TUGAS AKHIR – TL184834

REVIEW JENIS MATERIAL RADIOPAK DAN PENGARUH PENAMBAHANNYA TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN BIOKOMPATIBILITAS MATERIAL UNTUK PENGGANTI NUCLEUS PULPOSUS

ROSA DEWI FITRIANA
NRP. 02511640000032

Dosen Pembimbing
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR − TL 184834

REVIEW JENIS MATERIAL RADIOPAK DAN PENGARUH PENAMBAHANNYA TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN BIOKOMPATIBILITAS MATERIAL UNTUK PENGGANTI NUCLEUS PULPOSUS

ROSA DEWI FITRIANA
NRP. 02511640000032

Dosen Pembimbing
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

FINAL PROJECT − TL 184834

REVIEW TYPES OF RADIOPAQUE MATERIALS AND THE EFFECT OF ITS ADDITION TO THE MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES AND BIOCOMPATIBILITY FOR NUCLEUS PULPOSUS REPLACEMENT

ROSA DEWI FITRIANA
NRP. 02511640000032

Supervisors
Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.
Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

(*This page is intentionally left blank*)

REVIEW JENIS MATERIAL RADIOPAK DAN PENGARUH PENAMBAHANNYA TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN BIOKOMPATIBILITAS MATERIAL UNTUK PENGGANTI NUCLEUS PULPOSUS

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
ROSA DEWI FITRIANA
NRP 02511640000032

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.. .....(Pembimbing I)
2. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D..... (Pembimbing II)

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI

SURABAYA
JULI 2020

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW JENIS MATERIAL RADIOPAK DAN PENGARUH PENAMBAHANNYA TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN BIOKOMPATIBILITAS MATERIAL UNTUK PENGGANTI NUCLEUS PULPOSUS

Nama : Rosa Dewi Fitriana
NRP : 02511640000032
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing I : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.
Pembimbing II : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.

Abstrak

Metode diskektomi atau fusi tulang yang digunakan untuk menangani penyakit tulang belakang akibat degenerasi intervertebral disc (IVD) berpotensi memperburuk kondisi disk. Sehingga, mulai dikembangkan solusi alternatif untuk mengatasi masalah tersebut yaitu dengan penggantian nucleus pulposus, salah satu bagian dari IVD dengan anatomi paling sederhana. Salah satu kriteria yang harus dimiliki material pengganti nucleus pulposus adalah sifat radiopak agar dapat terlihat pada radiografi dan mempermudah perawatan. Beberapa material radiopak yang banyak digunakan adalah ZrO_2, $BaSO_4$, yodium, dan Bi_2O_3. Pada review ini dilakukan analisis mengenai pengaruh penambahan material radiopak pada material untuk pengganti nucleus pulposus dengan meninjau hasil pemindaian sinar-x, kekuatan mekanik, dan juga biokompatibilitas. Keempat jenis material radiopak tersebut dapat menghasilkan gambar yang kontras dan jelas pada pemindaian sinar-x, meningkatkan kekuatan tarik dan modulus young, namun menurunkan kekuatan tekan, hanya yodium yang meningkatkan kekuatan tekan. Dari pengujian biokompatibilitas, material radiopak tersebut menunjukkan biokompatibilitas yang cukup baik dari pengujian secara in vivo maupun in vitro.

Kata Kunci: ***Biokompatibilitas, Intervertebral disc (IVD), Material Radiopak, Nucleus pulposus, Sifat mekanik.***

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

REVIEW TYPES OF RADIOPACIFIER AND THE EFFECT OF ITS ADDITION TO THE MATERIAL MECHANICAL PROPERTIES AND BIOCOMPATIBILITY FOR NUCLEUS PULPOSUS REPLACEMENT

Student Name : Rosa Dewi Fitriana
NRP : 02511640000032
Department : Material and Metallurgical Engineering
Supervisor : Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc.
Co-Supervisor : Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D.

Abstract

Discectomy or bone fusion procedure that are used to cure the lower back pain due to intervertebral disc degeneration potentially worsening the condition of the disc. Thus, an alternative solution was developed to overcome this problem by replacing the nucleus pulposus, the simplest part of intervertebral disc. One of the criteria that must be possessed by the nucleus pulposus replacement material is the radiopaque, so that the material can be seen on radiograph and simplifies the implantation process. Some of the most commonly used radiopacifiers are zirconium oxide, barium sulphate, iodine, and bismuth oxide. This paper review analyzes the effect of adding radiopacifiers to nucleus pulposus replacement material by considering the results of x-ray scanning, mechanical properties, and biocompatibility. These radiopacifiers can provide adequate radiopacity, increase tensile strength and Young modulus, but decrease compressive strength. Only iodine that increase the compressive strength. According to biocompatibility test, these radiopacifiers exhibit good biocompatibility in vivo and in vitro.

Keywords: ***Biocompatibility, Intervertebral disc (IVD), Mechanical properties, Nucleus pulposus, Radiopacifier.***

(*This page is intentionally left blank*)

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir yang berjudul **"Review Jenis Material Radiopak dan Pengaruh Penambahannya terhadap Sifat Mekanik dan Biokompatibilitas Material untuk Pengganti Nucleus Pulposus"** untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS.

Selama proses penelitian, penulis ingin mengucapkan rasa terimakasih kepada berbagai pihak yang telah banyak membantu serta memberi dukungan kepada penulis, diantaranya adalah:

1. Ibu Amaliya Rasyida, S.T., M.Sc. selaku dosen pebimbing yang telah membimbing serta memberi ilmu penulis dalam pengerjaan Laporan Tugas Akhir
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph. D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS – ITS dan juga selaku dosen pembimbing yang juga banyak membimbing serta memberi ilmu kepada penulis
3. Bapak Dr. Eng. Hosta Ardhyananta S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS - ITS
4. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T., selaku dosen wali yang senantiasa memberikan banyak arahan dan nasihat kepada penulis

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak. Penlis juga menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna, untuk itu kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan.

Surabaya, 28 Juli 2020
Penulis

Rosa Dewi Fitriana

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **v**
Abstrak ..... **vii**
Abstract ..... **ix**
KATA PENGANTAR ..... **xi**
DAFTAR ISI ..... **xiii**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xvii**
BAB I PENDAHULUAN
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan Masalah 3
1.3 Batasan Masalah 3
1.4 Tujuan Review 3
1.5 Manfaat Review 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA
2.1 Intervertebral Disc (IVD) 5
2.2 Degenerasi Intervertebral Disc 7
2.3 Radiopak 10
2.4 Material Radiopak 12
2.4.1 Zirkonium Oksida (ZrO_2) 12
2.4.2 Barium Sulfat ($BaSO_4$) 13
2.4.3 Yodium 14
2.4.4 Bismuth Oksida (Bi_2O_3) 16
BAB III METODOLOGI
3.1 Diagram Alir 17
3.2 Bahan dan Metode 18
3.3 Proses Pengujian 29
3.3.1 Pengujian Radiopasitas 29
3.3.2 Pengujian Tarik 29
3.3.3 Pengujian Tekan 29
3.4 Ruang Lingkup Pembahasan 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Analisis Data 33

4.1.1 Zirkonium Oksida (ZrO_2) 33
4.1.2 Barium Sulfat ($BaSO_4$) 38
4.1.3 Yodium 42
4.1.4 Bismuth Oksida (Bi_2O_3) 47
4.2 Pembahasan 51
4.2.1 Pengaruh Penambahan Material Radiopak terhadap Radiopasitas 52
4.2.2 Pengaruh Penambahan Material Radiopak terhadap Sifat Mekanik dan Biokompatibilitas 53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 59
5.2 Saran 59
DAFTAR PUSTAKA 61
LAMPIRAN 73
UCAPAN TERIMA KASIH 89
BIODATA PENULIS 91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagian dari dua vertebra lumbar yang berdekatan dan *intervertebral disc* yang memisahkan kedua vertebra; (a) tampak samping vertebra lumbar; (b) bagian midsagittal vertebra lumbar. 5
Gambar 2.2 Struktur dan bagian annulus fibrosus. 6
Gambar 2.3 Anatomi i*ntervertebral disc (IVD);* (a) kondisi normal; (b) terdegradasi.....8
Gambar 2.4 Struktur kristal zirkonium oksida 12
Gambar 4.1 Grafik perbandingan kekuatan tekan pada material sebelum dan setelah penambahan 30% ZrO_2.....36
Gambar 4.2 Grafik perbandingan kekuatan tekan pada material sebelum dan setelah penambahan 20% Bi_2O_3.....50

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat *nucleus pulposus* dan annulus fibrosus 7
Tabel 2.2 Campuran material radiopak pada aplikasi in vivo.....11
Tabel 2.3 Sifat mekanik zirkonium oksida.....13
Tabel 2.4 Sifat – sifat umum barium sulfat 14
Tabel 2.5 Sifat – sifat fisik yodium secara umum 15
Tabel 3.1 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan zirkonium oksida (ZrO_2) 18
Tabel 3.2 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan barim sulfat ($BaSO_4$) 21
Tabel 3.3 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan yodium.....24
Tabel 3.4 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan bismuth oksida (Bi_2O_3).....27
Tabel 3.5 Ruang lingkup pembahasan.....30
Tabel 4.1 Pengaruh konsentrasi zirkonium oksida (ZrO_2) terhadap radiopasitas material polimer dan komposit 33
Tabel 4.2 Pengaruh penambahan ZrO_2 terhadap sifat mekanik polimer dan komposit 35
Tabel 4.3 Pengaruh konsentrasi zirkonium oksida (ZrO_2) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit.....37
Tabel 4.4 Pengaruh konsentrasi barium sulfat ($BaSO_4$) terhadap radiopasitas material polimer komposit 38
Tabel 4.5 Pengaruh konsentrasi $BaSO_4$ terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit 40
Tabel 4.6 Pengaruh konsentrasi barium sulfat ($BaSO_4$) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit 41

Tabel 4.7 Pengaruh konsentrasi kandungan yodium terhadap radiopasitas material polimer dan komposit 42
Tabel 4.8 Pengaruh konsentrasi yodium terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit 44
Tabel 4.9 Pengaruh konsentrasi kandungan yodium terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit..... 46
Tabel 4.10 Pengaruh konsentrasi bismuth oksida (Bi_2O_3) terhadap radiopasitas material polimer dan komposit 47
Tabel 4.11 Pengaruh konsentrasi Bi_2O_3 terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit 48
Tabel 4.12 Pengaruh konsentrasi bismuth oksida (Bi_2O_3) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit..... 51
Tabel 4.13 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap radiopasitas material 53
Tabel 4.14 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap sifat mekanik material..... 54
Tabel 4.15 Persentase rata-rata perubahan nilai sifat mekanik material dari penambahan material radiopak 56
Tabel 4.16 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap biokompatibilitas material..... 56

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Low Back Pain (LBP) atau yang lebih dikenal dengan nyeri pada tulang belakang merupakan salah satu masalah kesehatan yang dirasakan di punggung bagian bawah, seringkali menyebabkan penurunan performa dalam beraktivitas bagi individu yang mengalaminya. *Low Back Pain* (LBP) adalah nyeri yang terlokalisasi pada area lumbar antara tulang rusuk inferior dan pinggang, dengan nyeri menjalar ke bawah paha posterior-lateral distal ke lutut (Maharty, 2012).

Penelitian yang dilakukan Deros (2010) mengenai evaluasi postur kerja dan LBP di perusahaan makanan di Malaysia menunjukkan bahwa postur mengangkat (*lifting*) berpengaruh terhadap LBP sebesar 80%. Penelitian lain yang dilakukan Shah dan Dave (2012) mengenai prevalensi dan hubungan faktor risiko LBP pada dokter di Surat menunjukkan bahwa nilai prevalensi LBP pada dokter mencapai 36,82%, dalam hal ini LBP berkaitan dengan pekerjaan dokter yang sering membungkuk, postur kerja yang buruk dan duduk atau berdiri lama. Selanjutnya berdasarkan penelitian yang dilakukan Community Oriented Program of Controle of Rheumatic Disease (COPCORD) bahwa di Indonesia angka kejadian LBP pada penduduk desa adalah 15,1% (Darmawan, 2015). Pada 2012, lebih dari 52 juta pasien di *United State* mengunjungi seorang dokter dengan keluhan nyeri punggung memperkirakan biaya medis langsung sebesar $ 253 miliar (Bowles, 2011). Berdasarkan data dari Kementrian Kesehatan Republik Indonesia, prevelansi nyeri punggung bawah di Indonesia sebesar 18% dan terus meningkat sesuai dengan bertambahnya usia. Hampir 75% dari populasi manusia suatu saat akan mengalami sakit punggung (Handa, 2019). Penyebab paling umum adalah degenerasi *intervertebralis* (IVD). Studi orang dewasa dari populasi umum di sejumlah negara maju telah

melaporkan bahwa prevalensi LBP cukup tinggi, dan meningkat sesuai dengan rentang waktu yang dipertimbangkan.

Intervertebral disc adalah sebuah jaringan komposit yang terdiri dari *nucleus pulposus* (NP), *annulus fibrosus* (AF), dan *cartilage endplate*. Masing-masing dari bagian tersebut memiliki komposisi serta susunan yang berbeda dan saling bekerja sama untuk menghasilkan fungsi mekanis dari IVD (Bowles, 2011). Degenerasi *intervertebral disc* adalah penyebab utama dari keluhan punggung bawah dan merupakan penyebab utama dari biaya perawatan kesehatan (Anderson, 2005). Degenerasi IVD dikaitkan dengan peningkatan proses katabolik yang menyebabkan hilangnya proteoglikan dan akibatnya tekanan osmotik dari NP yang mengurangi dukungan beban tekan dan dapat menyebabkan peningkatan regangan dalam jaringan AF. Perubahan-perubahan anatomis dalam NP diyakini sebagai penyebab utama gangguan IVD terkait pelampiasan saraf (Bowles, 2011).

Metode penanganan konservatif bisa dilakukan untuk mengurangi nyeri punggung bawah, namun ketika metode itu gagal maka dilakukan pembedahan. Prosedur bedah yang melibatkan pengangkatan bagian nukleus (diskektomi) telah terbukti mengubah respons annulus terhadap kompresi, sehingga perlu dikembangkan perawatan alternatif untuk mengatasi kekurangan dari prosedur bedah (Mochida, 2015). Penggantian bagian *nucleus pulposus* dapat menjadi salah satu metode alternatif yang berpeluang untuk menjawab kekurangan tersebut, karena struktur dan fungsinya yang lebih sederhana daripada *annulus fibrosus* dan *cartilage endplate*. Metode ini juga tidak banyak mempengaruhi maupun mengubah fungsi dari *annulus fibrosus* dan *cartilage endplate*, serta membiarkan struktur bagian tersebut tetap utuh (Bao, 2000).

Material yang akan digunakan sebagai pengganti *nucleus pulposus* harus biokompatibel dan sifat fisik-mekanik yang sama atau mendekati *nucleus pulposus* yang asli. Selain itu, kriteria lain yang harus dimiliki adalah sifat radiopak, yang berfungsi untuk mengidentifikasi dan membedakan struktur anatomi dari material

implan, sehingga mempermudah proses implantasi dan tindak lanjut material selama penggunaannya (Boelen, 2005; Swetha, 2008). Saat ini, penelitian mengenai material pengganti nucleus pulposus dengan sifat radiopak masih belum banyak dilakukan. Oleh karena itu, *paper review* bertujuan untuk menganalisis jenis material radiopak yang dapat ditambahkan ke dalam material pengganti *nucleus pulposus* serta pengaruh penambahannya terhadap sifat mekanik dan juga biokompatibilitas material.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada *paper review* ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh penambahan material radiopak terhadap hasil pemindaian sinar-x pada kandidat material pengganti *nucleus pulposus*?
2. Bagaimana pengaruh penambahan material radiopak terhadap sifat mekanik dan biokompatibilitas kandidat material pengganti *nucleus pulposus*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam *paper review* ini adalah:

1. Material radiopak yang dibahas dalam *paper review* ini hanya fokus pada zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida
2. Tidak membahas secara detail terkait proses sintesis dan pengaruh bahan tambahan yang digunakan pada setiap referensi
3. *Paper review* tidak fokus terkait hasil karakterisasi material
4. Perbedaan metode pengujian yang dilakukan pada setiap referensi diabaikan

1.4 Tujuan Review

Tujuan dari penulisan *paper review* ini antara lain:

1. Untuk menganalisis pengaruh penambahan material radiopak terhadap hasil pemindaian sinar-x pada kandidat material pengganti *nucleus pulposus*

2. Untuk menganalisis pengaruh penambahan material radiopak terhadap sifat mekanik dan biokompatibilitas kandidat material pengganti *nucleus pulposus*.

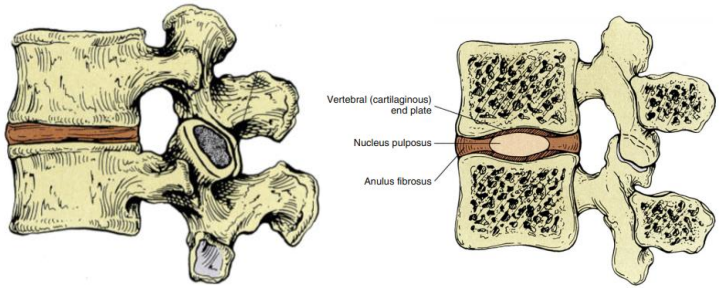
1.5 Manfaat Review

Manfaat dari penulisan *paper review* ini adalah sebagai referensi material radiopak yang dapat ditambahkan pada material polimer maupun komposit sebagai kandidat material untuk *prosthesis nucleus pulposus* pada tulang belakang yang telah mengalami degenerasi. Material radiopak membuat material agar dapat terdeteksi pada saat pemindaian sinar-x, sehingga memudahkan pemasangan implan dan juga perawatan selanjutnya.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Intervertebral Disc (IVD)

Intervertebral disc merupakan struktur kompleks yang mentransmisikan beban aksial dan meredam beban mekanis mengurangi kerusakan pada tulang belakang pada tulang belakang serta memberikan fleksibilitas (Tang, 2017; Causa, 2002). Terdiri dari tiga elemen anatomi, yaitu *cartilage endplate*, annulus fibrosus (AF), dan *nucleus pulposus* (Gambar 2.1). Masing-masing dari bagian tersebut memiliki komposisi serta susunan yang berbeda dan saling bekerja sama untuk menghasilkan fungsi mekanis dari IVD (Bowles, 2011). Di dalam tubuh manusia, terdapat 23 *intervertebral disc* dengan ketinggian yang bervariasi sesuai lokasi. Ketinggian total untuk semua *intervertebral disc* mencapai sepertiga dari panjang tulang belakang.



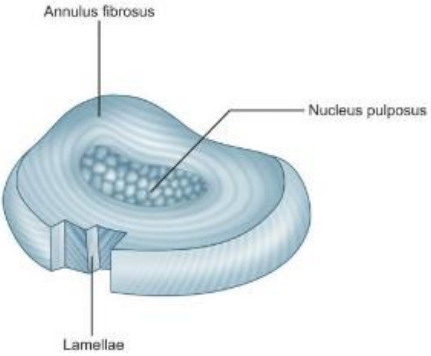
(a) (b)

Gambar 2.1 Bagian dari dua vertebra lumbar yang berdekatan dan *intervertebral disc* yang memisahkan kedua vertebra; (a) tampak samping vertebra lumbar; (b) bagian midsagittal vertebra lumbar (Cramer, 2014).

Nucleus pulposus yang berbentuk gelatin merupakan bagian dari IVD memiliki kandungan air tinggi, sehingga menunjukkan tekanan hidrostatis yang meningkatkan respon terhadap beban tekan. Selama gerakan *bending* dan torsional pada tulang belakang,

susunan kolagen kompleks pada *annulus fibrosus* menanggung beban tarik. Fungsi inilah yang diharapkan dapat dipulihkan saat memilih bahan untuk perbaikan IVD (Bowles, 2011)

Annulus fibrosus adalah pita tebal berserat yang mengelilingi inti *nucleus pulposus* serta yang menentukan ukuran dan bentuk IVD. *Annulus fibrosus* terbuat dari 15 hingga 25 lapisan cincin konsentris dari serat kolagen yang disebut lamina (Gambar 2.2). *Annulus fibrosus* sebagai kapsul berfungsi sebagai "membran pembatas" untuk mendukung beban aksial pada tubuh (Sharan, 2013). Secara biokimia, *annulus fibrosus* terdiri dari 65% air. Sedangkan pada kandungan kering, terdiri hingga 55% kolagen, 20% proteoglikan dan 10% serat elastis. Demarkasi antara *annulus fibrosus* dan *nucleus pulposus* tidak terlalu berbeda pada tulang dewasa (Coventry, 1945). Sifat umum yang dimiliki oleh *nucleus pulposus* dan annulus fibrosus ditunjukkan pada tabel 2.1



Gambar 2.2 Struktur dan bagian *annulus fibrosus* (Sharan, 2013).

Cartilage end plates (CEP) merupakan layer tipis tulang rawan hialin yang membatasi superior dan inferior. CEP memiliki ketebalan sekitar 0,6 mm, namun ketebalan ini akan berkurang seiring bertambahnya usia (Newell, 2017). CEP membantu untuk mencegah tubuh mengalami atrofi tekanan (Cramer, 2014). CEP sangat keropos dan memungkinkan cairan masuk dan keluar dari AF dan NP secara osmotik (Humzah, 1988).

Tabel 2.1 Sifat *nucleus pulposus* dan *annulus* fibrosus

Sifat		Nilai	Referensi
Tekanan *in vivo*	NP	Posisi duduk: 460 – 1330 kPa Posisi berdiri: 500 – 870 kPa Posisi berbaring: 91 – 539 kPa Posisi membungkuk dengan membawa beban 20 kg: 2300 kPa	Newell, 2017
	AF	110 – 130 kPa	Nerurkar, 2010
Modulus Young	NP	64,9 ± 44,1 kPa	Cortes, 2013
	AF	25,0 ± 21,6 kPa	
Kekuatan tarik		1,56 – 2,57 MPa	Umehara, 1996
Water content	NP	78 – 80 %	Périé, 2005
	AF	65%	Conventry, 1945
Densitas	NP	(2 – 5) × 10^6 sel/ml	Bowless, 2005

2.2 Degenerasi Intervertebral Disc

Degenerasi *intervertebral disc* adalah respon menyimpang dari sel karena adanya perubahan struktur dan komposisi sehingga menimbulkan disfungsi mekanis dari tulang belakang, seperti gangguan pada pergerakan tulang belakang, serta perlindungan elemen saraf (Adams, 2006; Anderson, 2005). Degenerasi IVD juga menjadi penyebab utama dari keluhan nyeri pada punggung bawah. Proses degenerasi IVD gangguan ini melibatkan peristiwa berurutan yang menyebabkan hilangnya sel dan matriks terkait, yang terdiri dari kolagen dan proteoglikan (Anderson, 2005).

Dalam keadaan sehat, fungsi disc terjaga melalui interaksi nucleus pulposus yang kaya akan proteoglikan dan kolagen di sekitar *annulus fibrosus* (Boxberger, 2006). Perbandingan secara fisik kondisi disk normal dan kondisi disk yang telah terdegradasi ditunjukkan pada Gambar 2.3.

(a) (b)

Gambar 2.3 Anatomi i*ntervertebral disc (IVD);* (a) kondisi normal; (b) terdegradasi (Urban, 2003)

Degenerasi IVD dikaitkan dengan peningkatan proses katabolik yang menyebabkan hilangnya proteoglikan dan akibatnya tekanan osmotik dari NP yang mengurangi dukungan beban tekan dan dapat menyebabkan peningkatan regangan dalam jaringan AF. Perubahan-perubahan ini terkait dengan bukti anatomis tentang hilangnya ketinggian IVD dan pengurangan gerak untuk segmen yang terpengaruh. Perubahan-perubahan anatomis dalam NP menjadi penyebab utama gangguan IVD (Bowles, 2011).

Ada beragam metode pengobatan konservatif yang bisa dilakukan untuk mengurangi nyeri punggung bawah, namun ketika metode itu gagal maka dapat dilakukan pembedahan. Prosedur bedah seperti diskektomi atau fusi tulang belakang efektif secara klinis, tetapi tidak mempertahankan fungsi IVD dan meningkatkan beban mekanis ke cakram (*disc*) (Mochida, 2015). Secara biologis dan biomekanik, kedua prosedur ini benar-benar memperburuk kondisi disk yang terkena, disk yang berdekatan, dan jaringan di sekitarnya, yang mengarah ke degenerasi lebih lanjut. Karenanya

hasil jangka panjang dari kedua prosedur ini relatif buruk (Bao, 2000).

Prosedur bedah yang melibatkan pengangkatan bagian nukleus (diskektomi) telah terbukti mengubah respons annulus terhadap kompresi ketika tubuh menerima beban. Dalam disk yang utuh, margin dalam dan luar annulus menonjol keluar dalam kondisi di bawah kompresi. Namun, ketika nukleus dihilangkan, arah *swelling* dari margin dalam berubah menuju pusat disk. Karena adanya perubahan ini, maka tegangan geser antara lamella dari annulus akan cenderung meningkat, kemungkinan menyebabkan robekan melingkar, yang merupakan tanda degenerasi IVD (Meakin, 2001).

Seiring berjalannya waktu, dikembangkan solusi alternatif yang memadai yaitu dengan menggantinya dengan implan prostetik *nucleus pulposus*. Perawatan ini juga cocok untuk membantu pasien penderita degenerasi diskus stadium awal (Boelen, 2005). Karena nukleus memiliki struktur dan fungsi yang jauh lebih sederhana daripada AF dan CEP, memungkinkan ahli bedah untuk membiarkan *annulus fibrosus* dan *cartilage endplate* tetap utuh serta prosedur bedah jauh lebih mudah daripada yang diperlukan untuk mengganti seluruh diskus (Bao, 2000).

Untuk penggantian *nucleus pulposus,* biomaterial yang digunakan sebagian besar berfokus pada bahan sintetis atau berbasis biologis yang dapat disuntikkan yang dapat mengembalikan tinggi disk dan stabilitas segmen gerak ke IVD (Thomas, 2003). Baru-baru ini hidrogel muncul sebagai salah satu biomaterial injeksi yang dapat memenuhi beragam tuntutan klinis, termasuk untuk penggantian *nucleus pulposus*. Boelen (2005) menjelaskan bahwa ada beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh biomaterial sebagai pengganti *nucleus pulposus,* antara lain:

1. Material harus menunjukkan radiopasitas instrinsik.
2. Material harus bersifat non-sitotoksik.
3. Prostesis yang ditanamkan dalam bentuk kering (yang relatif kecil) harus *swollen* untuk mengisi seluruh rongga yang tersisa

4. Dalam keadaan *swollen*, sifat fisik-mekanik prostesis harus cocok dengan *nucleus pulposus* yang asli.

2.3 Radiopak

Radiopak merupakan suatu kondisi dimana material tidak dapat dilewati oleh sinar-x dan material akan terlihat berwarna putih atau abu-abu sehingga yang dapat membantu ketepatan penempatan material ketika diinjeksi atau diimplan, sehingga material dapat dikontrol selama penggunaannya (Mawad, 2008). Polimer konvensional yang digunakan sebagai implan memiliki kelemahan untuk terdeteksi pada pemeriksaan radiologi. Hal ini disebabkan oleh densitas yang serupa dengan jaringan lunak karena struktur mengandung unsur yang sama seperti hidrogen, oksigen, atau karbon, sehingga densitas yang dimiliki juga serupa (James, 2006). Radiografi menunjukkan kontras antara struktur radiopak dan radiolusen, memungkinkan untuk membedakan antara struktur gigi dan bahan restorasi lainnya (Marins, 2017).

Teknik penggambaran pada radiografi menggunakan prinsip penyerapan sinar-x (Dawlee, 2011). Sinar-x ditandai oleh getaran elektromagnetik dengan panjang gelombang berkisar antara 12-0,06 Å. Penyerapan terjadi dari interaksi foton sinar-x dengan elektron dalam struktur yang diamati, yang membuat elektron-elektron ini ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan laju yang proporsional, dengan demikian radiopasitas yang muncul dapat diamati pada film sinar-x (Davy, 1982). Elemen radiopak dijelaskan oleh hubungan antara nomor atomnya dan kemampuannya untuk menyerap sinar-x, dinyatakan secara matematis pada persamaan 2.1 (Ackerman, 1982):

$$\mu = k \lambda^3 Z^4 + 0.2 \qquad (2.1)$$

Untuk meningkatkan visibilitas pada pemeriksaan radiologi, beberapa metode telah dikembangkan untuk meningkatkan kepadatan dan berat jenis polimer, dengan pencampuran unsur-unsur dengan nomor atom tinggi dan kepadatan tinggi ke dalam material polimer atau material implan dengan rasio tertentu (Mottu, 1999; Marins, 2017; Tian, 2018). Pada persamaan 2.1, elemen

dengan pengisi nomor atom tinggi (Z) dapat menyerap atau memantulkan lebih banyak sinar-x (μ) yang mengarah pada peningkatan radiopasitas (Coralles, 2013). Mottu (1999) mengklasifikasikan campuran material radiopak dalam polimer tertentu beserta kegunaannya seperti yang tertulis pada tabel 2.2. Radiopasitas suatu material untuk keperluan medis dapat diketahui melalui pengujian yang mengacu pada standar standar ASTM F640 – 79.

Tabel 2.2 Campuran material radiopak pada aplikasi in vivo (Mottu, 1999).

Polymer	Material radiopak	Spesies	Kegunaan
Isobutyl 2-cyanoacrylate (IBCA)	Iodine	Manusia	AVM, GIT Urinary tract
	Tantalum	Manusia	AVM, Urinary Tract
N-butyl 2-cyanoacrylate (NBCA)	Tantalum	Manusia Kelinci, Anjing	Ginjal
	Iodine	Manusia	Aneurisma, AVM
	Tungsten	Manusia	AVM
Poly(methyl metacrylate) (PMMA)	Barium	Manusia	Dental resin, Bone cement
	Bismuth	Manusia	Dental resin
Poly(vinyl alcohol) (PVAL)	Barium	Manusia Anjing	Ginjal
Poly(vinyl acetate) (PVAC)	Iodine	Manusia Anjing	Ginjal
Ethylene vinyl alcohol copolymer (EVAL)	Iodine	Manusia	AVM
Silicone	Barium	Manusia	Aortic valve
Cellulose Acetate (CA)	Bismuth	Manusia & Anjing	Aneurisma

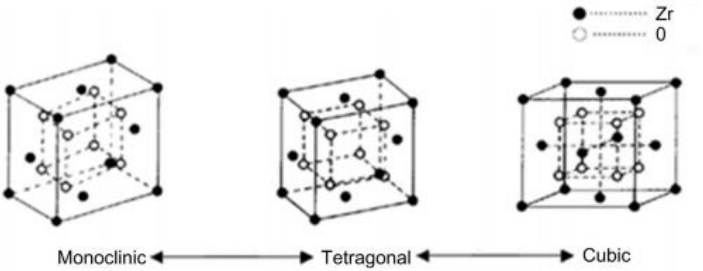
AVM: arteriovenous malformation; GIT: gastrointestinal tract

2.4 Material Radiopak

Pada subab sebelumnya, telah dijelaskan bahwa material yang mengandung unsur dengan nomor atom tinggi, efektif untuk meningkatkan radiopasitas pada suatu material. Penelitian dan pengembangan terus dilakukan untuk menemukan penambahan material radiopak yang menghasilkan radiopasitas maksimal, kebutuhan dosis minimal, dan toksisitas yang lebih rendah (Lusic, 2012). Berikut akan dijelaskan beberapa material yang paling banyak digunakan sebagai material radiopak untuk kebutuhan medis.

2.4.1 Zirkonium Oksida (ZrO_2)

Zirkonium oksida atau zirkonia merupakan bahan keramik non-reaktif yang ketersediaannya cukup melimpah di bumi dan juga ada di tubuh manusia, di jaringan tulang, dalam jumlah mulai dari 2 – 20 mg/kg (de Azevedo, 2018). Zirkonium oksida murni memiliki 3 bentuk struktur kristal seperti pada Gambar 2.4 yaitu struktur monoklinik pada temperatur ruangan, pada pemanasan sekitar 1000 – 1100^0C hingga 2000^0C struktur menjadi tetragonal, dan pada temperatur di atas 2000^0C terbentuk menjadi FCC (Tanzi, 2019).



Gambar 2.4 Struktur kristal zirkonium oksida (Tsoi, 2019)

Zirkonium oksida termasuk material yang bersifat biokompatibel karena tidak ada respon biologis dan non karsinogenik dengan jaringan di sekitarnya, oleh karena itu ZrO_2

mulai digunakan pertama kali untuk keperluan medis pada tahun 1969, yaitu sebagai bahan yang diusulkan untuk penggantian kepala pinggul (Shanmugam, 2018; Manicone, 2007). Karena kekuatan mekaniknya yang setara dengan gigi, zirkonium oksida sering digunakan sebagai bahan implan gigi dan juga biaya produksinya yang lebih murah jika dibandingakn dengan alumina. Selain itu, zirkonium oksida dengan modulus elastisitas yang lebih rendah dan kekuatan yang lebih tinggi berpotensi sebagai aplikasi penahan beban (Shanmugam, 2018). Selain itu, ZrO_2 juga mulai digunakan sebagai agen radiopak untuk meningkatkan radiopasitas pada material polimer dan komposit karena sifatnya yang *bioinert* dan biokompatibel (Ge, 2012; Coleman, 2012). Sifat mekanik ZrO_2 secara umum seperti yang tertulis pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat mekanik zirkonium oksida (Shanmugam, 2018)

Sifat	Keterangan
Densitas (g/m^3)	6,1
Kekerasan Vickers (GPa)	12
Kekuatan tekan (MPa)	1074
Modulus elastisitas (GPa)	201
Fracture toughness (K1c) MPa	6 – 15

2.4.2 Barium Sulfat ($BaSO_4$)

Barium merupakan elemen logam yang termasuk dalam kelompok alkali tanah yang paling stabil (Oskarsson, 2007). Barium sulfat dimurikan secara kimiawi dari zat mineral komin dan secara kimiawi dianggap sebagai garam anorganik dengan ion Ba^{2+} dan SO_4^{2-} (Guo, 2008). Barium hanya ditemukan dalam kombinasi dengan elemen lain seperti sulfat (SO_4^{2-}) atau karbonat (CO_3^{2-}). Barium sulfat adalah serbuk kristal putih yang bersifat inert secara kimiawi dan tidak dapat diserap oleh mukosa, sehingga dianggap aman digunakan untuk material radiopak (Périard, 2003).

Karena stabilitas termal yang tinggi, biostabilitas dan biokompatibilitas yang baik, bersifat inert secara kimiawi, serta

biayanya yang tidak mahal, barium sulfat sering dimanfaatkan sebagai material radiopak yang digunakan dalam berbagai aplikasi medis, seperti kateter angiografik, kateter ablasi, kateter diagnosis elektrofisiologi, dan sejenisnya (Guo, 2008; Périard, 2003). Secara umum, sifat-sifat barium sulfat dituliskan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Sifat – sifat umum barium sulfat

Sifat	Keterangan	Referensi
Berat molekul	233,39 g/mol	PubChem, 2019
Wujud fisik	Bubuk putih atau kekuningan, tidak berbau, dan hambar	Lewis, 2007
Densitas	4,25 – 4,5 g/cm^3	NIOSH, 2016
Titik lebur	1580^{0}C	Lide, 2007
Kekerasan Mohs	3,3	Lide, 2007
Keamanan dan bahaya	- Tidak mudah terbakar - Jika dipanaskan bersama aluminium dapat mengakibatkan ledakan - Jika terkena mata atau kulit, dapat menyebabkan iritasi	International Chemical Safety Cards (ICSC); Lewis, 2007; NIOSH, 2016

2.4.3 Yodium

Yodium (Z = 53) secara historis menjadi atom pilihan untuk aplikasi pencitraan CT (Lusic, 2012). Kemampuan yodium untuk menyerap sinar – X ditemukan pada awal tahun 1896 dan hampir 30 tahun yodium dikembangkan sebagai agen radiopak pertama untuk dapat digunakan pada bidang medis. Senyawa iodin Lipidol diperkenalkan sebagai agen kontras pertama yang dapat digunakan

untuk mielografi (Speck, 2018). Secara umum, yodium memiliki sifat – sifat seperti yang tertera pada Tabel 2.5.

Yodium sebagai media kontras diklasifikasikan menjadi dua kelompok yaitu ionic atau non-ionik (Hultzch, 2015). Senyawa ionic cenderung lebih mudah berinteraksi dengan struktur biologis seperti peptida dan sel membran. Karena osmolalitasnya cukup tinggi, sehingga berpotensi menyebabkan masalah fisiologis seperti vasolidasi, bradikardia, dan hipertensi paru, selain itu radiopasitas yang dihasilkan juga lebih rendah. Kemudian, non-ionik media kontras beryodium mulai digunakan karena menunjukkan efek samping dan osmolalitas yang lebih rendah (Lusic, 2012). Oleh karena itu, lebih dari 90% agen kontras ionik pada angiografi, urografi, dan CT telah digantikan oleh agen kontras non-ionik (Speck, 2018).

Tabel 2.5 Sifat – sifat fisik yodium secara umum (Lyday, 2015)

Sifat	Keterangan
Kategori elemen	Halogen
Berat unsur standar	126,90447
Tekanan uap pada 25^0C	0,031 kPa
Konduktivitas thermal	0,421 $Wm^{-1}K^{-1}$
Keamanan	Kontak langsung dapat menyebabkan iritasi pada mata dan kulit serta mengganggu pernapasan.
Penampakan fisik	Ketika padatan yodium dipanaskan, akan menyublim membentuk uap berwarna ungu

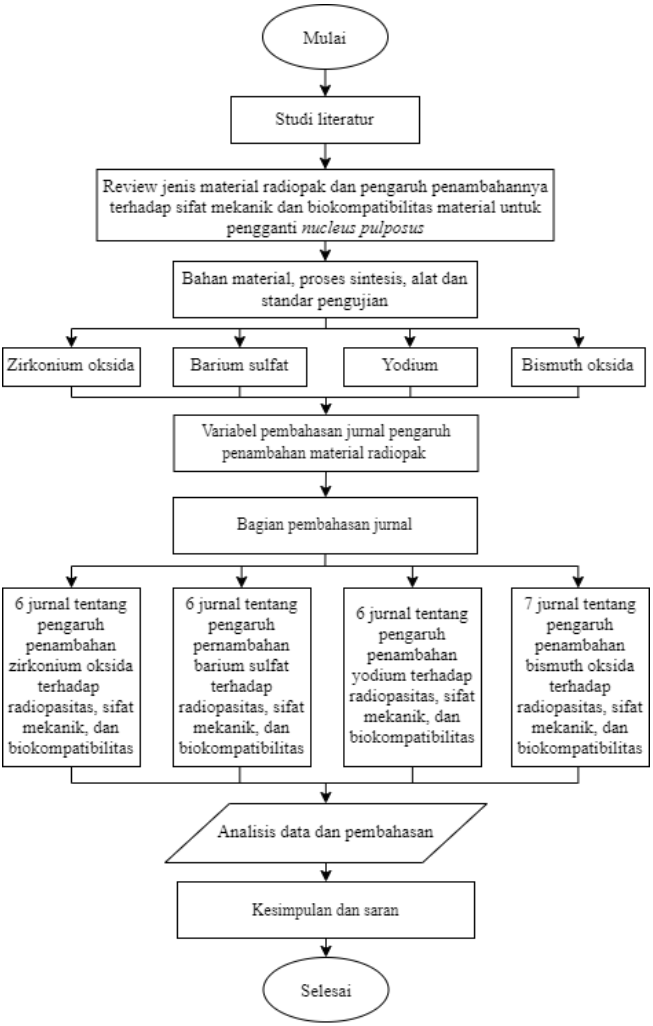
2.4.4 Bismuth Oksida (Bi_2O_3)

Bismuth oksida adalah material semikonduktor dengan sifat optik dan listrik yang sangat baik seperti indeks bias tinggi, permitivitas dielektrik tinggi, dan fotokonduktivitas yang baik (Hincapié, 2012). Di Amerika Serikat, sekitar 64,5% bismuth digunakan dalam paduan dan aditif metalurgi, selain itu juga digunakan sebagai astringen, antiseptik, antasida, dan agen radiopak dalam diagnosis sinar-X (Fowler, 2007). Bismuth oksida ($Bi_2O_{3)}$ memiliki lima polimorf kristalografi, yaitu α – Bi_2O_3 (*monoclinic*), β – Bi_2O_3 (tetragonal), γ – Bi_2O_3 (*body-centered cubic*), δ – Bi_2O_3 (*cubic*), dan ε – Bi_2O_3 (*triclinic*). Dari kelima bentuk tersebut, α – Bi_2O_3 pada temperatur ruangan dan δ – Bi_2O_3 pada temperatur tinggi adalah fase stabil dari Bi_2O_3 (Szostak, 2019).

Dalam dunia medis, bismuth oksida pertama kali digunakan sebagai obat untuk dyspepsia pada tahun 1786. Seiring berjalannya waktu, senyawa bismuth semakin dikembangkan sebagai agen antimikroba dan anti kanker, contohnya bismuth oksida yang digunakan untuk luka yang terinfeksi (Yang, 2011). Bismuth oksida juga telah digunakan sebagai agen radiopak yang terkandung di dalam MTA untuk aplikasi dental material. Beberapa penelitian melakukan penambahan Bi_2O_3 pada semen Portland, namun Coomaraswamy menemukan bahwa penambahan Bi_2O_3 menyebabkan peningkatan jumlah air yang tidak bereaksi dalam semen Portland yang berakibat pada peningkatan porositas (Yang, 2011; Coomaraswamy, 2007).

BAB III
METODOLOGI

3.1 Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram alir penulisan

3.2 Bahan dan Metode

Adapun bahan dan metode dari beberapa referensi disajikan dalam tabel 3.1

Tabel 3.1 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan zirkonium oksida (ZrO_2)

Konsentrasi ZrO_2 (%)	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
28%	PMMA	1. Mencampur blok PMMA murni dan blok PMMA yang mengandung 28% ZrO_2 2. Campuran dikemas ke dalam labu dan dimasukkan ke dalam bak air 50^0C. 3. Memanaskan campuran hingga 70^0C, disimpan pada 70^0C selama 60 menit dan terakhir pada 100^0C selama 30 menit	Material implan	Chang, 1981
30%	Semen Portland	Mencampur bahan dengan perbandingan 1 g serbuk semen per 0,3 mL air suling	Dental material	Guerreiro-Tanomaru, 2014
30%	Semen Portland	Semen Portland (70%) dan ZrO_2 (30%) dicampur dengan 0,33 ml air suling.	Dental material	Guerreiro-Tanomaru, 2014

Konsentrasi ZrO_2 (%)	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
5%	Biodentin (mengandung 5% ZrO_2)	Serbuk biodentin (0,82 g) Cairan: Larutan encer hydrosoluble polymer dengan $CaCl_2$ (6 tetes)	Material perbaikan endodontik	Rodriguez, 2018
15%	Biodentin	Serbuk: Biodentin 85% (0,7 g) ZrO_2 15% (0,12 g) Cairan: Larutan biodentin (6 tetes)		
30%	Kalsium Silikat	Serbuk kalsium silikat + ZrO_2 dicampur dengan perbandingan 1 gram serbuk semen per 0,3 ml air suling	Dental material	Silva, 2013
15%	PMMA	Pencampuran PMMA dengan 15% berat ZrO_2	Semen tulang	Wang, 2005

Konsentrasi ZrO_2 (%)	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
2%	PVA	Sebanyak 2% ZrO_2 (0.01 g) ditambahkan ke larutan PVA (0,5 g PVA; 50 ml air suling)	Nanocomposite film	Krishnamoorthy, 2011.
10% 20% 30%	Semen Portland	Penambahan ZrO_2 ke dalam semen Portland. Pencampur dengan rasio 1 gram bubuk semen per 0,37 ml air suling	Endodontic material	Antonijevic, 2013

Tabel 3.2 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan barim sulfat ($BaSO_4$)

Konsentrasi $BaSO_4$	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
28%	PMMA	1. Mencampur blok PMMA murni dan blok PMMA yang mengandung 28% $BaSO_2$ 2. Campuran dikemas ke dalam labu dan dimasukkan ke dalam bak air 50^0C. 3. Memanaskan campuran hingga 70^0C, disimpan pada 70^0C selama 60 menit dan terakhir pada 100^0C selama 30 menit	Material implan	Chang, 1981
40%	PVA	1. Pembuatan larutan PVA/GA 2. Penambahan $BaSO_4$ pada larutan PVA/GA 3. Pembuatan mikrosfer	Emboli partikulat	Thanoo, 1991
10%	PMMA	Pencampuran PMMA dan 10% $BaSO_4$	Semen tulang akrilik	Artola, 2003

Konsentrasi $BaSO_4$	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
0% vol 5% vol 10% vol 15% vol 20% vol 25% vol	Vinyl silicone	Pencampuran barium sulfat dengan pasta hidrofilik vinyl silicone hingga homogen	Material implan untuk gingival	Tsutsumi, 2012
0% 10% 15% 20%	PLLA	Fabrikasi material polimer nanokomposit menggunakan microcompounder dan menghasilkan serat nanokomposit 180 ± 10µm	Stent koroner	Ang, 2018
10% 20% 30% 40%	PMMA	Pencampuran serbuk PMMA, barium sulfat, dan monomer cair, yang terdiri dari methylmethacrylate, *N*,*N*-dimetil-*p*-toluidin, dan hidrokuinon	Semen tulang	Makita, 2008

Konsentrasi $BaSO_4$	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
0%	Double Antibacterial Pastes (DAP)	Pembuatan *injectable* DAP dengan konsentrasi 1mg/ml	Obat intracanal untuk endodontik regeneratif	Verma, 2018
30%		Pembuatan *injectable* DAP dengan konsentrasi 1mg/ml dengan penambahan 30% $BaSO_4$		
10%	PMMA	Preparasi PMMA dengan 10% $BaSO_4$	Semen tulang	Wang, 2005

Tabel 3.3 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan yodium

Material radiopak	Konsentrasi yodium	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
4IEMA	5% 10% 15% 20%	NVP	1. Sintesis monomer 4IEMA 2. Copolimerisasi NVP dan 4IEMA	Prostesis untuk nucleus pulposus	Boelen, 2005; Boelen, 2007
	5% 10% 15% 20%	HEMA	1. Sintesis monomer 4IEMA 2. Copolimerisasi NVP dan 4IEMA		
		PMMA	1. Preparasi I-copolymer 2. Preparasi semen tulang Komposisi I-semen: a) Serbuk 31,04 g PMMA 0,96 g benzoyl peroksida 8 g I-copolymer b) Cairan 15,44 g MMA 2,41 g butil metakrilat 0,44 g *N*,*N*-dimetil-*p*-toluidin 20 ppm hidrokuinon	Semen tulang	Hooy-Corstjens, 2004

Material radiopak	Konsentrasi yodium	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
ICP		PMMA	a) Komponen serbuk: PMMA (34,92g); ICP (4g); BPO (1,08g) b) Komponen cairan: MMA (15,44g); BMA (2,41g); DMPT (0,44g); HQ (20 ppm)	Semen tulang akrilik	Lewis, 2004
TIBMA	5% vol	PMMA	1. Sintesis monomer TIBMA 2. Preparasi semen TIBMA	Semen tulang akrilik	Artola, 2003
DISMA	5% vol	PMMA	1. Sintesis monomer DISMA 2. Preparasi semen DISMA		
IHX	10%	PMMA	Preparasi PMMA dengan 10% IHX	Semen tulang	Wang, 2005
IDX	10%	PMMA	Preparasi PMMA dengan 10% IDX		
	44%	I-PVA	40% I-PVA, polimer PVA yang telah dicangkok dengan gugus beryodium (44% kandungan yodium), dilarutkan dalam dimetil sulfoksida (DMSO)	Emboli	Dudeck, 2006

Material radiopak	Konsentrasi yodium	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
MAOETIB	1 mg/ml 2 mg/ml 4 mg/ml 8 mg/ml 16 mg/ml	Poli-MAOETIB	1. Sintesis monomer triiodophenyl methacrylate, 2-methacryloyloxyethyl(2,3,5-triiodobenzoate) [MAOETIB] 2. Sintesis poliMAOETIB	*X-ray imaging*	Galperin, 2007
4-iodobenzoyl klorida	0.5%	PVA	1. Pembentukan ikatan kovalen yodium terhadap PVA 2. Pembentukan gugus ester yang dapat terhidrolisis Pembentukan jaringan	Untuk pelepasan obat dan protein terkontrol	Mawad, 2008

Tabel 3.4 Prosedur dan variasi konsentrasi penambahan bismuth oksida (Bi_2O_3)

Konsentrasi Bi_2O_3	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
20%	Semen Portland	Mencampur bahan dengan perbandingan 1 g serbuk semen per 0,3 mL air suling	Dental material	Guerreiro-Tanomaru, 2014
25%	Semen Portland	Preparasi semen eksperimen dengan komposisi 75% semen Portland dan 25% bismuth oksida	bahan pengisi ujung akar	Hwang, 2009
20%	Semen Portland	Menacampur 20% bismuth oksida dan WPC dengan 0,30 ml air untuk setiap 1 g material.	Dental material	Tanomaru-Filho, 2012
20 phr 40 phr 60 phr 80 phr	Silicone rubber	Pencampuran bismuth oksida dan silicone rubber menggunakan roll mill sesuai dengan ASTM D3182-07	Pelindung radiasi	El-Fiki, 2015

Konsentrasi Bi_2O_3	Material polimer/ komposit	Prosedur sintesis	Aplikasi	Referensi
10% 20% 30% 40%	Semen Portland	Sampel dicampur dengan rasio 3,3 gram serbuk/ml air suling	Dental material	Coomaraswamy, 2007
25%	Semen Portland	Pencampuran semen dengan air dan superplasticizer	Material endodontik	Camilleri, 2008
	Semen Portland	Pencampuran semen Portland dan bismuth oksida dengan rasio 4:1 (PcBo4); 6:1 (PcBo6); 8:1 (PcBo8)	Material endodontik	Kim, 2008
10% 15% 20% 25% 30%	Semen Portland putih (WPC)	Pencampuran WPC/Bi_2O_3 dan air dengan rasio 1:0,37	Material endodontik	Saliba, 2009

3.3 Proses Pengujian

Adapun proses pengujian secara umum yang dilakukan pada beberapa referensi adalah sebagai berikut:

3.3.1 Pengujian Radiopasitas

Pengujian radiopasitas dilakukan untuk mengetahui kualitas gambar dari hasil radiografi suatu material. Pada umumnya, membandingkan radiopasitas spesimen dengan material referensi standar. Spesimen yang telah sesuai dengan standar ASTM F640 diletakkan pada perangkat radiografi yang berisi film x-ray dan selembar aluminium dengan tebal 10 mm diletakkan di atas spesimen. Pengaturan tegangan, waktu, serta arus pada perangkat radiografi disesuaikan dengan yang digunakan dalam diagnosis pada manusia.

3.3.2 Pengujian Tarik

Pengujian tarik yang dilakukan untuk mengetahui nilai kekuatan tarik, modulus Young, serta elongasi (%) pada suatu material. Secara umum, proses pengujian tarik diawali dengan preparasi spesimen sesuai dengan standar yang ada. Sebelum diuji, spesimen diinkubasi dalam media air pada temperatur 37 ± 1^{o}C, selama 7 hingga 14 hari. Lalu, spesimen dipasang pada mesin uji tarik kemudian diberi beban dan ditarik dengan kecepatan konstan hingga patah/putus. Pengujian dilakukan beberapa kali pada spesimen untuk didapatkan nilai rata-rata. Standar pengujian tarik yang digunakan tidak sama, tergantung pada jenis material yang akan diuji, misalnya ASTM D 412 untuk pengujian tarik pada material *vulcanized rubber*.

3.3.3 Pengujian Tekan

Pengujian tekan dilakukan untuk mendapatkan nilai kekuatan tekan dari suatu material. Prosedur pengujian tekan tidak jauh berbeda dengan pengujian tarik. Diawali dengan preparasi spesimen sesuai dengan standar pengujian. Permukaan spesimen dihaluskan menggunakan kertas amplas, kemudian, spesimen diinkubasi dalam media air pada temperatur 37 ± 1^{o}C. Instrumen

yang digunakan adalah mesin uji tekan universal. Hasil pengujian dicatat dalam satuan kilogram (kg) dan dikonversi menjadi megapaskal (MPa).

3.4 Ruang Lingkup Pembahasan

Adapun ruang lingkup pembahasan pada dari beberapa referensi disajikan dalam tabel 3.5

Tabel 3.5 Ruang lingkup pembahasan

Material radiopak	Material polimer/ komposit	Radiopasitas	Kekuatan tekan	Kekuatan tarik	Modulus Young	Elongasi (%)	biokompatibilitas	Referensi
ZrO2	PMMA	v	v				v	Chang, 1981
	Semen Portland	v	v					Guerreiro-Tanomaru, 2014
	Semen Portland	v						Guerreiro-Tanomaru, 2014
	Biodentin	v						Rodriguez, 2018
	Kalsium silikat	v	v				v	Silva, 2014
	Kalsium aluminat			v	v	v		Krishnamoorthy, 2014
	Semen Portland	v	v					Antonijevic, 2013
	PMMA						v	Wang, 2005
$BaSO_4$	PMMA	v	v				v	Chang, 1981
	Vinyl silicone	v						Tsutsumi, 2012
	PLLA	v		v	v	v		Ang, 2018
	PMMA	v	v				v	Makita, 2008
	PVA	v						Thanoo, 1991
	PMMA		v	v	v	v		Artola, 2003
	PMMA						v	Wang, 2005

Material radiopak	Material polimer/ komposit	Radiopasitas	Kekuatan tekan	Kekuatan tarik	Modulus Young	Elongasi (%)	biokompatibilitas	Referensi
$BaSO_4$	Double Antibiotic pastes (DAP)						v	Verma, 2018
4IEMA	NVP	v	v		v		v	Boelen, 2005
	HEMA	v	v		v		v	
	NVP			v				Boelen, 2007
	HEMA			v				Hooy – Corstjens, 2004
	PMMA			v	v			
4-iodobenzoyl chloride	PVA	v						Mawad, 2008
TIBMA	PMMA	v					v	Artola, 2003
DISMA	PMMA	v					v	
Yodium	PVA						v	Dudeck, 2006
Bi_2O_3	Semen Portland	v						Guerreiro-Tanomaru, 2014
	Semen Portland	v					v	Hwang, 2009
	Semen Portland	v	v					Antonijevic, 2013
	Silicone rubber			v	v	v		El-Fiki, 2015
	Semen Portland		v					Coomaraswamy, 2007
	Semen Portland	v					v	Kim, 2008

Material radiopak	Material polimer/ komposit	Radiopasitas	Kekuatan tekan	Kekuatan tarik	Modulus Young	Elongasi (%)	biokompatibilitas	Referensi
Bi_2O_3	Semen Portland putih	v						Saliba, 2009
	Semen kalsium silikat						v	Silva, 2014

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Data

Material radiopak yang akan dibahas secara detail pada *paper review* ini terdiri dari zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida

4.1.1 Zirkonium Oksida (ZrO_2)

Beberapa penelitian yang telah dilakukan, penambahan ZrO_2 memberikan radiopasitas yang memadai untuk kebutuhan klinis Mengacu pada standar ISO 6876 tentang standar untuk dental sealing material, material harus memiliki radiopasitas minimal 3 mmAl atau 39% agar dapat dibedakan dengan tulang maupun jaringan tubuh sehingga material dapat dengan tepat tertanam dalam tubuh di lokasi yang telah ditentukan. Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 4.1 dibuktikan bahwa semakin tinggi penambahan konsentrasi ZrO_2, maka radiopasitas material yang dihasilkan semakin meningkat serta gambar yang dihasilkan semakin kontras dan jelas.

Tabel 4.1 Pengaruh konsentrasi zirkonium oksida (ZrO_2) terhadap radiopasitas material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi ZrO_2	Nilai radiopasitas	Referensi
PMMA	28%	83%	Chang, 1981
Semen Portland	30%	3,50 ± 0,26 mmAl	Guerreiro-Tanomaru, 2014
Semen Portland	30%	3,70 ± 0,06 mmAl	Guerreiro-Tanomaru, 2014
Biodentin	5%	2,52 ± 0,11 mmAl	Rodriguez, 2018
	15%	4,20 ± 0,30 mmAl	

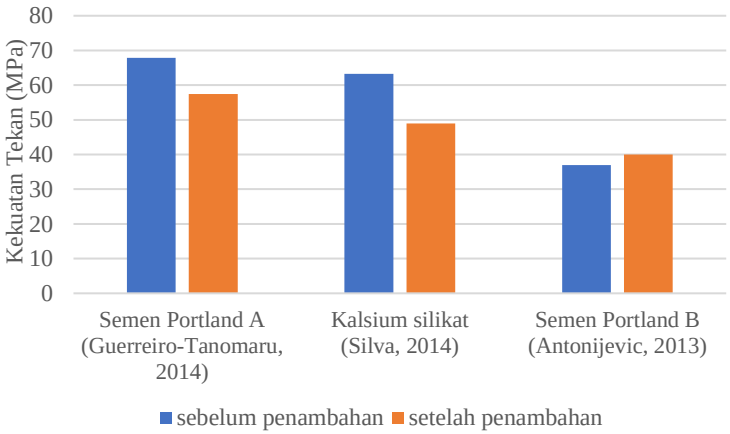
Material	Konsentrasi ZrO_2	Nilai radiopasitas	Referensi
Kalsium silikat	0%	1,32 ± 0,09 mmAl	Silva, 2014
	30%	4,12 ± 0,34 mmAl	
Semen Portland	10%	2,30 mmAl	Antonijevic, 2013
	20%	3,10 mmAl	
	30%	4,45 mmAl	

Selain berpengaruh terhadap radiopasitas, penambahan sejumlah zirkonium oksida juga mempengaruhi sifat mekanik dari material dasarnya. Beberapa penelitian mengenai pengaruh konsentrasi penambahan zirkonium oksida terhadap sifat mekanik pada material polimer disajikan pada Tabel 4.2. Sedangkan, Gambar 4.1 merupakan perbandingan kekuatan tekan pada material setelah penambahan ZrO_2 sebanyak 30% dari penelitian yang dilakukan oleh Guerreiro-Tanomaru (2014), Silva (2014), dan Antonijevic (2014).

Dilihat dari grafik tersebut, terjadi penurunan kekuatan tekan pada semen Portland A dan kalsium silikat, sedangkan pada semen Portland B terjadi sedikit peningkatan kekuatan tekan. Perbedaan juga terlihat pada semen Portland A dan semen Portland B. Penurunan kekuatan tekan pada semen Portland A dari penelitian yang dilakukan oleh Guerreiro – Tanomaru pada tahun 2014 terjadi karena adanya cacat pada struktur mikro akibat reaksi nanopartikel Semen Portland dan ZrO_2. Pada penelitian Silva (2014), penurunan kekuatan tekan disebabkan adanya porositas yang berdampak pada penurunan kekuatan tekan. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Antonijevic (2013), kekuatan tekan pada semen Portland B meningkat dari 37 MPa menjadi 40 MPa.

Tabel 4.2 Pengaruh penambahan ZrO_2 terhadap sifat mekanik polimer dan komposit

Material	Konsentrasi ZrO_2	Kekuatan tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young (MPa)	Elongasi (%)	Referensi
PMMA	28 %	Kering:145 Basah: 128				Chang, 1981
Semen Portland	30 %	57,43 ± 7,0				Guerreiro-Tanomaru, 2014
PVA	0%		16,25	1,42	112,125	Krishnamoorthy, 2011
	2%		29,02	2,39	152,015	
Semen kalsium silikat	30 %	48,93 ± 3,33				Silva, 2014
Semen Portland	10%	35				Antonijevic, 2013
	20%	39,5				
	30%	40				



Gambar 4.1 Grafik perbandingan kekuatan tekan pada material sebelum dan setelah penambahan 30% ZrO_2.

Zirkonia juga memiliki sifat biokompatibilitas yang baik, kekerasan dan kekuatan yang tinggi, oleh karena itu zirkonia sering diaplikasikan di dunia medis sebagai implan ortopedi, seperti komponen kepala femoralis pada implan pinggul dan implan gigi. Pengaruh penambahan zirkonium oksida terhadap biokompatibilitas material ditunjukkan pada tabel 4.3 berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti.

Biokompatibilitas zirkonium oksida dibuktikan oleh tingkat proliferasi sel dari spesimen PMMA yang mengandung ZrO_2 sebanding dengan PMMA murni (Tabel 4.3). Setelah 12 minggu implantasi, pola sel di sumsum tulang di sekitar sampel komposit PMMA/ZrO_2 hampir identik dengan spesimen kontrol dan pola sel hemopoietik tampak normal (Chang, 1981).

Tabel 4.3 Pengaruh konsentrasi zirkonium oksida (ZrO_2) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi ZrO_2	Hasil biokompatibilitas	Referensi
PMMA	0%	pertumbuhan sel relatif: 0,9	Chang, 1981
	28%	pertumbuhan sel relatif: 0,92	
PMMA	0%	Pertumbuhan tulang (%) : 27,2 ± 7,9	Wang, 2005
	15%	Pertumbuhan tulang (%) : 26,6 ± 6,9 Pembentukan osteoklas lebih tinggi dibandingkan dengan PMMA tanpa penambahan material radiopak (lampiran 3)	
Semen kalsium silikat	30%	Jumlah sel inflamasi mengalami penurunan tetapi tidak lebih rendah daripada semen kalsium silikat murni	Silva, 2014

Berdasarkan Tabel 4.1, penambahan zirkonium oksida sebagai material radiopak dapat menghasilkan gambar yang cukup kontras dari pemindaian sinar-x ketika kandungan ZrO_2 yang digunakan lebih dari 10%, karena aplikasi pada referensi yang digunakan adalah sebagai dental material sehingga radiopasitas yang dibutuhkan sesuai standar ISO 6876. Selain itu, seperti yang tertulis pada Tabel 4.3, zirkonium oksida juga tidak memberikan dampak buruk pada biokompatibilitas material implan.

4.1.2 Barium Sulfat ($BaSO_4$)

Barium sulfat digunakan pertama kali untuk pemeriksaan sinar-x untuk saluran pencernaan pada tahun 1996, dengan cara menambahkannya ke dalam bubur yang disebut *Rieder meal* (Speck, 2018). Dilihat dari Tabel 4.4, beberapa penelitian menyebutkan bahwa penambahan barium sulfat berat mampu meningkatkan radiopasitas serta menghasilkan gambar yang cukup kontras.

Tabel 4.4 Pengaruh konsentrasi barium sulfat ($BaSO_4$) terhadap radiopasitas material polimer komposit

Material	Konsentrasi $BaSO_4$	Nilai radiopasitas	Referensi
PMMA	28 %	59%	Chang, 1981.
Vinyl silicone	0% vol	Sulit terdeteksi oleh CT dan hasil visualnya masih buruk (lampiran 4)	Tsutsumi, 2012
	5% vol	Hasil visual mirip dengan tulang kortikal mandibula. Serta, tidak ada artefak yang terbentuk	
	10% vol	Hasil lebih terlihat kontras daripada 5% $BaSO_4$ akan tetapi partikel barium sulfat tidak homogen	
	15% vol 20% vol 25% vol	Hasil gambar CT semakin jelas, akan tetapi terbentuk artefak di sekitar implan	
PLLA	0% 10% 15% 20%	Radiopasitas semakin meningkat dengan bertambahnya jumlah $BaSO_4$.	Ang, 2018
PMMA	10% 20%	Semakin tinggi konsentrasi $BaSO_4$, radiopasitas semakin	Makita, 2008

	30% 40%	meningkat dan gambar yang dihasilkan akan semakin jelas dan kontras (lampiran 5; lampiran 6)	
PVA	40%	Tabung PCL yang dikemas dengan mikrosfer dapat dengan jelas dilihat dari gambar x-ray (lampiran 7)	Thanoo, 1991

Berlawanan dengan peningkatan radiopasitas yang dihasilkan, barium sulfat menyebabkan penurunan kekuatan mekanik dari material dasar (Tabel 4.5). Penelitian yang dilakukan oleh Makita (2008) menunjukkan bahwa penambahan barium sulfat pada PMMA dengan konsentrasi 30% - 40% menyebabkan semen menjadi lebih rapuh karena terjadi penurunan kekuatan. Hal ini juga didukung oleh hasil penelitian yang dilakukan Baelani (2010), bahwa material yang mengandung barium sulfat menjadi semakin rapuh.

Tabel 4.5 Pengaruh konsentrasi $BaSO_4$ terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi $BaSO_4$ (%)	Kekuatan tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young	Elongation (%)	K_{IC} ($MPa.m^{½}$)	Referensi
PMMA	28	Kering: 142 Basah: 120	-	-	-		Chang, 1981
PLLA	0	-	69,1 ± 2,85	4,09 ± 0,11 GPa	15,4 ± 2,16		Ang, 2018
	5	-	97,5 ± 7,78	5,16 ± 0,05 GPa	11,5 ± 2,33		
	10	-	139 ± 7,30	6,22 ± 0,26 GPa	10,4 ± 3,30		
	15	-	146 ± 8,02	6,64 ± 0,17 GPa	8,31 ± 1,17		
	20	-	79,4 ± 4,54	4,47 ± 0,23 GPa	9,35 ± 1,76		
PMMA	10	85 ± 5	-	-	-		Makita, 2008
	20	86 ± 4	-	-	-		
	30	87 ± 8	-	-	-		
	40	69 ± 10	-	-	-		
PMMA	10	113,69 (3,42)	36,75 (4,10)	1983 (67)	2,33 (0,30)		Artola, 2003

Tabel 4.6 Pengaruh konsentrasi barium sulfat ($BaSO_4$) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi $BaSO_4$	Hasil biokompatibilitas	Referensi
PMMA	0%	pertumbuhan sel relatif: 0,9	Chang, 1981
	28 %	pertumbuhan sel relatif: 0,8	
PMMA	10%	terbentuk kapsul fibrotik di sekitar implan (lampiran 8)	Artola, 2003
Double Antibiotic Pastes (DAP)	0%	Biofilm bakteri: 6,18 (0,61)	Verma, 2018
	30%	Biofilm bakteri: 5,33 (0,27)	
PMMA	10%	Menghasilkan pembentukan osteoklas yang paling tinggi (lampiran 3)	Wang, 2005

Berdasarkan hasil dari beberapa penelitian, konsentrasi optimal penambahan barium sulfat sebagai material radiopak adalah 10%. Karena konsentrasi diatas 15% tidak menggambarkan jaringan lunak dengan tepat karena terbentuknya artefak, sebuah goresan atau zona gelap di antara objek (Tsutsumi, 2012). Selain itu, konsentrasi $BaSO_4$ yang terlalu tinggi akan menghasilkan material yang rapuh (Baelani, 2010). Hal ini terjadi karena terbentuknya aglomerasi yang menyebabkan distribusi tegangan yang tidak merata (Ang, 2017). Aglomerat $BaSO_4$ dalam matriks dianggap sebagai mikropori dan berperan dalam nukleasi retakan serta berpengaruh terhadap penurunan nilai *endurance limit* dan *fracture toughness* (Baelani 2010; Sabokbar, 1994). Dari sudut pandang biologis, barium sulfat memiliki efek antibakteri, namun respon inflamasi sel masih cukup tinggi, dibuktikan dengan terbentuknya kapsul fibrotik pada silinder PMMA yang mengandung 10% $BaSO_4$ (Verma, 2018; Artola, 2003). Senyawa terlarut $BaSO_4$ bersifat sitotoksik, sehingga paparan $BaSO_4$ dengan

waktu yang lebih lama dan dosis yang lebih besar dapat menyebabkan kematian sel fagositik yang telah mencerna $BaSO_4$ (Chang, 1981). Menurut Périard (2003), barium sulfat dapat menimbulkan efek samping dan komplikasi, meskipun masih terhitung jarang dan langka. Beberapa komplikasi yang cukup parah dan berpotensi mengancam jiwa, seperti keracunan barium, intubasi vagina, perforasi saluran pencernaan, serta hypervolemia. Sehingga, penambahan $BaSO_4$ harus memperhatikan arahan dan rekomendasi pabrik mengenai dosis.

4.1.3 Yodium

Polimer radiopak dapat dibuat dengan menambahkan material radiopak seperti bubuk logam berat dan garam anorganik dari unsur berat (Galperin, 2007). Selain pencampuran, polimer radiopak juga dapat diperoleh dengan melakukan sintesis monomer yang mengandung atom halogen yang terikat secara kovalen, seperti yodium (James, 2006). Jika kandungan yodium cukup tinggi, maka tidak perlu menambahkan material radiopak lain ke dalam biomaterial (Aldenhoff, 2002).

Tabel 4.7 Pengaruh konsentrasi kandungan yodium terhadap radiopasitas material polimer dan komposit

Material	Material radiopak	(%)	Nilai radiopasitas	Referensi
NVP	4IEMA	5	Semakin tinggi konsentrasi iodine pada hidrogel akan semakin jelas terlihat pada hasil x-ray (lampiran 9)	Boelen, 2005
		10		
		15		
		20		
HEMA	4IEMA	5		
		10		
		15		
		20		

PVA	4 - iodobenzoyl chloride	0.5	Terlihat jelas dan dapat dibedakan dengan vertebra serviks tikus (lampiran 10).	Mawad, 2008
PMMA	TIBMA	5% vol	Radiopasitas yang dihasilkan lebih homogen namun gambar yang dihasilkan tidak sebaik material radiopak inorganik (lampiran 11)	
	DISMA	5% vol		
Poly-MAOETIB	MAOETIB	1 mg/ml	16 ± 4 HU	Galperin, 2007
		2 mg/ml	42 ± 4 HU	
		4 mg/ml	115 ± 3 HU	
		8 mg/ml	185 ± 6 HU	
		16mg/ml	362 ± 1 HU	

Tabel 4.8 Pengaruh konsentrasi yodium terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit

Material	Material radiopak	Konsen-trasi	Kekuatan tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young (MPa)	Referensi
NVP	4IEMA	5%	Sedikit terdeformasi (lampiran 12A)	-	1	Boelen, 2005
		10%	sangat terdeformasi pada siklus pertama (lampiran 12A)	-	24	
		15%	Hasil N85 dan N80 tidak ditampilkan, tetapi dapat dibandingkan dengan N90, hanya tekanan maksimum yang lebih tinggi (6 MPa)	-	123	
		20%		-	250	
HEMA		5%	Sedikit terdeformasi (lampiran 12B)	-	3	
		10%	sangat terdeformasi pada siklus pertama (lampiran 12B)	-	13	

Material	Material radiopak	Konsen-trasi	Kekuatan tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young (MPa)	Referensi
NVP	4IEMA	-		-	0,6 (0,09)	Boelen, 2007
		6%				
HEMA	4IEMA	-		-	0,75 (0,01)	
		6%				
PMMA	4IEMA	-		Kering: 94 ± 2,9 basah: 79 ± 2,1	Kering: 2100 basah: 1800	Hooy-Corstjens, 2004
PMMA	TIBMA		Kering: 126,79 (1,42)	Kering: 45,78 (0,96)	Kering: 2330 (51)	Artola, 2003
		5%	Basah: 118,09 (3,84)	Basah: 43,10 (3,72)	Basah: 2048 (3.60)	
	DISMA		Kering: 128,64 (1,37)	Kering: 46,66 (2,30)	Kering: 2255 (164)	
		5%	Basah: 114,29 (2,25)	Basah: 43,32 (3,07)	Basah: 2114 (35)	

Tabel 4.9 Pengaruh konsentrasi kandungan yodium terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit

Material	Material radiopak	Konsen-trasi yodium	Hasil uji biokompatibilitas	Referensi
NVP	4IEMA	5% 10% 15% 20%	Sebagian permukaan mengandung sel hidup (hijau) dan hanya beberapa sel mati, menunjukkan bahwa hidrogel memiliki biokompatibilitas yang baik (lampiran 12).	Boelen, 2005
HEMA		5% 10%		
I-PVA		44%	Nilai rata-rata Hb sebelum embolisasi= 9,1 ± 1,1 g/dl setelah embolisasi= 8,9 ± 1,4 g/dl	Dudeck, 2006
PMMA	TIBMA	5%	- membran berserat yang terbentuk tipis - jaringan ikat membentuk jaringan di sekitar material yang kaya akan serat kolagen	Artola, 2003
	DISMA	5%		
PMMA	Iohexol (IHX)	10%	- Peningkatan osteoklas tidak jauh berbeda dengan PMMA tanpa penambahan (lampiran 2) - Pertumbuhan tulang (%): 26,8 ± 8,8	Wang, 2005
	Iodixanol (IDX)	10%	- Menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam pembentukan osteoklas (lampiran 2) - Pertumbuhan tulang (%): 31,3 ± 8,4	

Pada Tabel 4.9, kandungan yodium dalam PVA tidak memberikan respon toksik dari jaringan karena nilai rata-rata hemoglobin tidak berkurang secara signifikan serta membran berserat yang terbentuk tidak tebal karena respon sel inflamasi yang rendah, sebagai material implan hasil tersebut merupakan hal yang masih normal (Dudeck, 2006; Artola 2003). Berdasarkan Tabel 4.7 dan Tabel 4.8, monomer dengan 5% yodium yang terkandung di dalamnya, cukup menghasilkan radiopasitas yang memadai tanpa mengurangi kekuatan mekanik dari material dasarnya.

4.1.4 Bismuth Oksida (Bi_2O_3)

Beberapa penelitian mengenai penambahan bismuth oksida sebagai material radiopak disajikan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Pengaruh konsentrasi bismuth oksida (Bi_2O_3) terhadap radiopasitas material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi Bi_2O_3	Nilai radiopasitas	Referensi
Semen Portland	20%	4,902 ± 0.60 mmAl	Guerreiro-Tanomaru, 2014
Semen Portland	25%	6,04 mmAl	Hwang, 2009
Semen Portland	10%	3,25 mmAl	Antonijevic, 2013
	20%	5,50 mmAl	
	30%	6,85 mmAl	
Semen Portland	25%	6,81 mmAl	Kim, 2008
	16.67%	3,70 mmAl	
	12.5%	3,17 mmAl	
Semen Portland putih	10%	3,64 mmAl	Saliba, 2009
	15%	4,68 mmAl	
	20%	6,62 mmAl	
	25%	7,61 mmAl	
	30%	9,79 mmAl	

Tabel 4.11 Pengaruh konsentrasi Bi_2O_3 terhadap sifat mekanik material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi Bi_2O_3	Kekuatan tekan (MPa)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Young (GPa)	Elongasi (%)	Referensi
Semen Portland	0%	41,2				Tanomaru-Filho, 2012
	20%	22,9				
Silicone rubber	20 phr		8,0	6,8	550	El-Fiki, 2015
	40 phr		11,4	9,0	625	
	60 phr		12,9	10,2	725	
	80 phr		8,3	6,0	610	
Semen Portland Endodontik	10%	40,1 ± 114				Coomaraswamy, 2007
	20%	36,2 ± 7,6				
	30%	31,1 ± 5,2				
	40%	28,7 ± 4,5				
Semen Portland	0%	26,4				Camilleri, 2008
	25%	19,5				
Kalsium silikat	20%	21,82				Silva, 2014

Ditinjau dari kekuatan mekanik, penambahan bismuth oksida juga dapat mengakibatkan peningkatan maupun penurunan. Dari Tabel 4.11 disajikan data nilai kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus young, dan elongasi hasil penambahan bismuth oksida dengan konsentrasi yang berbeda dari beberapa penelitian yang telah dilakukan. Kemudian, gambar 4.2 merupakan perbandingan kekuatan tekan dari penambahan bismuth oksida dengan konsentrasi yang sama yaitu 20%. Berdasarkan grafik tersebut menunjukkan bahwa penambahan bismuth oksida menyebabkan penurunan kekuatan tekan.

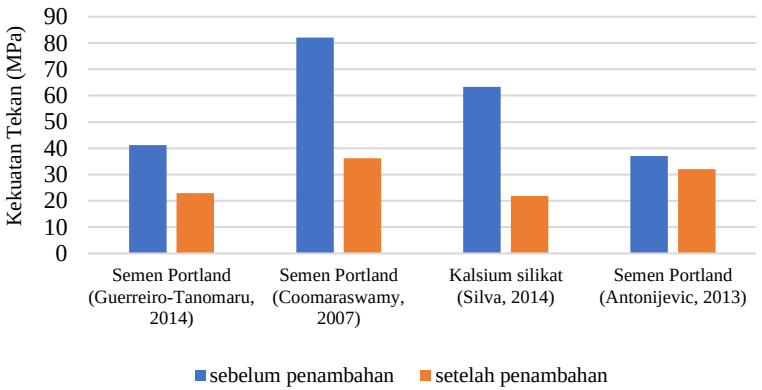
Keberadaan bismuth oksida dapat mengganggu mekanisme hidrasi dan menyebabkan cacat matriks pada struktur mikro, akibatnya terjadi peningkatan porositas dan ketahanan material berkurang (Guerreiro – Tanomaru, 2014; Silva, 2014). Pada penelitiannya, Antonijevic (2013) juga menjelaskan bahwa penurunan kekuatan tekan pada penambahan Bi_2O_3 terjadi karena peningkatan porositas pada semen yang disebabkan oleh partikel Bi_2O_3 yang cenderung membentuk aglomerasi.

Coomaraswamy (2007) pada menyatakan hubungan kekuatan tekan dengan porositas relatif dengan persamaan 4.1 dari yang telah dibuktikan oleh Takahashi (1997), dimana CS adalah kekuatan tekan, E_o adalah modulus material porositas nol, R adalah energy permukaan patah, c adalah ukuran cacat kritis, dan RP adalah relative porositas.

$$CS = \sqrt{\frac{E_o \cdot R}{\pi \cdot c}}\, e^{-const.\ RP} \qquad (4.1)$$

Jika konstanta material tidak berubah, maka persamaan 4.1 disederhanakan menjadi persamaan 4.2. Dari persamaan tersebut dapat disimpulkan bahwa material akan mengalami penurunan kekuatan tekan ketika porositas semakin meningkat.

$$\ln CS = \text{konstan} \cdot RP \qquad (4.2)$$



Gambar 4.2 Grafik perbandingan kekuatan tekan pada material sebelum dan setelah penambahan 20% Bi_2O_3

Tabel 4.12 menunjukkan pengaruh penambahan Bi_2O_3 terhadap biokompatibilitas pada material. Berdasarkan jurnal-jurnal yang disebutkan dalam Tabel 4.12, jika dibandingkan dengan material awal sebelum penambahan (lampiran 14 – 16), Bi_2O_3 dapat menyebabkan penurunan viabilitas sel dan peningkatan jumlah sel inflamasi. Akan tetapi, reaksi jaringan terhadap material yang mengandung Bi_2O_3 tersebut hampir sama dan tidak menunjukkan adanya infeksi karena respon inflamasi yang masih dalam kategori reaksi ringan (Hwang, 2009). Dengan demikian, bismuth oksida termasuk material radiopak yang biokompatibel untuk digunakan.

Tabel 4.12 Pengaruh konsentrasi bismuth oksida (Bi_2O_3) terhadap biokompatibilitas material polimer dan komposit

Material	Konsentrasi Bi_2O_3	Hasil biokompatibilitas	Referensi
Semen Portland	25%	Respon inflamasi masih dalam kategori reaksi ringan (lampiran 14)	Hwang, 2009
Semen kalsium silikat	30%	Jumlah sel inflamasi jauh lebih tinggi daripada kalsium silikat tanpa penambahan Bi_2O_3	Silva, 2014
Semen Portland	25% 16,67% 12,5%	Persentase viabilitas sel meningkat setelah 48 jam dan 72 jam akan tetapi tidak lebih tinggi dari MTA dan PC (lampiran 16)	Kim, 2008

Jika dibandingkan dengan zirkonium oksida, barium sulfat, dan yodium, bismuth oksida menghasilkan radiopasitas yang paling tinggi dan jauh dari standar yang telah ditetapkan. Namun, bismuth oksida menyebabkan porositas sehingga menyebabkan penurunan stabilitas mekanik (Silva, 2014; Coomaraswamy, 2007). Ukuran dan bentuk partikel dapat mempengaruhi daya serap air suatu material. Partikel yang sangat halus lebih mudah menyerap air, namun menyebabkan penurunan radiopasitas (Coomaraswamy, 2008).

4.2 Pembahasan

Berdasarkan analisis data yang telah dilakukan, kemudian pembahasan akan dijelaskan pada sub-subab berikut:

4.2.1 Pengaruh Penambahan Material Radiopak terhadap Radiopasitas

Penambahan zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida sebagai material radiopak, terbukti dapat meningkatkan radiopasitas pada material polimer maupun komposit. Peningkatan radiopasitas yang dihasilkan tergantung pada konsentrasi penambahannya, semakin tinggi kandungan material radiopak, maka radiopasitas yang dihasilkan juga semakin tinggi. Selain itu, jenis material yang digunakan juga berpengaruh terhadap radiopasitas yang dihasilkan. Dilihat dari persamaan 2.1, bahwa penyerapan sinar-x sebanding dengan jumlah atom, oleh karena itu, elemen dengan nomor atom tinggi sering digunakan untuk mendapatkan radiopasitas pada material karena memiliki kemampuan penyerapan sinar-x yang cukup tinggi (Davy, 1982; Ackerman, 1982). Perbandingan dari jenis material radiopak yang telah dijelaskan sebelumnya, disajikan pada Tabel 4.13.

Pada beberapa penelitian mengenai penambahan barium sulfat dan yodium terhadap radiopasitas, data hasil pengujian dinyatakan dalam bentuk data kualitatif atau berupa gambar hasil pemindaian sinar-x, sedangkan nilai radiopasitas dari penambahan zirkonium oksida dan bismuth oksida dinyatakan dalam bentuk kuantitatif. Hal ini membuat radiopasitas dari empat jenis material radiopak tersebut sulit untuk dibandingkan. Namun, berdasarkan standar ASTM F640 tentang standar pengujian radiopasitas untuk aplikasi medis, tidak ada nilai radiopasitas minimal yang ditetapkan melainkan disesuaikan dengan kebutuhan untuk penggunaannya, termasuk untuk aplikasi penggantian *nucleus pulposus*.

Tabel 4.13 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap radiopasitas material

Material radiopak	Referensi	Radiopasitas
ZrO_2	Guerreiro-Tanomaru, 2014	Semua material dengan penambahan ZrO_2 mengalami peningkatan radiopasitas sebesar 2,34%. Nilai radiopasitas tertinggi yang dihasilkan adalah 4,45 mmAl pada material semen Portland.
$BaSO_4$	Tsutsumi, 2012	Radiopasitas material polimer semakin meningkat dengan penambahan $BaSO_4$. Akan tetapi, terbentuk artefak di sekitar implan pada penambahan barium sulfat dengan konsentrasi >15%
Yodium	Boelen, 2005; Mawad, 2008	Semakin tinggi kandungan yodium, gambar yang dihasilkan semakin kontras. Sebanyak 5% yodium, cukup menghasilkan radiopasitas yang memadai.
Bi_2O_3	Saliba, 2009	Semua material dengan penambahan ZrO_2 mengalami peningkatan radiopasitas sebesar 2,87%. Nilai radiopasitas tertinggi yang dihasilkan adalah 9,79 mmAl pada material semen Portland.

4.2.2 Pengaruh Penambahan Material Radiopak terhadap Sifat Mekanik dan Biokompatibilitas

Selain radiopasitas, kekuatan material kandidat material yang akan digunakan sebagai prostesis untuk pengganti *nucleus pulposus* juga harus menyesuaikan kekuatan mekanik asli *nucleus pulposus* yang ditunjukkan pada Tabel 2.1. Pada sejumlah penelitian, penambahan material radiopak juga mengakibatkan

perubahan pada sifat mekanik material, baik peningkatan maupun penurunan. Pada *paper review* ini, sifat mekanik yang dibandingkan adalah kekuatan tekan, kekuatan tarik, dan modulus Young untuk kemudian disesuaikan dengan kriteria *nucleus pulposus*.

Tabel 4.14 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap sifat mekanik material

Material matriks	Material radiopak	Konsen-trasi material radiopak	Kekuatan Tekan (MPa)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Young (MPa)	Referensi
Kriteria NP			0,091–2,3	1,56–2,57	0,649	Newell, 2017; Cortes, 2013; Umehara, 1996
Semen Portland	ZrO_2	10%	35			Antonijevic, 2013;
PVA		2%		29,02	2,39	Krishnamoorthy, 2011
PMMA	$BaSO_4$	40%	69			Makita, 2008
PMMA		10%		36,75		Artola, 2003
PLLA		20%			4.47	Ang, 2018
PMMA	Yodium	5%	118,09	43,10		Artola, 2004
NVP		6%			0,6	Boelen, 2007
Semen Portland	Bi_2O_3	25%	19,5			Camilleri, 2008
Silicone rubber		60phr		12,9		El-Fiki, 2015
Silicone rubber		80phr			6	El-Fiki, 2015

Dari pembahasan beberapa jurnal penelitian sebelumnya mengenai pengaruh penambahan material radiopak terhadap sifat mekanik material, kemudian diambil nilai terendah untuk dibandingkan dengan sifat mekanik yang dibutuhkan *nucleus*

pulposus, seperti yang disajikan pada Tabel 4.14. Dapat dilihat bahwa hampir seluruh referensi yang dibahas tidak memenuhi kriteria *nucleus pulposus*, yang mendekati kriteria hanya nilai modulus Young pada material radiopak yodium yaitu sebesar 0,6 MPa dari penelitian yang dilakukan oleh Boelen (2007) mengenai hidrogel radiopak untuk pengganti *nucleus pulposus* yang menggunakan material kopolimer *N*-vinyl-2-pyrrolidinone (NVP) dan 2-(4'iodobenzoyl)-oxo-ethyl methacrylate (4IEMA) dengan rasio molar NVP:4IEMA = 94:6.

Kemudian berdasarkan beberapa penelitian yang telah dibahas, untuk dapat membandingkan pengaruh material radiopak pada sifat mekanik secara keseluruhan, maka perbandingan dinyatakan dalam bentuk persentase perubahan nilai kekuatan. Persentase diperoleh melalui perhitungan rasio selisih kekuatan awal dan akhir dengan kekuatan awal lalu dikali 100%, kemudian hasil perhitungan disajikan ke dalam Tabel 4.15. Nilai negatif pada tabel menunjukkan terjadinya penurunan nilai, sedangkan positif menunjukkan terjadi kenaikan nilai. Penurunan kekuatan tekan terjadi pada penambahan zirkonium oksida, barium sulfat, dan bismuth oksida. Hal ini dapat disebabkan karena partikel yang tidak terdispersi secara homogen, kemudian membentuk aglomerat pada matriks dan juga menyebabkan porositas (Nugroho, 2016; Silva, 2014). Seperti pada persamaan 4.2 yang menunjukkan bahwa semakin tinggi porositas terjadi, maka kekuatan material akan semakin turun (Coomaraswamy, 2007). Walaupun demikian, kekuatan material masih jauh lebih tinggi daripada yang dibutuhkan. Hal ini karena kekuatan mekanik yang dimiliki material dasar terlalu tinggi, sehingga tidak cocok untuk digunakan menjadi pengganti *nucleus pulposus*.

Tabel 4.15 Persentase rata-rata perubahan nilai sifat mekanik material dari penambahan material radiopak

Material radiopak	Persentase kenaikan rata-rata		
	Kekuatan Tekan	Kekuatan Tarik	Modulus Young
ZrO_2	-0,096%	0,786%	0,683%
$BaSO_4$	-0,017%	0,510%	0,375%
Yodium	0,110%	0,035%	2,878%
Bi_2O_3	-0,392%	0,360%	0,240%

Tabel 4.16 Perbandingan pengaruh material radiopak terhadap biokompatibilitas material

Material radiopak	Biokompatibilitas
ZrO_2	Laju pertumbuhan sel sebanding dengan sampel kontrol, respon inflamasi lebih rendah daripada bismuth oksida, pembentukan osteoklas meningkat
$BaSO_4$	Terjadinya penurunan laju pertumbuhan sel, respon inflamasi masih cukup tinggi karena zat terlarut yang bersifat sitotoksik. Namun memiliki efek antibakteri dan pembentukan osteoklas yang lebih tinggi dibandingkan ZrO_2
Yodium	Tidak memberikan respon toksik dari jaringan dibuktikan dari tidak terjadi penurunan yang signifikan pada nilai haemoglobin, serta meningkatkan pembentukan osteoklas
Bi_2O_3	Respon inflamasi lebih tinggi daripada ZrO_2 namun masih dalam kategori ringan, terjadi peningkatan persentase viabilitas sel setelah 48 jam dan 72 jam

Kriteria berikutnya yang harus dimiliki oleh material implan adalah memiliki kesesuaian dengan tubuh manusia (biokompatibel). Berdasarkan analisis data, kemudian diperoleh perbandingan mengenai pengaruh penambahan material radiopak terhadap biokompatibilitas material seperti yang tertera pada Tabel 4.16. Pengujian biokompatibilitas yang dilakukan pada masing –

masing jurnal berbeda, akan tetapi keempat jenis material radiopak yang telah disebutkan menunjukkan biokompatibilitas yang cukup baik. Namun pada $BaSO_4$, zat terlarut yang dapat menyebabkan kematian pada sel fagositik untuk waktu yang lebih lama dan dosis yang lebih besar. Begitu juga dengan Bi_2O_3 yang memiliki respon inflamasi lebih tinggi daripada ZrO_2, walaupun respon inflamasi sel masih tergolong ringan (Silva, 2014; Hwang, 2009).

Ditinjau dari radiopasitas dan biokompatibilitas, zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida dapat digunakan sebagai material radiopak untuk kandidat material pengganti *nucleus pulposus*. Akan tetapi, karena penambahan material radiopak tersebut mempengaruhi sifat mekanik, sehingga pemilihan material dan penentuan konsentrasi yang akan digunakan perlu menjadi pertimbangan untuk menghasilkan material yang sesuai dengan kebutuhan *nucleus pulposus*.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida sebagai material radiopak dapat meningkatkan radiopasitas material dengan konsentrasi penambahan sedikitnya 10%. Sedangkan yodium dengan kandungan 5%, mampu menghasilkan visualisasi gambar yang cukup jelas. Sehingga, material radiopak tersebut dapat digunakan untuk memberikan radiopasitas pada kandidat material pengganti *nucleus pulposus*.
2. Penambahan zirkonium oksida, barium sulfat, yodium, dan bismuth oksida sebagai material radiopak mempengaruhi sifat mekanik material. Oleh karena itu, hal yang perlu menjadi pertimbangan untuk material pengganti nucleus pulposus adalah kombinasi material yang akan digunakan beserta konsentrasinya, agar material yang dihasilkan sesuai dengan kriteria *nucleus pulposus*. Selain itu, keempat jenis material radiopak memiliki biokompatibilitas yang cukup baik, namun kemungkinan munculnya efek samping yang disebabkan oleh zat terlarut dari material radiopak juga perlu menjadi pertimbangan dalam penentuan konsentrasi.

5.2 Saran

Adapun saran pada *paper review* ini adalah sebagai berikut:

1. Karena analisis pada laporan ini berupa *paper review*, sehingga perlu dilakukan eksperimen mengenai kandidat material pengganti *nucleus pulposus*
2. Meninjau sifat dasar dari material yang akan digunakan sebagai kandidat material pengganti *nucleus pulposus*, baik matriks maupun material radiopak beserta konsentrasi campurannya

3. Menganalisis pengaruh penambahan material radiopak terhadap sifat fisik pada kandidat material pengganti *nucleus pulposus*
4. Menganalisis pengaruh penambahan material radiopak terhadap laju degradasi material untuk mengetahui umur pakai material pengganti *nucleus pulposus*

DAFTAR PUSTAKA

Ackerman, J. 1982. **Radiopaque** dalam **Encyclopedia of Chemical Technology 3rd Ed**. New York: John Wiley & Sons.

Adams, M. A., dan Roughley, P. J. 2006. "What is Intervertebral Disc Degeneration, and What Causes It?". **Spine**, 31(18), 2151-2161.

Aldenhoff, Y. B., Kruft, M. A. B., Pijpers, A. P., van der Veen, F. H., Bulstra, S. K., Kuijer, R., dan Koole, L. H. 2002. "Stability of Radiopaque Iodine-Containing Biomaterials". **Biomaterials**, 23(3), 881-886.

Allen, C., Ledet, E., Yuan, H., dan Sharan, A. 2004. "New Developments in Nucleus Pulposus Replacement Technology". **The Spine Journal** 4, 325S-329S.

Anderson, D. Greg, dan Chadi, Tannoury. 2005. "Molecular Pathogenic Factors in Symptomatic Disc Degeneration". **The Spine Journal**, 260-266.

Ang, H. Y., Toong, D., Chow, W. S., Seisilya, W., Wu, W., Wong, P., dan Huang, Y. 2018. "Radiopaque Fully Degradable Nanocomposites for Coronary Stents". **Scientific Reports**, 8(1), 1-14.

Antonijevic, D., Medigovic, I., Zrilic, M., Jokic, B., Vukovic, Z., dan Todorovic, L. 2014. "The Influence of Different Radiopacifying Agents on the Radiopacity, Compressive Strength, Setting Time, and Porosity of Portland Cement". **Clinical Oral Investigations**, 18(6), 1597-1604.

Artola, A., Gurruchaga, M., Vazquez, B., San Roman, J., dan Goni, I. 2003. "Elimination of Barium Sulphate from Acrylic Bone Cements. Use of Two Iodine-Containing Monomers". **Biomaterials**, 24(22), 4071-4080.

ASTM International. 2000. "Standar Test Methods for Radiopacity of Plastics for Medical Use". **ASTM F640 – 79**.

Baleani, M., dan Viceconti, M. 2011. "The Effect of Adding 10% of Barium Sulphate Radiopacifier on the Mechanical Behaviour of Acrylic Bone Cement". **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 34(5), 374-382.

Bao, Q. B., dan Yuan, H.A. 2000. "Artificial Disc Technology". **Neurosurg Focus** Volume 9, 1-7.

Boelen, E. J., Hooy-Corstjens, C. S., Bulstra, S. K., Ooij, A. v., Rhijn, L. W., dan Koole, L. H. 2005. "Intrinsically Radiopaque Hydrogels for Nucleus Pulposus Replacements". **Biomaterials** 26, 6674-6683.

Boelen, E. J., Koole, L. H., van Rhijn, L. W., dan van Hooy-Corstjens, C. S. 2007. "Towards a Functional Radiopaque Hydrogel for Nucleus Pulposus Replacement". **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, 83(2), 440-450.

Bowles, R.D., dan Bonassar, L.J. 2011. **Intervertebral Disc** dalam Ducheyne, Paul. **Comprehensive Biomaterial**. USA: Elsevier Ltd.

Boxberger, J. I., Sen, S., Yerramalli, C. S., dan Elliott, D. M. 2006. "Nucleus Pulposus Glycosaminoglycan Content is Correlated with Axial Mechanics in Rat Lumbar Motion Segments". **Journal of Orthopaedic Research**, 24(9), 1906-1915.

Camilleri, J. 2008. "The Physical Properties of Accelerated Portland Cement for Endodontic Use". **International Endodontic Journal**, 41(2), 151-157.

Causa, F., Manto, L., Borzacchiello, A., De Santis, R., Netti, P. A., Ambrosio, L., dan Nicolais, L. 2002. "Spatial And Structural Dependence of Mechanical Properties of Porcine Intervertebral Disc". **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, 13(12), 1277-1280.

Chang, P.I. 1981. "Polymer implant materials with Improve X-Ray Opacity and Biocompatibility". **Biomaterials** Vol 2.

Coleman, N.J., dan Li, Q. 2012. "The Impact of Zirconium Oxide Radiopacifier on the Early Hydration Behaviour of White

Portland Cement". **Materials Science and Engineering C**, 33(1), 427-433.

Collares, F. M., Klein, M., Santos, P. D., Portella, F. F., Ogliari, F., Leitune, V. C. B., dan Samuel, S. M. W. 2013. "Influence of Radiopaque Fillers on Physicochemical Properties of a Model Epoxy Resin-Based Root Canal Sealer". **Journal of Applied Oral Science**, 21(6), 533-539.

Coomaraswamy, K. S., Lumley, P. J., dan Hofmann, M. P. 2007. "Effect of Bismuth Oxide Radioopacifier Content on the material properties of an Endodontic Portland Cement–Based (MTA-Like) System". **Journal of Endodontics**, 33(3), 295-298.

Cortes, D. H., Jacobs, N. T., DeLucca, J. F., dan Eliott, D. M. 2013. "Elastic, Permeability and Swelling Properties of Human Intervertebral Disc Tissues: A Benchmark for Tissue Engineering". **Journal of Biomechanics**, 1-7.

Coventry, M. B., Ghormley, R. K., dan Kernohan, J. W. 1945. "The intervertebral disc: Its microscopic anatomy and pathology: Part I. Anatomy, development, and physiology". **The Journal of Bone and Joint Surgery** 27(1), 105-112.

Cramer, G. D. 2014. **General Characteristics of the Spine** dalam Cramer, G. D. dan Darby, S. A. **Clinical Anatomy of the Spine, Spinal Cord, and Ans**. Mosby.

Darmawan, J., Valkenburg, H. A., Muirden, K. D., dan Wigley, R. D. 1992. "Epidemiology of Rheumatic Diseases in Rural and Urban Populations in Indonesia: A World Health Organisation International League Against Rheumatism COPCORD Study, Stage I, Phase 2". **Annals of the Rheumatic Diseases**, 51(4), 525-528.

Davy, K., dan BE, C. 1982. **Radiopaque Denture Base: A New Acrylic Co-Polymer**. 254-264.

de Azevedo Gonç, R. C., dan da Silva, E. O. 2018. "Effect of the Addiction of Metal Oxide Nanoparticles on the Physical, Chemical and Thermal Properties of PVA Based

Nanocomposites". **Materials Sciences and Applications**, 9(5), 473-488.

Deros, Baba Md., Daruis, Dian D.I., Ismail, A.R., dan Rahim, Ahmad R.A., Januari 2010. "Work Posture and Back Pain Evaluation in a Malaysian Food Manufacturing Company". **American Journal of Applied Science** 7(4), 473-479.

El-Fiki, S., El Kameesy, S. U., Nashar, D. E., Abou-Leila, M. A., El-Mansy, M. K., dan Ahmed, M. 2015. "Influence of Bismuth Contents on Mechanical and Gamma Ray Attenuation Properties of Silicone Rubber Composite". **International Journal of Advanced Research**, 3(6), 1035-1041.

Fowler, B. A., Sullivan Jr, D. W., dan Sexton, M. J. 2015. **Bismuth**. dalam **Handbook on the Toxicology of Metals**. Academic Press.

Galperin, A., Margel, D., Baniel, J., Dank, G., Biton, H., dan Margel, S. 2007. Radiopaque Iodinated Polymeric Nanoparticles for X-Ray Imaging Applications". **Biomaterials**, 28(30), 4461-4468.

Ge, Q. 2012. **Synthesis and Characterization of Mesoporous Zirconia Nanocomposite Using Self-Assembled Block Copolymer Template.** Ames: Iowa State University Digital Repository.

Guerreiro-Tanomaru, J. M., Storto, I., da Silva, G. F., Bosso, R., Costa, B. C., Bernardi, M. I. B., dan Tanomaru-Filho, M., 2014. "Radiopacity, pH and Antimicrobial Activity of Portland Cement Associated with Micro-and Nanoparticles of Zirconium Oxide and Niobium Oxide". **Dental Materials Journal**.

Guerreiro-Tanomaru, J. M., Trindade-Junior, A., Cesar Costa, B., da Silva, G. F., Drullis Cifali, L., Basso Bernardi, M. I., dan Tanomaru-Filho, M. 2014. "Effect of Zirconium Oxide and Zinc Oxide Nanoparticles on Physicochemical

Properties and Antibiofilm Activity of a Calcium Silicate-Based Material". **The Scientific World Journal**.

Guo, X. 2008. "Radiopaque, Barium Sulfate-Filled Biomedical Compounds of a Poly (ether-block-amide) Copolymer" **Journal of Applied Polymer Science**, 109(6), 4015-4024.

Handa, R. 2019. "Low Back Pain - Myths and Facts." **Journal of Clinical Orthopedics and Trauma** 10, 828-830.

Hincapié, C. M. B., Cárdenas, M. J. P., Orjuela, J. E. A., Parra, E. R., dan Florez, J. J. O. 2012. "Physical-Chemical Properties Of Bismuth And Bismuth Oxides: Synthesis, Characterization And Applications". **Dyna**, 79(176), 139-148

Hultzsch, S. 2015. **Drugs during Pregnancy and Lactation**. Academic Press.

Hwang, Y. C., Lee, S. H., Hwang, I. N., Kang, I. C., Kim, M. S., Kim, S. H., dan Oh, W. M. 2009. "Chemical Composition, Radiopacity, and Biocompatibility of Portland Cement with Bismuth Oxide. **Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology**, 107(3), e96-e102.

Iatidris, J.C., Kumar, S., dan Foster, R.J. 1999. "Shear Mechanical Properties of Human Lumbar Annulus Fibrosus". **Journal of Orthopaedic Research**, 17(5), 732-737.

ILO International Chemical Safety Cards (ICSC). ----. **Barium Sulfate**. <URL: https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_version=2&p_card_id=0827>

James, N.R., Philip, J., dan Jayakrishnan, A., 2006. "Polyurethanes with Radiopaque Properties". **Biomaterials**, 27, 160-166.

Kim, E. C., Lee, B. C., Chang, H. S., Lee, W., Hong, C. U., dan Min, K. S. 2008. "Evaluation of the Radiopacity and Cytotoxicity of Portland Cements Containing Bismuth Oxide". **Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology**, 105(1), e54-e57.

Krishnamoorthy, K., Natarajan, S., Kim, S.-J., dan Kadarkaraithangam, J. 2011. "Enhancement in Thermal and Tensile Properties of ZrO_2/Poly(vinyl Alcohol) Nanocomposite Film". **Material Express**, 329-334.

Lewis, G., van Hooy-Corstjens, C. S., Bhattaram, A., dan Koole, L. H. 2005. "Influence of the Radiopacifier in an Acrylic Bone Cement on Its Mechanical, Thermal, and Physical Properties: Barium Sulfate-Containing Cement Versus Iodine-Containing Cement". **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, 73(1), 77-87.

Lewis, R.J. Sr. 2004. **Sax's Dangerous Properties of Industrial**

Lide, D.R. 2008. **Handbook of Chemistry and Physics 88TH E dition**. CRC Press.

Lusic, H., dan Grinstaff, M. W. 2013. "X-Ray-Computed Tomography Contrast Agents". **Chemical reviews**, 113(3), 1641-1666.

Lusic, H., dan Grinstaff, M. W. 2013. "X-ray-Computed Tomography Contrast Agents". **Chemical Reviews**, 113(3), 1641-1666.

Lyday, P. A., dan Kaiho, T. 2000. **Iodine and Iodine Compounds**. New York: John Wiley & Sons.

Maharty, Donald C., 2012. **The History of Lower Back Pain** dalam Manusov, Eron G. **Primary Care: Clinics in Office Practice Volume 39, Number 3**. Philadelphia: Elsevier Inc.

Makita, M., Yamakado, K., Nakatsuka, A., Takaki, H., Inaba, T., Oshima, F., dan Takeda, K. 2008. "Effects of Barium Concentration on the Radiopacity and Biomechanics of Bone Cement: Experimental Study". **Radiation Medicine**, 26(9), 533-538.

Manicone, P. F., Iometti, P. R., dan Rafaelli, L. 2007. "An Overview of Zirconia Ceramics: Basic Properties and Clinical Application". **Journal of Dentistry**, 35, 819-826.

Marins, N. H., Meereis, C. T., Silva, R. M., Ruas, C. P., Takimi, A. S., Carreño, N. L., dan Ogliari, F. A. 2018. "Radiopaque Dental Adhesive with Addition of Niobium Pentoxide Nanoparticles". **Polymer Bulletin**, 75(6), 2301-2314.

Materials 11th Edition. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, Wiley & Sons, Inc. Hoboken, NJ.

Mawad, D., Poole-Warren, L. A., Martens, P., Koole, L. H., Slots, T. L., dan Hooy-Corstjens, C. S. 2008. "Synthesis and Characterization of Radiopaque Iodine-containing Degradable PVA Hydrogels". **Biomacromolecules**, 263-268.

Meakin, J. R., dan Hukins, D. W. 2001. "Replacing the Nucleus Pulposus of the Intervertebral Disk: Prediction of Suitable Properties of a Replacement Material Using Finite Element Analysis". **Journal of Materials Science: Materials in Medicine**, 12, 207-213.

Mochida, J., Sakai, D., Nakamura, Y., Watanabe, T., Yamamoto, Y., dan Kato, S. 2015. "Intervertebral Disc Repair With Activated Nucleus Pulposus Cell Transplanation: A Three-Year, Prospective Clinical Study". **European Cells and Materials** vol. 29, 202-212.

Mottu, F., Rufenacht, D. A., dan Doelker, E. 1999. :Radiopaque Polymeric Materials for Medical Application Current Aspects of Biomaterial Research". **Investigate Radiology** vol. 34 no. 5.

Nerukar, N. L., Elliot, D.M., dan Mauck, R.L. 2010. "Mechanical Design Criteria for Intervertebral Disc Tissue Engineering". **Journal of Biomechanics**, 43, 1017-1030.

Newell, N., Little, J., Christou, A., Adams, M., Adam, C., dan Masouros, S. 2017. "Biomechanics of the Human Intervertebral Disc: A Review of Testing Techniques and Results". **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical**, 420-434.

Nugroho, F. 2016. "Studi Pengaruh Proses Manufaktur Komposit Bermatrik Epoksi Terhadap Kekuatan Tarik dan Impak

pada Komposit Hybrid Berpenguat Serbuk Kayu Albasia dan Serat Gelas". Dalam *Seminar Nasional SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta* (Vol. 2, pp. 41-47).

Ochoa-Rodríguez, V. M., Tanomaru-Filho, M., Rodrigues, E. M., Guerreiro-Tanomaru, J. M., Spin-Neto, R., dan Faria, G. 2019. "Addition of Zirconium Oxide to Biodentine Increases Radiopacity and Does Not Alter Its Physicochemical and Biological Properties". **Journal of Applied Oral Science**, 27.

Oskarsson, A. 2014. **Barium** dalam Nordberg, G. F., Fowler, B. A., dan Nordberg, M. **Handbook on the Toxicology of Metals**. Academic press.

Périard, M. A. 2003. "Adverse Effects and Complications Related to the Use of Barium Sulphate Contrast Media for Radiological Examinations of the Gastrointestinal Tract: A Literature Review". **Canadian Journal of Medical Radiation Technology**, 34(3), 3-9.

Périé, D., Korda, D., dan Iatridis, J. C. 2005. "Confined Compression Experiments on Bovine Nucleus Pulposus and Annulus Fibrosus: Sensitivity of the Experiment in the Determination of Compressive Modulus and Hydraulic Permeability". **Journal of Biomechanics**, 38(11), 2164-2171.

Saliba, E., Abbassi-Ghadi, S., Vowles, R., Camilleri, J., Hooper, S., dan Camilleri, J. 2009. 'Evaluation of the Strength and Radiopacity of Portland Cement with Varying Additions of Bismuth Oxide". **International Endodontic Journal**, 42(4), 322-328.

Shah, Salvi dan Davi, B. 2012. "Prevalence of Low Back Pain and Its Associated Risk Factors among Doctors in Surat". **International Journal of Health Sciences & Research**, vol. 2, issue 1, 91–102.

Shanmugam, K., dan Sahadevan, R. 2018. **Bioceramics–An Introductory Overview** dalam Thomas, S., Balakrishnan,

P., dan Sreekala, M. S. (Eds.). **Fundamental Biomaterials: Ceramics**. Woodhead Publishing

Sharan, A. D., Qiu, X., Chan, F., Tang, S. Y., dan Vaccaro, A. R. 2013. **Anatomy and Structure of The Intervertebral Disc** dalam Sharan, A. D. **Basic Science of Spinal Diseases.** New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publishers (P) Ltd.

Silva, G. F., Bosso, R., Ferino, R. V., Tanomaru-Filho, M., Bernardi, M. I., Guerreiro-Tanomaru, J. M., dan Cerri, P. S. 2014. "Microparticulated and Nanoparticulated Zirconium Oxide Added to Calcium Silicate Cement: Evaluation of Physicochemical and Biological Properties". **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, 102(12), 4336-4345.

Smid, J., Cabasso, I., Rawls, H. R., Obligin, A., Delaviz, Y., Sahni, S. K., dan Zhang, Z.-X. 1987. "Novel Homogeneous Polymer - Heavy Metal Salt Complexes for X-Ray Imaging". **Makromolekulare Chemie, Rapid Communications**, 543-547.

Speck, U. 2018. **X-Ray Contrast Media: Overview, Use and Pharmaceutical Aspects**. Springer Nature.

Swetha, dan Shashikala. 2008. "Comparative Evaluation of Radiopacity of Three Root Canal Sealers Using Conventional and Digital Radiographic Technique: An Invitro Study". **Endodontology**, 51-56.

Szostak, K., Ostaszewski, P., Pulit-Prociak, J., dan Banach, M. 2019. "Bismuth Oxide Nanoparticles in Drug Delivery Systems". **Pharmaceutical Chemistry Journal**, 53(1), 48-51.

Tang, S. Y. 2017. **Natural Composites: The Structure-function Relationships of Bone, Cartilage, Tendon/Ligament, and The Intervertebral Disc** dalam **Biomedical Composites** (hal. 1-16). Elsevier Ltd.

Tanomaru-Filho, M., Morales, V., da Silva, G. F., Bosso, R., Reis, J., Duarte, M. A., dan Guerreiro-Tanomaru, J. M. 2012.

"Compressive Strength and Setting Time of MTA and Portland Cement Associated with Different Radiopacifying Agents". **ISRN Dentistry**, 2012.

Tanzi, M. C., Farè, S., dan Candiani, G. 2019. **Foundations Of Biomaterials Engineering**. Academic Press.

Thanoo, B. C., Sunny, M. C., dan Jayakrishnan, A. 1991. "Preparation and Properties of Barium Sulphate and Methyl Iothalamate Loaded Poly(vinyl Alcohol) Microspheres as Radiopaque Particulate Emboli". **Journal of Applied Biomaterials**, 2(2), 67-72.

The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 2016. **Barium Sulfat**. <URL: https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0047.html>

Thomas, J., Lowman, A., dan Marcolongo, M. 2003. "Novel Associated Hydrogels for Nucleus Pulposus Replacement". **Journal of Biomedical Material Research**, 1329-1337.

Tian, L., Lu, L., Feng, J., dan Melancon, M. P. 2018. "Radiopaque Nano and Polymeric Materials for Atherosclerosis Imaging, Embolization and Other Catheterization Procedures". **Acta Pharmaceutica Sinica B**, 1-11

Tsoi, J. K. 2019. **Ceramic Materials in Dentistry** dalam Khurshid, Z., Najeeb, S., Zafar, M. S., dan Sefat, F. **Advanced Dental Biomaterials**. Woodhead Publishing.

Tsutsumi, T. 2012. "CT Study of Radiopaque Implant Template for Gingival Form". **International Journal of Oral-Medical Sciences**, 10(4), 330-335.

Umehara, Shinji, Tadano, S., Abumi, K., Katagiri, K., Kaneda, K., dan Ukai, T. 1996. "Effects of Degeneration on the Elastic Modulus Distribution in the Lumbar Intervertebral Disc". **Spine**, 21(7), 811-820.

Urban, J. P., dan Roberts, S. 2003. "Degeneration of the Intervertebral Disc". **Arthritis Research & Therapy**, 5(3), 120.

van Hooy-Corstjens, C. S., Govaert, L. E., Spoelstra, A. B., Bulstra, S. K., Wetzels, G. M., dan Koole, L. H. 2004. "Mechanical Behaviour of a New Acrylic Radiopaque Iodine-Containing Bone Cement". **Biomaterials**, 25(13), 2657-2667.

Wang, J. S., Diaz, J., Sabokbar, A., Athanasou, N., Kjellson, F., Tanner, K. E., McCarthy, I. D., dan Lidgren, L. 2005. "In Vitro and In Vivo Biological Responses to a Novel Radiopacifying Agent for Bone Cement". **Journal of the Royal Society Interface**, 2(2), 71-78.

(*Halaman ini sengaja dikosongkan*)

LAMPIRAN

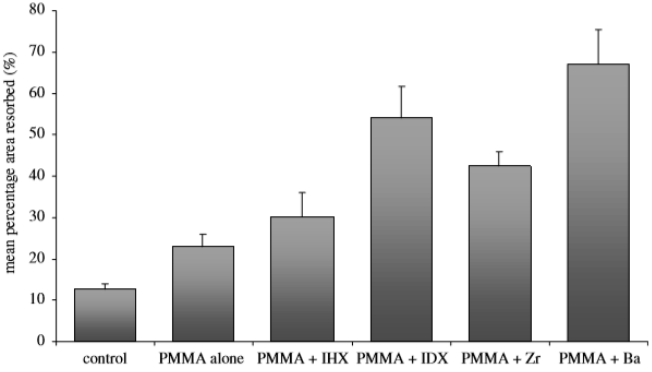
Lampiran 1

Hasil uji biokompatibilitas dalam kultur sel untuk PMMA dengan kandungan filler ZrO_2 (Chang, 1981)

Sampel	*Percent of initial cell attachment*	Laju pertumbuhan sel relatif
PMMA/ZrO_2	102	0.92
PMMA	89	0.90
Kontrol	100	1.00

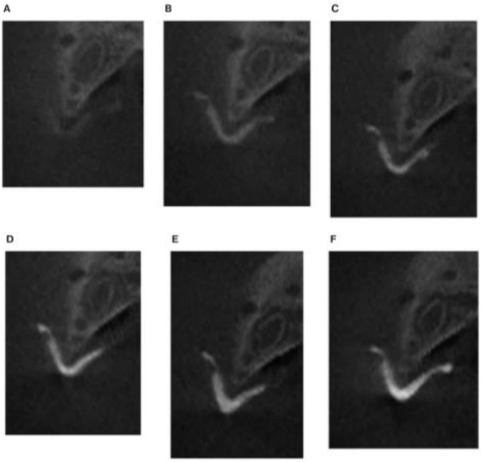
Lampiran 2

Jumlah dentin yang diserap oleh sel-sel mononuklear darah perifer dikultur dengan PMMA tanpa partikel atau partikel semen tulang yang mengandung material radiopak berbeda (Wang, 2005)



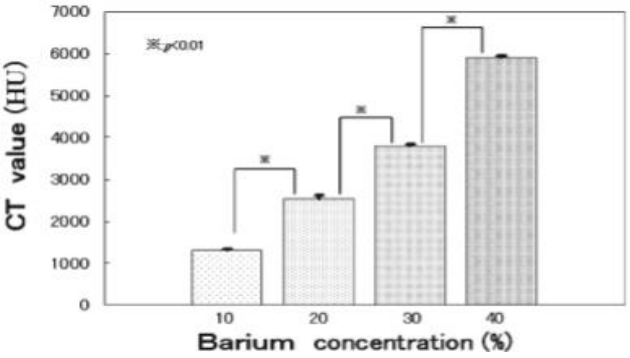
Lampiran 4

Gambar CT pada konsentrasi $BaSO_4$ yang berbeda. (A) $BaSO_4$ 0 vol%; (B) $BaSO_4$ 5 vol%; (C) $BaSO_4$ 10 vol%; (D) $BaSO_4$ 15 vol%; (E) $BaSO_4$ 20 vol%; (F) $BaSO_4$ 25 vol% (Tsutsumi, 2012)



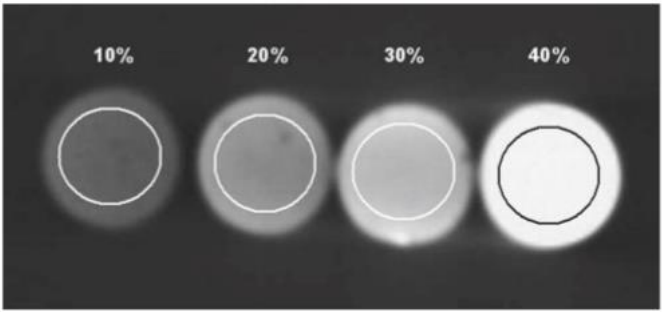
Lampiran 5

Nilai hasil computed tomography (CT) dari blok silinder dari semen tulang yang mengandung empat konsentrasi barium (10%, 20%, 30%, 40%) (Makita, 2008)



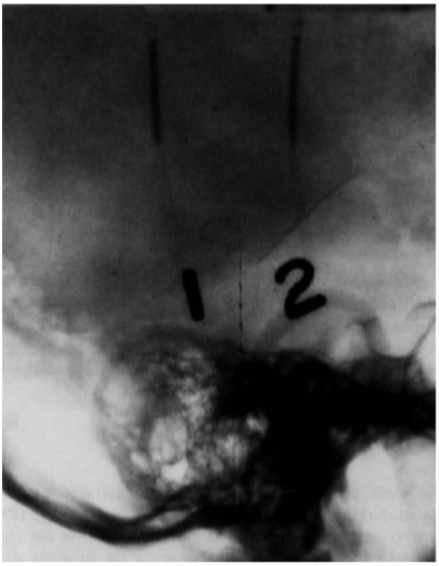
Lampiran 6

Gambar aksial computed tomography (CT) dari blok silinder dari semen tulang yang mengandung barium sulfat (Makita, 2008)



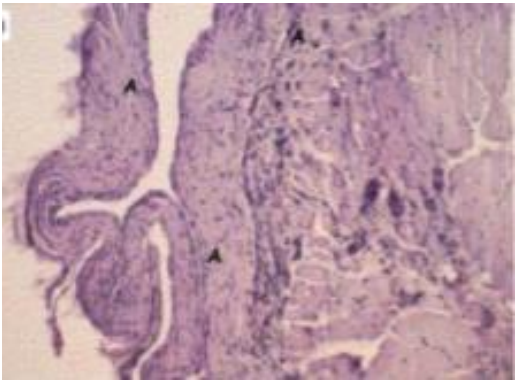
Lampiran 7

Gambar sinar-X dari tabung PVC yang dikemas dengan mikrosfer radiopak membengkak dalam larutan garam dan diperiksa melalui tengkorak manusia; (1) mikrosfer yang mengandung 40% $BaSO_4$ dan (2) mikrosfer yang mengandung 40% metil iothalamat (Thanoo, 1991).



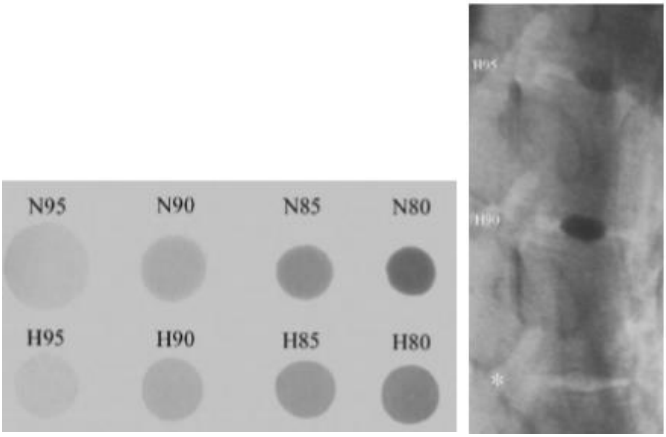
Lampiran 8

Sampel histologis jaringan yang mengelilingi spesimen silinder semen yang mengandung 10% barium sulfat, di mana A adalah kapsul fibrotik (Artola, 2003)



Lampiran 9

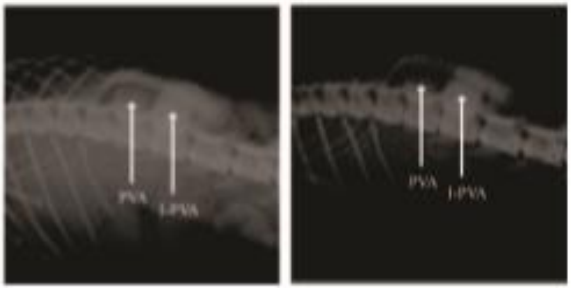
Hasil x-ray dari hidrogel (a) semua sampel dalam kondisi swelling; (b) sampel H95 dan H90 yang ditanam di dalam IVD kadaver babi *IVD asli (Boelen, 2005).



(a) (b)

Lampiran 10

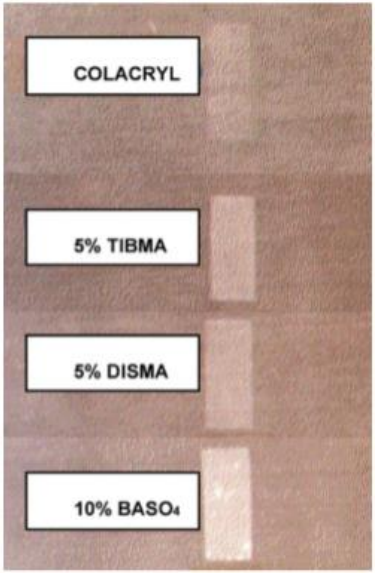
a) Perbandingan gambar x-ray dari implan I-PVA dan material kontrol; (b) gambar x-ray setelah kontras diubah hingga jaringan lunak tidak dapat terlihat (Mawad, 2008)



(a) (b)

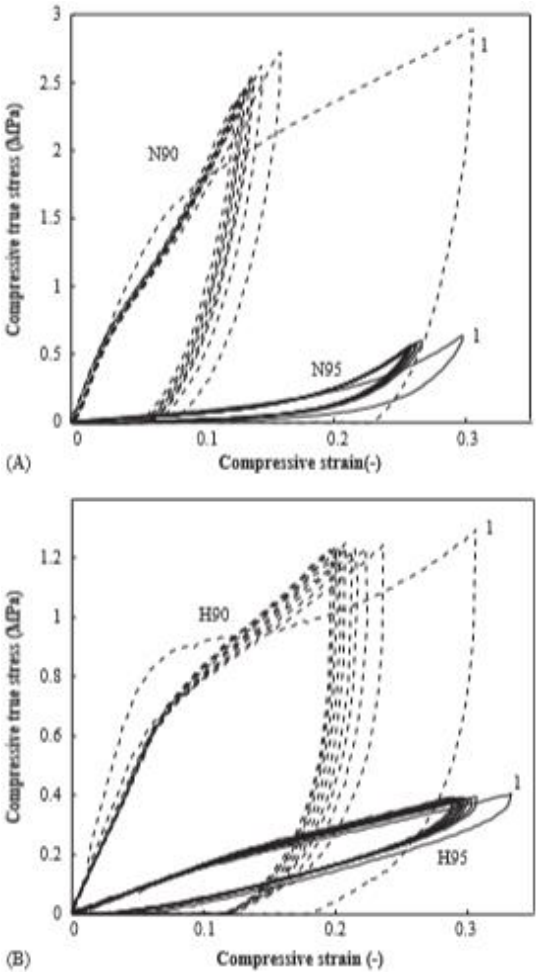
Lampiran 11

Foto x-ray dari sampel semen yang mengandung 5% TIBMA, 5% DISMA, 10% barium sulfat, dan radiolusen (Artola, 2003)



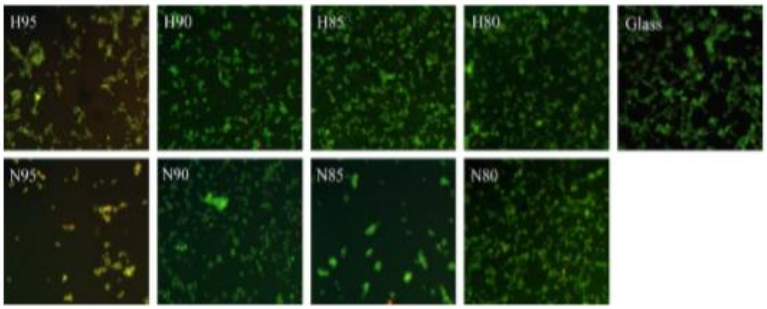
Lampiran 12

Kurva histeresis dari pengujian tekan dinamis, dalam hal ini hidrogel dikompresi dari 0-30%; (A) Hidrogel berbasis NVP, (B) Hidrogel berbasis HEMA. 1 menunjukkan siklus pertama (Boelen, 2005)



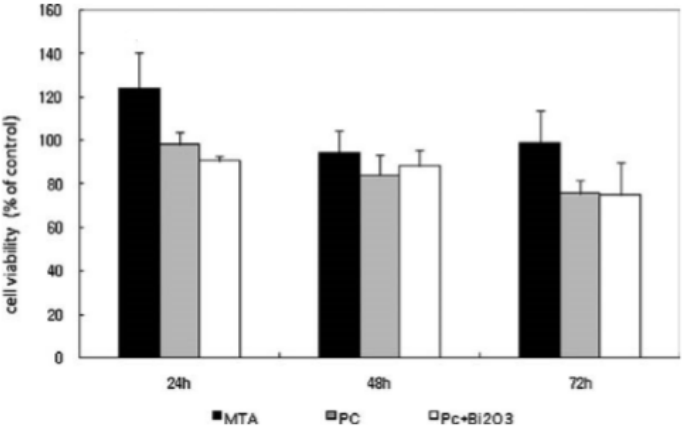
Lampiran 13

Gambar fluoresen yang dihasilkan dari uji pewarnaan hidup / mati dari sel-sel fibroblast tikus 3T3 yang berkontak dengan hidrogel (Boelen, 2005)



Lampiran 14

Viabilitas sel pada MTA, semen Portland, dan semen eksperimen setelah inkubasi selama 24, 48, dan 72 jam diukur menggunakan MTT assay (Hwang, 2009).



Lampiran 15

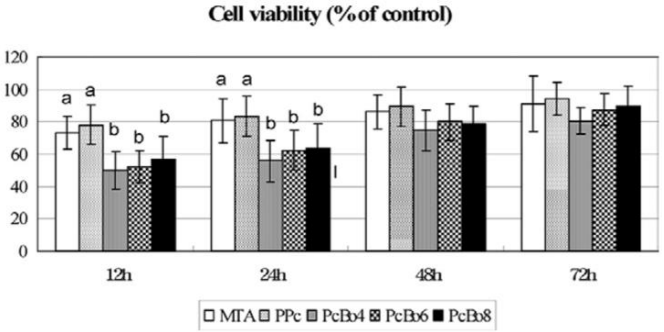
Skor* respon inflamasi pada 10, 30, dan 60 hari setelah prosedur bedah (mean ± SD) (Hwang, 2009)

Material	10 hari	30 hari	60 hari
Kontrol	1.00 ± 1.14	1.33 ± 0.57	1.25 ± 0.5
MTA	1.75 ± 0.5	2.00 ± 0	1.66 ± 0.57
Semen Portland	0.66 ± 0.57	1.33 ± 0.57	1.33 ± 0.57
Semen eksperimen	1.00 ± 0	1.25 ± 0.5	1.33 ± 0.57

*Skor: 0, tidak ad reaksi; 1, reaksi ringan; 2, reaksi moderat/sedang; 3, reaksi berat.

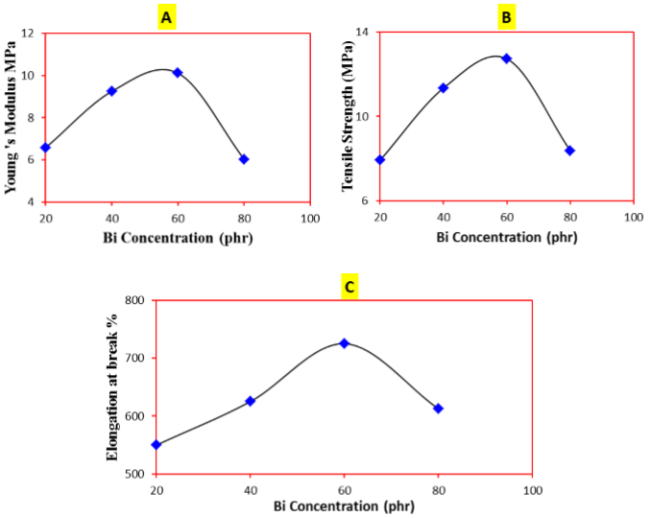
Lampiran 16

Efek MTA dan variasi semen Portland pada sel ligamen periodontal manusia yang diukur dengan uji MTT assay (Kim, 2008)



Lampiran 17

Hasil pengujian: A) modulus Young; B) kekuatan tarik; C) perpanjangan putus (%) pada komposit dengan variasi konsentrasi bismuth oksida (El-Fiki, 2015).



Lampiran 18

Perhitungan persentase perubahan nilai radiopasitas pada penambahan ZrO_2

Material polimer/ komposit	Konsentrasi	Radiopasitas		Kenaikan atau penurunan (%)	Referensi
		Awal	Akhir		
PMMA	28%	8.00	83.00	9.38%	Chang, 1992
PC	30%	1.12	3.51	2.13%	Tanomaru-Guerreiro, 2014 (1)
PC	30%	1.15	3.70	2.22%	Tanomaru-Guerreiro, 2014 (2)
Kalsium silikat	30%	1.32	4.12	2.12%	Silva, 2014
Biodentin	15%	2.52	4.20	0.67%	Rodriguez, 2018
Semen Portland	10%	1.90	2.30	0.21%	Antonijevic, 2013
	20%	1.90	3.10	0.63%	
	30%	1.90	4.45	1.34%	
Persentase rata-rata peningkatan radiopasitas					2.34%

Lampiran 19

Perhitungan persentase perubahan nilai radiopasitas pada penambahan Bi_2O_3

Material polimer/ komposit	Konsentrasi	Radiopasitas		Kenaikan atau penurunan (%)	Referensi
		Awal	Akhir		
Semen Portland	25%	0.96	6.04	5.29%	Hwang, 2009
Semen Portland	25%	0.86	6.81	6.92%	Kim, 2008
	16.67%	0.86	3.7	3.30%	
	12.25%	0.86	3.17	2.69%	

Semen Portland Putih	10%	2.02	3.64	0.80%	Saliba, 2009
	15%	2.02	4.68	1.32%	
	20%	2.02	6.62	2.28%	
	25%	2.02	7.61	2.77%	
Semen Portlan	30%	2.02	9.79	3.85%	Antonijevic, 2013
	10%	1.90	3.25	0.71%	
	20%	1.90	5.5	1.89%	
	30%	1.90	6.85	2.61%	
Persentase rata-rata peningkatan radiopasitas					2.87%

Lampiran 20

Perhitungan persentase perubahan nilai sifat mekanik pada penambahan ZrO_2

Material polimer/ komposit	%	Kekuatan Tekan (MPa)			Kekutan Tarik (MPa)			Modulus Young (MPa)			Referensi
		Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	
PMMA	28	117	128	0.09%							Chang, 1992
Semen Portland	30	67.88	57.43	-0.154%							Tanomaru-Guerreiro, 2014 (2)
PVA	20				16.25	29.02	0.79%	1.42	2.39	0.683%	Krishnamoorthy, 2011
Kalsium silikat	30	63.29	48.93	-0.227%							Silva, 2014
Semen Portland	10	37	35	-0.054%							Antonijevic, 2013
	20	37	39.5	0.068%							
	30	37	40	0.081%							
RATA - RATA				-0.096%			0.786%			0.683%	

Lampiran 21

Perhitungan persentase perubahan nilai sifat mekanik pada penambahan $BaSO_4$

Material polimer/ komposit	%	Kekuatan Tekan (MPa)			Kekutan Tarik (MPa)			Modulus Young (MPa)			Referensi
		Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	
PMMA	28	28	117	120	0.03%						Chang, 1992
PLLA	5	5				69.1	97.5	0.41%	4.09	5.16	Ang, 2018
	10	10				69.1	139	1.01%	4.09	6.22	
	15	15				69.1	146	1.11%	4.09	6.64	
	20	20				69.1	79.4	0.15%	4.09	4.47	
PMMA	10	10	85	85	0.000%						Makita, 2008
	20	20	85	86	0.012%						
	30	30	85	87	0.024%						
	40	40	85	69	-0.188%						
PMMA		10	111.12	113.69	0.023%	41.73	36.75	-0.12%	2070	1983	Artola, 2003
RATA - RATA				-0.017%			0.51%			0.375%	

Lampiran 22

Perhitungan persentase perubahan nilai sifat mekanik pada penambahan yodium

Material polimer/ komposit	Agen radiopak	%	Kekuatan Tekan (MPa)			Kekutan Tarik (MPa)			Modulus Young (MPa)			Referensi
			Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	
NVP	4IEMA	5								1		Boelen, 2005
		10							1	24	23.00%	
		15							24	123	4.13%	
		20							123	250	1.03%	
HEMA	4IEMA	5								3		
		10								13		
NVP	4IEMA	6							0.1	0.6	5.00%	Boelen, 2007
HEMA	4IEMA	6							0.1	0.75	6.50%	
PMMA	4IEMA					79			1800			Hooy - Corstjens, 2004
PMMA	TIBMA	5	111.12	118.09	0.063%	41.73	43.10	0.033%	2070	2048	-0.01%	Artola, 2003
RATA - RATA					0.110%			0.035%			2.878%	

Lampiran 23

Perhitungan persentase perubahan nilai sifat mekanik pada penambahan Bi_2O_3

Material polimer/ komposit	%	Kekuatan Tekan (MPa)			Kekutan Tarik (MPa)			Modulus Young (MPa)			Referensi
		Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	Awal	Akhir	Kenaikan (%)	
Semen Portland	20	41.2	22.9	-0.444%							Tanomaru-Filho,
Semen Portland	10	82.1	40.1	-0.512%							Coomaraswamy, 2007
	20	82.1	36.2	-0.559%							
	30	82.1	31.1	-0.621%							
	40	82.1	28.7	-0.650%							
Semen Portland	25	26.4	19.5	-0.261%							Camilleri, 2008
Kalsium silikat	20	63.29	21.82	-0.655%							Silva, 2014
Semen Portland	10	37	34	-0.081%							Antonijevic, 2013
	20	37	32	-0.135%							
	30	37	37	0.000%							
Silicon rubber	20 phr				8	8		6.8			El-Fiki, 2015
	40 phr				8	11.4	0.43%	6.8	9	0.32%	
	60 phr				8	12.9	0.61%	6.8	10.2	0.50%	
	80 phr				8	8.3	0.04%	6.8	6	-0.12%	
Rata - rata				-0.392%			0.36%			0.24%	

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam mengerjakan dan menyelesaikan laporan tugas akhir ini, penulis menerima dukungan baik moral dan materiil dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada:

1. Mama, mas Galuh, Mas Galih, dan seluruh keluarga besar yang tidak pernah berhenti mendoakan serta memberi dukungan moril maupun materiil kepada penulis. Khususnya kepada Alm. Ayah penulis yang selalu hidup di dalam hati dan memberi kekuatan untuk penulis.
2. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah banyak membantu penulis dalam penelitian ini.
3. Sabrina Hazimi dan Danastri Ayu Eda, sahabat penulis yang menerima segala kekurangan serta selalu hadir dengan canda dan tawa.
4. Felia Jamil, teman baik penulis yang selalu mendengarkan keluh kesah penulis dalam hal apapun dan selalu ada untuk memberi dukungan ketika penulis sedang berada di titik terendah.
5. Loly, Tiara, dan Theresya, sahabat yang selalu ada saat suka maupun duka dalam segala hal dan tidak pernah berhenti untuk memberi semangat ketika penulis mulai merasa putus asa.
6. Cinlyadevi Angelourenz sebagai teman diskusi tugas akhir dan selalu mendengar keluh kesah penulis
7. Nadya dan Luckyta yang turut mengisi hari-hari penulis selama masa perkuliahan di ITS dan tetap memberi dukungan serta semangat walaupun terpisah ruang dan waktu.
8. Teman-teman “Benar-benar Berinovasi” yang menjadi tempat untuk berbagi suka dan duka serta membuat Laboratorium Material Inovasi menjadi nyaman dan menyenangkan selama pengerjaan tugas akhir.

9. Departemen Hublu HMMT FTI ITS 17/18 dan 18/19 yang memberikan banyak pengalaman dan kenangan selama masa perkuliahan. Terutama kepada Bagaskara Wiraditya selaku Kepala Departemen Hubungan Luar HMMT FTI ITS 18/19 yang sangat sabar menghadapi penulis yang sangat sentimenal dan emosional.
10. Keluarga besar MT18 yang selalu punya cara untuk menciptakan kenangan indah yang tidak mungkin bisa dilupakan. Penulis sangat bangga dan beruntung menjadi bagian dari MT18.
11. Terakhir kepada Rosa Dewi Fitriana, diri penulis sendiri, terima kasih telah bertahan hingga titik ini dan berhasil menyelesaikan perkuliahan. Semoga semakin dikuatkan dan tidak banyak air mata yang jatuh menghadapi kehidupan berikutnya.
12. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

Semoga penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua yang membutuhkan.

Surabaya, 28 Juli 2020
Penulis

Rosa Dewi Fitriana

BIODATA PENULIS

Penulis bernama lengkap Rosa Dewi Fitriana. Lahir di Kota Probolinggo pada tanggal 22 Februari 1998 merupakan anak ketiga dari 3 bersaudara dari pasangan Heri Suprijanto dan Suherwati. Penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari TK Kemala Bhayangkari Probolinggo, SD Negeri Sukabumi II Probolinggo, SMP Negeri 1 Probolinggo, dan SMA Negeri 10 Malang. Kemudian pada tahun 2016, penulis melanjutkan pendidikan di Departemen Teknik Material Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama menjalani masa perkuliahan, penulis mengikuti kegiatan pelatihan LKMM Pra TD, LKMW TD, BMS, LKMM TD, dan PMO HMMT FTI ITS. Penulis juga aktif mengikuti kepanitiaan di tingkat institut seperti INI LHO ITS! pada tahun 2016 dan 2017, serta GERIGI ITS 2018. Selain itu, penulis juga aktif dalam kegiatan berorganisasi di Himpunan Mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi (HMMT FTI ITS) sebagai staff Departemen Hubungan Luar pada kepengurusan 2017/2018 dan sebagai Kabiro Hubungan Ormawa di Departemen Hubungan Luar pada kepengurusan 2018/2019. Dalam bidang akademik, penulis juga menjadi Asisten Laboratorium Kimia Material pada tahun 2017 dan 2018. Pada tahun 2019, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Petrokimia Gresik selama kurang lebih 1 bulan. Penulis melakukan penelitian di bidang Material Inovatif dengan tugas akhir berjudul "Review Jenis Material Radiopak dan Pengaruh Penambahannya terhadap Sifat Mekanik dan Biokompatibilitas Material untuk Pengganti Nucleus Pulposus". Penulis dapat dihubungi melalui alamat email rosadewif@gmail.com dan nomor telepon 085258869898.