi deformasi plastis matriks UHMWPE. Peningkatan beban dari 6 ton menjadi 10 ton memperbesar kontak antarpartikel sebelum sintering sehingga jalur difusi menjadi lebih efektif dan volume pori awal berkurang. Temperatur 271°C mempercepat mobilitas rantai polimer dan difusi antarpermukaan, menghasilkan ikatan antarfase yang lebih kuat dibanding 266°C. Waktu tahan 10 menit memberikan kesempatan relaksasi tegangan dan penyempurnaan neck growth antarpartikel, sehingga struktur menjadi lebih kompak. Kombinasi parameter tersebut menghasilkan spesimen dengan densitas relatif tertinggi yang tercermin pada nilai kekerasan maksimum sekitar 41 Shore D.

Untuk memverifikasi bahwa peningkatan kekerasan disebabkan oleh reduksi porositas dan perbaikan ikatan antarmuka, tiga spesimen dengan nilai tertinggi dianalisis menggunakan ImageJ berbasis citra metalografi. Analisis dilakukan untuk mengkuantifikasi fraksi area pori, ukuran efektif pori, dan tingkat homogenitas distribusi ZrO₂ dalam matriks. Data tersebut akan dikorelasikan dengan hasil Shore D guna menilai hubungan antara derajat densifikasi, kualitas mikrostruktur, dan respons mekanik permukaan. Pendekatan ini memungkinkan interpretasi yang lebih objektif terhadap mekanisme penguatan, apakah didominasi oleh penurunan cacat volumetrik, peningkatan interlocking partikel, atau efek penguatan dispersi nano ZrO₂.



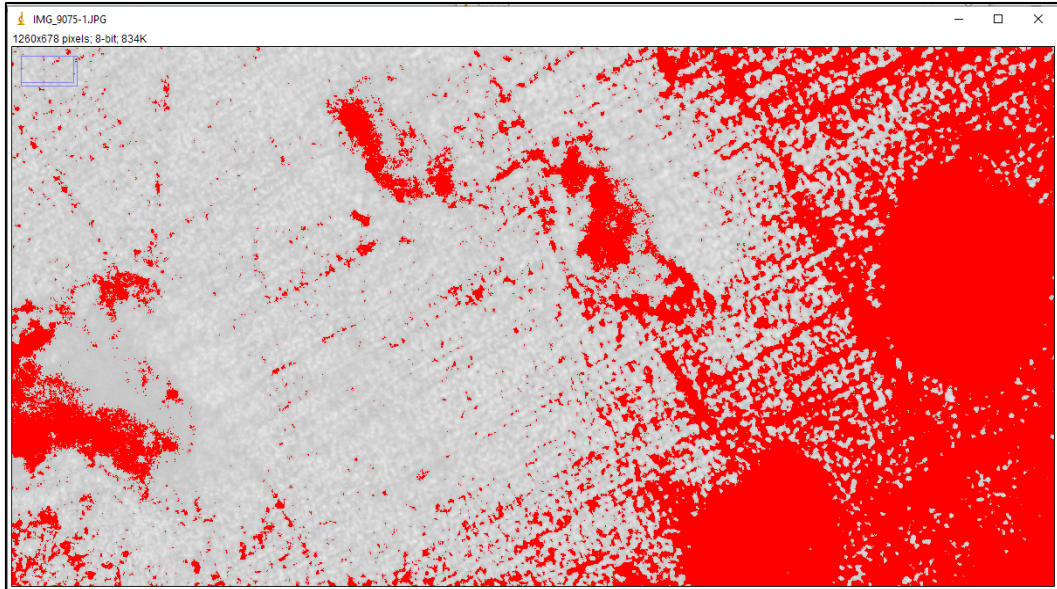
Gambar 10. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE-10% ZrO₂ (10 ton, 271°C, 10 menit)

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	169920	24.891	0	188

Gambar 11. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO₂ (24,891%)

Berdasarkan hasil analisis ImageJ pada gambar metalografi spesimen UHMWPE + nano ZrO₂ 10% dengan parameter 10 ton, 271 °C, dan 10 menit, diperoleh nilai porositas sebesar 24,891% yang ditunjukkan oleh area berwarna merah pada citra threshold. Warna merah merepresentasikan daerah pori atau void, sedangkan area abu-abu merupakan matriks material yang telah mengalami pemadatan. Persentase porositas tersebut menunjukkan bahwa proses sintering sudah menghasilkan densifikasi yang cukup baik, namun masih terdapat rongga yang tersebar terutama pada sisi kanan citra yang mengindikasikan pemadatan belum sepenuhnya merata. Distribusi pori yang relatif

menyebar tanpa membentuk kluster besar menandakan mekanisme difusi antarpartikel telah berlangsung, tetapi belum mencapai kondisi optimum untuk menghasilkan struktur mikro yang lebih rapat dan homogen.



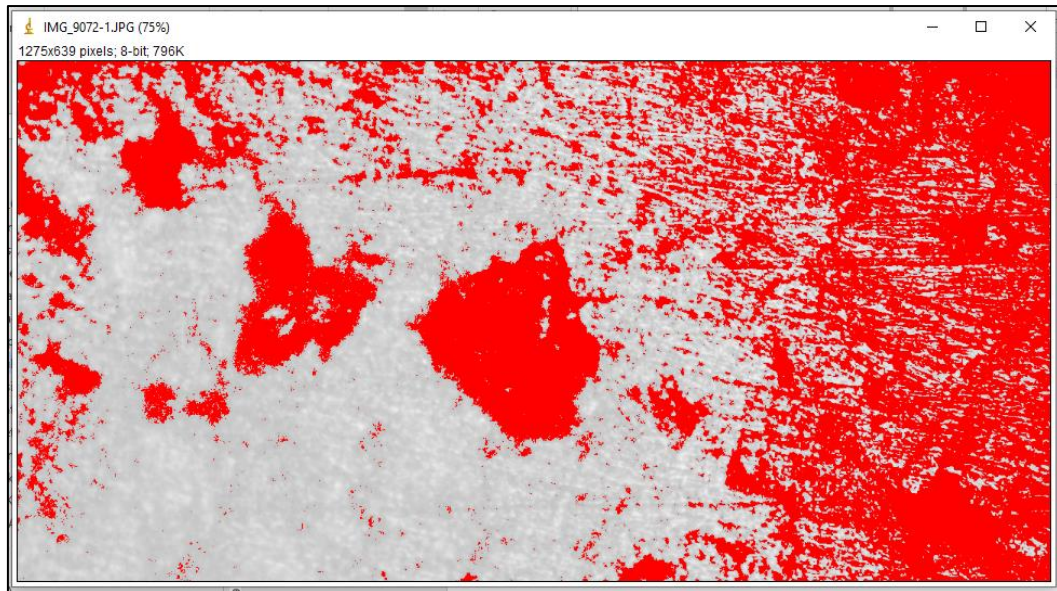
Gambar 12. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE-10% ZrO₂ (6 ton, 271°C, 10 menit)

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	336582	39.399	0	194

Gambar 13. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO₂ (39,399%)

Hasil ImageJ untuk spesimen UHMWPE + nano ZrO₂ 10%, 6 ton, 271°C, 10 menit menunjukkan nilai % Area = 39,399%, yang merepresentasikan fraksi pori permukaan hasil segmentasi. Nilai ini tergolong tinggi dan menandakan densifikasi belum optimal akibat tekanan kompaksi yang relatif rendah, sehingga kontak antarpartikel saat sintering terbatas dan pembentukan ikatan difusional tidak merata. Pola pori pada citra memperlihatkan konsentrasi rongga di satu sisi spesimen, mengindikasikan distribusi tekanan dan aliran

panas yang tidak homogen selama pemadatan. Kondisi mikrostruktur tersebut berpotensi menurunkan kemampuan material menahan penetrasi, yang relevan dengan kecenderungan nilai kekerasan Shore D yang lebih rendah dibanding spesimen dengan beban 10 ton.



Gambar 14. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE-10% ZrO₂ (10 ton, 266°C, 10 menit)

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	324287	39.803	0	193

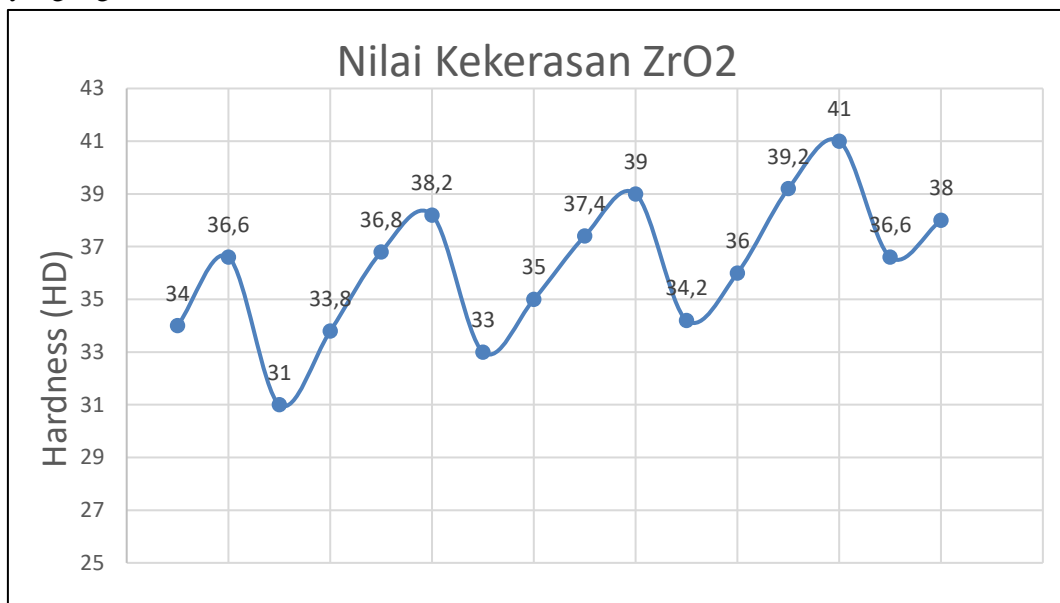
Gambar 15. Output Results ImageJ analisis %Area nano ZrO₂ (39,803%)

Hasil analisis ImageJ pada spesimen UHMWPE + nano ZrO₂ 10% dengan parameter beban 10 ton, temperatur 266°C, dan waktu 10 menit menunjukkan nilai porositas permukaan sebesar 39,803% berdasarkan keluaran %Area. Citra hasil threshold menampilkan area berwarna merah yang merepresentasikan rongga atau pori, sedangkan area abu-abu menunjukkan bagian matriks yang telah mengalami pemadatan. Meskipun

tekanan kompaksi telah ditingkatkan menjadi 10 ton, distribusi pori masih tampak cukup dominan dan tidak sepenuhnya merata, yang mengindikasikan bahwa pada temperatur 266°C proses difusi antarpartikel belum berlangsung optimal. Pola pori yang membentuk kluster di beberapa zona menunjukkan adanya ketidakseragaman densifikasi lokal, sehingga sebagian volume spesimen belum mengalami pembentukan ikatan yang sempurna selama sintering.

Perbandingan ketiga spesimen menunjukkan bahwa kondisi proses memberikan pengaruh berbeda terhadap tingkat densifikasi komposit. Spesimen **10 ton–271°C–10 menit** memiliki porositas paling rendah dengan distribusi pori lebih halus dan merata, menandakan mekanisme difusi dan pepadatan berlangsung paling optimal. Spesimen **6 ton–271°C–10 menit** berada pada posisi menengah, di mana temperatur sudah mendukung proses sintering, namun tekanan kompaksi yang lebih rendah menyebabkan sebagian pori masih tersisa dan membentuk kluster lokal. Adapun spesimen **10 ton–266°C–10 menit** menunjukkan porositas tertinggi, yang mengindikasikan bahwa temperatur 266°C belum cukup untuk mengaktifkan difusi antarpartikel secara maksimal meskipun tekanan telah tinggi. Tren mikrostruktur ini sejalan dengan hasil uji kekerasan Shore D, di mana spesimen dengan porositas lebih rendah cenderung memberikan nilai kekerasan lebih tinggi.

Berdasarkan data pada tabel hasil pengujian kekerasan, selanjutnya disajikan grafik untuk memperjelas tren perubahan nilai kekerasan terhadap variasi parameter proses yang digunakan.



Gambar 16. Grafik nilai kekerasan (UHMWPE-ZrO₂)

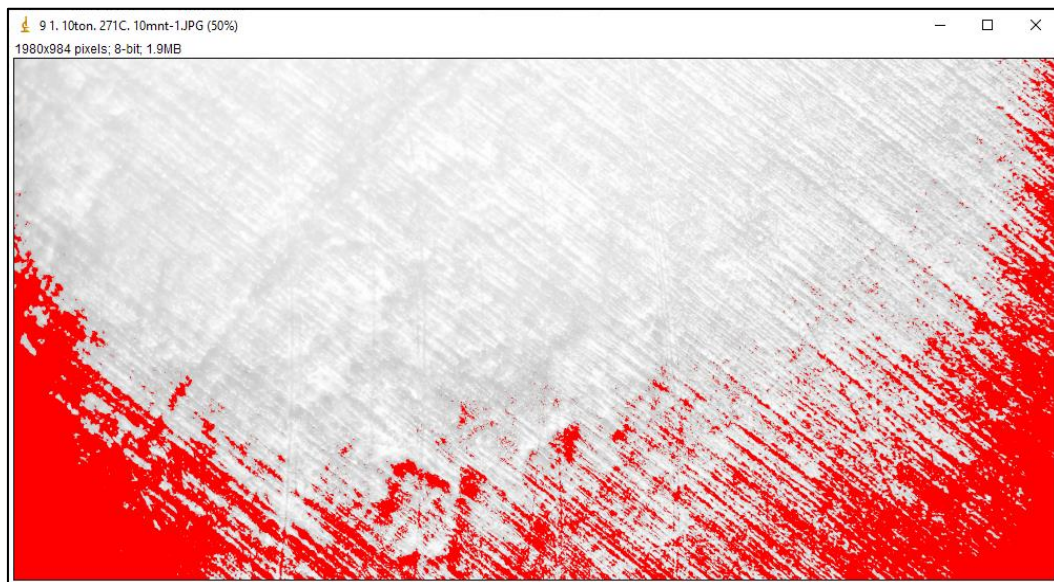
No	Komposisi	Beban	Temperatur	Waktu	Kekerasan					Rata-rata Nilai Kekerasan
					1	2	3	4	5	
1	UHMWPE 90% + GNP 10%	6 ton	266°C	5 menit	34	38,5	33	35	35,5	35,2
2	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 ton	266°C	5 menit	35	36,5	37,5	37	36	36,4
3	UHMWPE 95% + GNP 5%	6 ton	266°C	5 menit	32	28	30,5	31	32	30,7
4	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 ton	266°C	5 menit	39	36	31	32	36,5	34,9
5	UHMWPE 90% + GNP 10%	6 ton	271°C	5 menit	43	38	36,5	40	36	38,7
6	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 ton	271°C	5 menit	40	37	39,5	38,5	36	38,2
7	UHMWPE 95% + GNP 5%	6 ton	271°C	5 menit	26,5	35	27	27	36,5	30,4
8	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 ton	271°C	5 menit	38,5	39	34	34,5	37	36,6
9	UHMWPE 90% + GNP 10%	6 ton	266°C	10 menit	38	39	40	36	36,5	37,9
10	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 ton	266°C	10 menit	42	39	38	36	38	38,6
11	UHMWPE 95% + GNP 5%	6 ton	266°C	10 menit	36	38	37,5	37	36,5	37
12	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 ton	266°C	10 menit	37	41	36	40	36	38
13	UHMWPE 90% + GNP 10%	6 ton	271°C	10 menit	38	33,5	34,5	30	32	33,6
14	UHMWPE 90% + GNP 10%	10 ton	271°C	10 menit	40	30	37	38	31,5	35,3
15	UHMWPE 95% + GNP 5%	6 ton	271°C	10 menit	26	30	31	32,5	30,5	30
16	UHMWPE 95% + GNP 5%	10 ton	271°C	10 menit	33	36	30	37	33,5	33,9

Tabel 10. Hasil pengujian kekerasan komposisi UHMWPE-GNP

Hasil pengujian kekerasan pada komposit UHMWPE yang diperkuat dengan Graphene Nanoplatelet (GNP) menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan nilai kekerasan seiring bertambahnya persentase GNP, beban pengepresan, temperatur, dan waktu sintering. Spesimen dengan komposisi UHMWPE 90% + GNP 10% secara

konsisten menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan komposisi UHMWPE 95% + GNP 5%, yang mengindikasikan bahwa penambahan GNP berperan sebagai penguat yang meningkatkan resistansi material terhadap penetrasi indentor Shore D. Selain itu, peningkatan beban kompaksi dari 6 ton menjadi 10 ton serta kenaikan temperatur dari 266°C ke 271°C juga berkontribusi terhadap proses densifikasi yang lebih baik, sehingga menghasilkan ikatan antarpartikel yang lebih kuat dan porositas yang lebih rendah. Waktu sintering 10 menit memberikan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan 5 menit, yang menunjukkan bahwa difusi antarpartikel berlangsung lebih optimal pada durasi pemanasan yang lebih lama.

Berdasarkan data tersebut, tiga spesimen dengan nilai kekerasan tertinggi yaitu pada kondisi UHMWPE 90% + GNP 10% dengan parameter 10 ton–271°C–10 menit, 6 ton–271°C–10 menit, dan 10 ton–266°C–10 menit—akan dianalisis lebih lanjut menggunakan perangkat lunak ImageJ. Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi persentase porositas dan karakteristik distribusi fase pada permukaan spesimen, sehingga hubungan antara peningkatan kekerasan dan kualitas mikrostruktur yang terbentuk akibat variasi parameter proses dapat dipahami secara lebih komprehensif.



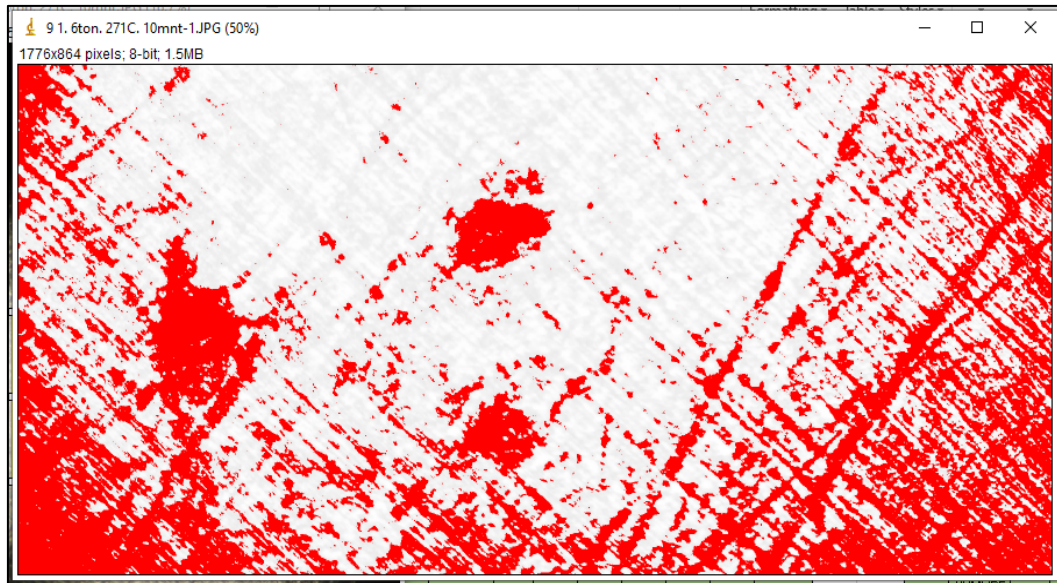
Gambar 17. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% GNP (10 ton, 271°C, 10 menit)

The screenshot shows a window titled 'Results' with a menu bar containing 'File', 'Edit', 'Font', and 'Results'. Below the menu bar is a table with the following data:

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	402279	20.647	0	196

Gambar 18. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (20,647%)

Untuk spesimen GNP 10%, beban 10 ton, suhu 271 °C, waktu 10 menit, hasil analisis ImageJ menunjukkan nilai %Area sebesar 20,647% dengan ambang intensitas 0–196. Luasan berwarna merah yang relatif rendah menandakan bahwa jumlah pori atau daerah tidak terikat (void) pada permukaan spesimen lebih sedikit dibandingkan spesimen lain dengan parameter lebih rendah. Pola distribusi merah tampak terkonsentrasi di bagian tepi, sedangkan area tengah didominasi matriks berwarna terang yang lebih homogen. Hal ini mengindikasikan proses pemadatan yang lebih efektif akibat kombinasi tekanan 10 ton dan suhu 271 °C, sehingga partikel UHMWPE dan GNP mengalami ikatan antarmuka yang lebih baik serta penurunan celah mikro. Kondisi mikrostruktur yang lebih rapat tersebut selaras dengan hasil uji kekerasan yang menunjukkan nilai tertinggi pada kelompok spesimen ini, karena berkurangnya porositas berkontribusi langsung terhadap peningkatan kemampuan material menahan deformasi.



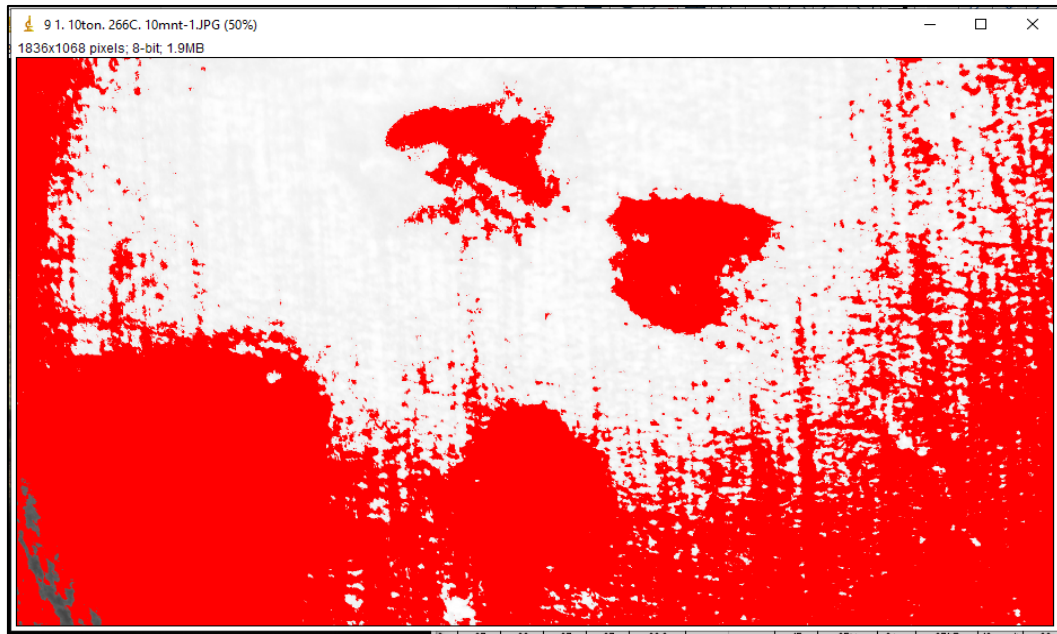
Gambar 19. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE–10% GNP (6 ton, 271°C, 10 menit)

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	996488	50.819	102	237

Gambar 20. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (31,316%)

Untuk spesimen UHMWPE + GNP 10% dengan parameter 6 ton, 271 °C, dan 10 menit, hasil analisis ImageJ menunjukkan nilai porositas sebesar 31,316% (%Area). Area berwarna merah pada citra hasil threshold merepresentasikan pori atau celah antarpartikel, sedangkan area terang menunjukkan bagian matriks yang telah mengalami pepadatan. Nilai porositas yang mencapai sekitar 31% ini menunjukkan bahwa proses densifikasi belum optimal dibandingkan spesimen dengan tekanan lebih tinggi. Distribusi pori tampak cukup luas dan membentuk klaster di beberapa zona, terutama pada bagian tepi, yang mengindikasikan bahwa tekanan kompaksi 6 ton belum mampu menghasilkan kontak antarpartikel yang merata sebelum proses sintering. Kondisi mikrostruktur yang masih mengandung pori dalam jumlah signifikan ini berpengaruh terhadap respons mekanik

material, karena keberadaan rongga dapat menurunkan kontinuitas matriks dan mengurangi kemampuan material dalam menahan beban penetrasi.



Gambar 21. Hasil thresholding porositas spesimen UHMWPE-10% GNP (10 ton, 266°C, 10 menit)

	Area	%Area	MinThr	MaxThr
1	480535	31.316	77	234

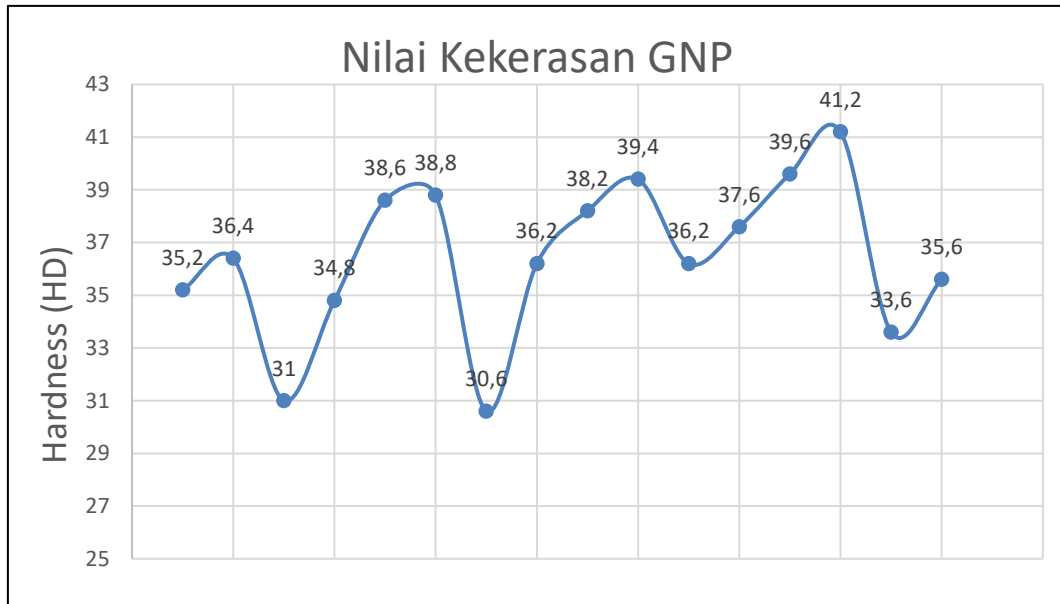
Gambar 22. Output Results ImageJ analisis %Area GNP (50,819%)

Untuk spesimen UHMWPE + GNP 10% dengan parameter 10 ton, 266 °C, dan 10 menit, hasil analisis ImageJ menunjukkan nilai porositas sebesar 50,819% berdasarkan %Area. Nilai ini tergolong sangat tinggi dan menunjukkan bahwa lebih dari setengah area citra teridentifikasi sebagai pori atau celah antarpartikel (ditandai warna merah). Distribusi

pori tampak masif dan membentuk klaster besar terutama pada bagian bawah dan sisi kanan citra, yang mengindikasikan bahwa meskipun tekanan kompaksi telah mencapai 10 ton, temperatur 266 °C belum cukup untuk mengaktifkan proses difusi dan pelelehan matriks UHMWPE secara optimal. Rentang threshold 102–237 juga menunjukkan segmentasi intensitas yang cukup luas, menandakan kontras mikrostruktur yang signifikan antara fase padat dan rongga. Kondisi mikrostruktur dengan porositas tinggi ini mencerminkan densifikasi yang kurang efektif, yang secara mekanistik dapat mengurangi kontinuitas matriks dan menurunkan kemampuan material dalam mendistribusikan beban secara merata.

Berdasarkan hasil analisis ImageJ terhadap ketiga spesimen GNP 10%, terlihat perbedaan tingkat densifikasi yang signifikan akibat variasi parameter proses. Spesimen **10 ton–271°C–10 menit** menunjukkan porositas terendah ($\pm 20,647\%$) dengan distribusi pori yang lebih terbatas dan terlokalisasi di tepi, menandakan proses pemadatan dan difusi berlangsung paling optimal. Spesimen **6 ton–271°C–10 menit** memiliki porositas menengah ($\pm 31,316\%$), yang menunjukkan bahwa temperatur sudah mendukung proses sintering, namun tekanan kompaksi yang lebih rendah menyebabkan masih banyak rongga tersisa. Sementara itu, spesimen **10 ton–266°C–10 menit** menunjukkan porositas tertinggi ($\pm 50,819\%$), mengindikasikan bahwa temperatur 266°C belum cukup untuk menghasilkan pelelehan dan ikatan antarmuka yang efektif meskipun tekanan tinggi telah diterapkan. Perbandingan ini menegaskan bahwa temperatur sintering memiliki pengaruh dominan terhadap proses densifikasi, sedangkan tekanan kompaksi berperan sebagai faktor pendukung dalam mengurangi porositas dan meningkatkan kualitas mikrostruktur.

Berdasarkan data pada tabel hasil pengujian kekerasan, selanjutnya disajikan grafik untuk memperjelas tren perubahan nilai kekerasan terhadap variasi parameter proses yang digunakan.



Gambar 23. Grafik nilai kekerasan (UHMWPE-GNP)

2. Resume hasil perbandingan dan analisis hasil penelitian

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Shore D, penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kekerasan maksimum diperoleh pada komposisi UHMWPE 90% + ZrO₂ 10% dengan parameter beban 10 ton, temperatur 271°C, dan waktu sintering 10 menit, yaitu sebesar 41 HD. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan penguat GNP pada penelitian yang sama, yang mencapai nilai maksimum 38,6 HD pada kondisi 10 ton, 266°C, dan 10 menit. Hal ini mengindikasikan bahwa nano ZrO₂ memberikan kontribusi penguatan yang lebih efektif dibandingkan GNP dalam sistem komposit tunggal, terutama dalam meningkatkan hambatan penetrasi terhadap indenter akibat sifat keramik yang lebih kaku.

Apabila dibandingkan dengan penelitian Agung yang menggunakan sistem hybrid filler (UHMWPE + HAp + ZrO₂ + GNP), nilai kekerasan maksimum yang diperoleh pada penelitian tersebut mencapai 48,1 HD pada temperatur 295°C, beban 10 ton, dan waktu 10 menit. Nilai ini sekitar 17% lebih tinggi dibandingkan hasil maksimum pada penelitian ini. Perbedaan tersebut terutama dipengaruhi oleh temperatur sintering yang lebih tinggi sehingga meningkatkan mobilitas rantai polimer dan difusi antarpartikel, serta adanya efek sinergi dari kombinasi beberapa penguat yang mampu memperbaiki distribusi tegangan dan mengurangi konsentrasi pori secara lebih efektif.

Jika dibandingkan dengan penelitian Qoulun, nilai kekerasan tertinggi yang diperoleh adalah 45,40 HD pada komposisi UHMWPE–HAp–GNP dengan temperatur 271°C dan waktu 10 menit. Nilai tersebut sekitar 10% lebih tinggi dari penelitian ini. Keunggulan tersebut kemungkinan disebabkan oleh kombinasi HAp dan GNP yang menghasilkan struktur mikro lebih homogen serta distribusi penguat yang lebih merata, sehingga meningkatkan densitas relatif dan ketahanan permukaan terhadap deformasi.

Meskipun nilai kekerasan maksimum dalam penelitian ini lebih rendah dibandingkan sistem hybrid pada penelitian lain, tren peningkatan kekerasan menunjukkan korelasi yang konsisten dengan penurunan porositas hasil analisis citra ImageJ. Spesimen dengan parameter 10 ton–271°C–10 menit menunjukkan persentase porositas terendah (24,891%) dibandingkan variasi lainnya, dan secara simultan menghasilkan nilai kekerasan tertinggi. Hal ini menegaskan bahwa mekanisme densifikasi dan peningkatan ikatan antarmuka matriks–penguat dalam penelitian ini berjalan secara efektif, meskipun masih dapat dioptimalkan melalui peningkatan temperatur atau penggunaan sistem penguat hybrid.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa nano ZrO₂ lebih efektif dibandingkan GNP dalam sistem penguatan tunggal UHMWPE, serta bahwa peningkatan tekanan kompaksi dan temperatur sintering berperan signifikan dalam meningkatkan sifat mekanik permukaan. Namun demikian, dibandingkan dengan sistem multi-filler, komposit dengan satu jenis penguat memiliki keterbatasan dalam menghasilkan efek sinergi penguatan yang maksimal.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, parameter proses berupa beban pengepresan, temperatur sintering, dan waktu penahanan berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan komposit UHMWPE–nano ZrO₂. Peningkatan beban dari 6 ton menjadi 10 ton serta temperatur hingga 271°C pada waktu penahanan 10 menit meningkatkan proses densifikasi dan memperbaiki kontak antarpartikel, sehingga menghasilkan struktur yang lebih kompak. Kombinasi parameter 10 ton – 271°C – 10 menit menghasilkan nilai kekerasan tertinggi pada komposit ZrO₂, yang didukung oleh hasil analisis ImageJ berupa persentase area porositas yang lebih rendah dan distribusi partikel yang lebih homogen.

Secara mikrostruktural, peningkatan kekerasan terjadi akibat peran partikel ZrO₂ sebagai penguat yang meningkatkan hambatan terhadap deformasi plastis matriks UHMWPE. Analisis citra menunjukkan bahwa spesimen dengan distribusi partikel lebih merata dan aglomerasi minimal memiliki korelasi langsung terhadap peningkatan kekerasan. Jika dibandingkan dengan komposit berbasis GNP pada parameter proses serupa, komposit ZrO₂ menunjukkan respons peningkatan kekerasan yang lebih konsisten terhadap kenaikan beban dan temperatur, yang mengindikasikan efektivitas mekanisme penguatan partikel keramik dalam sistem komposit ini.

2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan variasi komposisi nano ZrO₂ yang lebih luas guna menentukan komposisi optimum secara kuantitatif terhadap sifat mekanik. Selain itu, diperlukan karakterisasi mikrostruktur menggunakan SEM resolusi tinggi untuk mengamati ikatan antarmuka matriks–partikel secara lebih detail. Pengujian tambahan seperti uji tarik, impak, dan keausan juga perlu dilakukan agar performa material dapat dievaluasi secara komprehensif, terutama jika diarahkan pada aplikasi biomaterial. Optimalisasi metode pencampuran dan pengendalian parameter sintering juga disarankan guna meminimalkan aglomerasi partikel dan meningkatkan homogenitas struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. P. Soemardi, A. Suwandi, and A. S. Ibrahim, "Analisis Karakteristik Material UHMPWE dan PEEK untuk Implan Sendi Pinggul," *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 5, no. 2, p. 303, 2020, doi: 10.31544/jtera.v5.i2.2020.303-310.
- [2] I. Fasa, D. A. N. Mikrostruktur, and S. Zirkonia, "IDENTIFIKASI FASA DAN MIKROSTRUKTUR SERBUK ZIRKONIA (ZrO₂) BERBAHAN DASAR PASIR ZIRKON ALAM," vol. 10, no. 1, 2024.
- [3] H. Hermawan, "Pengenalan Pada Biomaterial," *Assoc. Profr. Laval Univ. Canada*, pp. 1–8, 2019, doi: 10.31227/osf.io/v3z5t.1/8.
- [4] P. S. Biologi, D. Biologi, F. Sains, and U. Diponegoro, "Buletin Anatomi dan Fisiologi Volume 2 Nomor 2 Agustus 2017 Analisis Hematologi Kelinci setelah Implantasi Ultra High Molecular Weight Poliethylene (UHMWPE) pada Sendi Lutut The Hamatology Analysis of Rabbit after Implantation by Ultra High Molecular We," vol. 2, 2017.
- [5] N. Pranno *et al.*, "Antibacterial Activity against Staphylococcus Aureus of Titanium Surfaces Coated with Graphene Nanoplatelets to Prevent Peri-Implant Diseases . An In-Vitro Pilot Study".
- [6] N. A. Saad and M. N. Obaid, "Enhanced the Antibacterial and Mechanical properties of UHMWPE by Addition Sort Fibers of Polyacrylonitraile PAN , Graphene Nanoplate (GNP) and Hydroxyapatite (HAp)," vol. 14, no. 2, pp. 1370–1376, 2020.
- [7] E. Andrijanto, G. Subiyanto, N. Marlina, H. Citra, and C. Lintang, "Preparation of Graphene Oxide Sand Composites as Super Adsorbent for Water Purification Application," vol. 05019, pp. 1–5, 2018.
- [8] A. A. Rahmanullah and D. H. Prajitno, "MECHANOSYNTHESIS OF MMC CuC DOPED WITH Ti FOR APPLICATION OF PANTOGRAPH CONTACT STRIP (PCS) PEMBUATAN METAL Matrik Komposit CuC Yang Didoping Dengan Ti Untuk Aplikasi Pantograph Contact Strip (PCS)," no. August, pp. 233–242, 2020.
- [9] J. T. Mesin, F. Teknik, and U. N. Semarang, "Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Indonesia," 2020.

- [10] D. T. Mesin, F. Teknik, and U. Diponegoro, "Dampak Proses Sintering Material Keramik pada Sifat Mekanik dan Dimensi Suatu Produk," vol. 20, no. 4, pp. 244–248, 2018.
- [11] P. Dan and P. Peralatan, "Politeknologi vol. 10 no. 3, september 2011," vol. 10, no. 3, 2011.
- [12] A. Firdaus, A. Tjahjono, and S. A. Saptari, "Analisis Pengaruh Bentuk Filler Pada Komposit Batang Bambu Terhadap Nilai Kekerasan (Hardness Shore D)," vol. I, no. 2, 2018.
- [13] A. Hariyanto, Yuswanto, and P. S. Kuncoro, "Analisis SEM (Scanning Electron Microscope) dan foto mikro pada material komposit serat tangkai jagung dengan matriks plastik polipropilen," *AutoMech: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 5, no. 02, pp. 15–22, 2025.
- [14] I. Syafa'at, A. Nurman, dan Darmanto, "Studi Eksperimental Keausan Kuningan Menggunakan Pin-on-Disc Tipe Point Contact," *Momentum*, vol.8, no. 1, hlm. 37–41, Apr. 2012.
- [15] H. Xin, H. Liang, L. Zhang, J. Jia, X. Li, and Z. Jin, "polyethylene against different metal counterparts," no. April, pp. 140–149, 2022, doi: 10.1049/bsb2.12038.

LAMPIRAN

1. Proses pembuatan spesimen

Proses awal yang dilakukan yaitu memadukan UHMWPE yang diperkuat dengan HAp, ZrO₂ dan UHMWPE yang diperkuat dengan HAp, GNP dengan masing-masing dua komposisi.



Gambar 24. Penimbangan komposisi

Setelah mendapat komposisi yang diinginkan, komposisi dilakukan proses *planetary ball mills* selama 30 menit dengan putaran 45 rpm dilakukan untuk menghaluskan komposisi agar merata.



Gambar 25. Mesin planetary ball mills

Proses selanjutnya, komposisi dibagi masing-masing menjadi 1.725 gram untuk dilanjutkan proses kompaksi menggunakan *hydraulic press* agar menghasilkan kerapatan yang sama. Masing-masing komposisi dibuat dengan variabel beban kompaksi, temperatur, dan waktu sintering yang berbeda.



Gambar 26. Spesimen hasil kompaksi

Selanjutnya, dilakukan proses sintering dengan konfigurasi dan variabel yang sudah ditentukan, setiap komposisi tersebut menghasilkan 16 spesimen. Proses sintering dilakukan pemanasan menggunakan tungku *ceramic engineering furnace manufacture*.



Gambar 27. Spesimen hasil sintering

Spesimen yang telah di sintering, digerinding untuk merapihkan bentuk hingga menjadi silinder. Setelah itu, spesimen dipoles menggunakan amplas grid 600, 800, 1000, 1200, 1500, 2000 hingga permukaan spesimen halus. Lalu dilanjutkan pengujian



Gambar 28. a) proses grinding b) proses polishing