

Phantom Pelvis untuk Radiologi: Metode, Material, dan QA



M. Sofyan, Dipl.Rad., S.ST., M.Kes. M.Tr.ID.

Prof. Dr. Marsum, BE., S.Pd., MHP.

Agung Nugroho Setiawan, SST., M.Tr.ID.

Dr. Sri Sumarni, Bdn., M.Mid.

Dr. Donny Kristanto Mulyantoro, SKM., M.Kes.

Dr. Gatot Murti Wibowo, S.Pd., M.Sc.

Phantom Pelvis untuk Radiologi: Metode, Material, dan QA

M. Sofyan, Dipl.Rad., S.ST., M.Kes. M.Tr.ID.

Prof. Dr. Marsum, BE., S.Pd., MHP.

Agung Nugroho Setiawan, SST., M.Tr.ID.

Dr. Sri Sumarni, Bdn., M.Mid.

Dr. Donny Kristanto Mulyantoro, SKM., M.Kes.

Dr. Gatot Murti Wibowo, S.Pd., M.Sc.

PT BUKULOKA LITERASI BANGSA

Anggota IKAPI: No. 645/DKI/2024



Phantom Pelvis untuk Radiologi: Metode, Material, dan QA

Penulis : M. Sofyan, Dipl.Rad., S.ST., M.Kes. M.Tr.ID., Prof.
Dr. Marsum, BE., S.Pd., MHP., Agung Nugroho
Setiawan, SST., M.Tr.ID., Dr. Sri Sumarni, Bdn.,
M.Mid., Dr. Donny Kristanto Mulyantoro, SKM.,
M.Kes., dan Dr. Gatot Murti Wibowo, S.Pd., M.Sc.
ISBN : 978-634-250-240-2 (PDF)
Penyunting Naskah : Ahmad Fauzy Pratama, S.Pd.
Tata Letak : Ahmad Fauzy Pratama, S.Pd.
Desain Sampul : Novikean Keysah Sanisri

Penerbit

Penerbit PT Bukuloka Literasi Bangsa

Distributor: PT Yapindo

Kompleks Business Park Kebon Jeruk Blok I No. 21, Jl. Meruya Ilir Raya
No. 88, Kelurahan Meruya Utara, Kecamatan Kembangan, Kota Adm.
Jakarta Barat, Provinsi DKI Jakarta, Kode Pos: 11620

Email : penerbit.blb@gmail.com

Whatsapp : 0878-3483-2315

Website : bukuloka.com

© Hak cipta dilindungi oleh undang-undang

Berlaku selama 50 (lima puluh) tahun sejak ciptaan tersebut pertama kali dilakukan pengumuman.

Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit. Ketentuan Pidana Sanksi Pelanggaran Pasal 2 UU Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta.

Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau Pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (Tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah).

Barang siapa dengan sengaja menyerahkan, menyiarkan, memamerkan, mengedarkan atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-Nya, sehingga buku referensi berjudul *Phantom Pelvis untuk Radiologi: Metode, Material, dan QA* ini dapat disusun dan hadir untuk memberikan gambaran tentang pemanfaatan phantom pelvis dalam dunia radiologi. Buku ini ditujukan untuk masyarakat umum agar pembaca dapat memahami bagaimana phantom digunakan sebagai model simulasi untuk mendukung praktik, pembelajaran, serta peningkatan mutu dalam pencitraan radiologi.

Phantom pelvis menjadi salah satu sarana penting dalam memastikan kualitas layanan radiologi, baik untuk keperluan pelatihan maupun pengujian sistem pencitraan. Melalui buku ini, pembaca diajak untuk mengenal metode pembuatan phantom, pemilihan material yang sesuai, serta peran penting *quality assurance* (QA) dalam menjaga keakuratan hasil pencitraan.

Jakarta, Agustus 2025

Tim Penyusun

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
Bab 1: Mengenal Phantom Antropomorfik.....	1
1.1 Definisi Phantom Antropomorfik dan Perannya dalam Radiologi..	1
1.2 Fungsi untuk Pendidikan, Kalibrasi, Uji Protokol, dan Quality Assurance	4
1.3 Cakupan: Fokus Area Pelvis dan Organ Terkait	7
1.4 Prinsip Umum Metode Sofyan dalam Rancang Bangun Phantom ..	9
1.5 Alur Besar Proyek: Dari Citra Medis hingga Validasi Radiologis	12
Bab 2: Dasar Anatomi dan Fisika Radiologi Pelvis	15
2.1 Mengenal Anatomi Radiologis Pelvis: Tulang, Otot, dan Organ ..	15
2.2 Koefisien Atenuasi, Densitas Elektron, dan Keterkaitannya dengan HU (Hounsfield Unit).....	17
2.3 Parameter Pencitraan Relevan: CT, Radiografi, dan Kompatibilitas Teknik.....	20
2.4 Target Sifat Radiologis Material Pengganti Tulang dan Jaringan Lunak.....	23
2.5 Kebutuhan Klinis: Positioning, Landmark, dan Reproducibility ..	25
Bab 3: Metode Sofyan: Prinsip, Tahapan, dan Keunggulan ...	29
3.1 Konsep Inti Metode Sofyan: Alur Kerja Terstruktur dan Berbasis Cetakan Modular	29

3.2 Tahapan Umum: Segmentasi—Desain—Pencetakan Cetakan— Penuangan—Perakitan	32
3.3 Penekanan pada Keseragaman Dimensi dan Kemudahan Replikasi	34
3.4 Keunggulan (Biaya, Akses Material, Kemudahan Perawatan) dan Keterbatasan Praktis	37
3.5 Penggunaan Alat Bantu Digital (CAD, Slicer, Mesh Repair)	39
Bab 4: Material: Gypsum sebagai Tulang dan Resin sebagai Jaringan Lunak.....	43
4.1 Gypsum: Karakter Mekanik, Densitas, dan Penyesuaian HU	43
4.2 Resin: Viskositas, Curing, Stabilitas, dan Pewarnaan/Penambahan Filler	46
4.3 Aditif untuk Pengaturan HU (mis. Kalsium Karbonat, Barium Sulfat)	48
4.4 Kompatibilitas Material terhadap CT/Radiografi dan Kondisi Lingkungan.....	51
4.5 Pemilihan Release Agent, Penguat Serat, dan Sealing Antarkomponen	53
Bab 5: Perancangan Geometri dari Data DICOM	56
5.1 Akuisisi Citra Pelvis (CT) dan Parameter Minimal yang Disarankan.....	56
5.2 Segmentasi: Tulang Pelvis, Rongga Panggul, serta Organ Target (Opsional Modular)	59
5.3 Konversi ke Mesh (STL), Perbaikan Mesh, dan Tolerance Manufaktur	61

5.4 Penentuan Bidang Belah, Alignment Pin, serta Landmark Positioning.....	63
5.5 Finalisasi Desain: Split Mold, Draft Angle, dan Rencana Perakitan	65
Bab 6: Pembuatan Cetakan dan Proses Manufaktur.....	69
6.1 Perancangan Cetakan (Two-Part atau Multi-Part Mold) dan Bahan Cetak (Silikon).....	69
6.2 Pencetakan Master Pattern (Opsi: 3D Printing) dan Pembuatan Cetakan Kerja	72
6.3 Proses Penuangan Gypsum (Tulang) dan Pengaturan Penguatan (Bila Perlu)	73
6.4 Proses Penuangan Resin (Degassing, Curing, Layering) dan Bonding Antarbagian.....	76
6.5 Perakitan Akhir: Penyatuan Modul, Finishing, Sealing, dan Uji Kebocoran.....	78
Bab 7: Keselamatan Kerja (K3) dan Kendali Mutu Proses.....	81
7.1 Personal Protective Equipment (PPE), Ventilasi Kerja, dan Handling Resin	81
7.2 Prosedur Aman Penanganan Bahan Kimia dan Pembuangan Limbah.....	84
7.3 Uji Dimensi, Ketegakan Bidang Belah, dan Kestabilan Struktur..	85
7.4 Pemeriksaan Cacat Permukaan, Retak Rambut, dan Koreksi Pascaproduksi	88
7.5 Checklist Kendali Mutu Tiap Tahap (Desain—Cetakan—Penuangan—Perakitan)	89

Bab 8: Kalibrasi dan Validasi Radiologis Phantom 93

- 8.1 Pengukuran HU di CT: Keseragaman dan Kesenjangan Material ... 93
- 8.2 Uji Atenuasi di Radiografi: Konsistensi Exposure dan Contrast... 95
- 8.3 Validasi Dosimetrik: Film Radiochromic, TLD, atau Ion Chamber (Opsional)..... 97
- 8.4 Repetabilitas Pengukuran dan Baseline Data untuk QA Berkala 100
- 8.5 Dokumentasi Hasil Validasi dan Kriteria Pass/Fail Sederhana ... 101

Bab 9: Penerapan dalam Pendidikan, QA, dan Klinik 105

- 9.1 Pelatihan Positioning Pelvis: Landmark, Rotasi, dan Immobilization 105
- 9.2 Uji Coba Protokol CT/Radiografi: Optimasi Exposure dan Dose Awareness..... 107
- 9.3 Simulasi Perencanaan Radioterapi Pelvis (Kontur Organ dan Verifikasi)..... 109
- 9.4 Uji Perangkat Bantu (Tatakan, Immobilizer, Pelvis Cradle) dengan Phantom..... 112
- 9.5 Penggunaan Checklist Praktikum dan Lembar Penilaian Sederhana 113

Bab 10: Perawatan, Biaya, dan Pengembangan Lanjut..... 117

- 10.1 Perawatan Rutin: Pembersihan, Penyimpanan, dan Inspeksi Berkala..... 117
- 10.2 Perbaikan Minor: Retakan, Re-sealing, dan Penggantian Komponen 119
- 10.3 Estimasi Waktu, Sumber Daya, dan Biaya Produksi per Unit... 122

10.4 Modifikasi Lanjutan: Organ Opsional, Penyesuaian HU, dan Removable Inserts	124
10.5 Dokumentasi Proyek: Spesifikasi, As-Built Drawing, dan Logbook QA.....	128
Profil Penulis	131
Daftar Pustaka.....	141

Bab 1: Mengenal Phantom

Antropomorfik

1.1 Definisi Phantom Antropomorfik dan Perannya dalam Radiologi

Dalam dunia radiologi, kebutuhan akan representasi tubuh manusia yang akurat telah melahirkan alat bantu visual dan teknis yang dikenal sebagai *phantom* antropomorfik. *Phantom* ini bukan sekadar alat bantu visual, melainkan perangkat yang dibangun dengan presisi tinggi untuk meniru karakteristik fisik dan sifat penyerapan radiasi dari jaringan manusia. Keberadaannya memainkan peran penting dalam mendukung berbagai prosedur visualisasi medis yang aman dan efisien.

1.1.1 Karakteristik dan Komposisi

Secara umum, *phantom* antropomorfik disusun dari material sintetis yang mampu menirukan kepadatan serta kemampuan atenuasi jaringan tubuh manusia. Salah satu aspek penting dalam pembuatan *phantom* adalah keserupaan struktur internal, terutama tulang, otot, dan jaringan lunak, yang menjadi indikator akurasi hasil pencitraan. Material seperti *epoxy resin*, silikon, dan campuran zat kalsium banyak digunakan karena memberikan kestabilan terhadap paparan sinar-X serta dapat dikustomisasi untuk berbagai bagian tubuh (Sari et al., 2023).

Di dalam praktiknya, *phantom* jenis ini tidak hanya digunakan dalam proses kalibrasi perangkat, tetapi juga saat melakukan simulasi tindakan medis guna mengamati seberapa akurat pencitraan yang dihasilkan. Salah satu *phantom* yang banyak digunakan adalah model dada antropomorfik yang diproduksi oleh Kyoto Kagaku di Jepang, karena kesesuaiannya dengan hasil *computed tomography* klinis (Sari et al., 2023).

1.1.2 Peran dalam Pelatihan dan Evaluasi Sistem

Lebih dari sekadar peralatan teknis, *phantom* antropomorfik sering digunakan sebagai media latihan dalam skenario simulatif. Hal ini memungkinkan pengguna untuk memahami secara praktis penggunaan alat pencitraan tanpa risiko terhadap pasien manusia. Tidak hanya memberikan pengalaman praktikal, *phantom* juga memungkinkan pengujian yang konsisten dari waktu ke waktu karena sifatnya yang statis.

Selain itu, *phantom* berfungsi sebagai acuan dalam proses evaluasi kualitas gambar. Misalnya, untuk menilai kejelasan dan kontras citra dalam *computed radiography*, digunakan *phantom* pelvis dengan variasi eksposur berbeda. Eksperimen ini memudahkan pengambilan keputusan teknis yang berkaitan dengan intensitas radiasi serta pengaturan perangkat pencitra (Humayroh, 2023).

1.1.3 Penyesuaian Teknologi terhadap Tantangan Klinis

Dengan semakin majunya teknologi pencitraan medis, seperti *digital radiography* dan *dual-energy CT*, tuntutan terhadap *phantom* yang realistis pun meningkat. Oleh sebab itu, para

pengembang menciptakan *phantom* yang bisa disesuaikan dengan kondisi klinis tertentu, termasuk ukuran tubuh, komorbiditas, dan variasi struktur anatomi. Misalnya, pada radiografi payudara, digunakan *phantom* khusus yang menyerupai jaringan payudara untuk memastikan kualitas gambar dalam mendeteksi massa kecil maupun mikro-kalsifikasi (Ismail, 2022).

Lebih lanjut, kehadiran *phantom* juga memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan protokol pencitraan baru yang menuntut efisiensi radiasi serendah mungkin. Dengan menggunakan *phantom*, pengguna dapat membandingkan hasil dari berbagai konfigurasi alat dan teknik eksposur guna menemukan keseimbangan optimal antara kualitas gambar dan dosis radiasi (Budi & Sutanto, 2017).

1.1.4 Tantangan dan Arah Pengembangan ke Depan

Meski sudah sangat membantu, pembuatan *phantom* antropomorfik masih menghadapi beberapa kendala teknis. Salah satunya adalah keterbatasan dalam meniru dinamika fisiologis tubuh seperti gerakan pernapasan atau peredaran darah, yang krusial dalam prosedur pencitraan real-time. Untuk itu, saat ini mulai dikembangkan *phantom* dinamis yang dapat mensimulasikan gerakan tertentu sehingga hasil citra menjadi semakin mendekati kondisi nyata.

Inovasi lain juga diarahkan pada pemanfaatan bahan ramah lingkungan. Beberapa pihak telah mencoba mengganti komponen tulang dengan bahan alami seperti cangkang kerang karena memiliki

struktur dan komposisi mineral yang menyerupai jaringan tulang manusia (Sari et al., 2023).

1.2 Fungsi untuk Pendidikan, Kalibrasi, Uji Protokol, dan Quality Assurance

Phantom antropomorfik telah berkembang menjadi alat bantu yang sangat bernilai dalam berbagai kegiatan teknis dan edukatif di dunia radiologi. Lebih dari sekadar tiruan tubuh manusia, perangkat ini mendukung berbagai aktivitas penting, mulai dari pembelajaran, validasi sistem, hingga pemastian mutu layanan citra medis.

1.2.1 Pendidikan

Dalam dunia pembelajaran radiologi, salah satu tantangan utama adalah bagaimana memindahkan teori ke praktik tanpa menimbulkan risiko pada pasien. Di sinilah *phantom* memainkan peran penting sebagai media simulasi yang aman dan realistis. Dengan desain yang menyerupai struktur anatomi tubuh manusia, *phantom* memberikan pengalaman praktikal tanpa konsekuensi klinis.

Melalui simulasi ini, peserta pelatihan dapat mempraktikkan penggunaan alat-alat pencitraan seperti *computed tomography*, radiografi digital, atau bahkan *magnetic resonance imaging* dalam konteks yang menyerupai situasi nyata. Misalnya, dalam pelatihan pengambilan gambar dada, teknisi dapat belajar menyesuaikan posisi subjek, parameter eksposur, dan memeriksa hasil gambar

sebelum benar-benar berhadapan dengan kasus nyata (Jannah, 2021). Pengalaman ini bukan hanya meningkatkan kepercayaan diri, tetapi juga mengasah kepekaan terhadap detail teknis yang krusial.

1.2.2 Kalibrasi

Ketepatan hasil pencitraan sangat bergantung pada kalibrasi alat yang digunakan. Dalam hal ini, *phantom* antropomorfik digunakan untuk menguji konsistensi dan keakuratan sistem pencitraan secara berkala. Misalnya, untuk alat *MRI* atau *CT scan*, *phantom* memungkinkan operator mengevaluasi sejauh mana alat tersebut menghasilkan citra dengan rasio sinyal terhadap gangguan (*signal-to-noise ratio*) yang optimal (Ganna & Putri, 2023).

Penggunaan *phantom* juga penting dalam pembuatan kurva kalibrasi yang berfungsi sebagai referensi pengaturan alat dalam kondisi standar. Kurva ini membantu memastikan bahwa gambar yang dihasilkan memiliki ketajaman dan kontras yang dapat diterima, serta mencerminkan keadaan anatomi sesungguhnya. Beberapa rumah sakit bahkan menggunakan *phantom* spesifik sesuai rekomendasi American College of Radiology sebagai bagian dari pengendalian internal alat mereka.

1.2.3 Uji Protokol

Dalam praktik sehari-hari, kebutuhan untuk melakukan penyesuaian terhadap pengaturan alat sangat besar. Hal ini tidak dapat dilakukan langsung pada pasien karena menyangkut paparan radiasi dan waktu. Oleh karena itu, *phantom* menjadi sarana yang sangat efektif dalam menguji berbagai skenario pemindaian. Operator dapat menguji pengaturan eksposur yang berbeda, jenis

filter, serta algoritma pemrosesan gambar untuk melihat dampaknya terhadap hasil akhir.

Melalui simulasi ini, parameter yang menghasilkan citra optimal dapat ditetapkan sebagai standar prosedur kerja. Hasil pengujian ini kemudian digunakan untuk menyusun instruksi kerja yang konsisten, sehingga proses pencitraan menjadi lebih efisien dan minim risiko. Dengan kata lain, *phantom* berkontribusi dalam pembentukan kebijakan teknis yang berdampak langsung terhadap layanan pasien.

1.2.4 Quality Assurance

Aspek mutu dalam radiologi bukan hanya soal hasil citra, tetapi juga kestabilan sistem secara keseluruhan. Untuk menjamin kualitas dan konsistensi tersebut, *phantom* digunakan dalam proses evaluasi berkala. Evaluasi ini mencakup analisis geometri gambar, kontras, serta keakuratan dimensi yang ditampilkan oleh sistem.

Misalnya, dalam uji sistem *MRI*, dilakukan pencitraan *phantom* berbasis jaringan air yang memungkinkan pengukuran distorsi medan magnet secara menyeluruh. Hasilnya dibandingkan dengan standar internasional untuk memastikan bahwa tidak terjadi penyimpangan yang dapat memengaruhi diagnosis (Ganna & Putri, 2023). Jika ditemukan ketidaksesuaian, maka tindakan korektif dapat segera dilakukan sebelum sistem digunakan kembali untuk layanan kepada pasien.

Dengan begitu, *phantom* tidak hanya menjadi alat bantu teknis, tetapi juga bagian penting dalam sistem kendali mutu layanan pencitraan medis secara menyeluruh.

1.3 Cakupan: Fokus Area Pelvis dan Organ Terkait

Proyek pembangunan *phantom* ini diarahkan pada area pelvis, mencakup organ reproduksi serta organ sekitar seperti kandung kemih dan rektum. Pemilihan area ini bukan tanpa alasan. Pelvis merupakan wilayah yang memiliki kerentanan tinggi terhadap berbagai penyakit, terutama kanker serviks, prostat, serta kanker kandung kemih dan rektum. Pada kasus kanker serviks, misalnya, keterlibatan kandung kemih dan dinding rektum seringkali ditemukan pada stadium lanjut, sehingga keakuratan penentuan dosis radiasi menjadi faktor yang sangat penting (Puteri, 2020).

Selain itu, penggunaan *phantom* pada area ini sangat dibutuhkan dalam pengembangan radioterapi modern. Hal ini terkait dengan kebutuhan untuk memastikan bahwa distribusi dosis radiasi dapat diterapkan dengan presisi pada target tanpa merusak jaringan sehat di sekitarnya. Penelitian oleh Anggi (2021) menunjukkan bahwa variasi teknik radioterapi seperti *3DCRT* dan *IMRT* menghasilkan perbedaan distribusi dosis yang signifikan pada kandung kemih dan rektum, sehingga peniruan anatomi pelvis dengan akurat menjadi kebutuhan mendesak.

1.3.1 Tantangan Peniruan Bentuk dan Densitas

Tantangan utama dari proyek ini adalah peniruan bentuk, ukuran, serta densitas jaringan yang bervariasi di area pelvis. Organ-organ seperti kandung kemih memiliki volume yang dinamis karena dapat berubah sesuai tingkat pengisian urine, sedangkan rektum juga

mengalami perubahan bentuk akibat pergerakan isi usus. Fenomena ini menjadikan *phantom* pelvis tidak hanya harus menyerupai struktur statis, melainkan juga memperhitungkan variabilitas alami tubuh manusia (Febriana, 2024).

Selain organ dalam, tulang pelvis juga memberikan pengaruh besar terhadap penyebaran radiasi. Karakteristik densitas tulang yang berbeda dengan jaringan lunak membuat distribusi dosis radiasi menjadi lebih kompleks. Oleh karena itu, *phantom* harus dirancang sedemikian rupa agar dapat meniru interaksi radiasi dengan jaringan keras maupun jaringan lunak secara mendetail (Arif, 2025).

1.3.2 Signifikansi dalam Radioterapi dan Diagnostik

Dalam praktik radioterapi, area pelvis merupakan salah satu fokus utama karena prevalensi tinggi kanker di wilayah ini. Teknik radioterapi modern seperti *IMRT* atau *VMAT* menuntut presisi tinggi agar dosis radiasi maksimal tersampaikan pada tumor, sementara jaringan sekitar tetap terlindungi. Angka komplikasi pasca-terapi, seperti perdarahan rektum atau disfungsi kandung kemih, dapat diminimalkan dengan simulasi dosis menggunakan *phantom* yang akurat (Soeprijanto, 2017).

Selain radioterapi, penggunaan *phantom* pelvis juga berperan dalam uji diagnostik. Misalnya, dalam pengembangan teknik pencitraan yang lebih sensitif terhadap perubahan jaringan pelvis, *phantom* dapat menjadi sarana uji coba untuk memastikan bahwa teknologi pencitraan mampu mendeteksi perubahan struktur yang kecil namun signifikan. Hal ini menegaskan bahwa proyek

pembangunan *phantom* tidak hanya relevan untuk terapi, melainkan juga bagi peningkatan kualitas diagnostik medis (Arif, 2025).

1.4 Prinsip Umum Metode Sofyan dalam Rancang Bangun Phantom

Metode Sofyan hadir sebagai kerangka sistematis dalam menciptakan *phantom* antropomorfik yang menyerupai struktur tubuh manusia. Prinsip utama dalam metode ini adalah memastikan keakuratan bentuk anatomi, kesesuaian material dengan karakteristik jaringan asli, kemudahan perakitan, serta adanya tahap validasi melalui citra klinis. Keempat aspek ini saling berkaitan erat, sehingga menghasilkan *phantom* yang bukan hanya realistis secara visual, tetapi juga fungsional ketika digunakan dalam praktik pencitraan medis.

1.4.1 Reproduksi Bentuk Anatomi

Langkah pertama dalam metode ini menekankan pentingnya reproduksi anatomi dari data citra medis, khususnya *computed tomography (CT)* dan *magnetic resonance imaging (MRI)*. Data digital pasien dapat diolah menjadi model tiga dimensi dengan detail yang sangat presisi, mencakup tulang, organ, dan jaringan lunak. Proses ini memungkinkan penggambaran struktur internal yang realistis sehingga *phantom* dapat menyerupai kondisi tubuh sebenarnya. Dalam konteks teknologi pencitraan terkini, akurasi reproduksi anatomi sangat krusial untuk memastikan hasil yang dapat diandalkan (Laidlaw et al., 2023).

1.4.2 Pemilihan Material Sesuai Densitas Radiologis

Selain bentuk, kesesuaian material dengan densitas radiologis jaringan juga menjadi elemen penting. Material yang dipilih harus mampu menirukan nilai *Hounsfield unit* pada CT maupun karakteristik kontras pada MRI. Dengan demikian, *phantom* dapat memberikan gambaran pencitraan yang menyerupai pasien manusia. Material berbasis resin cetak 3D, polimer, hingga komposit kerap digunakan karena fleksibilitasnya dalam menyesuaikan tingkat densitas. Tren terkini dalam bidang ini menunjukkan bahwa pencocokan densitas material berperan signifikan dalam keandalan pencitraan (Alzahrani et al., 2025).

1.4.3 Modularitas dan Kemudahan Perakitan

Prinsip berikutnya adalah modularitas. *Phantom* yang dirancang dengan sistem modul memungkinkan perakitan ulang, penggantian bagian tertentu, serta penyesuaian untuk tujuan yang berbeda. Modularitas memberikan fleksibilitas tinggi, misalnya untuk menguji protokol pencitraan spesifik pada kepala, toraks, atau abdomen tanpa harus membuat *phantom* baru secara keseluruhan. Hal ini terbukti efisien dan hemat sumber daya (Tino et al., 2020). Kemudahan perakitan juga mendukung transportasi dan pemakaian lintas fasilitas kesehatan, menjadikannya lebih praktis dalam penggunaan sehari-hari.

1.4.4 Validasi dengan Hasil Pencitraan Klinis

Tahap terakhir dalam metode Sofyan adalah validasi, yaitu membandingkan hasil pencitraan *phantom* dengan data klinis nyata. Proses ini memastikan bahwa *phantom* tidak hanya akurat dari sisi konstruksi, tetapi juga memberikan hasil citra yang dapat diandalkan untuk berbagai kebutuhan, termasuk evaluasi kualitas citra. Validasi klinis sering kali melibatkan penggunaan protokol yang identik dengan pasien sehingga keandalan *phantom* benar-benar teruji (Singh et al., 2020).

1.4.5 Integrasi Teknologi Cetak 3D

Perkembangan teknologi cetak 3D semakin memperkuat metode Sofyan. Dengan teknik ini, pembuatan *phantom* menjadi lebih cepat, presisi, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan individu. Kemampuan cetak 3D untuk mengatur *infill density* juga memungkinkan pencocokan karakteristik radiologis dengan lebih baik. Selain itu, inovasi material baru berbasis polimer berkontribusi terhadap peningkatan realisme anatomi (Lin et al., 2025).

1.4.6 Relevansi Metode Sofyan dalam Praktik Medis Modern

Dalam praktik medis modern, penggunaan *phantom* antropomorfik dengan prinsip metode Sofyan memiliki nilai strategis. Penerapan keempat prinsip utama—reproduksi anatomi, pemilihan material sesuai densitas radiologis, modularitas, dan validasi—menjadi fondasi untuk menghasilkan *phantom* yang konsisten dan realistis. Hal ini sejalan dengan upaya meningkatkan kualitas pencitraan dan memastikan keandalan prosedur medis (Cunningham et al., 2019).

Dengan demikian, metode Sofyan tidak hanya memberikan kerangka rancang bangun yang jelas, tetapi juga membuka ruang inovasi melalui integrasi teknologi baru. Kehadirannya mampu menjawab tantangan penciptaan *phantom* yang realistis, fleksibel, serta memiliki nilai praktis yang tinggi dalam dunia medis.

1.5 Alur Besar Proyek: Dari Citra Medis hingga Validasi Radiologis

Membangun *phantom* medis yang dapat digunakan dalam dunia radiologi bukanlah sekadar proses teknis, melainkan juga perjalanan kompleks yang menyatukan teknologi pencitraan, rekayasa digital, dan keterampilan klinis. Setiap tahap dari proses ini memiliki peran yang saling terkait, sehingga hasil akhirnya mampu memberikan kontribusi nyata bagi pemahaman citra medis. Setiap langkah harus dilalui dengan ketelitian tinggi agar hasil yang diperoleh benar-benar mencerminkan kondisi anatomi manusia.

1.5.1 Akuisisi Data Medis

Langkah awal dimulai dengan pengumpulan citra dari teknologi *computed tomography* (CT) atau *magnetic resonance imaging* (MRI). Data ini diperoleh dari tubuh manusia yang kemudian diproses secara hati-hati agar kualitas resolusi tetap optimal. Citra yang terkumpul menjadi fondasi bagi pembangunan model digital yang merepresentasikan organ atau jaringan tertentu. Proses ini menuntut standar etika dan teknis yang tinggi, karena citra medis bukan hanya sekadar potret anatomi, tetapi juga menyimpan

kompleksitas fisiologis yang perlu dijaga keutuhannya (Stocchiero et al., 2025).

1.5.2 Segmentasi dan Pemodelan 3D

Tahap berikutnya adalah melakukan segmentasi, yakni proses memilah bagian organ yang relevan dari citra medis. Dengan perangkat lunak seperti *3D Slicer*, organ tertentu dapat direpresentasikan dalam bentuk digital tiga dimensi. Hasil segmentasi ini tidak hanya membantu dalam visualisasi, tetapi juga menjadi dasar pembuatan *phantom*. Keakuratan dalam tahap ini sangat menentukan keberhasilan keseluruhan proyek, karena sedikit kesalahan segmentasi dapat menghasilkan bentuk *phantom* yang tidak representatif (Gerke et al., 2024).

1.5.2.1 Ketelitian dalam Segmentasi

Segala bentuk gangguan, seperti artefak citra atau resolusi rendah, berpotensi memengaruhi hasil pemodelan. Oleh karena itu, pemilihan perangkat lunak dan kualitas citra awal harus dipastikan sesuai standar. Beberapa penelitian terkini menekankan pentingnya teknik digital yang mampu mengurangi distorsi geometri, sehingga model 3D yang dihasilkan lebih akurat saat dikonversi ke bentuk fisik (Stocchiero et al., 2025).

1.5.3 Prototipe dan Pencetakan

Setelah model digital terbentuk, tahap selanjutnya adalah membangun prototipe melalui pencetakan tiga dimensi. Teknologi cetak 3D memungkinkan penggunaan material yang dapat meniru sifat radiologis jaringan tubuh. Campuran bahan radiokompatibel dipilih agar *phantom* yang dihasilkan mampu menampilkan densitas

serta kontras yang serupa dengan jaringan asli pada citra CT maupun MRI. Dalam beberapa tahun terakhir, kemajuan pencetakan 3D memberikan peluang besar untuk menciptakan *phantom* dengan detail anatomi yang sangat presisi (Amankulor et al., 2025).

1.5.4 Uji Pencitraan

Setelah prototipe selesai, *phantom* diuji menggunakan perangkat radiologi nyata. Pengujian ini bertujuan memastikan apakah hasil pencitraan yang dihasilkan sesuai dengan karakteristik klinis. Pada tahap ini, *phantom* dapat menjalani pemeriksaan dengan berbagai modalitas, seperti CT, MRI, atau bahkan *positron emission tomography* (PET). Proses uji pencitraan memungkinkan adanya penilaian menyeluruh, apakah *phantom* benar-benar mampu merepresentasikan jaringan manusia dalam konteks diagnostik (Gerke et al., 2024).

1.5.5 Validasi dan Penyesuaian

Langkah terakhir adalah proses validasi, yakni membandingkan hasil citra dari *phantom* dengan citra klinis yang asli. Dari perbandingan ini dapat diketahui sejauh mana ketepatan struktur, kontras, dan kualitas citra yang ditampilkan. Jika terdapat perbedaan signifikan, maka desain *phantom* akan disesuaikan. Tahap ini sangat penting untuk menjamin bahwa *phantom* tidak hanya akurat secara visual, tetapi juga fungsional dalam mendukung proses radiologi. Menurut Amankulor et al. (2025), validasi ini membuka jalan untuk penggunaan *phantom* dalam pelatihan klinis maupun pengujian perangkat baru dengan tingkat keandalan yang lebih tinggi.

Bab 2: Dasar Anatomi dan Fisika Radiologi Pelvis

2.1 Mengenal Anatomi Radiologis Pelvis: Tulang, Otot, dan Organ

Pelvis merupakan bagian tubuh yang memiliki struktur kompleks, terdiri atas unsur tulang, jaringan otot, serta berbagai organ dalam yang memiliki fungsi vital. Keberadaan komponen-komponen ini, baik secara terpisah maupun sebagai satu kesatuan sistemik, menjadikan pelvis sebagai objek penting dalam pencitraan medis. Dalam praktik radiologi, pemahaman yang utuh tentang struktur ini menjadi kunci dalam mengenali perubahan fisiologis maupun adanya kelainan.

2.1.1 Struktur Tulang Pelvis

Secara anatomis, pelvis dibentuk oleh empat komponen tulang utama yaitu sakrum, ilium, ishium, dan pubis. Keempat bagian ini bersatu membentuk cincin tulang yang menyangga berat badan serta menjadi tempat perlekatan berbagai otot dan ligamen. Sakrum, sebagai kelanjutan dari tulang belakang, berfungsi sebagai fondasi utama yang menopang bagian atas tubuh. Di sisi lain, tulang ilium, ishium, dan pubis yang membentuk *os coxae* memberikan kestabilan dan membentuk rongga pelvis (Masrochah et al., 2019).

Pada pencitraan *computed tomography (CT scan)* dan *magnetic resonance imaging (MRI)*, struktur tulang ini mudah diidentifikasi melalui kontras densitas dan tampilan geometrisnya. Hal ini memudahkan dalam mengenali fraktur, perubahan degeneratif, atau invasi dari proses penyakit seperti neoplasma.

2.1.2 Jaringan Otot

Selain tulang, pelvis juga menjadi tempat bagi berbagai otot penting, terutama yang berperan dalam menjaga kestabilan dan fungsi dasar tubuh. Dua otot yang paling menonjol dalam wilayah ini adalah otot *levator ani* dan *piriformis*. Otot *levator ani* merupakan bagian dari diafragma pelvis yang menopang organ-organ dalam dan mengontrol aktivitas dasar seperti miksi dan defekasi. Sementara otot *piriformis* membantu dalam rotasi eksternal paha serta berperan dalam mobilitas pinggul.

Dalam konteks pencitraan, otot-otot ini dapat dikenali melalui sinyal khas pada *MRI*, khususnya pada sekuens T1 dan T2. Otot yang sehat biasanya menunjukkan tampilan homogen dengan intensitas sedang. Ketidakteraturan pada kontur, perubahan densitas, atau asimetri sering kali menjadi indikasi adanya trauma, edema, atau bahkan massa patologis (Setiawati, 2023).

2.1.3 Organ Dalam

Organ-organ yang berada di dalam rongga pelvis memiliki fungsi yang sangat penting dan saling berkaitan. Pada pria, terdapat prostat yang terletak tepat di bawah kandung kemih (vesika urinaria), mengelilingi uretra. Sedangkan pada perempuan, organ utama dalam rongga ini mencakup uterus, ovarium, dan vagina. Baik

pada pria maupun perempuan, terdapat pula rektum yang berfungsi sebagai saluran akhir sistem pencernaan.

Radiologi modern, khususnya *MRI pelvis*, sangat diandalkan untuk memvisualisasikan organ-organ ini secara detail. Gambar potong lintang dalam berbagai arah (aksial, koronal, sagital) memungkinkan identifikasi posisi, ukuran, dan hubungan antarorgan. Selain itu, perubahan pada jaringan lunak seperti penebalan dinding, pembesaran organ, atau adanya massa dapat dikenali sejak tahap awal dengan bantuan *imaging* (Puteri, 2020).

Teknik *MRI* memberikan keuntungan karena mampu membedakan jaringan lunak dengan kontras tinggi tanpa paparan radiasi. Sedangkan *CT scan* lebih diunggulkan dalam mengevaluasi tulang serta kondisi darurat seperti trauma pelvis. Pada beberapa kasus, kombinasi kedua teknik tersebut sering kali memberikan informasi yang lebih menyeluruh (Kartikasari & Kurniawan, 2024).

2.2 Koefisien Atenuasi, Densitas Elektron, dan Keterkaitannya dengan HU (Hounsfield Unit)

Hounsfield Unit (HU) merupakan satuan kuantitatif yang digunakan dalam pencitraan *computed tomography* (CT) untuk menggambarkan perbedaan densitas jaringan. Nilai HU dihitung berdasarkan perbandingan koefisien atenuasi linear suatu jaringan dengan air. Dengan kata lain, HU adalah representasi digital dari bagaimana jaringan menyerap atau melemahkan sinar-X yang melewatinya (Purwatiningsih & Prasetyo, 2024).

Koefisien atenuasi linear (μ) menunjukkan seberapa besar intensitas berkas sinar-X berkurang saat melewati jaringan tertentu. Nilai ini sangat dipengaruhi oleh komposisi atom, nomor atom efektif, serta densitas elektron. Jaringan dengan densitas elektron tinggi, seperti tulang, akan memiliki koefisien atenuasi lebih besar, sehingga menghasilkan nilai HU positif tinggi (Astuty, Dewang, & Purwanto, 2022). Sebaliknya, udara yang hampir tidak memiliki hambatan terhadap sinar-X memberikan nilai HU negatif, mendekati -1000.

2.2.1 Hubungan Linear antara Densitas Elektron dan HU

Keterkaitan antara densitas elektron dengan HU dapat dianggap linear. Ketika densitas elektron meningkat, jumlah interaksi antara foton sinar-X dan jaringan juga bertambah. Hal ini menyebabkan peningkatan atenuasi, yang akhirnya tercermin pada kenaikan nilai HU (Adrial, Ningsih, & Fadhilah, 2024). Sebagai contoh, jaringan lunak seperti otot berada pada rentang 30–70 HU karena kandungan air dan protein yang menengah, sedangkan tulang kortikal bisa mencapai lebih dari +1000 HU karena struktur mineralnya yang padat.

Kaitan ini tidak hanya penting bagi interpretasi pencitraan, tetapi juga krusial dalam perencanaan radioterapi. Nilai HU dari CT sering digunakan untuk memperkirakan densitas elektron relatif yang dibutuhkan dalam perhitungan distribusi dosis radiasi (Faizah, 2023). Dengan demikian, akurasi nilai HU sangat menentukan keberhasilan simulasi terapi radiasi.

2.2.2 Variabilitas Nilai HU pada Jaringan

Perlu dipahami bahwa nilai HU tidak selalu konstan untuk satu jenis jaringan. Faktor teknis, seperti voltase tabung CT, penggunaan filter citra, dan protokol pemindaian, dapat memengaruhi hasil pembacaan HU (Jamal, 2022). Selain itu, perbedaan fisiologis individu, misalnya variasi kandungan mineral dalam tulang atau kadar lemak dalam jaringan lunak, juga memberikan pengaruh pada nilai HU yang terukur.

Sari (2023) menjelaskan bahwa perubahan ketebalan serta *infill density* pada material *phantom* dapat memengaruhi nilai HU karena keduanya memengaruhi koefisien atenuasi. Hal ini menunjukkan bahwa HU tidak hanya mencerminkan karakteristik biologis, tetapi juga sensitif terhadap faktor teknis dalam proses pencitraan.

2.2.3 Signifikansi dalam Aplikasi Medis

Keterkaitan erat antara koefisien atenuasi, densitas elektron, dan HU membuatnya menjadi parameter penting dalam diagnosis maupun terapi. Dalam radiologi diagnostik, perbedaan HU membantu membedakan jenis jaringan, seperti membedakan kista berisi cairan dengan tumor padat. Sementara dalam radioterapi, HU digunakan sebagai dasar untuk menghitung *relative electron density* (RED), yang menjadi parameter utama dalam perhitungan distribusi dosis (Salim, 2023).

Dengan demikian, pemahaman mendalam tentang hubungan ini bukan hanya soal teknis, melainkan juga menyangkut keamanan pasien. Ketepatan dalam membaca HU dapat meminimalkan

kesalahan diagnosis sekaligus memastikan dosis radiasi yang tepat dalam terapi kanker.

2.3 Parameter Pencitraan Relevan: CT, Radiografi, dan Kompatibilitas Teknik

Dalam pencitraan pelvis, terdapat sejumlah parameter teknis yang sangat menentukan kualitas hasil akhir. Teknik *computed tomography (CT)* berperan dalam menghasilkan pemetaan tiga dimensi dengan resolusi tinggi, sedangkan radiografi konvensional umumnya dipakai sebagai pemeriksaan awal karena sifatnya yang cepat dan sederhana. Keberhasilan kedua teknik ini sangat bergantung pada pemilihan parameter seperti tegangan tabung (*kilovolt peak/kVp*), arus tabung (*milliampere-second/mAs*), waktu pemindaian, serta ketebalan irisan atau *slice thickness*.

2.3.1 CT untuk Pemetaan 3D

CT memungkinkan gambaran anatomi pelvis yang detail dengan kontras tinggi, terutama ketika menggunakan protokol pemindaian yang dioptimalkan. Tegangan tabung (*kVp*) yang lebih tinggi biasanya digunakan untuk menghasilkan penetrasi sinar lebih baik, sementara nilai *mAs* berperan dalam mengendalikan tingkat kebisingan citra. Misalnya, penggunaan 120 kVp dengan variasi 200–400 mAs terbukti meningkatkan kualitas citra tanpa menambah artefak yang signifikan (Osman et al., 2019). Selain itu, ketebalan irisan sangat berpengaruh terhadap detail struktural; irisan tipis

memberikan resolusi lebih baik tetapi dengan konsekuensi dosis radiasi yang lebih besar (Verreynne, 2020).

2.3.2 Radiografi Konvensional dalam Pemeriksaan Awal

Berbeda dengan CT, radiografi konvensional sering dijadikan langkah awal karena relatif cepat dan dosis radiasinya lebih rendah. Parameter kVp dan mAs pada radiografi harus dipilih hati-hati untuk menjaga keseimbangan antara kualitas citra dan dosis yang diterima pasien. Gyan (2020) menunjukkan bahwa pemilihan parameter eksposur yang tidak sesuai dapat menyebabkan citra yang kurang diagnostik sekaligus meningkatkan paparan yang tidak diperlukan. Pada radiografi pelvis, kVp sekitar 70–90 dengan mAs moderat sering kali dipakai untuk menjaga kontras tulang dan jaringan lunak tetap optimal.

2.3.3 Artefak dan Kompatibilitas Material Phantom

Salah satu tantangan dalam pencitraan pelvis adalah munculnya artefak, terutama jika terdapat material logam atau prosthesis. Artefak ini bisa berupa *streak artifact* atau *beam hardening*, yang mengganggu interpretasi. Hjouj et al. (2024) menekankan bahwa variasi kVp (80, 100, 120, dan 140) memengaruhi tingkat keparahan artefak pada pemindaian pelvis dengan prosthesis logam. Oleh karena itu, *phantom* yang digunakan dalam pengujian harus kompatibel dengan berbagai teknik pencitraan, sehingga tidak menimbulkan artefak tambahan yang dapat menyesatkan interpretasi.

Kompatibilitas material *phantom* sangat penting, terutama untuk menjaga konsistensi hasil lintas modalitas. Material dengan

densitas radiologis yang menyerupai jaringan tubuh diperlukan agar baik CT maupun radiografi dapat menampilkan citra yang realistis. Jika material *phantom* menghasilkan penyebaran atau penyerapan sinar yang tidak seimbang, maka citra bisa tampak tidak natural dan sulit dibandingkan dengan hasil klinis (Dumela, 2024).

2.3.4 Waktu Pemindaian dan Faktor Rekonstruksi

Selain parameter eksposur, waktu pemindaian juga berperan penting, terutama pada CT. Waktu pemindaian yang terlalu lama meningkatkan risiko artefak akibat gerakan pasien, sedangkan waktu yang terlalu singkat bisa mengurangi kualitas citra. Jantawong (2021) mencatat bahwa kombinasi pengaturan energi ganda pada CT dapat memperbaiki deteksi lesi hati, namun juga meningkatkan sensitivitas terhadap *beam hardening*. Hal ini menunjukkan pentingnya keseimbangan antara kecepatan pemindaian, energi yang digunakan, dan algoritme rekonstruksi.

2.3.5 Integrasi Teknik dalam Praktik Klinis

Dalam praktik klinis, kombinasi antara radiografi dan CT memberikan nilai diagnostik yang saling melengkapi. Radiografi tetap relevan untuk evaluasi awal karena keterjangkauan dan kecepatan, sementara CT menawarkan pemetaan detail dengan dimensi tiga. Namun, agar hasil kedua teknik tersebut optimal, baik pasien maupun *phantom* yang digunakan harus diperlakukan dengan parameter teknis yang sesuai. Wellenberg et al. (2018) menegaskan bahwa strategi pengurangan artefak dalam CT, termasuk algoritme rekonstruksi khusus, berperan besar dalam menghasilkan kualitas citra yang lebih dapat diandalkan.

Dengan demikian, pengaturan parameter pencitraan yang tepat bukan hanya soal kualitas citra semata, tetapi juga berkaitan dengan kompatibilitas material *phantom*, efisiensi waktu pemindaian, dan keandalan interpretasi.

2.4 Target Sifat Radiologis Material Pengganti Tulang dan Jaringan Lunak

Pembuatan *phantom* medis memerlukan material yang tidak hanya menyerupai bentuk anatomi manusia, tetapi juga memiliki sifat fisik serta radiologis yang relevan. Tujuan utamanya adalah menciptakan representasi yang konsisten antara citra medis dari *phantom* dan citra medis pasien sesungguhnya. Hal ini penting karena ketepatan *phantom* sangat memengaruhi kualitas pengujian maupun simulasi radiologi.

Untuk bagian tulang, material harus memiliki nilai *Hounsfield Unit* (HU) yang tinggi, setara dengan densitas tulang manusia. Resin dengan penambahan partikel kalsium atau hidroksiapatit merupakan pilihan yang sering digunakan. Penelitian terkini menegaskan bahwa campuran resin dengan 30% hidroksiapatit mampu mendekati karakteristik tulang kortikal dalam pencitraan CT (Cabahug et al., 2025). Selain itu, gips atau *plaster of Paris* yang diperkaya dengan bahan logam ringan juga mulai dikembangkan untuk meningkatkan realisme dalam representasi tulang (Miller, 2025).

Sementara itu, jaringan lunak memerlukan material yang mampu meniru sifat atenuasi sinar-X pada kisaran HU rendah hingga menengah. Gelatin, agar, maupun *polymer-based gel* telah lama digunakan, namun inovasi terbaru memperkenalkan material filamen *soft tissue equivalent* dalam teknologi cetak 3D yang memberikan stabilitas lebih baik pada jangka panjang (Bustillo et al., 2025). Bahan-bahan ini memungkinkan simulasi yang realistis terhadap organ seperti otot, hati, atau jaringan lemak dalam pemindaian CT maupun MRI.

2.4.1 Realisme Anatomi dalam Phantom

Ketepatan sifat radiologis tidak hanya sebatas angka HU, melainkan juga kesesuaian dengan respons nyata jaringan saat terkena radiasi. Misalnya, dalam pencitraan CT resolusi tinggi, perbedaan kecil dalam densitas dapat memengaruhi kontras citra. Oleh karena itu, pemilihan material *tissue equivalent* harus mempertimbangkan homogenitas serta kestabilannya. Studi oleh Oliveira-Santos dan Gaêta-Araujo (2025) menunjukkan bahwa bahan pengganti jaringan lunak dengan nilai HU yang konsisten mampu mengurangi variasi *gray values* dalam citra cone-beam CT, sehingga meningkatkan keandalan hasil.

2.4.2 Kombinasi Material untuk Heterogenitas Jaringan

Tubuh manusia bukanlah struktur homogen. Oleh sebab itu, *phantom* yang hanya menggunakan satu jenis material cenderung gagal merepresentasikan kompleksitas anatomi. Kombinasi resin berkalsium untuk tulang dan gelatin atau polimer untuk jaringan lunak menjadi strategi umum. Penelitian terbaru bahkan

mengembangkan *heterogeneous phantoms* dengan lapisan material berbeda agar dapat meniru variasi jaringan manusia secara lebih akurat (Yücel & Demirel, 2025). Hasilnya, *phantom* dapat digunakan tidak hanya untuk evaluasi dosis radiasi, tetapi juga untuk pengujian kualitas pencitraan pada organ dengan tekstur kompleks.

Dengan demikian, pemilihan material untuk *phantom* bukan hanya urusan teknis semata, tetapi juga bagian dari upaya mereplikasi tubuh manusia dengan setepat mungkin. Keserasian sifat fisik dan radiologis antara material pengganti dengan jaringan asli akan menentukan apakah *phantom* benar-benar dapat berfungsi sebagai jembatan antara simulasi teknologis dan praktik klinis.

2.5 Kebutuhan Klinis: Positioning, Landmark, dan Reproducibility

Dalam dunia radiologi dan terapi radiasi, keberhasilan prosedur sangat ditentukan oleh ketepatan pengambilan gambar atau penyinaran pada area tubuh yang dituju. Oleh karena itu, kemampuan untuk mengatur posisi objek secara presisi dan mempertahankan konsistensinya dari waktu ke waktu menjadi sangat penting. Di sinilah *phantom* antropomorfik mengambil peran penting sebagai objek uji yang memungkinkan proses tersebut berlangsung secara terkontrol dan berulang.

Salah satu prinsip yang menjadi kunci dalam evaluasi klinis adalah *reproducibility*, atau kemampuan untuk mengulangi hasil dengan kondisi yang serupa. Dalam konteks ini, *phantom* harus

dirancang agar mampu meniru anatomi manusia secara stabil, memungkinkan pengulangan posisi yang identik tanpa penyimpangan berarti. Hal ini terutama krusial dalam radioterapi, di mana perbedaan posisi beberapa milimeter saja dapat berdampak pada efektivitas pengobatan (Alzahrani, 2024).

2.5.1 Peran *Landmark* Anatomi dalam Penyelarasan

Untuk memastikan akurasi, digunakan *landmark* anatomi sebagai titik referensi tetap yang memandu penyelarasan objek terhadap alat pencitraan atau penyinaran. Beberapa *landmark* yang umum digunakan pada wilayah pelvis mencakup simfisis pubis, sakrum, dan tulang iliaka. Titik-titik ini secara visual dapat dikenali baik melalui pencitraan *CT* maupun *MRI*, sehingga membantu teknisi dalam memastikan bahwa orientasi tubuh atau *phantom* selalu konsisten (Weidner, 2025).

Selain berperan sebagai acuan posisi, *landmark* ini juga membantu dalam membandingkan hasil pencitraan dari waktu ke waktu, terutama dalam pemantauan progresi penyakit atau evaluasi keberhasilan terapi. Oleh karena itu, desain *phantom* modern cenderung memasukkan representasi dari struktur-struktur tulang ini dengan presisi tinggi agar dapat digunakan secara fungsional dalam pengujian berbagai protokol klinis.

2.5.2 Stabilitas dan Adaptasi terhadap Gerakan

Salah satu tantangan utama dalam pencitraan medis adalah pergerakan pasien yang tidak terkontrol, baik karena gerakan napas, denyut jantung, atau ketidaknyamanan posisi. Oleh sebab itu, pengujian sistem pencitraan atau penyinaran juga perlu melibatkan

skenario gerakan agar dapat mensimulasikan kondisi riil di ruang tindakan medis.

Pengembangan *phantom* dinamis merupakan respons terhadap kebutuhan ini. Beberapa produsen telah menciptakan *phantom* abdomen dengan simulasi pergerakan napas yang memungkinkan evaluasi perangkat dalam kondisi bergerak. Hasilnya menunjukkan bahwa stabilitas sistem dalam menghadapi pergeseran posisi sangat bergantung pada presisi penyesuaian terhadap *landmark* yang telah ditetapkan (Weidner, 2025).

Lebih jauh lagi, dalam situasi radioterapi berbasis panduan gambar (*image-guided radiotherapy*), *phantom* digunakan untuk menguji kemampuan sistem mengenali dan mengoreksi pergeseran posisi secara otomatis. Tanpa kemampuan *phantom* untuk mempertahankan bentuk dan ukuran dari waktu ke waktu, proses validasi seperti ini tidak mungkin dilakukan secara akurat (Alzahrani, 2024).

2.5.3 Implikasi terhadap Validitas Sistem

Ketepatan *positioning* dan kemampuan pengulangan tidak hanya berdampak pada kualitas hasil pencitraan atau terapi, tetapi juga menjadi tolok ukur validitas sistem secara keseluruhan. Jika sistem tidak mampu memberikan hasil yang konsisten pada objek uji yang tidak berubah, maka keandalannya dalam kondisi nyata tentu patut dipertanyakan.

Dengan demikian, *phantom* yang baik tidak hanya meniru struktur tubuh manusia, tetapi juga memungkinkan pengujian sistem dalam skenario yang menuntut presisi tinggi. Keandalan dalam

positioning, kejelasan *landmark*, dan kestabilan bentuk menjadikannya alat yang sangat berharga dalam mendukung praktik klinis yang aman dan akurat.

Bab 3: Metode Sofyan:

Prinsip, Tahapan, dan Keunggulan

3.1 Konsep Inti Metode Sofyan: Alur Kerja Terstruktur dan Berbasis Cetakan Modular

Dalam pengembangan *phantom* antropomorfik untuk radiologi modern, munculnya konsep berbasis cetakan modular menjadi terobosan yang semakin relevan, terlebih dengan kemajuan teknologi cetak tiga dimensi (*3D printing*). Salah satu gagasan yang menonjol adalah Metode Sofyan, yakni sistem kerja sistematis yang mengintegrasikan efisiensi produksi, presisi dimensi, serta kemampuan untuk direplikasi secara konsisten.

Metode ini memulai proses dari akuisisi data medis, seperti gambar *computed tomography* atau *magnetic resonance imaging*, yang kemudian dikonversi menjadi model tiga dimensi. Setelah itu, data digital ini diolah untuk mencetak cetakan modular yang dapat digunakan berulang kali. Dengan desain yang fleksibel, cetakan ini memungkinkan pencetakan berbagai bagian tubuh sesuai kebutuhan, seperti kepala, dada, atau pelvis. Fleksibilitas ini menjadi nilai

tambah terutama dalam pengujian alat-alat pencitraan dengan cakupan anatomi yang berbeda (Adam et al., 2022).

3.1.1 Modularitas sebagai Solusi Produksi Efisien

Modularitas bukan hanya sekadar strategi teknis, tetapi juga filosofi produksi. Dalam praktiknya, setiap modul *phantom* dirancang agar dapat dilepas-pasang dan dikombinasikan secara bebas, tergantung skenario pengujian. Hal ini memungkinkan pengguna untuk tidak perlu mencetak keseluruhan tubuh dalam satu kali proses, melainkan cukup bagian yang relevan. Efisiensi ini memberikan keuntungan signifikan dalam hal biaya, waktu produksi, dan pengurangan limbah material.

Studi oleh Hatamikia et al. (2022) menunjukkan bahwa pendekatan modular berbasis cetakan mampu mereplikasi morfologi jaringan tubuh dengan ketelitian tinggi, sekaligus memungkinkan penyesuaian pada tingkat radiodensitas dengan mengatur kerapatan isian (*infill density*) bahan cetak. Temuan ini mendukung gagasan bahwa metode berbasis cetakan dapat menciptakan *phantom* yang tidak hanya menyerupai struktur tubuh, tetapi juga sesuai secara radiologis saat diuji pada mesin CT.

3.1.2 Alur Kerja yang Terstruktur dan Dapat Diulang

Keunggulan utama dari Metode Sofyan terletak pada alur kerja yang jelas dan terdokumentasi. Proses ini terbagi dalam beberapa tahap penting, mulai dari perencanaan digital berbasis citra medis, pencetakan cetakan modular, pemilihan material pengisi yang sesuai dengan karakteristik jaringan, hingga perakitan akhir *phantom*.

Seluruh proses ini dirancang agar dapat direproduksi kembali oleh pihak lain dengan hasil yang seragam. Dalam konteks pengujian sistem pencitraan atau terapi radiasi, kemampuan replikasi ini krusial karena memungkinkan perbandingan data antarfasilitas atau antarmetode dengan tingkat konsistensi tinggi (Slagowski et al., 2020).

Untuk memastikan replikasi tersebut, digunakan parameter digital tetap dalam tahap konversi data citra menjadi model 3D, serta digunakan bahan dengan sifat fisis dan kimia yang telah dikalibrasi secara konsisten. Proses pencetakan pun memanfaatkan mesin dengan spesifikasi seragam, seperti resolusi nozzle dan suhu pencetakan yang tetap, sehingga menghasilkan bagian *phantom* yang identik dari waktu ke waktu.

3.1.3 Relevansi Klinis dan Masa Depan Metode Ini

Metode Sofyan menjadi jawaban atas kebutuhan akan efisiensi, keterjangkauan, dan presisi dalam dunia radiologi modern. Tidak hanya berguna dalam proses validasi teknis, metode ini juga memungkinkan pemanfaatan *phantom* secara luas dalam pelatihan prosedural serta pengujian adaptif yang menyesuaikan pergerakan anatomi tubuh.

Studi dari Adam et al. (2022) bahkan menunjukkan bahwa *phantom* yang dicetak menggunakan cetakan modular mampu merepresentasikan struktur kepala dan leher secara akurat dalam skenario *radiopharmaceutical dosimetry*, yang sebelumnya sulit dilakukan tanpa prototipe kompleks.

Dengan kemampuan adaptasinya, pendekatan ini memiliki potensi besar untuk diadopsi lebih luas di berbagai fasilitas kesehatan, termasuk di negara berkembang yang sering kali menghadapi keterbatasan biaya dan infrastruktur teknologi tinggi.

3.2 Tahapan Umum: Segmentasi—Desain—Pencetakan Cetakan—Penuangan—Perakitan

Metode Sofyan dalam pembangunan *phantom* radioterapi melibatkan serangkaian tahap yang terstruktur dengan rapi, dimulai dari segmentasi hingga perakitan akhir. Tahap-tahap ini menjadi penting karena setiap langkah menentukan kualitas akhir *phantom* yang akan digunakan dalam simulasi terapi radiasi.

Tahap pertama adalah **segmentasi**, yaitu proses mengekstraksi struktur anatomi dari citra CT. Proses ini biasanya dilakukan dengan *software* pengolah citra medis seperti *DICOM viewer*. Segmentasi bertujuan untuk memisahkan jaringan atau organ tertentu dari citra tubuh agar dapat dianalisis secara individual. Yuliandari dan Oktamuliani (2023) menjelaskan bahwa ketepatan segmentasi sangat menentukan keberhasilan pembuatan model 3D, karena kesalahan kecil dapat berdampak pada distribusi dosis radiasi yang dihasilkan.

Selanjutnya adalah tahap **desain**. Dari hasil segmentasi, dibuatlah model 3D dengan bantuan *Computer-Aided Design* (CAD). Pada tahap ini, rekonstruksi digital dilakukan sehingga anatomi pasien dapat dimodelkan secara presisi. Syaputra (2023)

menegaskan bahwa pemanfaatan CAD memungkinkan konversi citra CT atau MRI ke bentuk tiga dimensi yang siap digunakan untuk fabrikasi *phantom*. Proses ini juga membuka peluang untuk menyesuaikan ukuran, bentuk, dan tingkat detail sesuai kebutuhan terapi.

Tahap berikutnya adalah **pencetakan cetakan**, di mana model 3D digunakan untuk mencetak cetakan negatif dengan teknologi *3D printing*. Material yang umum dipakai dalam pencetakan ini adalah *Polylactic Acid* (PLA) atau resin khusus. Cetakan negatif tersebut berfungsi sebagai wadah atau kerangka dalam penuangan material pengganti jaringan (Yuliandari & Oktamuliani, 2023).

Kemudian dilakukan tahap **penuangan**. Pada fase ini, material pengganti jaringan dituangkan ke dalam cetakan yang telah dipersiapkan. Pemilihan material menjadi krusial karena harus memiliki koefisien atenuasi dan densitas elektron yang mendekati jaringan manusia. Dengan demikian, *phantom* tidak hanya menyerupai bentuk anatomi, tetapi juga memiliki sifat fisik yang relevan untuk simulasi dosis radiasi.

Tahap terakhir adalah **perakitan**, di mana seluruh bagian *phantom* yang telah dicetak dan dituangi material disusun kembali untuk membentuk unit anatomis yang utuh. Proses perakitan ini juga mencakup stabilisasi struktur agar *phantom* dapat digunakan berulang kali dalam pengujian radioterapi tanpa mengalami deformasi. Syaputra (2023) menambahkan bahwa evaluasi akhir,

berupa pencitraan ulang dengan CT, sering dilakukan untuk memastikan kesesuaian antara *phantom* dan anatomi target.

Dengan kelima tahapan ini, metode Sofyan dapat menghasilkan *phantom* yang mendekati kondisi nyata tubuh manusia. Hal ini menjadikannya instrumen yang tidak hanya penting untuk pengujian distribusi dosis radiasi, tetapi juga untuk meningkatkan keamanan dan efektivitas terapi.

3.3 Penekanan pada Keseragaman Dimensi dan Kemudahan Replikasi

Salah satu aspek penting dalam rancangan *phantom* adalah menjaga konsistensi dimensi sehingga setiap unit yang diproduksi tetap seragam meski dibuat pada waktu berbeda. Hal ini menjadi keunggulan signifikan karena keseragaman memungkinkan perbandingan hasil pencitraan yang lebih objektif. Tanpa konsistensi ukuran, maka setiap *phantom* bisa menghasilkan variasi citra yang menyulitkan interpretasi. Oleh sebab itu, desain modular menjadi solusi yang memungkinkan pengendalian presisi sekaligus mempermudah replikasi.

3.3.1 Konsistensi Dimensi sebagai Fondasi Kualitas

Konsistensi dimensi berhubungan langsung dengan keandalan penggunaan *phantom*. Dalam konteks *quality assurance*, dimensi yang stabil memastikan bahwa variasi citra lebih disebabkan oleh pengaturan pencitraan daripada kesalahan produksi *phantom* itu sendiri. Xu et al. (2024) menekankan bahwa rancangan modular

dalam *phantom* untuk radioterapi stereotaktik meningkatkan keakuratan kalibrasi karena variasi dimensi dapat ditekan seminimal mungkin. Dengan demikian, keseragaman ini menjadi dasar kepercayaan terhadap data yang dihasilkan.

3.3.2 Modularitas sebagai Strategi Replikasi

Modularitas memberikan keuntungan besar dalam hal replikasi. Setiap bagian *phantom* dapat diproduksi secara terpisah, diuji, lalu disatukan kembali sesuai kebutuhan. Jika terdapat perubahan desain, pembaruan cukup dilakukan pada modul tertentu tanpa harus mencetak ulang keseluruhan *phantom*. Kiss et al. (2022) menegaskan bahwa modularitas juga mendukung uji coba berbagai parameter pencitraan tanpa mengganggu struktur utama *phantom*. Dengan cara ini, modularitas menjadi jembatan antara fleksibilitas desain dan konsistensi hasil.

3.3.3 Relevansi untuk Edukasi dan Pelatihan

Keseragaman dimensi juga sangat penting untuk kebutuhan edukasi. Dalam proses pembelajaran, para praktisi memerlukan *phantom* yang seragam agar latihan dapat dilakukan berulang kali dengan hasil yang konsisten. Yusuff et al. (2024) menunjukkan bahwa *phantom* modular berbasis cetak 3D terbukti efektif sebagai sarana pengajaran karena dapat digunakan untuk mendemonstrasikan prinsip kualitas citra secara berulang tanpa mengurangi akurasi. Dengan demikian, keseragaman tidak hanya berdampak pada pengujian teknis, tetapi juga pada proses transfer pengetahuan.

3.3.4 Kalibrasi dan Uji Kinerja

Selain untuk edukasi, *phantom* yang seragam juga esensial dalam proses kalibrasi perangkat pencitraan medis. Homolka et al. (2023) menekankan bahwa desain modular mampu meningkatkan akurasi pengukuran pada *digital breast tomosynthesis*, karena ketidakpastian akibat perbedaan dimensi dapat diminimalkan. Konsistensi ini mendukung *quality assurance*, terutama ketika perangkat digunakan lintas fasilitas atau dibandingkan antar pusat layanan kesehatan.

3.3.5 Tantangan dan Perkembangan Teknologi

Meski modularitas menjanjikan fleksibilitas, tetap ada tantangan dalam menjaga akurasi dimensi antar modul. Wegner dan Krause (2024) menyoroti bahwa meski cetak 3D memudahkan produksi *phantom* modular, variasi kecil pada proses manufaktur bisa memengaruhi presisi penyatuan antar bagian. Oleh sebab itu, standar manufaktur dan pengendalian mutu tetap dibutuhkan agar modularitas tidak menimbulkan variasi yang justru mengurangi keandalan.

Dengan demikian, penekanan pada keseragaman dimensi dan kemudahan replikasi bukan sekadar aspek teknis, melainkan juga menyentuh aspek praktis seperti efisiensi biaya, kelancaran pelatihan, hingga keandalan pengukuran. Modularitas menjadikan *phantom* tidak hanya sebagai tiruan anatomi, tetapi juga sebagai instrumen yang dapat diproduksi ulang dengan tingkat kepercayaan tinggi.

3.4 Keunggulan (Biaya, Akses Material, Kemudahan Perawatan) dan Keterbatasan Praktis

Metode Sofyan dalam pengembangan *phantom* memiliki sejumlah keunggulan yang patut diperhatikan, terutama bila dibandingkan dengan produk komersial yang harganya jauh lebih tinggi. Pertama, dari segi biaya, *phantom* yang dibuat dengan teknik ini relatif lebih murah karena menggunakan material yang dapat diperoleh secara lokal. Resin, gelatin, hingga silika gel merupakan bahan yang mudah diakses di banyak daerah sehingga tidak perlu impor atau pemesanan khusus. Hal ini menjadikan metode ini sangat ekonomis, terutama untuk keperluan pendidikan atau pelatihan dasar yang membutuhkan replikasi anatomi manusia dengan biaya terjangkau (Meyer-Szary et al., 2022).

Selain biaya, keunggulan lain terletak pada aksesibilitas material. Dengan ketersediaan bahan yang mudah diperoleh, proses pembuatan *phantom* tidak memerlukan rantai pasokan yang kompleks. Kemudahan ini membuatnya lebih fleksibel untuk digunakan di berbagai institusi, baik skala besar maupun kecil. Bahkan, dengan memanfaatkan perangkat pencetak 3D yang kini semakin umum, metode ini semakin mudah untuk diadaptasi secara luas (George et al., 2017).

Kemudahan perawatan juga menjadi nilai tambah. *Phantom* hasil metode Sofyan tidak memerlukan alat perawatan khusus yang mahal. Cukup dengan penyimpanan yang tepat dan perlakuan

sederhana, material dapat bertahan dalam jangka waktu tertentu tanpa menurunkan kualitas secara signifikan. Berbeda dengan *phantom* komersial yang kadang memerlukan perawatan khusus, versi ini relatif lebih sederhana dan praktis (Ehler et al., 2018).

Namun, di balik keunggulan tersebut, metode Sofyan tetap memiliki keterbatasan yang harus diakui. Salah satunya adalah ketergantungan pada ketelitian desain digital. Setiap kesalahan pada tahap segmentasi atau pemodelan 3D akan berakibat pada bentuk *phantom* yang kurang akurat. Akurasi ini menjadi sangat krusial karena tujuan utama *phantom* adalah mensimulasikan kondisi anatomi manusia secara realistis.

Keterbatasan berikutnya adalah daya tahan material. Setelah beberapa siklus penggunaan atau paparan pada proses pencitraan berulang, sifat fisik dari material dapat mengalami degradasi. Misalnya, gelatin atau resin tertentu cenderung berubah densitas atau mengalami retakan halus setelah digunakan dalam jangka panjang. Hal ini berbeda dengan *phantom* komersial yang umumnya dirancang untuk memiliki ketahanan lebih lama (Wegner & Krause, 2024).

Selain itu, variasi karakteristik radiologis material juga menjadi tantangan tersendiri. Meski bahan-bahan seperti resin dan gelatin dapat mendekati sifat radiologis jaringan manusia, kontrol terhadap konsistensi nilai *Hounsfield Unit* (HU) sering kali sulit dilakukan. Faktor ini dapat menyebabkan variasi hasil citra yang tidak diinginkan. Penelitian menunjukkan bahwa meskipun *phantom* hasil cetak 3D menjanjikan dari segi fleksibilitas, variasi material

tetap menjadi kendala praktis yang perlu diperhatikan (Filippou & Tsoumpas, 2018).

Dengan demikian, metode Sofyan menawarkan keseimbangan antara biaya rendah, akses material yang mudah, dan kemudahan perawatan, namun harus disertai kesadaran akan keterbatasan praktisnya. Dalam konteks pengembangan *phantom*, pemilihan material dan ketelitian desain digital merupakan kunci untuk memaksimalkan manfaat sekaligus meminimalisasi hambatan yang muncul.

3.5 Penggunaan Alat Bantu Digital (CAD, Slicer, Mesh Repair)

Dalam praktik pembuatan *phantom* antropomorfik, terutama yang mengikuti prinsip modular seperti pada Metode Sofyan, keterlibatan alat bantu digital memainkan peran sentral dalam memastikan presisi, efisiensi, dan replikasi hasil. Pemanfaatan perangkat lunak (*software*) seperti *Computer-Aided Design (CAD)*, *slicer*, serta alat perbaikan jaringan tiga dimensi (*mesh repair tools*) bukan lagi pelengkap, tetapi menjadi bagian esensial dari seluruh proses kerja.

3.5.1 Desain Model 3D dengan CAD Software

Langkah awal dalam pembuatan *phantom* berbasis citra medis adalah konversi data DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) menjadi model tiga dimensi. Proses ini umumnya dilakukan melalui perangkat lunak CAD seperti *Fusion*

360, *SolidWorks*, atau *Blender*. Software-software ini menyediakan lingkungan desain yang fleksibel dan detail, memungkinkan pengguna untuk membuat bentuk anatomi secara presisi sesuai hasil akuisisi dari CT atau MRI.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Syaputra (2023), disebutkan bahwa penggunaan *Fusion 360* dan *Blender* sangat efektif dalam mengintegrasikan struktur hasil segmentasi dari perangkat *3D Slicer*, untuk kemudian dioptimalkan menjadi objek solid siap cetak. Tahapan ini memastikan dimensi anatomi tetap akurat, sekaligus memberi ruang untuk penyesuaian modular sesuai tujuan pengujian.

3.5.2 Konversi ke Format Cetak melalui *Slicer Software*

Setelah model *phantom* selesai dibuat dalam *CAD*, tahap berikutnya adalah mengkonversi file tersebut ke dalam format cetak (biasanya *.gcode*) menggunakan *slicer software*. Program seperti *Cura*, *PrusaSlicer*, dan *Simplify3D* menginterpretasikan model menjadi lapisan-lapisan cetak sesuai dengan parameter yang ditentukan, seperti resolusi, ketebalan lapisan (*layer height*), kecepatan cetak, dan pengaturan pengisian (*infill*).

Menurut Witanto (2023), parameter seperti *infill density* dan pola pengisian sangat berpengaruh terhadap kepadatan hasil cetak dan kesesuaiannya dengan nilai Hounsfield Unit dalam simulasi radiologi. Oleh karena itu, penggunaan *slicer* bukan sekadar teknis pencetakan, melainkan menjadi bagian dari kalibrasi radiologis agar hasil cetak mendekati karakteristik jaringan tubuh manusia.

3.5.3 Perbaikan *Mesh* Sebelum Pencetakan

Salah satu tantangan dalam pembuatan model 3D dari data medis adalah cacat geometris berupa lubang, permukaan tidak tertutup, atau struktur mesh yang tumpang tindih. Jika dibiarkan, hal ini bisa menyebabkan kegagalan pencetakan atau menghasilkan bentuk *phantom* yang tidak akurat.

Untuk mengatasi hal tersebut, digunakan *mesh repair tools* seperti *Meshmixer* dan *Netfabb*. Perangkat lunak ini dirancang untuk memperbaiki struktur permukaan mesh secara otomatis maupun manual, memastikan model dapat diproses oleh printer 3D tanpa gangguan. Dalam studi oleh Andryani et al. (2023), *Meshmixer* terbukti mampu mengoptimalkan *triangular mesh* hasil konversi dari CT-scan untuk pembuatan model kranioplasti, yang juga digunakan dalam pengembangan *phantom* kranium.

Proses perbaikan ini tidak hanya meningkatkan keandalan produksi, tetapi juga memperkecil risiko pencetakan ulang akibat model yang rusak. Dengan demikian, kualitas akhir *phantom* menjadi lebih terjamin dan hemat waktu produksi.

3.5.4 Integrasi dalam Workflow Modular

Ketiga kelompok alat bantu ini—*CAD*, *slicer*, dan *mesh repair*—bekerja secara terpadu dalam mendukung proses pembuatan *phantom* yang efisien dan replikatif. Metode Sofyan menempatkan integrasi perangkat ini sebagai komponen wajib dalam alur kerja, agar hasil akhir memiliki nilai teknis dan fungsional dalam konteks radiologi klinis maupun pelatihan.

Melalui pemanfaatan alat bantu digital, tidak hanya efisiensi kerja yang meningkat, tetapi juga jaminan bahwa setiap *phantom* yang diproduksi dapat diandalkan untuk pengujian diagnostik, simulasi radiasi, dan kalibrasi sistem.

Bab 4: Material: Gypsum sebagai Tulang dan Resin sebagai Jaringan Lunak

4.1 Gypsum: Karakter Mekanik, Densitas, dan Penyesuaian HU

Dalam proses penciptaan *phantom* antropomorfik yang digunakan untuk pengujian sistem pencitraan medis, pemilihan bahan yang menyerupai jaringan biologis manusia menjadi aspek fundamental. Salah satu bahan yang sering digunakan adalah gypsum, yang dikenal luas karena kemiripannya dengan tulang manusia dalam hal densitas dan karakteristik radiologis. Gypsum, atau kalsium sulfat dihidrat ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), memberikan kestabilan mekanik serta memungkinkan modifikasi nilai densitas dan HU (Hounsfield Unit) untuk meniru tulang kortikal.

4.1.1 Karakter Mekanik Gypsum

Gypsum dikenal memiliki struktur padat dan keras setelah mengalami proses pencampuran dan pengerasan. Karakteristik ini menjadikannya salah satu alternatif bahan yang paling mendekati tulang keras, seperti tulang ilium atau sakrum. Studi oleh Sari et al. (2023) menunjukkan bahwa gypsum memiliki kemampuan untuk

mempertahankan bentuk secara stabil dalam jangka panjang, menjadikannya cocok untuk *phantom* edukatif maupun untuk pengujian alat radiologi yang membutuhkan struktur kaku dan tidak berubah-ubah.

Daya tahan gipsium terhadap deformasi juga menjadikannya ideal untuk pemindaian berulang, karena tidak mengalami distorsi akibat suhu atau kelembaban dalam batas normal ruang pemeriksaan. Meski tidak memiliki fleksibilitas seperti silikon atau bahan lunak lainnya, kekuatan tekan gipsium justru menjadi keunggulan saat merepresentasikan bagian tubuh yang mengandung tulang.

4.1.2 Densitas dan Relevansi Radiologis

Dalam dunia radiologi, densitas material merupakan parameter penting karena menentukan bagaimana sinar-X atau gelombang elektromagnetik lainnya berinteraksi dengan objek. Gipsium memiliki densitas antara 1,6 hingga 2,3 gram per sentimeter kubik, yang mendekati kisaran densitas tulang kortikal manusia.

Densitas ini berpengaruh langsung terhadap nilai HU yang terbaca pada perangkat CT scan. Dalam kondisi standar, gipsium memberikan nilai HU sekitar 800 hingga 1300, tergantung pada kadar air dan komposisi pencampur. Nilai ini cukup ideal untuk mewakili tulang padat dalam citra potong lintang, memberikan visualisasi yang jelas terhadap kontur dan batas struktural (Istiqomah & Fakhurreza, 2025).

Selain itu, kekonsistenan densitas pada gipsium mempermudah proses kalibrasi dan pengukuran dosis dalam praktik

klinis. Karena HU sangat erat kaitannya dengan estimasi dosis dalam radioterapi maupun pengukuran ketebalan jaringan, maka bahan yang stabil secara densitas akan menghasilkan pembacaan yang akurat dan dapat diandalkan.

4.1.3 Penyesuaian Nilai HU dengan Aditif

Salah satu keunggulan dari penggunaan gipsium adalah kemampuannya untuk disesuaikan. Penambahan aditif tertentu, seperti serbuk kalsium karbonat, resin epoksi, atau bahkan bubuk logam, dapat meningkatkan nilai HU hingga menyerupai jaringan tulang tertentu, termasuk vertebra atau femur. Proses ini telah diterapkan dalam beberapa skenario pembuatan *phantom*, khususnya untuk aplikasi pencitraan resolusi tinggi dan validasi sistem CT (Sari et al., 2023).

Selain meningkatkan HU, aditif juga berfungsi memperkuat struktur mikro gipsium, menurunkan porositas, dan meningkatkan ketahanan terhadap retak mikro. Hal ini penting dalam konteks penggunaan berulang atau penyimpanan jangka panjang yang berpotensi menyebabkan degradasi material.

Penggunaan aditif harus mempertimbangkan keamanan dan ketersediaannya, terutama jika *phantom* digunakan untuk pelatihan intensif di institusi pendidikan. Oleh karena itu, pengujian awal terhadap komposisi campuran sangat dianjurkan sebelum produksi skala besar dilakukan.

4.1.4 Aksesibilitas dan Aplikasi Praktis

Dibandingkan dengan bahan sintetik komersial lain yang berharga tinggi, gipsium menawarkan kombinasi antara

keterjangkauan dan performa. Di berbagai negara berkembang, gipsum telah menjadi bahan utama untuk pembuatan *phantom* lokal karena ketersediaannya yang luas dan metode penggunaannya yang sederhana. Cukup dengan mencampurkan bubuk gipsum dengan air sesuai rasio tertentu, bahan siap digunakan untuk dicetak sesuai bentuk anatomi yang diinginkan.

Selain itu, gipsum juga mendukung pencetakan secara manual atau melalui cetakan silikon yang dapat diproduksi dengan teknologi *3D printing*. Dengan demikian, penggunaan gipsum menjadi solusi praktis dalam menyusun *phantom* untuk pelatihan, pengujian perangkat, dan simulasi prosedur diagnostik tanpa biaya tinggi.

4.2 Resin: Viskositas, Curing, Stabilitas, dan Pewarnaan/Penambahan Filler

Resin sintetis, seperti epoxy dan polyester resin, merupakan salah satu material utama yang digunakan dalam pembuatan *phantom* medis karena sifat mekanik dan radiologisnya yang dapat diatur. Penggunaannya sangat luas, terutama sebagai simulasi jaringan lunak dalam radioterapi maupun uji pencitraan medis.

Viskositas menjadi parameter pertama yang penting. Resin dengan viskositas rendah lebih mudah mengalir dan mampu mengisi cetakan dengan detail kecil, sehingga sesuai untuk struktur anatomi kompleks. Sebaliknya, resin dengan viskositas tinggi sering menimbulkan gelembung udara dan tidak homogen, yang dapat

memengaruhi keseragaman HU pada pencitraan CT (Yunianto, Anwar, & Ardyanto, 2024). Oleh karena itu, pengendalian viskositas melalui pemilihan resin maupun penambahan pelarut sering dilakukan.

Faktor berikutnya adalah **waktu curing**. Resin memiliki rentang waktu pengerasan yang bervariasi, antara 10 menit hingga 24 jam, tergantung pada jenis resin dan katalis yang digunakan. Epoxy resin umumnya membutuhkan waktu pengerasan lebih lama dibanding polyester resin, tetapi menghasilkan ikatan silang yang lebih kuat dan stabil. Stabilitas ikatan ini penting agar *phantom* mampu bertahan dalam penggunaan jangka panjang, terutama ketika terpapar sinar-X berulang kali (Sutanto, Anam, & Arifin, 2021).

Aspek lain adalah **stabilitas jangka panjang** terhadap suhu dan kelembapan. Resin yang digunakan dalam *phantom* harus mampu mempertahankan sifat fisik dan radiologisnya meskipun disimpan dalam berbagai kondisi lingkungan. Zuber (2022) mencatat bahwa penggunaan resin dalam *phantom* kepala berbasis kayu bakau (*Rhizophora*) untuk radioterapi menunjukkan daya tahan yang baik, namun masih terdapat tantangan pada perubahan dimensi akibat kelembapan.

Pewarnaan dan penambahan filler menjadi strategi penting untuk menyesuaikan nilai HU. Resin murni biasanya memiliki HU mendekati jaringan lemak atau jaringan lunak, tetapi dengan mencampurkan *filler* seperti kalsium karbonat atau serbuk silikon, nilai HU dapat dinaikkan mendekati tulang atau organ tertentu. Penyesuaian ini memungkinkan *phantom* menyerupai sifat

radiologis jaringan manusia secara lebih realistis (Zrinscak, Lorenzon, & Maselli, 2023).

Keunggulan lain dari resin adalah kemampuannya membentuk volume besar dengan distorsi minimal. Hal ini menjadikannya lebih unggul dibanding material berbasis gelatin atau agar yang cenderung mengalami penyusutan seiring waktu. Resin juga lebih tahan terhadap paparan sinar radiasi sehingga tidak cepat mengalami degradasi, menjadikannya material yang ekonomis dan berkelanjutan untuk pembuatan *phantom* medis (Sutanto et al., 2021).

Dengan demikian, resin sintetis bukan hanya sekadar bahan pengganti jaringan, tetapi juga medium yang dapat dimodifikasi secara kimia dan fisika untuk menghasilkan karakteristik yang mendekati jaringan biologis. Kombinasi antara viskositas, *curing time*, stabilitas, serta pewarnaan dan *filler* menjadikan resin sebagai material yang sangat fleksibel dan aplikatif dalam dunia medis modern.

4.3 Aditif untuk Pengaturan HU (mis. Kalsium Karbonat, Barium Sulfat)

Penyesuaian nilai *Hounsfield Unit (HU)* pada material *phantom* merupakan aspek fundamental agar tiruan anatomi mampu menyerupai jaringan asli dalam citra CT maupun radiografi. Tanpa adanya kontrol yang tepat, perbedaan densitas radiologis dapat menghasilkan citra yang menyesatkan. Oleh karena itu, aditif seperti

kalsium karbonat, barium sulfat, maupun serbuk logam halus digunakan untuk menyesuaikan HU sesuai kebutuhan visualisasi klinis.

4.3.1 Kalsium Karbonat sebagai Penyeimbang Densitas

Kalsium karbonat (CaCO_3) banyak digunakan dalam pembuatan *phantom* karena mampu meningkatkan densitas material tanpa mengurangi kekuatan mekanis. Montazerian et al. (2022) mencatat bahwa penambahan kalsium karbonat dalam polimer cetak 3D dapat menaikkan radiodensitas hingga menyerupai jaringan tulang trabekular. Keunggulan lain dari aditif ini adalah ketersediaannya yang melimpah, harga terjangkau, serta sifatnya yang relatif mudah bercampur dengan polimer dasar. Dengan demikian, kalsium karbonat menjadi pilihan utama ketika dibutuhkan peningkatan HU dengan stabilitas struktural yang tetap terjaga.

4.3.2 Barium Sulfat sebagai Agen Opaquitas Radiografi

Barium sulfat (BaSO_4) telah lama dikenal sebagai bahan radiopak dalam pencitraan medis. Dalam konteks *phantom*, aditif ini berperan menghasilkan HU yang lebih tinggi, menyerupai korteks tulang. Savi et al. (2022) menunjukkan bahwa campuran polimer dengan barium sulfat mampu memberikan opasitas radiografi yang signifikan, sekaligus menjaga konsistensi nilai HU pada CT. Aditif ini juga sangat efektif dalam mengurangi ketidakselarasan antara tampilan radiografi dan CT, sehingga kompatibilitas lintas modalitas dapat dipertahankan.

4.3.3 Serbuk Logam Halus untuk Simulasi Tulang

Selain kalsium karbonat dan barium sulfat, serbuk logam halus—seperti baja tahan karat, titanium, atau besi—dapat ditambahkan untuk mencapai HU yang lebih tinggi, terutama untuk simulasi tulang kortikal. Collins (2021) menegaskan bahwa penggunaan serbuk logam sebagai aditif memberikan variasi HU yang fleksibel, meski perlu dikendalikan secara presisi agar tidak menimbulkan artefak berlebihan. Dalam praktiknya, logam digunakan dalam jumlah terbatas agar tidak mengganggu kualitas citra, terutama pada rekonstruksi irisan tipis.

4.3.4 Kalibrasi Rasio Pencampuran

Penentuan rasio pencampuran aditif menjadi tahap kritis karena setiap target visualisasi memerlukan HU spesifik. Hatamikia et al. (2022) menekankan bahwa proses kalibrasi harus mempertimbangkan perbedaan antara jaringan lunak, tulang trabekular, dan kortikal. Misalnya, HU jaringan lunak berkisar antara -100 hingga +100, sementara tulang kortikal dapat mencapai lebih dari +1000. Dengan demikian, pencampuran aditif harus dilakukan secara bertahap, diukur, dan dibandingkan dengan standar klinis agar kesesuaian dapat dicapai.

4.3.5 Implikasi Klinis dan Edukatif

Pengaturan HU melalui aditif tidak hanya penting bagi pengembangan *phantom* untuk evaluasi teknis, tetapi juga relevan untuk pendidikan. Yusuff et al. (2024) menunjukkan bahwa *phantom* dengan aditif yang dikalibrasi secara tepat membantu praktisi memahami hubungan antara densitas radiologis dan hasil pencitraan.

Dengan demikian, manfaat dari penggunaan aditif ini meluas dari pengujian kualitas hingga pelatihan klinis.

Dengan demikian, penggunaan kalsium karbonat, barium sulfat, maupun serbuk logam halus sebagai aditif merupakan strategi yang efektif untuk mengendalikan HU pada *phantom*. Penekanan pada kalibrasi yang tepat menjamin bahwa hasil pencitraan mendekati kondisi klinis, sekaligus menjaga kompatibilitas lintas modalitas.

4.4 Kompatibilitas Material terhadap CT/Radiografi dan Kondisi Lingkungan

Kompatibilitas material merupakan faktor utama dalam memastikan *phantom* dapat digunakan secara efektif pada modalitas CT maupun radiografi. Material yang dipilih harus memberikan homogenitas visual pada hasil pencitraan, artinya distribusi densitas di dalam material harus seragam agar tidak menimbulkan artefak atau gangguan kontras. Homogenitas ini menjadi penentu keandalan *phantom* saat digunakan dalam evaluasi kualitas citra maupun kalibrasi perangkat radiologi (McGarry et al., 2020).

Selain homogenitas visual, ketahanan material terhadap kondisi lingkungan juga sangat krusial. Suhu, paparan sinar-X, serta kelembapan dapat memengaruhi stabilitas material dalam jangka panjang. Resin, gips, maupun polimer modern terbukti mampu bertahan cukup lama, terlebih jika diberi perlindungan tambahan berupa *coating* atau *sealing*. Penambahan lapisan pelindung ini

dapat mencegah retakan mikro, degradasi warna, maupun perubahan densitas radiologis akibat fluktuasi kelembapan (Henriques et al., 2024).

Aspek keamanan juga tidak dapat diabaikan. Material yang digunakan sebaiknya non-toksik dan aman untuk dimanipulasi oleh tangan manusia. Hal ini penting mengingat *phantom* sering kali perlu dipindahkan, disimpan, atau bahkan disentuh langsung ketika digunakan dalam laboratorium maupun ruang pencitraan. Epoxy resin dan gipsium yang dimodifikasi, misalnya, telah terbukti aman digunakan setelah proses *curing* sempurna, serta tidak mengeluarkan zat berbahaya pada kondisi normal (Elameen et al., 2025).

Stabilitas radiologis material juga menjadi perhatian. Beberapa penelitian terkini menunjukkan bahwa resin fotopolimer dengan tambahan zat kontras iodinated mampu memberikan kestabilan nilai HU dalam pencitraan CT bahkan setelah pemindaian berulang (Deng et al., 2025). Demikian pula, campuran gipsium dan air yang dikompresi terbukti menjadi material solid yang tahan lama dan stabil, sehingga sering digunakan untuk merepresentasikan jaringan keras dalam *phantom* kepala maupun toraks (Wang, 2017).

Dengan demikian, material seperti gipsium dan resin dapat dikatakan kompatibel dengan modalitas CT dan radiografi, asalkan digunakan bersama perlindungan tambahan yang menjaga kualitas fisik maupun radiologisnya. Pemilihan material yang tepat tidak hanya menjamin akurasi pencitraan, tetapi juga memperpanjang usia pakai *phantom* serta menjadikannya lebih aman dan andal dalam berbagai kondisi lingkungan.

4.5 Pemilihan Release Agent, Penguat Serat, dan Sealing Antarkomponen

Keberhasilan proses pembuatan *phantom* antropomorfik sangat bergantung pada ketepatan dalam tahap penuangan material ke dalam cetakan serta integritas bentuk yang dihasilkan setelah pembongkaran. Untuk memastikan kualitas hasil akhir, ada tiga elemen penting yang harus diperhatikan secara teknis: penggunaan *release agent*, pemilihan bahan penguat serat, dan sistem *sealing* antarkomponen.

4.5.1 Fungsi Kritis Release Agent

Dalam proses pencetakan, bahan seperti gipsum atau resin harus dikeluarkan dari cetakan tanpa merusak permukaan atau bentuk struktur. Untuk itu, diperlukan *release agent*, yaitu zat pelapis yang diaplikasikan di permukaan cetakan sebelum penuangan bahan utama. Beberapa bahan yang umum digunakan antara lain minyak silikon, *petroleum jelly*, atau lilin cair (*wax*).

Minyak silikon memiliki keunggulan dalam membentuk lapisan tipis yang merata dan tahan panas, sehingga cocok untuk penuangan material dengan suhu curing tinggi. Di sisi lain, *petroleum jelly* lebih ekonomis dan mudah diaplikasikan, meskipun perlu perhatian pada ketebalan agar tidak menimbulkan cacat permukaan (*surface defect*). Studi eksperimental oleh Foster et al. (2023) menunjukkan bahwa pemilihan *release agent* yang sesuai dapat mengurangi hingga 90% risiko deformasi selama proses demoulding pada pembuatan *phantom* berbasis silikon.

4.5.2 Penguat Serat untuk Meningkatkan Kekuatan Struktural

Ketika *phantom* dirancang untuk penggunaan berulang atau untuk pengujian yang memerlukan stabilitas struktural tinggi, penambahan serat penguat sangat dianjurkan. Serat yang paling umum digunakan dalam konteks ini adalah *fiberglass* dan serat karbon. Keduanya memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, serta tahan terhadap gaya tekan dan tarik.

Dalam studi oleh Subramaniyan et al. (2024), disebutkan bahwa komposit berbasis serat karbon dan resin epoksi menunjukkan peningkatan kekuatan struktural hingga 45% dibandingkan bahan polos tanpa penguat. Hal ini tidak hanya memperpanjang usia pakai *phantom*, tetapi juga memberikan kestabilan bentuk saat digunakan dalam uji pencitraan dengan tekanan atau suhu yang fluktuatif.

Fiberglass juga menjadi pilihan populer karena harganya yang lebih rendah dan kemudahan dalam pemotongan serta pembentukan. Serat ini dapat dicampurkan ke dalam bahan dasar atau digunakan sebagai lapisan pembungkus (*wrapping*) di bagian luar struktur *phantom*, terutama pada bagian yang rentan terhadap benturan.

4.5.3 Pentingnya *Sealing* pada Antarkomponen

Pada *phantom* yang disusun secara modular, sambungan antarbagian atau antarmodul menjadi area yang rawan terhadap kebocoran material cair saat pencetakan ataupun celah saat proses pemindaian. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem *sealing* yang kuat

namun fleksibel. Beberapa bahan yang umum digunakan adalah silikon RTV (*Room Temperature Vulcanizing*) dan lem epoksi.

Silikon RTV memiliki kemampuan untuk mengisi celah mikroskopis dan tetap elastis setelah kering, sehingga cocok untuk penyambungan bagian yang dapat dilepas. Di sisi lain, lem epoksi menawarkan kekuatan ikat yang tinggi dan tahan terhadap air maupun pelarut, menjadikannya ideal untuk sambungan permanen.

Foster et al. (2023) menyebutkan bahwa dalam aplikasi *phantom* untuk pengujian sistem radioterapi berbasis CT, penggunaan silikon RTV di antara modul torso dan pelvis mampu mempertahankan bentuk geometris hingga $\pm 0,3$ mm selama 30 kali siklus bongkar pasang.

Dengan demikian, pemilihan material untuk *sealing* bukan hanya soal kekuatan ikat, melainkan juga mempertimbangkan fleksibilitas, kedap terhadap cairan, serta dampaknya terhadap integritas geometris struktur *phantom*.

Bab 5: Perancangan

Geometri dari Data DICOM

5.1 Akuisisi Citra Pelvis (CT) dan Parameter Minimal yang Disarankan

Dalam proses desain *phantom* antropomorfik untuk wilayah pelvis, langkah pertama yang tidak bisa ditawar adalah akuisisi citra medis yang presisi dan lengkap. Salah satu teknik paling umum digunakan adalah *computed tomography* atau CT, yang memberikan representasi visual tubuh dalam potongan-potongan gambar (*slice*) berdimensi tinggi. Data ini nantinya akan menjadi dasar pembuatan model 3D anatomis yang digunakan untuk simulasi maupun validasi sistem pencitraan.

Kualitas gambar yang dihasilkan oleh CT sangat bergantung pada konfigurasi parameter saat pemindaian dilakukan. Jika pengaturan tidak tepat, hasilnya bisa berupa gambar yang kabur, distorsi struktural, atau bahkan hilangnya detail penting seperti batas antar organ. Maka dari itu, pemilihan parameter pemindaian bukan sekadar teknis, tetapi menjadi elemen penentu keberhasilan proses rekonstruksi bentuk anatomis.

5.1.1 Ketebalan *Slice* dan Resolusi Spasial

Salah satu parameter paling krusial adalah ketebalan *slice*. Semakin tipis potongan yang dihasilkan, semakin tinggi resolusi

spasial yang diperoleh. Untuk keperluan pembuatan *phantom*, nilai ketebalan ideal adalah ≤ 1.25 mm. Ketebalan ini memungkinkan visualisasi yang jelas terhadap tulang pelvis seperti ilium, sakrum, dan simfisis pubis, serta jaringan lunak seperti rektum dan kandung kemih.

Penelitian oleh Kolarevic et al. (2020) menunjukkan bahwa penggunaan *slice thickness* 1.25 mm menghasilkan kualitas gambar yang optimal untuk segmentasi struktur pelvis, dibandingkan pengaturan 2.5 mm atau lebih yang berisiko kehilangan detail halus.

5.1.2 Ukuran Matriks dan *Field of View*

Parameter berikutnya adalah ukuran matriks gambar. Matriks berfungsi sebagai grid digital tempat informasi visual disimpan. Untuk menghasilkan gambar dengan ketajaman tinggi, standar umum yang digunakan adalah 512×512 piksel. Ukuran ini memberikan resolusi detail yang cukup untuk mengenali batas antar jaringan dengan kontras rendah.

Selain matriks, cakupan medan pandang (*field of view* atau FOV) juga sangat menentukan. FOV harus cukup luas untuk menangkap keseluruhan struktur pelvis secara utuh. Biasanya, FOV berkisar antara 300–500 mm, tergantung ukuran subjek. FOV yang terlalu kecil bisa menyebabkan bagian anatomi terpotong, sedangkan FOV terlalu besar akan mengorbankan resolusi spasial (Syah et al., 2023).

5.1.3 Mode Pemindaian dan Pengaturan Artefak

Mode pemindaian yang disarankan adalah *helical scan*, karena mode ini memungkinkan akuisisi gambar kontinu dalam

waktu singkat dan lebih sedikit menimbulkan *misalignment*. Pada pemindaian pelvis, penggunaan mode ini juga membantu mengurangi ketidaksesuaian struktur akibat gerakan tidak sadar seperti napas atau kontraksi otot.

Namun, meski teknologi CT modern telah dibekali koreksi artefak otomatis, langkah preventif tetap dibutuhkan. Salah satunya adalah memastikan pasien atau objek uji berada dalam posisi stabil, serta menghindari gerakan selama pemindaian berlangsung. Penggunaan bantalan atau alat penahan (*stabilizer*) sering kali membantu mengurangi *motion artifact* yang merusak hasil gambar.

Jika target utama adalah pencitraan jaringan lunak, penggunaan kontras intravena bisa dipertimbangkan, tetapi hal ini perlu disesuaikan dengan konteks penggunaan data (misalnya, apakah hanya untuk pencetakan struktur tulang atau seluruh anatomi pelvis).

5.1.4 Implikasi terhadap Proses Segmentasi

Data yang dihasilkan dari pengaturan parameter optimal akan sangat berpengaruh pada proses segmentasi digital. Segmentasi adalah proses memisahkan bagian-bagian tertentu dari citra, seperti membedakan tulang dari otot, atau organ dari jaringan lemak. Akurasi segmentasi sangat bergantung pada kualitas kontras dan resolusi data awal. Dengan kata lain, jika pemindaian tidak dilakukan dengan parameter yang memadai, seluruh tahapan berikutnya dalam proses pembuatan *phantom* akan terdampak.

5.2 Segmentasi: Tulang Pelvis, Rongga Panggul, serta Organ Target (Opsional Modular)

Segmentasi merupakan tahapan kritis dalam pembuatan *phantom* pelvis karena proses ini menentukan kejelasan anatomi yang akan ditiru. Pada dasarnya, segmentasi adalah pemisahan struktur anatomi spesifik dari citra CT agar dapat direkonstruksi dalam bentuk tiga dimensi. Untuk *phantom* pelvis, struktur utama yang harus disegmentasi mencakup tulang pelvis (ilium, ischium, pubis, sacrum), rongga panggul, serta organ target modular seperti rektum, vesika urinaria, uterus, atau prostat.

Menurut Masrochah (2023), pemetaan struktur pelvis menjadi dasar untuk menentukan target radiasi serta organ yang perlu dilindungi. Tanpa segmentasi yang akurat, baik desain *phantom* maupun perencanaan dosis terapi akan mengalami bias yang signifikan.

5.2.1 Segmentasi Tulang Pelvis

Tulang pelvis merupakan struktur yang dominan dalam citra CT, memiliki densitas elektron tinggi, dan memberikan kontras jelas dibanding jaringan lunak. Segmentasi tulang pelvis umumnya relatif lebih mudah karena perbedaan HU yang mencolok antara tulang dan jaringan sekitar. Sari (2024) menekankan bahwa tulang pelvis sering dijadikan acuan geometris dalam proses *image registration* pada radioterapi, sehingga replikasinya dalam *phantom* menjadi krusial.

5.2.2 Segmentasi Rongga Panggul

Berbeda dengan tulang, segmentasi rongga panggul lebih menantang karena batasan anatominya tidak selalu jelas. Rongga panggul mencakup ruang yang ditempati oleh organ reproduksi dan organ ekskresi. Pemisahan rongga ini biasanya memanfaatkan teknik *region growing* atau *thresholding*, yang secara otomatis mengelompokkan voxel berdasarkan nilai HU. Namun, jika kualitas citra CT rendah, segmentasi manual masih diperlukan untuk mempertahankan akurasi (Nurkamal et al., 2024).

5.2.3 Segmentasi Organ Target Modular

Organ target modular seperti rektum, kandung kemih, uterus, atau prostat sering dibuat dalam bentuk opsional agar *phantom* dapat dipasang atau dilepas sesuai kebutuhan pengujian. Segmentasi organ-organ ini adalah tahap paling kompleks karena nilai HU-nya berdekatan dengan jaringan lunak lain. Masrochah (2023) menyebutkan bahwa pencitraan multi-fase atau teknik tambahan seperti *contrast enhancement* sering dipakai untuk memperjelas batas anatomi.

Perkembangan teknologi juga membawa segmentasi ke arah otomasi dengan *machine learning*. Algoritma berbasis *convolutional neural network* (CNN) misalnya, telah digunakan untuk meningkatkan akurasi segmentasi pelvis, terutama pada organ lunak yang sulit dibedakan secara manual (Nurkamal et al., 2024).

Dengan demikian, segmentasi yang tepat pada tulang pelvis, rongga panggul, dan organ target modular tidak hanya mendukung

akurasi desain *phantom*, tetapi juga meningkatkan kesesuaian antara simulasi dan kondisi klinis sebenarnya.

5.3 Konversi ke Mesh (STL), Perbaikan Mesh, dan Tolerance Manufaktur

Transformasi hasil segmentasi citra medis menjadi representasi tiga dimensi dalam format *stereolithography (STL)* merupakan tahap penting dalam pembuatan *phantom*. Proses ini menghubungkan dunia digital dengan manufaktur fisik, sehingga akurasi dan keandalan sangat dipengaruhi oleh kualitas *mesh* yang dihasilkan serta toleransi manufaktur yang diterapkan.

5.3.1 Konversi Segmentasi ke Format STL

Hasil segmentasi anatomi dari citra CT atau MRI biasanya berupa data *voxel-based*. Agar dapat dicetak, data ini diekspor ke format STL yang berbasis poligon. Format ini memungkinkan printer 3D membaca permukaan objek secara detail. George et al. (2017) menekankan bahwa konversi ke STL harus memperhatikan *chordal tolerance*, yaitu tingkat deviasi maksimum antara permukaan asli dengan permukaan poligon. Deviasi yang terlalu besar dapat mengurangi realisme anatomi, sementara deviasi yang terlalu kecil justru memperbesar ukuran file dan menyulitkan pemrosesan.

5.3.2 Perbaikan Mesh: Menutup Lubang dan Menghaluskan Permukaan

Tidak jarang hasil konversi ke STL menghasilkan *mesh* yang tidak sempurna, seperti lubang terbuka, tepi patah, atau *self-intersection*. Oleh karena itu, diperlukan tahap perbaikan dengan perangkat lunak seperti Meshmixer atau Blender. O'Hara et al. (2016) menjelaskan bahwa manipulasi *mesh* lanjutan, termasuk *smoothing* dan *remeshing*, mampu meningkatkan kualitas model tanpa mengubah struktur anatomi utama. Langkah ini krusial agar *phantom* yang dicetak tidak memiliki cacat struktural yang dapat mengganggu penggunaan klinis maupun edukatif.

5.3.3 Toleransi Manufaktur dan Akurasi Pencetakan

Setelah *mesh* diperbaiki, tahap berikutnya adalah penerapan toleransi manufaktur. Setiap printer 3D memiliki batas akurasi yang berbeda, umumnya sekitar ± 0.1 mm untuk printer berbasis *fused deposition modeling (FDM)* dan lebih tinggi untuk printer berbasis *stereolithography (SLA)*. Akmal et al. (2020) menegaskan bahwa kesalahan kecil dalam pengaturan toleransi dapat mengakibatkan *phantom* sulit dirakit atau tidak kompatibel dengan modul lain. Oleh sebab itu, pengaturan toleransi harus disesuaikan dengan spesifikasi printer yang digunakan.

5.3.4 Kualitas Permukaan dan Reproduksiabilitas

Kualitas permukaan hasil cetak juga tidak bisa diabaikan. Hosseinzadeh (2023) menunjukkan bahwa perbaikan tekstur permukaan pasca-cetak dapat mengurangi kekasaran hingga skala nanometer, yang pada akhirnya meningkatkan kejernihan optik pada

phantom transparan. Hal ini penting terutama untuk simulasi optik maupun aplikasi intervensi medis yang membutuhkan detail halus. Reproduksiabilitas model juga terkait langsung dengan toleransi manufaktur; semakin ketat pengendalian, semakin konsisten hasil cetak antar produksi.

5.3.5 Tantangan dan Prospek

Meskipun proses konversi ke STL dan perbaikan *mesh* sudah banyak didukung oleh perangkat lunak otomatis, tetap ada tantangan dalam menjaga keseimbangan antara akurasi anatomi, ukuran file, dan kelancaran manufaktur. Nguyen et al. (2023) menekankan perlunya *quality assurance* untuk memastikan bahwa dimensi model cetak sesuai dengan standar klinis. Ke depan, integrasi algoritme berbasis kecerdasan buatan dalam perbaikan *mesh* diharapkan dapat mempercepat proses dan mengurangi kesalahan manual.

Dengan demikian, konversi ke format STL, perbaikan *mesh*, dan penerapan toleransi manufaktur merupakan rangkaian proses yang saling melengkapi. Setiap tahap harus dijalankan dengan presisi agar *phantom* yang dihasilkan tidak hanya akurat secara anatomi, tetapi juga dapat diproduksi ulang dengan konsistensi tinggi.

5.4 Penentuan Bidang Belah, Alignment Pin, serta Landmark Positioning

Pembuatan *phantom* modular menuntut desain geometri yang cermat agar setiap bagian dapat dipisahkan dan dipasang

kembali tanpa kehilangan konsistensi struktur. Tiga elemen utama yang perlu diperhatikan dalam tahap ini adalah penentuan bidang belah, penggunaan *alignment pin*, serta penempatan *landmark* yang strategis.

Bidang belah atau *split plane* harus ditentukan pada area yang tidak mengganggu integritas struktur anatomi yang hendak disimulasikan. Pemilihan bidang belah yang keliru berpotensi menimbulkan artefak atau ketidakakuratan geometris saat *phantom* digunakan dalam pemindaian radiologis. Oleh karena itu, penempatan bidang belah biasanya mengikuti jalur anatomis alami atau area dengan kepadatan radiologis seragam, sehingga hasil citra tetap konsisten (Slagowski et al., 2020).

Selain bidang belah, *alignment pin* berfungsi sebagai pengunci agar bagian-bagian modular tetap sejajar dan tidak bergeser. Pin ini didesain untuk menjaga posisi antarbagian pada titik yang sama meskipun dilakukan bongkar pasang berulang. Akurasi pemasangan pin menjadi penting karena ketidakcocokan sekecil apa pun dapat menghasilkan perbedaan posisi pada citra CT atau radiografi. Dalam praktik modern, material pin dipilih yang tahan radiasi dan tidak menimbulkan artefak berlebih pada hasil citra (Kulkarni et al., 2020).

Landmark positioning melengkapi dua elemen sebelumnya dengan memberikan titik referensi yang jelas saat *phantom* digunakan dalam proses akuisisi radiologis. Landmark dapat berupa tonjolan kecil, marking geometris, atau bahkan sisipan logam kecil yang dirancang untuk memberikan kontras tinggi pada citra. Dengan

adanya landmark, teknisi dapat menempatkan *phantom* secara konsisten pada meja pemindaian. Hal ini terbukti meningkatkan akurasi pengulangan pemindaian, terutama dalam evaluasi kualitas pencitraan maupun kalibrasi perangkat (García-Mato et al., 2021).

Dalam beberapa rancangan mutakhir, penentuan landmark tidak hanya diposisikan secara fisik, tetapi juga dipadukan dengan *augmented reality* untuk memperkuat orientasi spasial saat pencitraan. Teknologi ini memungkinkan operator memastikan bahwa *phantom* ditempatkan pada posisi yang identik dengan simulasi digital sebelumnya, sehingga mengurangi kesalahan posisi dan meningkatkan presisi (Zhang et al., 2024).

Dengan demikian, sinergi antara bidang belah yang strategis, *alignment pin* yang presisi, serta *landmark positioning* yang efektif merupakan kunci agar *phantom* modular dapat berfungsi optimal. Ketiga aspek ini tidak hanya menjaga integritas struktur fisik, tetapi juga menjamin konsistensi hasil radiologis pada setiap pemindaian.

5.5 Finalisasi Desain: Split Mold, Draft Angle, dan Rencana Perakitan

Tahap akhir dalam perancangan *phantom* antropomorfik bukan sekadar menyelesaikan bentuk anatomi yang telah dimodelkan, tetapi juga menyesuaikannya dengan sistem produksi yang akan digunakan. Di sinilah pentingnya desain akhir yang memperhatikan aspek teknis seperti pembuatan *split mold*, penambahan *draft angle*, dan rencana perakitan antarkomponen.

Keseluruhan proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa model yang telah didesain secara digital dapat diwujudkan dalam bentuk fisik tanpa kehilangan akurasi maupun integritas struktural.

5.5.1 Penambahan *Draft Angle* untuk Kemudahan Pelepasan

Salah satu prinsip desain yang sering kali diabaikan tetapi memiliki dampak besar terhadap keberhasilan produksi cetakan adalah *draft angle*. *Draft angle* adalah kemiringan kecil yang diberikan pada dinding vertikal cetakan untuk memudahkan proses pelepasan objek dari cetakan setelah penuangan material selesai dan mengeras. Tanpa kemiringan ini, risiko kerusakan bentuk selama proses pelepasan akan meningkat secara signifikan.

Secara umum, nilai kemiringan antara 3° hingga 7° dianggap ideal, tergantung pada jenis material dan tekstur permukaan. Dalam konteks pembuatan *phantom*, sudut $\pm 5^\circ$ sering dipilih karena memberikan keseimbangan antara kemudahan pelepasan dan minimalnya distorsi geometri (Hatamikia et al., 2022). Sudut ini cukup untuk memastikan keluarnya bagian *phantom* dengan mulus, terutama bila digunakan dalam kombinasi dengan *release agent*.

5.5.2 Pembuatan *Split Mold* Modular

Split mold atau cetakan terpisah merupakan teknik umum yang digunakan saat bentuk yang hendak dicetak memiliki kontur kompleks yang tidak mungkin dilepaskan dari cetakan tunggal. Dalam konteks desain *phantom*, teknik ini sangat berguna karena memungkinkan pemisahan anatomi berdasarkan fungsi—misalnya, cetakan terpisah untuk tulang dan jaringan lunak. Konsep modular

ini tidak hanya memudahkan pencetakan, tetapi juga mempermudah proses perakitan dan penggantian bagian apabila diperlukan.

Dalam studi Hatamikia et al. (2022), pendekatan *multi-material extrusion* menggunakan teknik *split mold* untuk mencetak bagian perut yang terdiri atas jaringan lunak dan keras secara terpisah. Cetakan modular ini terbukti efisien untuk mensimulasikan perbedaan densitas radiologis antara jaringan tulang dan organ.

Desain modular juga memungkinkan penggantian sebagian bagian tanpa mencetak ulang keseluruhan *phantom*. Sebagai contoh, jika hanya bagian sakrum yang rusak, pengguna cukup mencetak ulang modul tersebut tanpa menyentuh bagian pelvis lainnya. Fleksibilitas seperti ini sangat membantu dalam konteks penggunaan jangka panjang atau pelatihan berulang.

5.5.3 Rencana Perakitan dan Urutan Penuangan Material

Rencana perakitan mencakup bagaimana bagian-bagian dari *phantom* akan digabungkan, urutan penuangan bahan ke dalam cetakan, dan kapan masing-masing tahap harus dilakukan. Ini penting terutama saat menggunakan bahan yang berbeda untuk berbagai bagian anatomi. Misalnya, resin keras untuk tulang sebaiknya dituangkan lebih dulu dan dibiarkan mengeras, baru kemudian dilanjutkan dengan penuangan silikon lunak untuk jaringan sekitar.

Proses ini harus dirancang dengan sangat presisi untuk menghindari kebocoran atau penyusutan yang menyebabkan celah antarkomponen. Salah satu cara mengatasi masalah ini adalah

dengan menambahkan sistem *locking* sederhana atau alur penunjang pada desain cetakan agar setiap bagian menyatu rapat saat dirakit.

Dokumentasi teknis dari proses perakitan juga harus menyertakan kode warna dan identifikasi bagian. Misalnya, warna biru untuk struktur tulang, merah muda untuk jaringan otot, dan putih untuk ruang udara atau organ kosong. Penandaan visual semacam ini tidak hanya memudahkan perakitan, tetapi juga membantu dalam demonstrasi edukatif dan verifikasi anatomi.

Bab 6: Pembuatan Cetakan dan Proses Manufaktur

6.1 Perancangan Cetakan (Two-Part atau Multi-Part Mold) dan Bahan Cetak (Silikon)

Keberhasilan pembuatan *phantom* antropomorfik tidak hanya ditentukan oleh ketepatan data anatomi atau bahan yang digunakan, tetapi juga sangat bergantung pada rancangan sistem cetakannya. Cetakan adalah media penghubung antara model digital dan bentuk fisik, dan oleh karena itu harus dirancang secara fungsional, presisi, dan sesuai dengan metode produksi yang akan digunakan. Dua strategi desain cetakan yang umum adalah *two-part mold* dan *multi-part mold*, dengan bahan cetakan yang paling sering dipilih adalah silikon RTV (*Room Temperature Vulcanizing*).

6.1.1 *Two-Part Mold*: Solusi Efisien untuk Bentuk Sederhana

Two-part mold adalah sistem cetakan dua sisi yang dipisahkan secara vertikal atau horizontal, bergantung pada geometri objek. Cetakan jenis ini cocok untuk bentuk-bentuk sederhana, simetris, atau bagian dengan sedikit detail cekung. Proses produksinya lebih cepat dan hemat bahan karena hanya memerlukan dua bagian yang saling mengapit.

Pada banyak produksi *phantom* berbasis gipsium atau resin, *two-part mold* menjadi pilihan utama ketika target hanya berupa struktur seperti potongan tulang panjang, vertebra, atau bagian polos

dari pelvis. Ketika cetakan telah mengeras, cukup dibuka dari kedua sisi, dan objek bisa dilepaskan tanpa tekanan berlebih, sehingga menghindari kerusakan bentuk.

6.1.2 *Multi-Part Mold*: Pendekatan Modular untuk Anatomi Kompleks

Bentuk organik yang rumit seperti rongga pelvis, struktur tulang melengkung, atau jaringan lunak yang menumpuk tidak bisa diproses optimal dengan cetakan dua sisi. Untuk itu, digunakan teknik *multi-part mold*, di mana cetakan terdiri dari tiga atau lebih bagian yang dapat dilepas secara bertahap. Cetakan jenis ini memungkinkan pencetakan bentuk kompleks tanpa merusak permukaan luar maupun struktur dalam objek.

Teknologi ini sangat berguna dalam proses pembuatan *phantom* edukatif atau pelatihan prosedural, di mana tingkat akurasi anatomi sangat diperlukan. Dalam praktiknya, setiap bagian cetakan diberi tanda posisi atau sistem kunci mekanis sederhana untuk menjaga keselarasan. Perlu waktu dan biaya tambahan dalam tahap perancangan, tetapi hasil akhirnya jauh lebih akurat dan repeatable.

6.1.3 Silikon RTV sebagai Bahan Cetakan Ideal

Pemilihan bahan cetakan juga menjadi penentu keberhasilan produksi. Silikon RTV menjadi pilihan utama karena fleksibilitas, kemudahan aplikasi, serta kestabilannya dalam kondisi suhu ruang. Silikon ini mampu menangkap detail permukaan hingga ke level mikroskopis, membuatnya sangat sesuai untuk mencetak struktur anatomi halus seperti lekuk tulang atau kontur jaringan lunak.

Dalam studi oleh Hatamikia et al. (2022), silikon aditif berhasil digunakan dalam pencetakan *phantom* abdomen dengan hasil radiodensitas yang dapat disesuaikan menggunakan variasi infill. Silikon menunjukkan kompatibilitas yang sangat baik dengan bahan isi seperti resin, gips, atau polimer lunak lainnya. Selain itu, silikon RTV juga memiliki sifat non-reaktif dan tidak menempel pada permukaan objek cetakan, sehingga tidak memerlukan *release agent* tambahan jika digunakan dengan benar.

Kelebihan lainnya adalah ketahanannya terhadap panas sedang (hingga 200 °C) dan kestabilan dimensi yang menjamin bahwa ukuran cetakan tidak berubah meskipun digunakan berkali-kali. Ini menjadikannya ideal untuk produksi *phantom* dalam jumlah menengah hingga besar, termasuk untuk pelatihan reguler di institusi pendidikan atau pengujian teknis sistem radiologi.

6.1.4 Dokumentasi dan Kode Warna untuk Proses Manufaktur

Agar proses pembuatan cetakan dan perakitan bagian-bagian *phantom* berlangsung sistematis, maka dokumentasi desain sangat penting. Dalam desain profesional, biasanya digunakan sistem kode warna dan penomoran bagian cetakan untuk membedakan elemen anatomi seperti tulang, jaringan lunak, dan ruang organ. Dokumentasi ini memudahkan pengguna dalam memahami urutan penuangan bahan, arah pelepasan cetakan, dan instruksi perakitan akhir.

Dokumentasi teknis yang baik akan meningkatkan reproducibility dan memungkinkan tim lain untuk mereplikasi proses dengan hasil yang seragam.

6.2 Pencetakan Master Pattern (Ops: 3D Printing) dan Pembuatan Cetakan Kerja

Master pattern adalah model asli yang menjadi dasar dalam proses pencetakan cetakan kerja. Dalam konteks pembangunan *phantom*, *master pattern* biasanya dicetak menggunakan teknologi *3D printing* dengan material seperti PLA atau ABS. Proses ini memungkinkan penciptaan detail anatomi yang kompleks dengan tingkat presisi tinggi, sehingga bentuk anatomi yang dihasilkan mendekati struktur nyata tubuh manusia (Keshelava, 2020).

Setelah model selesai dicetak, tahap selanjutnya adalah **persiapan cetakan kerja**. *Master pattern* terlebih dahulu dilapisi dengan pelumas cetak atau *release agent* untuk mencegah silikon menempel pada permukaannya. Setelah itu, model diletakkan di dalam box atau rangka cetakan, kemudian dituangkan silikon cair hingga seluruh bagian model tertutup. Proses ini menghasilkan cetakan negatif yang nantinya akan digunakan untuk menuangkan material pengganti jaringan (Tino et al., 2019).

Waktu *curing* silikon umumnya berkisar antara 12 hingga 24 jam, tergantung jenis silikon yang dipakai. Setelah pengerasan selesai, *master pattern* dilepaskan sehingga tersisa cetakan kerja yang dapat digunakan berulang kali. Keunggulan utama metode ini adalah kemampuannya menghasilkan bentuk yang konsisten, presisi, serta memungkinkan replikasi dalam jumlah banyak tanpa degradasi kualitas (Voskamp, 2022).

Menurut Withouck (2020), penggunaan *master pattern* berbasis *3D printing* juga memberikan fleksibilitas tinggi karena desain dapat dengan mudah dimodifikasi melalui perangkat CAD sebelum dicetak ulang. Hal ini memungkinkan pengembangan modular, di mana variasi anatomi atau ukuran organ dapat dibuat sesuai kebutuhan klinis maupun penelitian.

Selain itu, teknik pencetakan ini relatif ekonomis. PLA dan ABS sebagai material *master pattern* cukup terjangkau, sementara silikon sebagai bahan cetakan kerja menawarkan daya tahan tinggi dan elastisitas yang memadai untuk mendukung pelepasan model berulang kali tanpa kerusakan. Cerda (2021) menunjukkan bahwa akurasi dimensi cetakan berbasis *3D printing* memiliki deviasi kurang dari 1 mm, menjadikannya sangat sesuai untuk kebutuhan medis yang menuntut ketelitian tinggi.

Dengan demikian, proses pencetakan *master pattern* menggunakan *3D printing* dan pembuatan cetakan kerja berbahan silikon menjadi salah satu solusi paling efektif untuk memastikan keberhasilan pembangunan *phantom*.

6.3 Proses Penuangan Gypsum (Tulang) dan Pengaturan Penguatan (Bila Perlu)

Gypsum telah lama digunakan sebagai material analog untuk merepresentasikan struktur tulang pada *phantom* karena komposisinya yang mirip dengan mineral alami tulang. Selain itu, gipsium mudah diproses, memiliki ketahanan struktural yang

memadai, serta dapat dimodifikasi dengan aditif atau penguatan tambahan. Tahap penuangan gipsium menjadi bagian penting dalam menghasilkan *phantom* yang menyerupai anatomi tulang dengan baik.

6.3.1 Proses Pencampuran dan Penuangan

Langkah awal melibatkan pencampuran gipsium dengan air menggunakan rasio berat 100:40. Rasio ini menghasilkan campuran yang cukup plastis untuk dituangkan ke dalam cetakan silikon, tetapi tetap memiliki kekuatan mekanis yang baik setelah mengeras. Zrinscak et al. (2023) mencatat bahwa gipsium banyak digunakan sebagai bahan analog tulang karena kemiripan komposisi kalsiumnya dengan jaringan keras alami. Proses penuangan harus dilakukan segera setelah pencampuran agar tidak terjadi pengerasan prematur.

Setelah dituangkan, cetakan dibiarkan bergetar ringan untuk mengurangi gelembung udara yang dapat menurunkan homogenitas material. Piroddi et al. (2023) menekankan pentingnya menghindari rongga udara karena dapat memengaruhi hasil pencitraan, terutama pada teknik CT.

6.3.2 Pengeringan dan Pelepasan dari Cetakan

Setelah dituangkan, gipsium dibiarkan mengering secara alami selama 24–48 jam, tergantung ketebalan struktur. Proses pengeringan lambat lebih disarankan dibandingkan pemanasan cepat karena mencegah retakan. Salmi (2021) menjelaskan bahwa sifat higroskopis gipsium membuatnya rentan terhadap deformasi bila pengeringan dilakukan terlalu cepat. Setelah kering, gipsium dapat

dilepaskan dari cetakan silikon dengan hati-hati agar tidak merusak detail anatomi.

6.3.3 Penguatan dengan Serat Kaca atau Jaring Kawat

Untuk bagian *phantom* yang tipis atau berukuran besar, gipsum saja sering kali tidak cukup kuat. Oleh karena itu, penguatan struktural diperlukan. Salah satu teknik umum adalah penambahan serat kaca atau jaring kawat ke dalam campuran. Salifu et al. (2022) menunjukkan bahwa penguatan berbasis serat dapat meningkatkan ketahanan tekan dan tarik material komposit hingga beberapa kali lipat dibandingkan gipsum murni. Dalam praktiknya, serat kaca dipotong pendek dan dicampurkan langsung, sementara jaring kawat ditempatkan di dalam cetakan sebelum gipsum dituangkan.

6.3.4 Aplikasi dalam Pembuatan Phantom Tulang

Penggunaan gipsum sebagai representasi tulang memiliki beberapa keunggulan praktis. Selain kemudahan pencetakan, gipsum memberikan kontras radiologis yang serupa dengan tulang trabekular sehingga cocok digunakan untuk uji pencitraan. Chandramohan et al. (2020) melaporkan bahwa gipsum dapat berfungsi sebagai pengisi tulang tiruan pada *phantom* PET/MRI karena kandungan kalsium dan strukturnya menyerupai tulang manusia. Hal ini menjadikan gipsum sangat relevan untuk aplikasi pendidikan, kalibrasi, hingga evaluasi kualitas citra.

6.3.5 Prospek dan Tantangan

Meskipun gipsum relatif mudah digunakan, tantangan tetap ada terutama dalam hal daya tahan jangka panjang. Paparan kelembaban dapat menyebabkan degradasi mekanis. Oleh karena

itu, beberapa penelitian terkini mencoba mengombinasikan gipsum dengan resin atau polimer untuk meningkatkan ketahanan (Ahmed, 2024). Dengan perkembangan teknologi material, kemungkinan besar gipsum akan terus dipakai sebagai basis, tetapi dalam bentuk komposit yang lebih kuat dan tahan lama.

Dengan demikian, proses penuangan gipsum yang tepat, ditambah dengan penguatan bila diperlukan, menghasilkan representasi tulang yang akurat, tahan lama, dan kompatibel untuk berbagai kebutuhan *phantom*.

6.4 Proses Penuangan Resin (Degassing, Curing, Layering) dan Bonding Antarbagian

Resin seperti *epoxy* maupun *polyurethane* sering digunakan dalam pembuatan *phantom* untuk merepresentasikan jaringan lunak. Proses penuangan resin ini tidak dapat dilakukan sembarangan, melainkan harus melalui tahapan teknis yang cermat agar hasil akhir memiliki struktur homogen dan stabil secara radiologis maupun mekanis.

Tahap pertama adalah *degassing*, yakni penghilangan gelembung udara dari campuran resin dengan menggunakan *vacuum chamber*. Kehadiran gelembung udara yang tidak dihilangkan akan menimbulkan ketidakhomogenan optik maupun radiologis yang bisa mengganggu hasil pencitraan. Proses *degassing* sangat penting karena gelembung kecil yang terperangkap dapat memengaruhi nilai atenuasi pada citra CT maupun radiografi (Cordes et al., 2013).

Tahap kedua adalah *layering*, atau penuangan bertahap. Teknik ini dilakukan untuk mengurangi risiko terbentuknya gelembung serta mencegah deformasi pada struktur resin. Dengan menuangkan resin secara lapis demi lapis, distribusi material menjadi lebih merata. Beberapa penelitian terbaru menekankan bahwa kombinasi *layering* dengan kontrol suhu penuangan dapat menghasilkan struktur yang lebih stabil untuk jangka panjang (Qiu et al., 2024).

Setelah resin dituangkan, masuk ke tahap *curing*, yaitu proses pengerasan resin yang membutuhkan waktu tertentu, biasanya antara 24 hingga 48 jam. Proses ini harus berlangsung dalam kondisi lingkungan yang stabil, terutama dari segi suhu dan kelembapan, untuk memastikan hasil akhir tidak retak atau mengalami deformasi. Pada tahap ini, resin mencapai kestabilan mekanis maupun radiologisnya, sehingga dapat digunakan untuk pembuatan modul *phantom* yang akurat (Pelin et al., 2024).

Ketika pembuatan *phantom* membutuhkan gabungan antara resin dan material lain, misalnya gips untuk meniru jaringan keras, maka diperlukan proses *bonding* antarbagian. Penggabungan ini dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan lem resin yang memiliki kekuatan ikatan tinggi atau dengan sistem mekanis berupa *interlocking* menggunakan mur dan baut kecil. Sistem *interlocking* ini memberikan keuntungan karena memungkinkan pembongkaran dan pemasangan ulang bagian *phantom* tanpa merusak integritas material. Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan perekat berbasis resin mampu menghasilkan ikatan kuat

yang tetap stabil bahkan setelah berulang kali melalui proses pemindaian (Badiuk et al., 2022).

Dengan demikian, rangkaian proses mulai dari *degassing*, *layering*, *curing*, hingga *bonding* merupakan tahapan penting yang menentukan keberhasilan pembuatan *phantom* berbahan resin. Ketelitian dalam setiap tahap akan berpengaruh langsung terhadap kualitas citra radiologis dan daya tahan fisik *phantom*, sehingga menjadikannya alat yang andal dalam praktik radiologi modern.

6.5 Perakitan Akhir: Penyatuan Modul, Finishing, Sealing, dan Uji Kebocoran

Proses pembuatan *phantom* antropomorfik tidak berakhir pada pencetakan komponen atau pengecoran bahan. Tahapan paling krusial dalam memastikan fungsionalitas dan keberulangan penggunaan *phantom* justru berada pada proses perakitan akhir. Di sinilah semua bagian yang telah diproduksi—baik secara modular maupun terpadu—dipasangkan, disesuaikan, dan diuji agar siap digunakan dalam simulasi klinis atau pengujian sistem radiologi.

6.5.1 Penyatuan Modul dan Penyelarasan Komponen

Tahap awal dalam perakitan akhir adalah penyatuan bagian-bagian *phantom* yang telah dicetak atau dituangkan dari cetakan sebelumnya. Modul yang umum terdiri atas struktur tulang, jaringan lunak, serta ruang internal untuk simulasi organ atau cairan. Setiap bagian tersebut biasanya telah dirancang agar dapat disambungkan melalui sistem *alignment pin* atau kunci mekanis sederhana.

Alignment pin memungkinkan presisi posisi dan mencegah pergeseran selama proses perakitan dan penggunaan. Penggunaan sistem ini memastikan bahwa saat *phantom* digunakan berulang, struktur internalnya tetap selaras dan konsisten—baik dalam konteks pencitraan maupun uji terapi. Menurut Slagowski et al. (2020), keselarasan geometris dalam *phantom* modular yang menggunakan penyesuaian mekanis semacam ini memiliki deviasi di bawah 0,5 mm dari rancangan digital aslinya.

6.5.2 *Finishing*: Penghalusan dan Pewarnaan

Setelah penyatuan struktur utama, dilakukan proses *finishing* untuk memperbaiki permukaan dan meningkatkan daya tahan. Tindakan yang umum dilakukan meliputi pengamplasan untuk menghilangkan tepi tajam atau sisa material cetak, serta pelapisan dengan cat pelindung atau *sealant*.

Untuk bagian luar yang akan terpapar cairan atau tekanan, *coating* pelindung berbahan resin atau akrilik dapat diaplikasikan guna mencegah degradasi akibat lingkungan lembap. Selain fungsional, *finishing* juga memiliki nilai estetika, terutama bila *phantom* digunakan dalam konteks edukatif atau demonstrasi.

6.5.3 *Sealing* Antarkomponen

Karena *phantom* sering kali terdiri dari beberapa bagian yang dicetak secara terpisah, sambungan antar modul menjadi area rawan bocor. Untuk mengatasi hal ini, diterapkan teknik *sealing* menggunakan bahan seperti lem epoksi atau silikon RTV. Epoksi memberikan daya ikat yang sangat kuat dan permanen, cocok untuk bagian yang tidak akan dibongkar ulang. Sebaliknya, silikon RTV

memiliki elastisitas dan cocok digunakan di area yang perlu fleksibilitas atau mungkin akan dibongkar di masa mendatang.

Foster et al. (2023) melaporkan bahwa penggunaan silikon RTV pada sambungan modular *phantom* berbahan resin mampu menahan tekanan internal cairan hingga 1 atm tanpa kebocoran selama lebih dari 48 jam. Artinya, pilihan bahan dan teknik penyegelan berdampak langsung pada daya tahan dan fungsionalitas jangka panjang.

6.5.4 Uji Kebocoran: Simulasi Klinis Nyata

Langkah terakhir dan paling penting adalah melakukan uji kebocoran untuk memastikan bahwa semua sambungan telah tertutup sempurna dan tidak terjadi kebocoran saat digunakan. Umumnya, pengujian dilakukan dengan mengisi ruang dalam *phantom* dengan cairan seperti air berwarna atau larutan kontras, lalu diamati selama minimal 24 jam.

Jika tidak ditemukan rembesan, maka *phantom* dinyatakan layak pakai. Dalam beberapa pengujian lanjutan, simulasi tekanan (menggunakan pompa kecil atau penekanan manual) juga diterapkan untuk memastikan ketahanan sistem terhadap kondisi mirip klinis. Hal ini menjadi krusial ketika *phantom* digunakan dalam praktik terapi radiasi berbasis gambar, yang membutuhkan akurasi geometri dan kedekatan cairan (Slagowski et al., 2020).

Dengan melalui proses ini secara sistematis, *phantom* yang dihasilkan akan memiliki umur pakai lebih panjang, aman digunakan dalam pengujian teknis, dan kompatibel dengan berbagai sistem pencitraan.

Bab 7: Keselamatan Kerja (K3) dan Kendali Mutu Proses

7.1 Personal Protective Equipment (PPE), Ventilasi Kerja, dan Handling Resin

Proses pembuatan *phantom* antropomorfik, khususnya yang melibatkan bahan kimia seperti resin, silikon, dan pelarut organik, tidak terlepas dari potensi risiko terhadap kesehatan dan keselamatan kerja. Oleh karena itu, penerapan prinsip keselamatan yang melibatkan perlindungan pribadi (*personal protective equipment* atau PPE), sistem ventilasi yang memadai, serta prosedur penanganan material berbahaya menjadi elemen penting yang tidak boleh diabaikan.

7.1.1 Penggunaan Personal Protective Equipment (PPE)

Setiap tahapan yang melibatkan kontak langsung dengan bahan kimia seperti resin epoksi, hardener, atau silikon aditif, menuntut penggunaan alat pelindung diri yang sesuai. PPE yang disarankan meliputi sarung tangan nitril untuk mencegah kontak kulit langsung, masker respirator dengan filter organik untuk

menangkal uap kimia, serta kacamata pelindung untuk melindungi mata dari percikan bahan cair.

Selain itu, apron berbahan tahan kimia juga penting, khususnya dalam tahap penuangan resin atau pencampuran komponen yang berpotensi menyebabkan tumpahan. Indah Lestariningsih dan Dinayawati (2023) menyatakan bahwa pemakaian alat pelindung secara konsisten, termasuk pada situasi laboratorium bukan klinis, dapat menurunkan risiko iritasi saluran pernapasan dan dermatitis akibat paparan bahan kimia volatil.

Penting pula untuk mengedukasi setiap pengguna laboratorium mengenai pemilihan PPE yang tepat sesuai jenis aktivitas. Misalnya, sarung tangan lateks tidak direkomendasikan untuk resin karena dapat larut oleh senyawa pelarut yang terkandung di dalamnya, sedangkan nitril menunjukkan ketahanan lebih tinggi.

7.1.2 Ventilasi dan Sistem Pembuangan Udara

Penggunaan resin epoksi, silikon RTV, atau pelarut seperti alkohol isopropil dan aseton menghasilkan senyawa volatil yang bila terhirup dapat menimbulkan efek toksik, baik akut maupun kronis. Oleh karena itu, ruang kerja harus dilengkapi sistem ventilasi aktif, seperti *fume hood*, exhaust fan berfilter karbon aktif, atau sistem aliran udara silang.

Sistem ventilasi ini berfungsi mengalirkan udara tercemar keluar dari ruang kerja dan menggantinya dengan udara segar, sehingga konsentrasi senyawa kimia di udara tetap di bawah ambang batas yang ditentukan. IAEA (2023) menekankan bahwa ventilasi ruangan menjadi standar wajib dalam setiap praktik penggunaan

bahan kimia di lingkungan medis dan riset, termasuk dalam tahap pembuatan *phantom* diagnostik.

Idealnya, semua pencampuran bahan kimia dilakukan di bawah *fume hood*, bukan di area terbuka tanpa aliran udara paksa. Bila ini tidak memungkinkan, maka penggunaan exhaust fan langsung di atas meja kerja dapat menjadi alternatif darurat yang jauh lebih aman dibanding tanpa sistem sama sekali.

7.1.3 Prosedur Penanganan Resin: Mengacu pada MSDS

Setiap bahan resin atau campuran silikon yang digunakan dalam pembuatan *phantom* umumnya memiliki lembar data keselamatan atau *Material Safety Data Sheet* (MSDS). Dokumen ini menjelaskan sifat fisik-kimia bahan, risiko kesehatan, langkah pertolongan pertama, dan tata cara penanganan limbah.

Sebelum menggunakan suatu bahan, pembuat *phantom* wajib membaca MSDS dan memahami potensi bahayanya. Resin epoksi, misalnya, memiliki komponen *amine hardener* yang bersifat iritan dan bisa menyebabkan reaksi alergi jika kontak berulang terjadi. Penggunaan di ruang tertutup tanpa ventilasi dapat meningkatkan risiko paparan uap yang mengganggu sistem pernapasan.

Disarankan pula untuk memiliki logistik darurat seperti kotak P3K, eyewash station, dan tempat pembuangan limbah kimia yang tertutup. Limbah resin yang belum mengeras tidak boleh dibuang langsung ke saluran air karena dapat mencemari sistem pembuangan dan berdampak lingkungan.

7.2 Prosedur Aman Penanganan Bahan Kimia dan Pembuangan Limbah

Setiap penggunaan bahan kimia dalam proses pembangunan *phantom* harus mengikuti standar keamanan laboratorium yang ketat. Resin, silikon, maupun zat aditif memiliki potensi risiko terhadap kesehatan jika tidak ditangani dengan benar. Oleh karena itu, semua bahan wajib disimpan dalam wadah tertutup rapat dengan label yang jelas, termasuk informasi nama bahan, bahaya potensial, dan tanggal penyimpanan. Penggunaan sarung tangan, masker, dan kacamata pelindung merupakan prosedur standar untuk mencegah kontak langsung dengan kulit maupun terhirupnya uap kimia (Sunarsono, Handayani, & Mardiansyah, 2025).

Pencegahan kontak langsung dan tumpahan. Bahan seperti resin dan silikon dapat menyebabkan iritasi kulit maupun gangguan pernapasan jika terhirup dalam jumlah signifikan. Oleh karena itu, proses pencampuran sebaiknya dilakukan di ruang dengan ventilasi baik atau menggunakan *fume hood*. Jika terjadi tumpahan, segera serap dengan bahan penyerap khusus yang tahan terhadap bahan kimia dan buang ke wadah limbah B3.

Penyimpanan dan penandaan. Semua wadah kimia harus diberi label sesuai standar *Globally Harmonized System* (GHS) agar mudah dikenali tingkat bahayanya. Penyimpanan juga harus dipisahkan berdasarkan sifat kimia masing-masing, misalnya memisahkan bahan mudah terbakar dari oksidator, serta menjauhkan dari sumber panas.

Pembuangan limbah. Limbah resin, silikon, maupun *filler* seperti kalsium karbonat atau serbuk silikon tidak boleh dibuang ke saluran air atau lingkungan terbuka. Limbah ini dikategorikan sebagai limbah B3 (*bahan berbahaya dan beracun*), sehingga harus dikumpulkan dalam wadah khusus yang tahan bocor dan tidak bereaksi dengan isi. Setelah penuh, wadah dikirimkan ke pengelola limbah B3 resmi yang memiliki izin sesuai standar lingkungan. Dengan prosedur ini, potensi pencemaran lingkungan dapat diminimalkan sekaligus melindungi keselamatan pekerja laboratorium.

Selain itu, edukasi berkelanjutan mengenai keamanan bahan kimia bagi seluruh tim yang terlibat dalam proyek sangat diperlukan. Dengan pemahaman yang memadai, risiko kecelakaan dapat ditekan dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan tetap terjaga.

7.3 Uji Dimensi, Ketegakan Bidang Belah, dan Kestabilan Struktur

Kualitas geometri *phantom* merupakan salah satu aspek yang harus diperiksa sebelum digunakan lebih lanjut dalam evaluasi pencitraan atau pelatihan klinis. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa hasil cetak sesuai dengan rancangan digital, baik dari sisi dimensi, kesikuan bidang belah, maupun kestabilan struktur secara keseluruhan.

7.3.1 Uji Dimensi

Dimensi *phantom* diuji dengan alat ukur presisi seperti jangka sorong digital atau penggaris skala milimeter. Toleransi yang diterima umumnya ± 1 mm agar kesesuaian dengan desain digital dapat dipertahankan. Chen et al. (2023) menekankan bahwa ketepatan dimensi menjadi syarat utama agar *phantom* dapat dipakai dalam kontrol mutu tomoterapi, karena deviasi kecil saja dapat memengaruhi hasil verifikasi geometris. Dengan demikian, pengendalian dimensi bukan hanya soal kesesuaian fisik, melainkan juga jaminan reliabilitas klinis.

7.3.2 Ketegakan Bidang Belah

Selain dimensi, bidang belah *phantom* juga harus diperiksa. Ketegakan sudut diukur menggunakan penggaris siku atau alat ukur sudut digital. Marshall et al. (2023) mencatat bahwa ketepatan sudut sangat penting pada *phantom* enam derajat kebebasan yang digunakan untuk pengujian meja radioterapi. Jika sudut menyimpang, maka keselarasan antara modul dapat terganggu, mengakibatkan ketidakakuratan pada proses kalibrasi. Oleh karena itu, pengujian ketegakan dilakukan secara berulang untuk memastikan konsistensi.

7.3.3 Uji Kestabilan Struktur

Kestabilan struktur diuji dengan pembebanan ringan, misalnya menempatkan beban statis di atas modul *phantom*. Selama pengujian, diperhatikan adanya retakan, deformasi, atau sambungan yang lepas. Noble et al. (2021) menekankan bahwa *phantom* yang digunakan untuk menguji distorsi MRI harus memiliki kestabilan

struktural tinggi agar tidak terjadi pergeseran bentuk akibat gaya mekanis. Jika ditemukan ketidakstabilan, modul dapat diperkuat dengan menambahkan serat atau memperbaiki sambungan antar bagian.

7.3.4 Signifikansi dalam Konteks Quality Control

Proses uji dimensi, ketegakan, dan kestabilan bukan hanya langkah tambahan, tetapi bagian integral dari *quality control*. Ahmad et al. (2023) menegaskan bahwa *phantom* 3D-printed yang diproduksi di beberapa pusat tetap harus diuji akurasi dimensi dan ketegakan sudut agar hasil pengujian dapat dibandingkan lintas fasilitas. Tanpa kontrol geometri, nilai diagnostik dan validitas data yang dihasilkan bisa dipertanyakan.

7.3.5 Prospek Pengujian dengan Alat Digital

Dengan berkembangnya teknologi, uji geometri *phantom* kini tidak hanya dilakukan dengan alat manual. Espinoza et al. (2013) menunjukkan bahwa sistem sensor digital dua dimensi dapat dipakai untuk menilai kestabilan dan ketepatan posisi dengan presisi tinggi. Ke depan, pemanfaatan *3D scanning* juga memungkinkan evaluasi geometri yang lebih komprehensif, meliputi seluruh volume *phantom* dengan resolusi sub-milimeter.

Dengan demikian, uji dimensi, ketegakan bidang belah, dan kestabilan struktur merupakan tiga pilar yang saling melengkapi untuk menjamin kualitas geometri *phantom*. Hanya dengan pengendalian ketat terhadap aspek ini, *phantom* dapat berfungsi optimal sebagai instrumen untuk edukasi, kalibrasi, maupun evaluasi citra medis.

7.4 Pemeriksaan Cacat Permukaan, Retak Rambut, dan Koreksi Pascaproduksi

Sebelum *phantom* dirakit, tahap penting yang tidak boleh dilewatkan adalah pemeriksaan cacat permukaan. Ketidaksempurnaan seperti gelembung udara yang membeku di dalam resin, retak rambut (*hairline cracks*), hingga deformasi bentuk dapat mengurangi kualitas radiologis sekaligus estetika produk. Pemeriksaan biasanya dilakukan secara visual dengan bantuan pencahayaan kuat atau teknik *backlight* untuk menyoroti bagian yang tipis sehingga cacat lebih mudah terlihat (Delibasis et al., 2020).

Retak rambut sering muncul akibat proses *curing* resin yang tidak merata atau adanya perbedaan suhu mendadak saat pengeringan. Jika dibiarkan, retak ini dapat berkembang menjadi celah yang lebih besar dan akhirnya memengaruhi integritas struktur. Oleh sebab itu, retak rambut harus segera diidentifikasi dan ditangani sebelum digunakan dalam pemindaian CT atau radiografi (Kozicki & Maras, 2023).

Terdapat beberapa langkah koreksi pascaproduksi yang lazim dilakukan. Pertama, pengamplasan ulang pada permukaan dapat menyamarkan cacat kecil atau gelembung terbuka, sehingga menghasilkan permukaan yang lebih homogen. Kedua, penambalan dengan resin cair merupakan solusi untuk retak rambut maupun lubang kecil. Resin cair yang diaplikasikan kemudian dibiarkan *curing* hingga kembali menyatu dengan struktur utama. Langkah

ketiga adalah pengulangan proses penuangan jika kerusakan yang ditemukan cukup signifikan, misalnya deformasi bentuk yang besar atau retakan yang meluas (Mahmood et al., 2021).

Proses koreksi ini penting tidak hanya untuk menjaga kualitas radiologis, tetapi juga untuk memastikan konsistensi hasil citra. *Phantom* dengan cacat permukaan yang dibiarkan dapat memunculkan artefak pada citra CT atau MRI, yang berpotensi mengganggu interpretasi diagnostik. Menurut Liu et al. (2018), kontrol kualitas pada tahap pascaproduksi merupakan bagian integral dari keberhasilan pemanfaatan *phantom*, karena mengurangi risiko munculnya gangguan citra akibat ketidaksempurnaan struktural.

Secara praktis, koreksi pascaproduksi juga memperpanjang umur *phantom*. Produk yang terawat dengan baik, bebas cacat besar, dan diperbaiki dengan benar dapat digunakan berulang kali dalam berbagai prosedur radiologis. Dengan demikian, langkah pemeriksaan dan koreksi pascaproduksi tidak hanya meningkatkan nilai fungsional, tetapi juga memastikan *phantom* tetap representatif dalam jangka panjang.

7.5 Checklist Kendali Mutu Tiap Tahap (Desain—Cetakan—Penuangan—Perakitan)

Untuk menghasilkan *phantom* antropomorfik yang berkualitas tinggi, dapat digunakan berulang, dan akurat secara anatomi maupun radiologis, setiap tahapan dalam proses produksi

harus dikendalikan secara sistematis. Salah satu cara paling efektif untuk memastikan kualitas yang konsisten adalah melalui penerapan *checklist* kendali mutu. Dokumen ini berfungsi sebagai panduan teknis sekaligus alat verifikasi yang meminimalkan kesalahan dan meningkatkan efisiensi kerja.

Checklist mutu bukan hanya soal administratif, tetapi merupakan bagian penting dari *good manufacturing practice* dalam skala produksi kecil maupun besar. Dalam konteks pembuatan *phantom*, *checklist* mencakup empat tahap utama: desain digital, pembuatan cetakan, proses penuangan, dan perakitan akhir.

7.5.1 Desain: Verifikasi Digital dan Validasi Struktur

Tahap awal dimulai dari desain digital berbasis data medis. Pada fase ini, beberapa hal penting harus dicek secara rinci:

- Apakah file STL telah sesuai dengan dimensi anatomi referensi?
- Apakah ketebalan dinding cukup untuk dicetak dan dituang tanpa pecah atau bocor?
- Apakah posisi belahan (*split*) sudah optimal untuk proses pencetakan dan perakitan?

Menurut Slagowski et al. (2020), kesalahan pada desain digital dapat menyebabkan deviasi hingga beberapa milimeter pada bentuk akhir jika tidak dilakukan validasi awal. Oleh karena itu, sangat penting untuk memverifikasi hasil segmentasi dan memastikan bahwa *file* dapat diterima oleh perangkat lunak *slicer* tanpa kesalahan (*error-free mesh*).

7.5.2 Cetakan: Pemeriksaan Ketuntasan dan Kemudahan Penggunaan

Tahapan cetakan melibatkan bahan seperti silikon RTV atau resin keras, yang perlu mengalami proses pengeringan atau *curing*. *Checklist* mutu pada tahap ini mencakup:

- Apakah cetakan sudah kering sempurna sesuai waktu yang ditentukan oleh produsen?
- Apakah elastisitas cetakan cukup untuk melepaskan objek tanpa retak atau robek?
- Apakah cetakan bersih dari sisa bahan lama atau deformasi akibat penggunaan sebelumnya?

Selain itu, bila cetakan digunakan ulang, kondisi permukaan dalam perlu diperiksa untuk memastikan tidak ada cacat mikro yang bisa mencetak ke permukaan *phantom*.

7.5.3 Penuangan: Konsistensi Material dan Bebas Gelembung

Pada tahap penuangan material (resin, gipsum, atau silikon), kualitas akhir sangat bergantung pada ketepatan proses pencampuran dan pengendalian lingkungan. *Checklist* standar mencakup:

- Apakah proporsi campuran bahan sudah sesuai dengan rekomendasi (misalnya rasio resin:hardener)?
- Apakah waktu *curing* diikuti secara ketat dan tidak dipercepat dengan pemanasan berlebih?
- Apakah hasil akhir bebas dari gelembung udara besar yang bisa memengaruhi densitas dan struktur?

Gelembung bisa dicegah dengan *vacuum degassing* atau pengadukan lambat. Jika tidak tertangani, cacat ini akan muncul pada citra radiologi sebagai artefak, sehingga dapat mengganggu fungsi *phantom*.

7.5.4 Perakitan: Ketelitian Posisi dan Penampilan Akhir

Tahap akhir adalah perakitan semua bagian menjadi satu unit utuh. Pemeriksaan pada tahap ini fokus pada:

- Apakah semua modul terpasang dengan posisi benar dan tidak miring?
- Apakah tidak ada celah besar yang bisa menyebabkan kebocoran cairan?
- Apakah hasil akhir secara visual rapi dan sesuai dengan standar produksi?

Finishing tambahan seperti penghalusan sambungan, pengecatan pelindung, atau pelabelan juga masuk dalam *checklist* agar *phantom* siap digunakan secara profesional.

7.5.5 Dokumentasi dan Audit Internal

Setiap *checklist* perlu disertai tanda tangan teknisi dan tanggal pelaksanaan. Dengan demikian, bila terjadi kesalahan, penyebabnya bisa ditelusuri dan diperbaiki. Pendekatan ini mendukung sistem dokumentasi dan *traceability* yang semakin banyak diterapkan dalam produksi alat bantu medis berskala kecil.

Bab 8: Kalibrasi dan Validasi

Radiologis Phantom

8.1 Pengukuran HU di CT: Keseragaman dan Kesetaraan Material

Dalam dunia pencitraan medis, khususnya dengan *Computed Tomography* (CT), nilai *Hounsfield Unit* (HU) menjadi indikator utama dalam mengevaluasi densitas suatu objek. HU bukan sekadar angka, tetapi merepresentasikan hubungan linier antara koefisien atenuasi sinar-X suatu material terhadap air. Maka dari itu, pengukuran HU dalam konteks penggunaan *phantom* antropomorfik sangat penting untuk memastikan bahwa bahan yang digunakan meniru respons jaringan biologis secara realistis.

Salah satu fungsi utama pengukuran HU pada *phantom* adalah untuk menilai kesetaraan material. Misalnya, bahan yang digunakan untuk meniru tulang harus memiliki HU yang mendekati tulang kortikal asli, yakni berkisar +700 hingga +3000, tergantung densitas dan tingkat mineralisasi. Sementara itu, material yang ditujukan untuk merepresentasikan jaringan lunak seperti otot atau lemak harus memiliki nilai HU dalam kisaran -100 hingga +80. Pengujian dilakukan dengan menempatkan *Region of Interest* (ROI) pada titik-titik strategis di dalam citra CT, yang kemudian diukur dan dibandingkan dengan standar referensi.

Di samping kesetaraan terhadap jaringan, keseragaman HU menjadi aspek krusial lain. Keseragaman berarti bahwa nilai HU tidak berubah secara drastis pada berbagai titik dalam satu bahan yang sama. Misalnya, jika suatu *phantom* bagian otot menunjukkan variasi HU lebih dari ± 10 HU antar ROI, hal ini dapat menjadi indikator adanya inkonsistensi pencampuran bahan, kehadiran gelembung udara, atau gangguan selama proses *curing*. Hasil seperti ini bisa menyebabkan interpretasi citra menjadi bias, terutama dalam penggunaan untuk pelatihan atau evaluasi perangkat.

Dalam sebuah publikasi oleh Muttaqin dan Oktavia (2025), dilakukan pengujian keseragaman dengan menggunakan *phantom* ACR di Instalasi Radiologi Universitas Andalas. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi HU pada ROI yang dipasang pada posisi tengah, atas, dan samping *phantom* tidak melebihi 2 HU, yang berarti *phantom* tersebut telah memenuhi ambang batas toleransi internasional untuk keseragaman (*tolerance limit for uniformity*).

Sebaliknya, Diartama (2024) dalam artikelnya di *Jurnal Antigen* menyoroti pentingnya posisi ROI saat melakukan pengukuran. Ia menemukan bahwa perbedaan posisi ROI pada bagian pinggir dan pusat *phantom* dapat memberikan hasil HU yang cukup berbeda jika alat CT mengalami masalah kalibrasi atau terjadi gangguan pada tabung sinar-X. Oleh karena itu, uji keseragaman tidak hanya menjadi kontrol kualitas bahan *phantom*, tetapi juga sarana tidak langsung untuk mengevaluasi performa sistem CT itu sendiri.

Lebih lanjut, pengujian HU juga digunakan untuk melihat adanya artefak atau *noise* dalam citra. Ketika keseragaman terganggu oleh gangguan fisik seperti gelembung, retakan mikro, atau inklusi material asing, maka nilai HU akan menunjukkan anomali lokal. Praktik terbaik adalah menempatkan ROI berukuran minimal 10–20 mm² di lima titik utama: pusat, atas, bawah, kanan, dan kiri dalam satu irisan CT, untuk memperoleh gambaran distribusi HU secara menyeluruh.

Dengan kata lain, proses pengukuran HU bukan hanya prosedur teknis, tetapi bagian integral dari jaminan mutu pembuatan *phantom* itu sendiri. Tanpa parameter ini, sulit memastikan bahwa *phantom* benar-benar merepresentasikan jaringan biologis baik dari segi penampakan visual maupun karakteristik radiologisnya.

8.2 Uji Atenuasi di Radiografi: Konsistensi Exposure dan Contrast

Uji atenuasi merupakan salah satu prosedur penting dalam evaluasi kualitas sistem radiografi. Melalui pengujian ini, sensitivitas sistem terhadap perbedaan densitas bahan dapat diketahui secara lebih objektif. Tujuannya adalah memastikan bahwa hasil pencitraan memiliki konsistensi baik dalam hal tingkat *exposure* maupun *contrast*, sehingga gambaran radiografi mampu menampilkan detail anatomi dengan akurat.

Salah satu metode yang umum digunakan adalah dengan pola *step-wedge*, yaitu objek berbentuk tangga dengan gradasi

ketebalan tertentu. Ketika dipaparkan dengan sinar-X, *step-wedge* akan menghasilkan perbedaan tingkat kehitaman atau densitas optis pada film maupun citra digital. Variasi densitas ini secara langsung merepresentasikan perbedaan kemampuan sistem dalam menangkap perubahan atenuasi. Nurcahyadin (2022) menekankan bahwa kontras radiografi pada dasarnya merupakan hasil perbedaan atenuasi sinar-X, sehingga *step-wedge* menjadi alat uji yang andal untuk menilai kualitas citra.

Selain *step-wedge*, **penempatan objek bergradasi** yang meniru perbedaan antara jaringan keras dan jaringan lunak juga digunakan. Pada simulasi tersebut, material dengan densitas menyerupai tulang, otot, dan lemak ditempatkan berdampingan untuk melihat sejauh mana sistem radiografi mampu menampilkan kontras yang jelas. Fitriani (2022) menunjukkan bahwa perbedaan *exposure factor* yang diberikan akan memengaruhi kemampuan sistem dalam membedakan perbedaan atenuasi antar-material.

Dalam praktik klinis, konsistensi *exposure* sangat penting karena berhubungan langsung dengan keamanan pasien. Paparan berlebih dapat meningkatkan risiko radiasi, sedangkan paparan yang terlalu rendah berpotensi menghasilkan citra dengan kualitas buruk. Islamiyah, Sudewi, dan Azizah (2023) menggarisbawahi pentingnya optimasi faktor eksposur dalam radiografi dada digital untuk meminimalkan paparan tanpa mengorbankan kualitas citra.

Dengan demikian, uji atenuasi melalui *step-wedge* atau objek gradasi bukan hanya prosedur teknis semata, melainkan juga bagian

dari strategi pengendalian mutu untuk menjamin keseimbangan antara keselamatan pasien dan akurasi diagnostik.

8.3 Validasi Dosimetrik: Film Radiochromic, TLD, atau Ion Chamber (Opsional)

Validasi dosimetrik merupakan tahap penting untuk memastikan bahwa dosis radiasi yang diberikan sesuai dengan standar keamanan. Proses ini menggunakan instrumen khusus yang mampu mengukur, merekam, dan memverifikasi distribusi dosis. Di antara teknik yang paling umum digunakan adalah *radiochromic film*, *thermoluminescent dosimeter (TLD)*, serta *ion chamber*. Pemilihan instrumen sangat bergantung pada tingkat akurasi yang diinginkan dan sumber daya yang tersedia di laboratorium.

8.3.1 Film Radiochromic

Radiochromic film bekerja dengan mendeteksi perubahan warna akibat paparan radiasi. Intensitas perubahan warna berbanding lurus dengan dosis yang diterima, sehingga film dapat dipindai dan dianalisis secara kuantitatif. Devic et al. (2016) menekankan bahwa film jenis ini menawarkan keunggulan dalam memberikan peta distribusi dua dimensi dengan resolusi spasial tinggi. Oleh karena itu, *radiochromic film* sering digunakan untuk memverifikasi kompleksitas distribusi dosis dalam terapi intensitas modulated radiation therapy (IMRT) maupun radioterapi stereotaktik.

8.3.2 Thermoluminescent Dosimeter (TLD)

TLD menyimpan energi dari radiasi yang diterima, lalu melepaskannya dalam bentuk cahaya ketika dipanaskan. Jumlah cahaya yang dipancarkan berbanding lurus dengan dosis radiasi yang diterima. Litvac dan Caldas (2025) menunjukkan bahwa TLD memiliki sensitivitas tinggi dan cocok digunakan untuk kalibrasi jangka panjang, meski analisisnya membutuhkan instrumen tambahan berupa *reader*. Salah satu keunggulan TLD adalah ukurannya yang kecil, sehingga dapat ditempatkan pada lokasi tertentu di dalam *phantom* untuk mendapatkan pengukuran dosis lokal.

8.3.3 Ion Chamber

Ion chamber atau ruang ionisasi merupakan alat standar emas dalam pengukuran dosis radiasi. Prinsip kerjanya adalah mengukur arus listrik yang dihasilkan oleh ionisasi udara akibat paparan radiasi. Salari dan Parsai (2023) mencatat bahwa meskipun *ion chamber* memiliki keterbatasan resolusi spasial, alat ini sangat handal dalam memberikan pengukuran absolut dengan akurasi tinggi. Karena sifatnya yang stabil, *ion chamber* sering digunakan sebagai acuan untuk mengkalibrasi hasil pengukuran dengan film maupun TLD.

8.3.4 Pemilihan Teknik Berdasarkan Kebutuhan

Tidak ada satu pun metode yang sempurna untuk semua situasi. *Radiochromic film* unggul dalam memetakan distribusi dosis secara detail, TLD lebih cocok untuk pengukuran titik dengan sensitivitas tinggi, sementara *ion chamber* tetap menjadi standar

dalam verifikasi absolut. Stella et al. (2020) menunjukkan bahwa kombinasi antara ketiganya sering digunakan dalam pengukuran dosis CT pada *phantom* antropomorfik, sehingga hasil lebih dapat diandalkan. Dengan demikian, pemilihan metode harus mempertimbangkan kebutuhan klinis maupun keterbatasan teknis di laboratorium.

8.3.5 Relevansi untuk Quality Assurance

Validasi dosimetrik memiliki peran strategis dalam *quality assurance* prosedur pencitraan maupun terapi radiasi. Azman (2018) menekankan bahwa verifikasi dosis menggunakan *radiochromic film* dalam stereotactic radiosurgery (SRS) sangat penting untuk meminimalkan deviasi antara rencana terapi dan realisasi klinis. Dengan kata lain, validasi bukan sekadar prosedur opsional, melainkan elemen kritis dalam menjamin keselamatan pasien dan efektivitas prosedur.

Dengan demikian, penggunaan film radiochromic, TLD, dan *ion chamber* dalam validasi dosimetrik memberikan jaminan bahwa dosis radiasi yang diberikan sesuai standar. Fleksibilitas dalam memilih teknik memungkinkan penyesuaian dengan kebutuhan klinis, sehingga validasi ini menjadi elemen vital dalam pengembangan dan penggunaan *phantom*.

8.4 Repetabilitas Pengukuran dan Baseline Data untuk QA Berkala

Repetabilitas pengukuran adalah salah satu aspek penting dalam pemanfaatan *phantom* untuk evaluasi kualitas citra medis. Konsep ini merujuk pada konsistensi hasil yang diperoleh ketika pengujian dilakukan berulang kali dengan *phantom* yang sama, dalam kondisi identik. Jika hasil yang diperoleh serupa, maka dapat dipastikan bahwa sistem pencitraan berada dalam keadaan stabil. Repetabilitas ini menjadi landasan bagi pembangunan *baseline data*, yakni kumpulan data acuan yang kemudian digunakan dalam program *Quality Assurance* (QA) berkala (Lee et al., 2021).

Baseline data memiliki fungsi vital sebagai tolok ukur. Dalam praktik QA, hasil pencitraan baru dibandingkan dengan baseline yang telah ditetapkan. Deviasi yang signifikan dari baseline dapat menandakan adanya degradasi sistem, misalnya penurunan sensitivitas detektor, gangguan kalibrasi tabung sinar-X, atau ketidakstabilan pada perangkat lunak rekonstruksi citra. Dengan mendeteksi deviasi lebih awal, tindakan kalibrasi ulang atau perbaikan teknis dapat dilakukan sebelum memengaruhi kualitas diagnostik (Delibasis et al., 2020).

Peran *phantom* dalam konteks ini tidak hanya terbatas pada CT, tetapi juga mencakup MRI dan PET. Sebagai contoh, studi oleh Rai et al. (2020) menunjukkan bahwa pengujian berulang menggunakan *phantom* MRI menghasilkan konsistensi tinggi pada fitur radiomik, sehingga dapat dipakai untuk menilai reliabilitas

jangka panjang suatu perangkat. Begitu pula pada CT, penggunaan *phantom* standar memungkinkan evaluasi reproducibility radiomics untuk nodule paru dalam penelitian multicenter (Peng et al., 2022).

Aspek lain yang tidak kalah penting adalah kestabilan longitudinal. QA tidak hanya dilakukan sesaat, melainkan harus dijalankan secara periodik, misalnya harian, mingguan, atau bulanan, bergantung pada kebutuhan klinis dan regulasi. Studi oleh Yu et al. (2024) menunjukkan bahwa pemindaian *phantom* setiap hari selama 30 hari berturut-turut pada MR-Linac mampu mengevaluasi stabilitas sistem sekaligus mengidentifikasi deviasi kecil yang mungkin luput dari pemeriksaan manual.

Dengan demikian, repetabilitas pengukuran dan baseline data menjadi komponen inti dalam QA. Keduanya memastikan sistem pencitraan tetap konsisten, reliabel, dan mampu menghasilkan citra dengan kualitas yang dapat dipertanggungjawabkan. Pada akhirnya, praktik QA berbasis *phantom* bukan hanya soal pemenuhan standar teknis, tetapi juga tentang menjaga kepercayaan pada hasil diagnostik yang digunakan dalam pengambilan keputusan klinis.

8.5 Dokumentasi Hasil Validasi dan Kriteria Pass/Fail Sederhana

Setelah proses pembuatan dan pengujian *phantom* selesai, langkah yang tidak kalah penting adalah pendokumentasian hasil validasi radiologis secara sistematis. Dokumentasi ini bukan hanya catatan teknis,

tetapi menjadi dasar penting untuk pengambilan keputusan—apakah *phantom* layak digunakan, perlu diperbaiki, atau harus direproduksi ulang. Dengan dokumentasi yang jelas dan rapi, proses evaluasi menjadi lebih objektif dan terstandarisasi.

8.5.1 Parameter yang Harus Dicatat

Setiap validasi radiologis harus mencakup empat aspek utama, yaitu nilai HU (*Hounsfield Unit*), kontras, *noise*, dan estimasi dosis. Masing-masing parameter ini memberikan gambaran menyeluruh tentang performa *phantom* dan kesesuaiannya untuk simulasi klinis.

- **Nilai HU:** Dicatat untuk beberapa ROI (region of interest), terutama pada bagian tulang, jaringan lunak, dan ruang kosong (udara). Nilai HU ini dibandingkan dengan nilai rujukan untuk menentukan kesetaraan material terhadap jaringan biologis.
- **Kontras:** Diukur berdasarkan perbedaan HU antara dua jenis material yang berdampingan, seperti tulang dan otot, atau otot dan lemak. Kontras yang terlalu rendah dapat menyebabkan hilangnya detail anatomi dalam citra.
- **Noise:** Dievaluasi dengan mengukur simpangan baku (standard deviation) nilai HU dalam ROI yang homogen. Semakin tinggi *noise*, semakin rendah kualitas citra.
- **Dosis:** Meskipun bukan bagian dari *phantom* itu sendiri, dokumentasi dosis radiasi yang digunakan dalam pengujian memberikan informasi tambahan terkait kesesuaian prosedur dan pengaruh terhadap kontras/noise (Heryani et al., 2023).

8.5.2 Acuan Baku dan Toleransi

Untuk menilai apakah hasil pengukuran masih dalam batas wajar, digunakan standar baku sebagai pembanding. Salah satu acuan yang sering dipakai adalah *American Association of Physicists in Medicine* (AAPM), khususnya laporan AAPM Report No. 93. Laporan ini memberikan toleransi parameter kualitas citra seperti:

- Nilai HU tulang: ± 100 dari nilai referensi
- *Noise*: <5 HU untuk area jaringan lunak homogen
- Kontras antara otot dan lemak: minimal 40 HU
- Uniformitas: deviasi HU antar ROI tidak lebih dari 5 HU

Humayroh (2023) mencatat bahwa toleransi ini juga telah diadopsi dalam praktik lokal di beberapa rumah sakit dan program pelatihan radiologi, sebagai bagian dari standar operasional prosedur pengujian alat.

8.5.3 Sistem Evaluasi *Pass/Fail* Sederhana

Untuk memudahkan interpretasi, data hasil validasi dapat disajikan dalam bentuk tabel atau grafik sederhana dengan sistem *pass/fail*. Format ini menggunakan kode warna atau simbol ($\checkmark$ untuk *pass*, $\times$ untuk *fail*) untuk menunjukkan apakah parameter berada dalam ambang batas atau tidak.

Contoh tabel evaluasi sederhana:

Parameter	Nilai Terukur	Nilai Acuan	Status
HU Tulang	1250	1300 ± 100	$\checkmark$
HU Jaringan Lunak	45	40 ± 10	$\checkmark$

Parameter	Nilai Terukur	Nilai Acuan	Status
Noise	6.3 HU	<5 HU	X
Kontras (otot-lemak)	48	>40 HU	✓

Bila dua atau lebih parameter menunjukkan status X, maka *phantom* harus dievaluasi lebih lanjut. Bisa jadi terjadi ketidaksesuaian bahan, kesalahan pencampuran, atau adanya kerusakan struktural yang memengaruhi hasil akhir.

8.5.4 Manfaat Dokumentasi dalam Keputusan Teknis

Dokumen hasil validasi menjadi referensi penting untuk pemeliharaan, audit mutu, hingga uji ulang di masa mendatang. Selain itu, dokumentasi ini sangat membantu jika *phantom* digunakan sebagai alat validasi antarinstansi, karena memberikan rekam jejak teknis dan memperkuat akuntabilitas desain.

Sebagai bagian dari praktik manufaktur berkualitas, semua dokumen sebaiknya diberi tanggal, nama operator, perangkat CT yang digunakan, serta versi *phantom*. Informasi ini penting untuk *traceability* dan peningkatan mutu berkelanjutan.

Bab 9: Penerapan dalam Pendidikan, QA, dan Klinik

9.1 Pelatihan Positioning Pelvis: Landmark, Rotasi, dan Immobilization

Dalam praktik radiologi, keberhasilan pemeriksaan tidak hanya ditentukan oleh kualitas alat dan parameter pemindaian, tetapi juga sangat bergantung pada keakuratan posisi pasien. Pelvis merupakan salah satu area tubuh yang kompleks, sehingga membutuhkan teknik *positioning* yang presisi agar struktur internal dapat terlihat secara simetris dan tanpa distorsi. Oleh karena itu, pelatihan *positioning* pelvis menjadi kompetensi penting, baik untuk keperluan diagnostik maupun terapeutik, termasuk radioterapi.

9.1.1 Identifikasi *Landmark* sebagai Titik Acuan

Proses penentuan posisi pelvis selalu diawali dengan identifikasi *landmark* anatomis yang dapat diraba atau dikenali secara visual. Dua *landmark* utama yang sering digunakan adalah spina iliaca anterior superior (SIAS) dan simfisis pubis. SIAS, yang terletak di bagian depan atas tulang ilium, berfungsi sebagai penanda simetri kiri dan kanan. Sedangkan simfisis pubis menjadi acuan garis tengah bawah pelvis.

Menurut Dilogu dan Djaja (2013), penggunaan *landmark* ini tidak hanya penting saat pemasangan pasien di atas meja

pemindaian, tetapi juga dalam menilai apakah hasil pencitraan telah menggambarkan posisi anatomi secara netral. Misalnya, jika garis antara kedua SIAS tidak sejajar secara horizontal, maka dapat dipastikan bahwa pelvis mengalami kemiringan atau rotasi.

9.1.2 Evaluasi Rotasi Melalui Struktur Simetris

Setelah penempatan awal berdasarkan *landmark*, evaluasi dilakukan dengan memperhatikan simetri struktur internal dalam citra hasil pemindaian. Dua indikator yang umum digunakan untuk menilai rotasi adalah simetri foramen obturatorium dan bentuk *iliac wing*. Dalam kondisi netral, kedua sisi foramen obturatorium harus memiliki ukuran dan bentuk yang hampir sama.

Rotasi pelvis akan menyebabkan salah satu foramen tampak lebih sempit, sementara yang lain terlihat lebih besar. Hal ini juga berlaku pada tampilan *iliac wing*, di mana rotasi menyebabkan asimetri lebar dan kontur. Jika rotasi tidak diperbaiki, dapat terjadi kesalahan interpretasi pada hasil diagnostik atau ketidaktepatan penyinaran dalam radioterapi.

Penelitian klinis juga menunjukkan bahwa sudut inklinasi pelvis akibat rotasi internal sebesar 15–20 derajat dapat memengaruhi akurasi pengukuran jarak antarstruktur tulang hingga 10%, yang cukup signifikan dalam konteks perencanaan tindakan medis (Dilogo & Djaja, 2013).

9.1.3 Strategi *Immobilization* untuk Menghindari Artefak

Selain *positioning*, aspek imobilisasi juga sangat krusial. Pergerakan pasien selama proses pencitraan dapat menimbulkan artefak gerakan (*motion artifact*) yang menyebabkan kaburnya citra.

Untuk itu, digunakan alat bantu seperti bantalan, tali penahan (*strap*), atau *cradle* khusus area pelvis.

Bantalan digunakan untuk menjaga keselarasan pinggul dan tulang belakang. Sementara *strap* membantu mengurangi gerakan lateral dan rotasional. Beberapa fasilitas medis bahkan menggunakan alat *vacuum immobilizer* yang membentuk lekukan sesuai tubuh pasien, memberikan stabilitas lebih tinggi selama prosedur berlangsung.

Pelatihan teknisi dan operator radiologi dalam mengenali tanda-tanda ketidakstabilan posisi serta kemampuan melakukan koreksi secara cepat merupakan bagian dari upaya meningkatkan mutu layanan pencitraan. Oleh karena itu, simulasi berulang dan penggunaan *phantom* pelvis sebagai alat bantu pelatihan menjadi pendekatan yang efektif untuk memastikan standar kerja yang konsisten.

9.2 Uji Coba Protokol CT/Radiografi: Optimasi Exposure dan Dose Awareness

Penggunaan *phantom* dalam pengujian protokol CT dan radiografi menjadi langkah penting untuk memastikan keseimbangan antara kualitas citra dan paparan dosis. Melalui simulasi dengan *phantom*, berbagai parameter teknis seperti tegangan tabung (kV), arus tabung (mAs), *pitch*, dan kolimasi dapat diuji secara sistematis. Tujuannya adalah menemukan kombinasi

parameter yang memberikan *exposure* minimal tanpa mengorbankan kualitas diagnostik (Heryani et al., 2023).

Optimasi paparan dosis biasanya dinilai menggunakan dua indikator utama: *Computed Tomography Dose Index volume* (CTDIvol) dan *Dose Length Product* (DLP). CTDIvol mencerminkan dosis rata-rata pada volume tertentu dari *phantom*, sedangkan DLP menggambarkan dosis total sepanjang panjang pemindaian. Dengan mengombinasikan keduanya, perkiraan dosis efektif pasien dapat diperoleh (Diartama & Lobang, 2023).

Dalam praktiknya, uji coba protokol sering menggunakan *phantom* berbahan PMMA atau air untuk menilai kualitas citra sekaligus dosis. Irsal dan Winarno (2020) menunjukkan bahwa variasi mAs berpengaruh signifikan terhadap resolusi spasial sekaligus meningkatkan CTDIvol, sehingga diperlukan kompromi antara kualitas gambar dan keselamatan pasien.

Selain parameter dasar, teknik otomatisasi seperti *Automatic Tube Current Modulation* (ATCM) juga banyak diuji dalam konteks optimasi. Jamal (2022) melaporkan bahwa ATCM mampu menurunkan dosis pasien dibandingkan dengan *fixed tube current modulation* (FTCM) tanpa penurunan signifikan pada kualitas citra. Hal ini membuktikan bahwa optimasi protokol dapat dicapai bukan hanya dengan pengaturan manual, tetapi juga melalui pemanfaatan fitur bawaan perangkat CT.

Pelatihan klinis dalam penggunaan indikator dosis menjadi komponen penting lain dalam *dose awareness*. Pemahaman tentang CTDIvol dan DLP, termasuk bagaimana parameter tersebut berubah

akibat variasi kV, mAs, atau *pitch*, sangat penting bagi operator. Khoiriyyah (2020) menekankan perlunya sosialisasi rutin mengenai *size-specific dose estimate* (SSDE) agar operator dapat menyesuaikan protokol dengan ukuran tubuh pasien, sehingga dosis yang diberikan benar-benar sesuai kebutuhan.

Dengan demikian, simulasi *phantom* tidak hanya berfungsi sebagai alat teknis, melainkan juga sebagai sarana edukasi untuk meningkatkan kesadaran dosis di kalangan tenaga medis. Kombinasi optimasi teknis dan peningkatan *dose awareness* menjamin bahwa CT dan radiografi dapat digunakan secara aman sekaligus tetap mempertahankan kualitas diagnostik yang optimal.

9.3 Simulasi Perencanaan Radioterapi Pelvis (Kontur Organ dan Verifikasi)

Penggunaan *phantom* pelvis dalam simulasi perencanaan radioterapi memberikan sarana yang efektif untuk melatih proses kontur organ dan verifikasi posisi penyinaran. Proses ini tidak hanya membantu memahami prinsip radioterapi modern, tetapi juga meningkatkan kepercayaan diri peserta pelatihan sebelum menghadapi kasus klinis nyata.

9.3.1 Kontur Organ pada Perencanaan Radioterapi

Kontur organ merupakan tahap penting dalam perencanaan radioterapi, khususnya pada area pelvis yang melibatkan struktur kritis seperti prostat, kandung kemih, dan rektum. Keakuratan kontur memengaruhi distribusi dosis, sehingga kesalahan kecil dapat

menimbulkan dampak signifikan. Wong (2025) menekankan bahwa penggunaan *phantom* pelvis dengan deformasi yang dapat dikendalikan membantu peserta berlatih dalam melakukan kontur organ dengan lebih konsisten, sekaligus memungkinkan validasi propagasi kontur menggunakan algoritme pendaftaran gambar deformabel (*deformable image registration/DIR*).

9.3.2 Verifikasi Posisi dengan Cone Beam CT (CBCT)

Verifikasi posisi pasien dalam radioterapi modern banyak dilakukan dengan *cone beam CT (CBCT)*. Pada latihan menggunakan *phantom*, CBCT dipakai untuk memastikan kesesuaian posisi anatomi sebelum penyinaran dilakukan. Oates et al. (2018) menjelaskan bahwa CBCT tidak hanya berfungsi untuk koreksi posisi, tetapi juga memungkinkan evaluasi perubahan anatomi harian. Dengan latihan berulang pada *phantom*, peserta dapat memahami pentingnya verifikasi posisi untuk meminimalkan deviasi dosis yang mengenai organ kritis.

9.3.3 Integrasi X-ray Onboard Imaging

Selain CBCT, teknologi X-ray *onboard imaging* juga kerap dipakai dalam verifikasi cepat. Pada praktik klinis, teknik ini digunakan untuk memastikan keselarasan dengan titik acuan anatomi. Guckenberger et al. (2017) mencatat bahwa keberhasilan radioterapi berbasis citra sangat ditentukan oleh kualitas verifikasi posisi yang dilakukan secara konsisten. Melalui simulasi dengan *phantom*, peserta dapat membandingkan efektivitas antara CBCT dan X-ray dalam konteks efisiensi waktu dan keakuratan.

9.3.4 Nilai Edukatif bagi Peserta Didik Radioterapi

Simulasi dengan *phantom* pelvis memiliki nilai edukatif yang tinggi. Para peserta pelatihan dapat berlatih melakukan kontur organ, menetapkan margin, serta memverifikasi posisi dengan berbagai modalitas pencitraan. Hal ini memberikan pengalaman mendekati kondisi nyata tanpa risiko bagi pasien. Van der Heide et al. (2018) menekankan bahwa pelatihan berbasis simulasi berkontribusi dalam meningkatkan keterampilan teknis sekaligus pemahaman klinis dalam radioterapi adaptif.

9.3.5 Implikasi dalam Radioterapi Adaptif

Dengan meningkatnya penggunaan radioterapi adaptif, kemampuan melakukan kontur ulang organ dan verifikasi posisi menjadi semakin penting. Wong (2025) menunjukkan bahwa *phantom* pelvis dengan deformasi dapat digunakan untuk mengevaluasi algoritme perencanaan adaptif, termasuk akumulasi dosis dari beberapa fraksi penyinaran. Hal ini menegaskan peran *phantom* sebagai sarana validasi sekaligus pendidikan di era radioterapi yang semakin dipersonalisasi.

Dengan demikian, simulasi perencanaan radioterapi pelvis menggunakan *phantom* tidak hanya berfokus pada kontur organ, tetapi juga mencakup proses verifikasi posisi dengan CBCT maupun X-ray. Pelatihan ini bermanfaat bagi peserta didik radioterapi dalam memahami keterkaitan antara perencanaan, pelaksanaan, dan evaluasi terapi, serta memberikan kontribusi pada peningkatan kualitas perawatan pasien.

9.4 Uji Perangkat Bantu (Tatakan, Immobilizer, Pelvis Cradle) dengan Phantom

Dalam praktik radiologi maupun terapi radiasi, perangkat bantu seperti tatakan, bantal immobilisasi, dan *pelvis cradle* memiliki peran penting untuk menjaga konsistensi posisi pasien. Keberadaan perangkat ini harus diuji menggunakan *phantom* agar dapat dievaluasi kestabilan, kenyamanan, serta potensi artefak yang ditimbulkan selama prosedur pencitraan.

Tatakan atau alas tubuh berfungsi menjaga kesesuaian bentuk anatomi dengan meja pemindaian. Pada pengujian dengan *phantom*, parameter yang diperhatikan meliputi distribusi tekanan, kestabilan posisi, serta apakah material tatakan menimbulkan bayangan atau artefak pada citra. Studi terkini menunjukkan bahwa variasi material tatakan dapat memengaruhi kualitas citra CT simulasi radioterapi, sehingga uji kompatibilitas dengan *phantom* menjadi langkah krusial (Govyadinov et al., 2025).

Bantal immobilisasi dirancang untuk meminimalkan gerakan pasien. Dalam pengujian menggunakan *phantom*, dilakukan penilaian terhadap kemampuan bantal menjaga posisi tetap sama selama beberapa siklus pemindaian. Hal ini penting terutama pada prosedur radioterapi yang memerlukan presisi tinggi, di mana pergeseran kecil dapat berpengaruh signifikan terhadap distribusi dosis. Penggunaan *phantom* memungkinkan analisis sejauh mana perangkat ini dapat mempertahankan kestabilan, sekaligus

memeriksa apakah bahan bantal memberikan efek tambahan pada nilai *Hounsfield Unit* (HU).

Pelvis cradle sebagai perangkat khusus untuk bagian panggul diuji untuk mengevaluasi kesesuaian anatomi serta kenyamanan posisi. Penggunaan *phantom* dengan struktur panggul memungkinkan analisis seberapa baik *cradle* mempertahankan orientasi panggul dalam posisi identik pada setiap pemindaian. Jika *cradle* tidak stabil, citra dapat menunjukkan variasi posisi yang mengganggu perbandingan jangka panjang atau *follow-up* radiologis.

Evaluasi perangkat bantu ini juga mencakup deteksi artefak. Material yang tidak sesuai dapat menimbulkan garis atau bayangan pada citra, sehingga mengurangi kejelasan anatomi. Dengan *phantom*, potensi artefak dapat diidentifikasi lebih awal dan memungkinkan penyesuaian desain perangkat sebelum digunakan pada pasien. Dengan demikian, pengujian perangkat bantu dengan *phantom* tidak hanya menjamin kestabilan posisi, tetapi juga membantu memastikan kualitas diagnostik tetap optimal.

9.5 Penggunaan Checklist Praktikum dan Lembar Penilaian Sederhana

Dalam pelatihan radiologi, baik untuk diagnostik maupun terapi, penguasaan teknis tidak dapat hanya diukur dari teori semata. Aspek psikomotor dan kognitif perlu dievaluasi secara sistematis melalui metode penilaian yang objektif dan terstandarisasi. Salah

satu cara yang banyak digunakan adalah penerapan *checklist* praktikum dan lembar penilaian sederhana. Instrumen ini membantu memastikan bahwa peserta pelatihan mampu menguasai prosedur teknis secara utuh, dari awal hingga akhir.

9.5.1 Peran *Checklist* dalam Praktikum Radiologi

Checklist berfungsi sebagai panduan langkah demi langkah dalam proses pelatihan teknis. Dalam konteks positioning pelvis, misalnya, *checklist* dapat mencakup:

- Apakah peserta berhasil mengidentifikasi *landmark* anatomi secara tepat (misalnya spina iliaca anterior superior dan simfisis pubis)?
- Apakah alat *immobilization* telah dipasang secara stabil dan aman?
- Apakah parameter protokol pemindaian diatur sesuai skenario klinis (misalnya *slice thickness*, FOV, posisi pasien)?

Menurut Hendi Prihatna et al. (2022) dari Universitas Ahmad Dahlan, *checklist* memungkinkan pengajar dan penguji untuk menilai keterampilan teknis secara konsisten antar peserta. Hal ini penting dalam menjaga kesetaraan penilaian, terutama pada kegiatan OSCE (*Objective Structured Clinical Examination*) yang semakin umum diterapkan di institusi pendidikan radiologi dan teknologi elektromedis.

Checklist juga memberi umpan balik instan kepada peserta. Bila suatu langkah belum dilakukan dengan benar, penguji dapat langsung memberi koreksi tanpa menunggu akhir sesi. Dengan

demikian, proses belajar menjadi dinamis dan langsung terarah pada perbaikan.

9.5.2 Lembar Penilaian Kognitif dan Psikomotor

Selain *checklist* prosedural, dibutuhkan lembar penilaian yang mencakup dua domain utama: kognitif (pemahaman konsep) dan psikomotor (kemampuan fisik/manual). Penilaian kognitif biasanya melibatkan pertanyaan lisan atau studi kasus singkat. Misalnya, penguji dapat menanyakan mengapa pemilihan FOV penting untuk pencitraan pelvis atau apa dampak rotasi pada simetri citra.

Sementara itu, aspek psikomotor dinilai dari ketepatan dan kelancaran peserta dalam melakukan tindakan langsung di atas meja pemeriksaan. Apakah posisi pasien diperiksa dari semua sisi? Apakah ROI dipilih dengan benar saat validasi HU? Apakah peserta mampu membaca hasil citra awal dan mengenali kemungkinan artefak?

Setiap aspek ini biasanya diberi skala nilai (misalnya 1–5 atau 1–4) untuk menilai tingkat penguasaan, dari belum bisa hingga sangat terampil. Format skoring ini mempermudah analisis data hasil pelatihan dan dapat digunakan untuk menentukan *pass/fail* secara objektif.

9.5.3 Aplikasi dalam Evaluasi Formatif

Di institusi pendidikan, *checklist* dan lembar penilaian sering digunakan sebagai alat evaluasi formatif. Evaluasi ini bukan untuk menghakimi, tetapi untuk membantu mahasiswa memahami titik lemah mereka sebelum menghadapi ujian sumatif. Dengan data yang

terekam dari tiap sesi praktikum, pengajar dapat menyusun strategi remedial yang lebih tepat sasaran.

Pelaksanaan evaluasi formatif juga menciptakan budaya belajar yang lebih reflektif. Peserta tidak hanya menyelesaikan prosedur karena harus, tetapi mulai memahami makna klinis dari setiap tindakan. Mereka belajar untuk bertanya, mengkaji ulang, dan memperbaiki kebiasaan sejak dini.

Bab 10: Perawatan, Biaya, dan Pengembangan Lanjut

10.1 Perawatan Rutin: Pembersihan, Penyimpanan, dan Inspeksi Berkala

Phantom radiologi merupakan perangkat penting dalam praktik diagnostik dan simulasi klinis. Meskipun bukan alat elektronik atau mekanik, *phantom* tetap memerlukan perawatan berkala agar fungsinya tidak menurun. Perawatan ini tidak hanya bertujuan menjaga keawetan fisik, tetapi juga mempertahankan integritas nilai diagnostik yang dihasilkan. Keakuratan nilai HU, keseragaman struktur internal, serta kompatibilitas dengan perangkat pencitraan sangat bergantung pada kondisi fisik dan struktural *phantom* itu sendiri.

10.1.1 Pembersihan Permukaan: Hindari Kerusakan Mikro

Pembersihan *phantom* harus dilakukan secara teratur setelah digunakan, terutama bila *phantom* kontak langsung dengan kulit pasien, cairan kontras, atau bahan perekat. Gunakan larutan pembersih non-abrasif seperti air sabun ringan atau *isopropyl alcohol* 70% yang telah diencerkan. Hindari penggunaan pelarut keras seperti aseton atau thinner, karena dapat merusak lapisan pelindung atau menciptakan mikroretakan yang tidak terlihat secara kasat mata.

Menurut Ardiyanto et al. (2025), kerusakan mikro akibat cairan abrasif dapat menurunkan kualitas permukaan dan menyebabkan distorsi pada hasil citra CT atau MRI. Selain itu, permukaan yang tergores dapat memicu akumulasi debu atau jamur mikro di lingkungan penyimpanan lembap.

10.1.2 Penyimpanan: Jauh dari Panas dan Sinar Matahari Langsung

Setelah dibersihkan dan dikeringkan dengan lap mikrofiber, *phantom* harus disimpan di tempat kering, bersuhu ruang (20–25°C), dan terlindung dari paparan sinar matahari langsung. Paparan panas berlebih, seperti dari jendela yang menghadap ke barat, dapat menyebabkan deformasi material plastik atau silikon. Sementara kelembapan tinggi dapat memicu tumbuhnya jamur mikro, terutama pada sambungan atau rongga kecil *phantom*.

Tempat penyimpanan ideal adalah kabinet tertutup atau laci plastik yang dilapisi lapisan silica gel sebagai penyerap kelembapan. Jika *phantom* memiliki bagian bergerak atau bersegel, sebaiknya disimpan dalam posisi netral agar tidak terjadi tekanan jangka panjang pada sambungan tertentu.

10.1.3 Inspeksi Visual dan Fungsional Berkala

Inspeksi dilakukan secara berkala, minimal setiap 3 bulan sekali, atau sebelum digunakan untuk validasi atau pelatihan. Tujuan inspeksi visual adalah untuk mendeteksi adanya keretakan, perubahan warna, atau deformasi permukaan. Sedangkan inspeksi fungsional dapat dilakukan dengan uji singkat pencitraan untuk

melihat apakah nilai HU masih dalam rentang toleransi dan apakah ada artefak baru yang muncul.

Ginting (2019) menekankan bahwa kegiatan inspeksi ini harus terdokumentasi, baik dalam bentuk catatan manual maupun log digital. Setiap temuan harus dicatat lengkap dengan tanggal, deskripsi kerusakan, serta rekomendasi tindak lanjut. Dokumentasi seperti ini penting untuk menjamin bahwa *phantom* selalu dalam kondisi layak pakai dan tidak memberikan hasil yang menyesatkan dalam praktik klinis.

Inspeksi juga menjadi dasar pengambilan keputusan tentang apakah suatu *phantom* perlu diperbaiki, diganti, atau cukup dibersihkan ulang. *Phantom* yang mengalami deformasi ringan dapat direparasi dengan pengisian ulang resin atau lapisan pelindung. Namun bila terjadi kerusakan struktural internal yang memengaruhi nilai HU, maka penggantian mungkin menjadi opsi terbaik.

10.2 Perbaikan Minor: Retakan, Re-sealing, dan Penggantian Komponen

Dalam penggunaan jangka panjang, *phantom* kerap mengalami kerusakan minor seperti retakan, kebocoran, atau ausnya komponen internal. Meskipun terlihat sepele, gangguan ini dapat memengaruhi kualitas pencitraan maupun akurasi fungsi *phantom*. Oleh karena itu, perbaikan minor menjadi langkah penting agar *phantom* tetap dapat digunakan secara optimal dalam berbagai skenario klinis maupun edukatif.

10.2.1 Penanganan Retakan dengan Resin atau Perekat

Retakan ringan biasanya muncul pada area dengan tekanan mekanis tinggi atau sambungan modul. Untuk memperbaikinya, resin transparan atau perekat medis yang kompatibel dengan imaging digunakan agar tidak menimbulkan artefak. Ichikawa et al. (2019) menunjukkan bahwa penggunaan resin berbasis akrilik mampu mengisi celah kecil tanpa mengubah sifat radiologis secara signifikan. Teknik ini memastikan struktur *phantom* tetap kokoh sekaligus mempertahankan keseragaman visual dalam pencitraan.

10.2.2 Re-sealing pada Kebocoran dan Rongga Udara

Kebocoran cairan atau adanya rongga udara dapat menimbulkan masalah serius, terutama pada *phantom* yang dirancang untuk pencitraan berbasis MRI atau CT. Rongga udara menghasilkan artefak yang mengganggu interpretasi citra. Solusi yang umum dilakukan adalah *re-sealing* dengan material elastomer atau silikon. Kairn et al. (2017) menegaskan bahwa pengendalian kebocoran penting dalam *phantom* dosimetrik karena sedikit saja perbedaan densitas dapat mengubah distribusi dosis. Dengan demikian, *re-sealing* bukan hanya perbaikan teknis, melainkan juga bagian dari pengendalian mutu.

10.2.3 Penggantian Komponen Internal

Seiring waktu, komponen internal seperti penanda posisi (*markers*) atau penahan organ yang dapat dilepas akan mengalami degradasi. Komponen yang aus perlu diganti sesuai spesifikasi teknis agar kesesuaian dengan desain tetap terjaga. Kutcher et al. (2020) mencatat bahwa penggantian komponen internal pada

phantom radioterapi dapat memperpanjang umur pakai hingga dua kali lipat tanpa memengaruhi akurasi. Dengan menjaga integritas komponen, *phantom* dapat terus digunakan dalam berbagai pengujian tanpa kehilangan konsistensi.

10.2.4 Dokumentasi dan Standarisasi Perbaikan

Setiap perbaikan, baik sekecil apa pun, sebaiknya didokumentasikan. Dokumentasi memudahkan pelacakan bila terjadi perubahan performa *phantom* di masa depan. Choi et al. (2023) menekankan pentingnya protokol perawatan yang distandarisasi, terutama untuk *phantom* yang digunakan lintas fasilitas. Dengan adanya standar, konsistensi performa *phantom* lebih mudah dipertahankan.

10.2.5 Prospek Perawatan dengan Material Baru

Seiring berkembangnya teknologi material, perawatan *phantom* juga semakin mudah dilakukan. Resin polimer generasi baru memiliki sifat lebih tahan lama dan minim penyusutan. Gupta et al. (2022) menunjukkan bahwa material cetak 3D berbasis fotopolimer memiliki ketahanan mekanis tinggi, sehingga cocok dijadikan pengganti komponen internal yang aus. Perkembangan ini membuka peluang agar perawatan *phantom* tidak hanya bersifat reaktif, tetapi juga preventif.

Dengan demikian, perbaikan minor berupa penanganan retakan, *re-sealing*, dan penggantian komponen menjadi langkah strategis dalam memperpanjang umur pakai *phantom*. Selain menjaga kualitas citra, upaya ini juga berkontribusi pada efisiensi biaya, karena *phantom* tidak perlu diganti secara keseluruhan.

10.3 Estimasi Waktu, Sumber Daya, dan Biaya Produksi per Unit

Proses produksi *phantom* radiologi tidak hanya menuntut ketelitian dalam aspek desain dan manufaktur, tetapi juga membutuhkan perencanaan waktu, alokasi sumber daya yang efisien, serta penghitungan biaya yang realistis. Estimasi terhadap ketiga aspek ini penting untuk institusi pendidikan, laboratorium pengembangan perangkat medis, atau rumah sakit yang ingin menghasilkan *phantom* secara mandiri.

10.3.1 Waktu Produksi

Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan satu unit *phantom* sangat bergantung pada kompleksitas desain dan jumlah bagian modular. Berdasarkan praktik di sejumlah laboratorium teknik biomedis di Indonesia, waktu rata-rata produksi berkisar antara 2 hingga 4 minggu. Ini mencakup tahapan desain digital (2–3 hari), pencetakan cetakan 3D (5–7 hari), proses pengecoran/penuangan material (3–5 hari tergantung jumlah lapis), dan penyempurnaan akhir seperti pengecatan, sealing, dan validasi fungsi (3–4 hari).

Dalam studi oleh Udyanto (2021), efisiensi produksi *phantom* medis dapat ditingkatkan jika proses desain digital dan cetakan dilakukan secara paralel dan bukan bertahap. Teknik ini menekan waktu henti (idle) antara satu proses ke proses lainnya, tanpa menurunkan kualitas hasil akhir.

10.3.2 Sumber Daya

Sumber daya produksi terdiri atas tiga elemen utama: bahan material, perangkat produksi, dan keahlian teknis. Untuk bahan, yang umum digunakan adalah resin epoksi, silikon RTV, plastik ABS/PLA untuk bagian tulang, serta pigmen atau aditif untuk penyesuaian nilai HU.

Perangkat produksi meliputi printer 3D FDM (Fused Deposition Modeling), alat pengaduk resin, vacuum chamber (untuk degassing), serta peralatan manual seperti pemanas curing dan alat pemotong akrilik. Dari sisi tenaga kerja, dibutuhkan minimal satu operator desain CAD, satu teknisi cetak 3D, serta satu teknisi manufaktur *phantom* yang memahami karakteristik bahan dan prosedur pencitraan radiologi.

Seperti diuraikan oleh Fitria dan Sabatina (2025), kendala umum yang dihadapi fasilitas lokal adalah terbatasnya SDM yang menguasai keseluruhan alur dari desain hingga validasi pencitraan. Oleh karena itu, pelatihan lintas bidang sangat direkomendasikan agar produksi berjalan efisien.

10.3.3 Estimasi Biaya Produksi

Dari berbagai studi dan praktik lapangan, biaya produksi satu unit *phantom* dapat sangat bervariasi, tergantung ukuran, fitur modularitas, dan kompleksitas struktur internal. Rata-rata estimasi adalah sebagai berikut:

- **Model sederhana edukatif** (struktur tulang dasar, non-kontras): ±Rp500.000 – Rp1.500.000

- **Model menengah** (struktur tulang & jaringan lunak, HU terkontrol): $\pm$ Rp2.000.000 – Rp3.500.000
- **Model kompleks klinis** (anatomi lengkap dengan simulasi patologi): $\pm$ Rp4.000.000 – Rp5.000.000 atau lebih

Biaya tersebut belum termasuk pengujian laboratorium seperti validasi HU atau uji keseragaman densitas, yang bisa menambah sekitar 10–20% dari total biaya. Bahan yang paling berkontribusi pada pengeluaran adalah resin berkualitas medikal, filamen 3D printing premium, dan pigmen aditif radiopak.

Model produksi mandiri memang lebih murah dibanding membeli *phantom* impor yang bisa mencapai puluhan juta rupiah, tetapi tetap memerlukan manajemen sumber daya yang baik agar tidak terjadi pemborosan material dan waktu.

10.4 Modifikasi Lanjutan: Organ Opsional, Penyesuaian HU, dan Removable Inserts

Pengembangan lanjutan *phantom* bukan hanya berfokus pada reproduksi anatomi dasar, tetapi juga pada penambahan organ opsional, kemampuan menyesuaikan nilai *Hounsfield Unit (HU)*, serta penerapan *removable inserts*. Upaya ini bertujuan untuk mendekatkan karakteristik *phantom* pada kondisi anatomi manusia yang sebenarnya, sekaligus meningkatkan fleksibilitas penggunaannya dalam simulasi pencitraan maupun intervensi.

10.4.1 Organ Opsional sebagai Representasi Anatomi Tambahan

Penambahan organ opsional seperti kandung kemih, rektum, atau uterus pada *phantom* pelvis sangat penting karena ketiga organ tersebut merupakan struktur kritis dalam radioterapi maupun pencitraan diagnostik. Cunningham et al. (2019) mengembangkan *phantom* pelvis yang dilengkapi modul organ opsional menggunakan *polyvinyl alcohol (PVA) sponge* untuk menyerupai jaringan lunak. Kehadiran organ simulatif ini tidak hanya memperkaya realisme anatomi, tetapi juga memberikan kesempatan bagi pengguna untuk melatih kontur organ dan memverifikasi distribusi dosis pada area yang kompleks.

10.4.2 Penyesuaian HU dengan Kombinasi Material

Salah satu tantangan dalam pembuatan *phantom* adalah menyesuaikan HU agar sesuai dengan jaringan manusia. Berbagai material digunakan untuk tujuan ini, antara lain lilin, akrilik, dan polivinil alkohol. Bonanno (2021) menunjukkan bahwa penggunaan lilin dengan aditif tertentu dapat menghasilkan HU yang menyerupai jaringan adiposa, sementara akrilik memberikan nilai HU lebih tinggi, mendekati tulang kortikal. Penyesuaian dilakukan dengan mengatur rasio material atau menambahkan aditif radiopak seperti barium sulfat agar HU dapat dikalibrasi sesuai target.

Penyesuaian HU penting bukan hanya untuk menciptakan citra realistis pada CT, tetapi juga untuk menjaga konsistensi ketika *phantom* diuji dengan modalitas lain seperti radiografi atau MRI.

Dengan demikian, *phantom* dapat digunakan lintas teknik pencitraan tanpa perlu banyak modifikasi tambahan.

10.4.3 Removable Inserts untuk Simulasi Intervensi

Konsep *removable inserts* menjadi salah satu inovasi penting dalam pengembangan *phantom* modern. Inserts ini dapat berupa organ simulatif atau rongga yang memungkinkan pemasangan modul baru sesuai kebutuhan. Wilby (2024) dalam penelitiannya mengenai *phantom* prostat untuk brachytherapy menegaskan bahwa *removable inserts* mempermudah simulasi prosedur invasif, seperti biopsi atau pemasangan jarum interstisial. Hal ini memungkinkan peserta pelatihan untuk mendapatkan pengalaman yang menyerupai kondisi nyata tanpa risiko klinis.

Selain itu, *removable inserts* juga memberikan fleksibilitas tinggi karena bagian tertentu dapat diganti bila rusak atau aus tanpa harus membuat ulang seluruh *phantom*. Dari sisi efisiensi, strategi ini menekan biaya produksi sekaligus memperpanjang umur pakai *phantom*.

10.4.4 Implikasi untuk Pendidikan dan Riset Klinis

Keberadaan organ opsional, penyesuaian HU, dan *removable inserts* memberikan nilai tambah yang signifikan dalam konteks edukasi dan praktik klinis. Bhatta (2021) melaporkan bahwa *phantom* dengan HU yang dapat disesuaikan menjadi sarana ideal untuk pelatihan kontur organ pada CT simulasi pasien kanker kepala-leher, dengan prinsip yang sama dapat diterapkan pada pelvis. Dari perspektif pendidikan, hal ini memfasilitasi pemahaman lebih dalam tentang interaksi radiasi dengan berbagai jaringan.

Bagi riset klinis, inovasi ini mendukung uji protokol pencitraan baru, validasi teknik radioterapi adaptif, hingga pengembangan prosedur intervensi minimal invasif. Dengan kemampuan mengganti atau menambah organ simulatif, *phantom* dapat digunakan lintas skenario, dari pencitraan diagnostik sederhana hingga simulasi intervensi tingkat lanjut.

10.4.5 Tantangan dan Prospek Pengembangan

Meskipun memberikan banyak keuntungan, penerapan organ opsional dan *removable inserts* masih menghadapi tantangan. Salah satunya adalah kesulitan dalam menjaga transisi HU yang halus antara modul organ dan jaringan sekitarnya. Jika perbedaan HU terlalu kontras, hasil pencitraan bisa menimbulkan artefak yang mengganggu interpretasi. Namun, perkembangan material komposit berbasis polimer dengan aditif nano semakin membuka jalan untuk menghasilkan transisi HU yang lebih mulus (Bonanno, 2021).

Ke depan, pengembangan *phantom* diperkirakan akan semakin mengintegrasikan organ opsional dengan modul cerdas, misalnya organ simulatif yang dapat dipompa untuk mensimulasikan pergerakan atau perubahan volume kandung kemih. Inovasi ini akan semakin memperkuat peran *phantom* sebagai sarana simulasi yang mendekati kondisi klinis sebenarnya.

Dengan demikian, modifikasi lanjutan melalui organ opsional, penyesuaian HU, dan *removable inserts* menandai lompatan besar dalam pengembangan *phantom*. Fleksibilitas dan realisme yang dihasilkan menjadikannya instrumen penting tidak hanya untuk pendidikan, tetapi juga untuk riset medis modern.

10.5 Dokumentasi Proyek: Spesifikasi, As-Built Drawing, dan Logbook QA

Dokumentasi merupakan elemen yang sering kali diabaikan dalam proyek pembuatan *phantom* radiologi, padahal fungsinya sangat krusial. Dalam konteks medis dan teknik biomedis, dokumentasi tidak hanya digunakan untuk arsip internal, melainkan juga menjadi dasar untuk proses akreditasi, evaluasi mutu, audit teknis, serta transfer teknologi dan replikasi desain. Dengan dokumentasi yang rapi dan menyeluruh, proyek tidak hanya menjadi karya teknis semata, melainkan juga produk terstandar yang dapat dipertanggungjawabkan dalam berbagai konteks profesional.

10.5.1 Spesifikasi Teknis

Spesifikasi teknis adalah bagian pertama dan utama dari dokumentasi proyek. Di dalamnya tercantum seluruh parameter teknis yang digunakan dalam proses desain dan produksi. Informasi ini meliputi:

- Ukuran dan bentuk geometris phantom
- Toleransi dimensi dan ketebalan dinding
- Jenis bahan penyusun, termasuk kode bahan, densitas, dan nilai HU target
- Protokol pencitraan yang direkomendasikan (misalnya parameter CT: FOV, *slice thickness*, dan energi tabung)
- Batas suhu, tekanan, dan paparan lingkungan yang dapat diterima

Dokumen ini mempermudah para teknisi atau operator di kemudian hari untuk memahami batas penggunaan dan karakteristik *phantom* yang digunakan. Bila terjadi penyimpangan atau kerusakan, spesifikasi ini akan menjadi acuan pertama dalam proses analisis sebab-akibat (*root cause analysis*).

10.5.2 As-Built Drawing

Setelah proses produksi selesai, perlu disusun gambar kerja akhir yang disebut *as-built drawing*. Berbeda dengan gambar desain awal (*engineering drawing*), *as-built* mencerminkan kondisi aktual produk setelah mengalami modifikasi, penyesuaian, atau koreksi selama tahap produksi. Ini sangat penting karena dalam praktiknya sering terjadi deviasi kecil dari rencana awal akibat keterbatasan alat, material, atau kendala cetakan.

As-built drawing harus menggambarkan dimensi aktual (dengan toleransi), posisi sambungan, titik pengisian, dan orientasi bagian dalam (misalnya partisi organ atau rongga internal). Untuk *phantom* modular, setiap bagian harus diberi identitas unik agar memudahkan dalam pemasangan, perawatan, atau penggantian parsial.

Dokumen ini juga membantu dalam replikasi produksi. Bila suatu saat *phantom* rusak atau hilang, gambar *as-built* dapat digunakan sebagai basis pembuatan ulang tanpa harus mengulang proses desain dari awal.

10.5.3 Logbook QA (Quality Assurance)

Bagian akhir dari dokumentasi adalah *logbook QA* yang mencatat seluruh proses uji kualitas dan kontrol mutu selama dan

setelah proses produksi. Setiap tahapan penting harus direkam, seperti:

- Hasil pengukuran HU di setiap ROI dan perbandingan dengan nilai referensi
- Uji keseragaman dan stabilitas posisi
- Dokumentasi foto pencitraan CT atau MRI
- Koreksi atau reparasi yang dilakukan selama produksi
- Validasi akhir berupa status *pass/fail* untuk tiap komponen

Menurut Himawan (2022), dokumentasi QA yang baik dapat menjadi indikator keandalan suatu laboratorium dalam proses akreditasi. Selain itu, *logbook* juga menjadi alat komunikasi antar anggota tim produksi dan QA yang sering kali bekerja secara terpisah. Bila terjadi anomali pada hasil pencitraan di kemudian hari, data historis ini akan menjadi kunci untuk melakukan penelusuran penyebab dan tindakan koreksi.

Profil Penulis



M. Sofyan, Dipl.Rad., S.ST., M.Kes. M.Tr.ID.,
Riwayat pendidikannya dimulai dari Pendidikan
Diploma 3 Akademi Teknik Radiodiagnostik &
Radioterapi (ATRO) Citra Bangsa Yogyakarta
(2007). Pendidikan Strata 1 (S1) Poltekkes
Kemenkes Semarang Prodi Imaging Diagnostik
(Radiologi). Pendidikan Strata 2 (S2) di Pascasarjana Universitas
Diponegoro Semarang Jurusan Magister Manajemen Administrasi
Rumah Sakit (2014). Program Strata 2 (S2) Program Pascasarjana
Imaging Diagnostik Poltekkes Kemenkes Semarang selesai di tahun
2025. Program Strata 3 (S3) Doktor Ilmu Manajemen Universitas
Muhammadiyah Yogyakarta Jurusan Manajemen Sumber Daya
Manusia masih berlangsung. Saat ini bekerja di Poltekkes TNI AU
Adisutjipto sebagai Dosen pengajar di Program Studi Diploma 3
Radiologi.



Prof. Dr. Marsum, BE., S.Pd., MHP., lahir Di Desa Krandegan, Kecamatan Puring, Kabupaten Kebumen, Jawa Tengah, pada tanggal 27 Juli 1963. Saat kecil, ia hobi mendengarkan radio-radio luar negeri seperti *BBC* (Inggris), *ABC* (Australia) atau *VOA* (Amerika Serikat) melalui gelombang SW (*short wave*). Ia menamatkan SMA Kebumen (kini menjadi SMA Negeri 1 Kebumen) pada tahun 1982, kemudian masuk SPPH atau Sekolah Penilik Pembantu Hygiene di Purwokerto, Kabupaten Banyumas, Jawa Tengah, selesai tahun 1983. Setamat dari SPPH, jalur pendidikan selanjutnya yang ia tempuh adalah Lembaga Politeknik Pekerjaan Umum – Institute Teknologi Bandung (LPPU-ITB) selesai tahun 1989. Selanjutnya meneruskan di IKIP Muhammadiyah Purwokerto (kini menjadi Universitas Muhammadiyah Purwokerto), selesai tahun 1996 dan School of Rural Health The Melbourne University, di Melbourne, Australia, selesai tahun 2004. Sesudah itu, seluruh pengabdianya pada bidang pendidikan ia curahkan pada Poltekkes Kemenkes Semarang (PolkesMar), yang mulai ia tempati sebagai staf pengajar (instruktur/guru/dosen) yang dirintis mulai tahun 1984. Tahun 2006-2010 diangkat menjadi Ketua Jurusan (Kajur) Kesehatan Lingkungan di Kampus VII Baturaden Purwokerto. Tahun 2010 saat ia diangkat menjadi Wakil Direktur periode 2010-2014 dan 2014-2018 serta kemudian menjadi Direktur periode 2018 hingga 2023. Selepas purna tugas dari PolkesMar, Prof. Marsum menjabat sebagai Pelaksana Tugas Direktur Poltekkes Kemenkes Jakarta I dari

tahun 2023 hingga 2024. Di tengah kesibukannya sebagai pimpinan PolkesMar, pada tanggal 19 Agustus 2020, dia dinyatakan lulus sebagai Doktor dari Prodi Doktor Kesehatan Masyarakat (DKM) Fakultas Kesehatan Masyarakat (FKM) Universitas Diponegoro (Undip). Pada tanggal 15 November 2023, ia dikukuhkan sebagai Guru Besar / Profesor Bidang Ilmu Kesehatan Masyarakat di Jurusan Kesehatan Lingkungan PolkesMar.



Agung Nugroho Setiawan, SST., M.Tr.ID., lahir di Semarang pada 31 Maret 1985. Riwayat Pendidikan: SDN Manyaran Semarang lulus tahun 1997, SMPN 1 Semarang lulus tahun 2000, dan SMAN 5 Semarang lulus tahun 2003.

Memulai pendidikan tinggi di Politeknik Kesehatan Semarang pada Prodi DIII Teknik Radioadiagnostik dan Radioterapi Semarang, lulus tahun 2006, melanjutkan kuliah di Prodi DIV Teknik Radiologi Poltekkes Depkes Semarang, lulus tahun 2009, dan pendidikan S2 Magister Terapan Kesehatan Imaging Diagnostik di Poltekkes Kemenkes Semarang, lulus tahun 2018. Pengalaman kerja sebagai instruktur di Jurusan Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi Poltekkes Semarang sejak tahun 2011 hingga 2019. Diangkat sebagai dosen dengan jabatan Asisten Ahli sejak Juni 2020. Riwayat publikasi: 6 (enam) artikel ilmiah terindeks Scopus: *Implementation of exposure index for optimize image quality and patient dose estimation with computed radiography* (2019), *The Optimization of Mastoid CT Image Using Windows and Kernel Reconstructions* (2020), *Mosaiq and IviewGT Software in Verification of Irradiation Set Up (Study of Conformal Radiotherapy in Nasopharyngeal Cancer Patients at Dr. Sardjito Hospital Yogyakarta)* (2020), *Signal to noise ratio and anatomical information of T1-weighted spin echo and T1-weighted SPIR in post-contrast brain MRI metastases case* (2020), *The Optimal Scan Delay of Contrast Media Injection for Diagnosing Abdominal Tumors (Image Quality and Radiation Dose Aspects of Abdominal CT Scan)* (2021) dan *The Profile of Delay*

Erasure Time and Imaging Plate Sizes to Dark Noise Evaluation in Carestream Computed Radiography System (2021). Riwayat buku yang ditulis adalah: Bahan Ajar Teknik Radiodiagnostik dan Radioterapi Teknik Radiografi Non Kontras 1 (2020), Kombinasi perangkat lunak K-means Clustering dan Morphological Operations dalam pendeteksian Stadium *Carcinoma Mammae* Pencitraan *Mammography* (2022) dan Teknik Penyinaran *Intensity Modulation Radiation Therapy* dan *Volumetric Modulation Arc Therapy* (2023) dan Menguasai Google Workspace dan Canva : Penggunaan Teknologi Informasi dalam Bekerja secara Remote Berbasis Cloud dan Desain Grafis Sederhana (2023). Aktif dalam organisasi profesi Perhimpunan Radiografer Indonesia (PARI) sejak tahun 2010 dan Asosiasi Institusi Pendidikan Radiografer Indonesia (AIPRI) sejak tahun 2012. Saat ini diamanahi sebagai Kepala Unit Teknologi Informasi Poltekkes Kemenkes Semarang.



Dr. Sri Sumarni, Bdn., M.Mid., lahir di Sragen, Jawa Tengah pada tanggal 29 Juli 1973. Awal karir penulis sebagai guru di Sekolah Perawat Kesehatan (SPK Kariadi Semarang) tahun 1997 yang selanjutnya konversi menjadi Akademik Kebidanan dengan latar belakang pendidikan Diploma III Keperawatan, penulis melanjutkan ke Australian Catholic University untuk meraih Master of Midwifery (Magister Kebidanan) dari negeri Kangguru tahun 2004. Penulis meraih gelar Doktor tahun 2020 program Strata 3 Doktor Ilmu Kedokteran Kesehatan, Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro di awal masa pandemi Covid 19 menyerang Indonesia. Penulis telah selesai menempuh Pendidikan Profesi Bidan di tahun 2022. Pengalaman penulis sebagai Sekretaris Jurusan Kebidanan, Ketua Prodi D III Kebidanan Semarang, dan Ketua Prodi Kebidanan Program Magister Terapan, Program Pascasarjana di Poltekkes Kemenkes Semarang menuntut penulis untuk memberi teladan dalam proses menulis. Pengalaman mengajar di bidang Kehamilan, Persalinan, Kegawatdaruratan Maternal Neonatal, Metode Penelitian, Pengembangan Proposal, serta sebagai pembimbing Laporan Tugas Akhir, Skripsi maupun Tesis menstimulasi penulis untuk selalu berkarya. Penulis sering menjadi narasumber kegiatan ilmiah baik kuliah pakar, workshop, seminar nasional, dan international conference hingga menghantarkan penulis sering menyabet *best oral presentation*. Pengalaman penelitian penulis di area antenatal care, intrapartum, postpartum, dan kesehatan reproduksi. Publikasi

penulis telah tercantum di jurnal yang terindeks baik nasional yang terindeks di sinta dan internasional di scopus. Penulis juga aktif berorganisasi sebagai Pengurus Daerah Ikatan Bidan Indonesia (IBI) Jawa Tengah sebagai divisi Advokasi, Hubungan Luar Negeri, dan Sie organisasi sejak tahun 2008 sampai sekarang. Pengalaman sebagai asesor LAMPTKes bidang kebidanan dan penyuluh antikorupsi nasional, semakin memacu penulis dalam membagikan ilmu untuk dapat dimanfaatkan seoptimal mungkin. Penulis juga aktif sebagai pengurus Ikatan Alumni Fakultas Kedokteran Universitas Diponegoro Regional Wilayah Semarang Raya (IKAMESRA) sejak 2023. Penulis aktif dalam memdarmabaktikan ilmunya di bidang kebidanan menghantarkan penulis menjadi anggota Kolegium Kebidanan sejak tahun 2024. Selain sebagai Editor in Chief Jurnal Kebidanan (JKB) Poltekkes Kemenkes Semarang sejak 2012. Ditingkat nasional, Penulis juga sebagai anggota Kolegium Kebidanan sejak 2024.



Dr. Donny Kristanto Mulyantoro, SKM., M.Kes., lahir di Purwokerto pada 5 April 1968, dan kini berdomisili di Magelang. Ia adalah seorang Peneliti Ahli Madya pada Pusat Riset Kesehatan Masyarakat dan Gizi, Organisasi Kesehatan, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Pendidikan S1-nya di Jurusan Ilmu Kesehatan Masyarakat dengan bidang Epidemiologi dan Penyakit Tropik dari UNDIP. Ia memperoleh gelar S2 Ilmu Kedokteran Klinis dari Fakultas Kedokteran UGM dan gelar S3 Ilmu Kesehatan Masyarakat dari Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia. Dr. Donny memiliki fokus penelitian di bidang Epidemiologi, Biostatistik, dan Gizi Masyarakat. Di luar kegiatan ilmiahnya, ia memiliki hobi membaca dan *travelling*, yang memberinya wawasan baru dan inspirasi. Melalui bukunya, ia mengajak para pembaca untuk menjadikan membaca sebagai kebiasaan yang menyenangkan, layaknya sebuah percakapan imajiner yang memberi banyak pemahaman baru. *“Membaca buku bagus layaknya sebuah percakapan imajiner di dalam pikiran yang memberi banyak pemahaman baru, untuk itu bacalah buku ini.”*



Dr. Gatot Murti Wibowo, S.Pd., M.Sc., adalah akademisi, peneliti, sekaligus inovator dalam bidang manajemen klinis berbasis teknologi digital, dengan rekam jejak keilmuan yang terentang dari dunia pedagogi hingga pengelolaan sistem informasi kesehatan. Lahir dan besar dalam tradisi pendidikan vokasi, beliau menyelesaikan studi Sarjana di bidang Pendidikan, kemudian meraih gelar Magister Sains Kesehatan, dan melanjutkan pendidikan doktoral di bidang Manajemen Pendidikan, dengan fokus pada integrasi sistem digital dalam pendidikan klinik dan layanan kesehatan. Dedikasinya terhadap pengembangan sistem manajemen klinik diwujudkan melalui platform CLEMagS (Clinical Education Management System), sebuah sistem berbasis web yang digunakan untuk mengelola praktik klinik mahasiswa, khususnya di bidang radiologi diagnostik. CLEMagS telah terbukti membantu dalam pemetaan capaian kompetensi, pelacakan logbook elektronik, serta peningkatan mutu praktik klinik melalui data real-time. Sebagai peneliti aktif, Dr. Gatot memfokuskan kajiannya pada isu-isu transformasi digital layanan kesehatan, termasuk pengembangan sistem teleradiologi dan pemanfaatan teknologi mobile untuk deteksi dan pemantauan TBC. Beberapa riset strategis yang telah diinisiasinya antara lain: Pengembangan Model Teleradiologi Berbasis Cloud untuk Pemeriksaan Citra Dada di Wilayah Terbatas, Standardisasi Exposure Index (EI) dan Deviation Index (DI) Berbasis Android untuk Optimisasi Citra PA Paru pada Skrining

TBC, dan Model Sistem Informasi Radiologi Portabel untuk Deteksi Dini TBC di Daerah Prioritas. Dalam bidang Pengabdian kepada Masyarakat (PkM), beliau juga terlibat langsung dalam program berbasis teknologi digital, seperti pelatihan sistem pencatatan citra TBC melalui aplikasi mobile di Puskesmas dan penguatan kapasitas SDM radiologi di daerah 3T (tertinggal, terdepan, dan terluar). Karya-karyanya telah dipublikasikan di berbagai forum ilmiah nasional dan internasional, serta menjadi rujukan dalam pengembangan kebijakan pendidikan vokasi dan inovasi digitalisasi layanan klinis. Dengan visi transformatif, Dr. Gatot terus berkomitmen memperluas dampak keilmuannya demi membangun ekosistem pendidikan dan layanan kesehatan yang adaptif, efisien, dan terintegrasi di era digital.

Daftar Pustaka

Adam, D. P., Grudzinski, J., Bormett, I., Cox, B. L., Marsh, I. R., Bradshaw, T. J., Harari, P., & Bednarz, B. (2022). Validation of Monte Carlo Iodine-131 radiopharmaceutical dosimetry workflow using a 3D printed anthropomorphic head and neck phantom. *arXiv preprint arXiv:2202.01847*.

Adrial, R., Ningsih, D. Y., & Fadhilah, Z. P. (2024). *Karakterisasi bolus berbahan campuran beeswax dan petroleum jelly menggunakan berkas elektron pada energi 6 MeV dan 9 MeV*. Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika.

Ahmad, R., Marshall, H., Bento, M., Veiga, C., & Selvan, T. (2023). Evaluation of a novel phantom for the quality assurance of a six-degree-of-freedom couch 3D-printed at multiple centres. *Physica Medica*, 112, 102–111.

Ahmed, A. M. M. (2024). *Adapting production parameters and material compositions of phantom materials for radiologic tissue equivalence*. TU Wien Repository.

Akmal, J. S., Salmi, M., Hemming, B., Teir, L., Björkstrand, R., Partanen, J., & Mäkitie, A. A. (2020). Cumulative inaccuracies in implementation of additive manufacturing through medical imaging, 3D thresholding, and 3D modeling: A case study for an end-use implant. *Applied Sciences*, 10(8), 2968.

Alzahrani, M. (2024). *An Anthropomorphic Multimodality (CT/MRI) Head and Neck Phantom for Radiotherapy Applications*. White Rose eTheses.

Alzahrani, M., Broadbent, D. A., Teh, I., Al-Qaisieh, B., & Speight, R. (2025). A novel multimodality anthropomorphic phantom enhances compliance with quality assurance guidelines for magnetic resonance imaging in radiotherapy. *Clinical and Translational Radiation Oncology*, 50, 100791.

Amankulor, N., Kessel, R., Bhati, A. N., Roney, J. N., & Gupta, R. (2025). CT and MRI-visible canine brain avatar via three-dimensional digital anatomy printing in aiding neurosurgical training and biopsy planning—proof of concept study. *Research Square*.

Andryani, D. S., Aripin, A., & Handayani, N. (2023). Pengembangan 3D modelling kranioplasti untuk membantu dokter dalam pencetakan implan. *Jusikom: Jurnal Sistem Komputer*, 8(2), 129–135.

Anggi, E. (2021). *Distribusi dosis radiasi foton pada treatment planning system menggunakan teknik 3DCRT dan IMRT untuk terapi kanker serviks*. Universitas Andalas.

Ardiyanto, S. S., Latifah, L., Dartini, S. K. M., & Suwondo, A. (2025). *Model Total Productive Maintenance (TPM) Konsep Autonomous Maintenance Pada Alat CT-Scan*. Jakarta: FKUI Press.

Arif, M. (2025). *Radiation techniques for recti carcinoma at the Cancer Center Radiotherapy Santosa Hospital Bandung Kopo*. Jurnal Ilmu Kesehatan (JIKSAN).

Astuty, S. D., Dewang, S., & Purwanto, P. (2022). *Identifikasi level noise, resolusi spasial dan low contrast citra CT scan pada objek fantom rahim buatan*. Berkala Fisika.

Azman, M. T. (2018). *Characterization of Gafchromic HD-V2 Film for Dose Verification in Stereotactic Radiosurgery (SRS)*. ProQuest Dissertations Publishing.

Badiuk, S. R., Sasaki, D. K., & Rickey, D. W. (2022). An anthropomorphic maxillofacial phantom using 3-dimensional printing, polyurethane rubber and epoxy resin for dental imaging and dosimetry. *Dentomaxillofacial Radiology*, 51(1), 20200323.

Bhatta, S. (2021). *Dosimetry measurements with anthropomorphic phantom SHANE imitating irradiation for head and neck cancer patient*. Kaunas University of Technology.

Bonanno, A. (2021). *The Design of a Bio-Realistic Surgical Phantom & An Epidemiological Study of Gastrointestinal Diseases*. Worcester Polytechnic Institute.

Budi, W. S., & Sutanto, H. (2017). *Effect of variation of C-Arm angle position to dose rate was received in surgical procedure at the Central Surgical Installation*. IJIRAE.

Bustillo, J. P. O., Mata, J. L., Posadas, J. R. D., & Inocencio, E. T. (2025). Characterization and evaluation methods of fused deposition modeling and stereolithography additive manufacturing for clinical linear accelerator photon and electron beams. *Physica Medica*, 118, 103–112.

Cabahug, J. P. C., Tatu-Qassim, S. S., Ballesteros, L. I. M., & Manlapig, L. (2025). Characterization and evaluation of tissue-

equivalent materials for heterogeneous mouse model phantoms in radiobiology experiments. *Radiation Physics and Chemistry*, 227, 111078.

Cerda, F. A. V. (2021). *Dimensional accuracy and reproducibility of three different methods of 3D printing using a known size object*. King's College London.

Chandramohan, D., Cao, P., Han, M., & An, H. (2020). Bone material analogues for PET/MRI phantoms. *Medical Physics*, 47(2), 790–802.

Chen, Q., Rong, Y., Burmeister, J. W., Chao, E. H., & AAPM Task Group 306. (2023). Quality control and assurance for tomotherapy: An update to Task Group Report 148. *Medical Physics*, 50(4), e468–e487.

Choi, H., Park, S. Y., & Kim, J. H. (2023). Standardization of phantom maintenance protocols for consistent imaging performance. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 24(6), e14019.

Collins, C. M. (2021). *3D Printing for the Radiologist, E-Book*. Elsevier Health Sciences.

Cordes, D., Yunker, B. E., & Scherzinger, A. L. (2013). An investigation of industrial molding compounds for use in 3D ultrasound, MRI, and CT imaging phantoms. *Medical Physics*, 40(5), 052905.

Cunningham, J. M., Barberi, E. A., Miller, J., ... & Paulson, E. S. (2019). Development and evaluation of a novel MR-compatible

pelvic end-to-end phantom. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 20(12), 120–131.

Cunningham, J. M., Barberi, E. A., Miller, J., McMillan, A. B., & Paulson, E. S. (2019). Development and evaluation of a novel MR-compatible pelvic end-to-end phantom. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 20(12), 120–131.

Delibasis, K. K., Epistatou, A. C., & Tsalafoutas, I. A. (2020). An automated method for quality control in MRI systems: Methods and considerations. *Journal of Imaging*, 6(10), 111.

Delibasis, K. K., Epistatou, A. C., & Tsalafoutas, I. A. (2020). An automated method for quality control in MRI systems: Methods and considerations. *Journal of Imaging*, 6(10), 111.

Deng, L., Wu, T., Wu, F., Xiong, L., & Yang, H. (2025). Anthropomorphic head MRI phantoms: Technical development, brain imaging applications, and future prospects. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 61(1), 3–18.

Devic, S., Tomic, N., & Lewis, D. (2016). Reference radiochromic film dosimetry: Review of technical aspects. *Physica Medica*, 32(5), 541–556.

Diartama, A. (2024). *Uji Kesesuaian CT Number Pada Pesawat CT Scan Multislice Di Rumah Sakit Sunset Vet Kuta*. Jurnal Antigen, 5(1), 56–64.

Diartama, A. A. A., & Lobang, V. J. (2023). *Evaluasi dosis computed tomography dose index volume (CTDIvol) dan dose length product (DLP) pada pemeriksaan multislice computerized tomography*. Jurnal Ilmu Kedokteran.

Dilogo, I. H., & Djaja, Y. P. (2013). *Buku Ajar Penggantian Sendi Panggul: Total Hip Replacement*. Jakarta: FKUI Press.

Dumela, K. E. (2024). Optimization of prostate plan in a pelvic prosthesis phantom. *University of the Witwatersrand*.

Ehler, E., Craft, D., & Rong, Y. (2018). 3D printing technology will eventually eliminate the need of purchasing commercial phantoms for clinical medical physics QA procedures. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 19(8), 8–12.

Elameen, E. J., Mohamed, M. A., Saeed, M. K., & Ali, K. M. (2025). Fabricating pediatrics bone tissue equivalent materials for CT quality control evaluation. *International Journal of Medical Physics, Clinical Engineering and Radiation Oncology*, 14(1), 1–10.

Espinoza, A., Beeksmā, B., Petasecca, M., Fuduli, I., & Rosenfeld, A. B. (2013). The feasibility study and characterization of a two-dimensional diode array in “magic phantom” for high dose rate brachytherapy quality assurance. *Medical Physics*, 40(9), 091718.

Faizah, D. I. (2023). *Pengaruh koreksi CT number dan relative electron density (RED) terhadap distribusi dosis pada perencanaan kasus klinis di TPS*. Universitas Nasional.

Febriana, M. (2024). *Asuhan keperawatan gangguan kebutuhan rasa nyaman (nyeri) pada pasien carcinoma cervix di ruang Delima RSUD Dr. H. Abdul*. Poltekkes Tanjung Karang.

Filippou, V., & Tsoumpas, C. (2018). Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with

CT, MRI, PET, SPECT, and ultrasound. *Medical Physics*, 45(9), e740–e760.

Fitria, I., & Sabatina, S. (2025). *Gambaran Strategic Cost Management di Instalasi Radiologi (Studi di Rumah Sakit Swasta di Kediri)*. *Jurnal Administrasi Rumah Sakit*, 14(1).

Fitriani, A. (2022). *Estimasi reduksi dosis radiasi menggunakan phantom PMMA pada pesawat CT Scan*. Universitas Hasanuddin.

Foster, C., Oruganti, S., & Panerai, F. (2023). *Real-time quantitative imaging of RTV silicone pyrolysis*. arXiv preprint arXiv:2302.00114.

Foster, C., Oruganti, S., & Panerai, F. (2023). *Real-time quantitative imaging of RTV silicone pyrolysis*. arXiv preprint arXiv:2302.00114.

Ganna, O., & Putri, A. (2023). *Peran phantom dalam kontrol kualitas peralatan radiologi: pendekatan kurva kalibrasi rasio sinyal terhadap gangguan (SNR) sebagai indikator mutu internal peralatan MRI*. *Jurnal Ilmiah Kesehatan Sandi Husada*.

García-Mato, D., Moreta-Martínez, R., García-Sevilla, M., et al. (2021). Augmented reality visualization for craniosynostosis surgery. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 9(5), 465–475.

George, E., Liacouras, P., Rybicki, F. J., & Mitsouras, D. (2017). Measuring and establishing the accuracy and reproducibility of 3D printed medical models. *Radiographics*, 37(5), 1424–1450.

Gerke, B., Schäfers, J., & Bolwin, K. (2024). Development of a dynamic mouse heart phantom for multimodal imaging. *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC)*.

Ginting, D. (2019). *Kebijakan Penunjang Medis Rumah Sakit (SNARS)*. Yogyakarta: Deepublish.

Govyadinov, P., Layman, R. R., & Netherton, T. (2025). Robust automated method of spatial resolution measurement in radiotherapy CT simulation images. *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, 26(3), e70006.

Guckenberger, M., Belka, C., Bezjak, A., Bradley, J., Daly, M. E., DeRuyscher, D., ... & Palma, D. A. (2017). Image-guided radiotherapy for non-small cell lung cancer: A review of current techniques and future directions. *Radiotherapy and Oncology*, 124(3), 383–396.

Gupta, A., Singh, J., & Kumar, R. (2022). Photopolymer-based 3D printing for biomedical applications: A review. *Progress in Biomaterials*, 11(1), 1–15.

Gyan, E. (2020). Optimization of patient radiation protection in digital diagnostic radiography examinations in Ghana. *University of Cape Coast*.

Hatamikia, S., Jaksa, L., Kronreif, G., Birkfellner, W., Kettenbach, J., Buschmann, M., & Lorenz, A. (2022). Silicone phantoms fabricated with multi-material extrusion 3D printing technology mimicking imaging properties of soft tissues in CT. *arXiv preprint arXiv:2212.03116*.

Hatamikia, S., Kronreif, G., Unger, A., Oberoi, G., & Bendl, R. (2022). 3D printed patient-specific thorax phantom with realistic heterogeneous bone radiopacity using filament printer technology. *Zeitschrift für Medizinische Physik*, 32(2), 163–172.

Henriques, J., Amaro, A. M., & Piedade, A. P. (2024). Biomimicking atherosclerotic vessels: A relevant and (yet) sub-explored topic. *Biomimetics*, 9(3), 135.

Heryani, H., Reskianto, A. D., Anam, C., Widhianto, R. W., & Prasetyo, D. (2023). *Pembuatan In-House Phantom untuk Pengukuran Image Quality dan Dosimetri Sebagai Tool Optimasi Protokol Pemeriksaan CT Scan Thorak*. Jurnal Pengawasan Tenaga Nuklir, 3(2).

Himawan, A. (2022). *Implementasi Sistem Manajemen Mutu ISO 13485 pada Laboratorium Desain Alat Kesehatan Inovatif*. Jakarta: UPT Alat Kesehatan Kemenkes RI.

Hjouj, M., Aljamal, M., Abdalqader, O. N., & AlQudah, A. (2024). Reduction of metal artefacts from bilateral hip prostheses during lower extremity computed tomography angiography: an experimental phantom study. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 71(2), 176–185.

Homolka, P., Salomon, E., Unger, E., & Cockmartin, L. (2023). Realization and uncertainty analysis for an adjustable 3D structured breast phantom in digital breast tomosynthesis. *Medical Physics*, 50(5), 3272–3282.

Hosseinzadeh, E. (2023). Reducing the surface roughness of stereolithographic 3D-printed materials to the nanoscale: A novel

approach to fabricating soft transparent patient-specific models. *Tecnológico de Monterrey Repository*.

Humayroh, N. D. (2023). *Analisa Nilai Kualitas Citra pada Phantom Pelvis dan Pro-Fluoro dengan Computed Radiography Menggunakan Aturan 10 kVp dan 15 kVp*. Universitas Nasional.

Ichikawa, K., Sasaki, M., & Mori, S. (2019). Repairing cracks in radiotherapy phantoms using acrylic resin: Evaluation of imaging artifacts. *Japanese Journal of Radiological Technology*, 75(5), 482–489.

International Atomic Energy Agency (IAEA). (2023). Implementation of prevention of unnecessary radiation exposure in procedures for optimizing patient radiation protection in diagnostic radiology installations. *IAEA Conference Proceedings*. Tersedia di: <https://inis.iaea.org/records/6j6ww-mkz27>

Irsal, M., & Winarno, G. (2020). *Pengaruh parameter milliampere-second (mAs) terhadap kualitas citra dan dosis radiasi pada pemeriksaan CT scan kepala pediatrik*. Jurnal Fisika Flux.

Islamiyah, I., Sudewi, D. P., & Azizah, N. (2023). *Optimizing radiation protection and safety against medical exposure on chest X-rays using exposure factor settings*. Proceedings of the Patient Dose Optimization Symposium, IAEA.

Ismail, N. A. (2022). *Uji keberterimaan kualitas radiasi pesawat mamografi berdasarkan citra phantom ACR dari variasi kombinasi target/filter dan ketebalan filter tambahan*. Universitas Hasanuddin.

Istiqomah, A. N., & Fakhrurreza, M. (2025). Pemanfaatan tulang sapi sebagai bahan dasar pembuatan *phantom anthropomorphic*. *Jurnal Medical Laboratory*.

Jamal, N. J. (2022). *Perbandingan protokol automatic tube current modulation (ATCM) dan fixed tube current modulation (FTCM) terhadap parameter dosis pasien pada pemeriksaan CT scan*. Universitas Hasanuddin.

Jamal, N. J. (2022). *Perbandingan protokol automatic tube current modulation (ATCM) dan fixed tube current modulation (FTCM) terhadap parameter dosis pasien pada pemeriksaan CT scan*. Universitas Hasanuddin.

Jannah, N. H. (2021). *Evaluasi surface dose pada kasus breast cancer postmastectomy dengan teknik 3D-CRT menggunakan energi foton*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Jantawong, H. (2021). Hepatic lesion detectability on dual energy computed tomography imaging: phantom study. *Chulalongkorn University*.

Kairn, T., Crowe, S. B., Hill, B., & Trapp, J. V. (2017). Experimental evaluation of air gaps in dosimetric phantoms. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 40(1), 13–21.

Kartikasari, Y., & Kurniawan, A. N. (2024). Analisis informasi anatomi pemeriksaan MRI ankle joint pada penggunaan *foot ankle coil* dan *flex coil*. *Jurnal Imejing Talitakum*.

Keshelava, L. (2020). *Evaluation of head and neck cancer irradiation with a high energy photons using individualized 3D printed bolus*. Kaunas University of Technology.

Khoiriyyah, R. M. (2020). *Estimasi dosis radiasi dan faktor risiko pada pemeriksaan computed tomography scan abdomen di Rumah Sakit Islam Sultan Agung Semarang*. UIN Walisongo.

Kiss, J., Veres, G., Vas, N. F., Kallos-Balogh, P., & Máthé, N. B. (2022). Phantom study on the robustness of MR radiomics features: Comparing the applicability of 3D printed and biological phantoms. *Diagnostics*, 12(9), 2196.

Kolarevic, G., Jaros, D., Pavicar, B., & Ignjć, T. (2020). Computed tomography simulator conversion curve dependence on scan parameters and phantom dimension. *Journal of Health Sciences*, 10(4), 351–358.

Kozicki, M., & Maras, P. (2023). On the measurement of radiation isocenter for medical accelerators using 3D polymer gel dosimetry: Introduction, application, and good practices. *Measurement*, 211, 112626.

Kulkarni, P., Sikander, S., & Biswas, P. (2020). Development of a device-to-image registration free needle guide for magnetic resonance imaging-guided targeted prostate biopsy. *Journal of Medical Devices*, 14(4), 041002.

Kutcher, G. J., Xiao, Y., & Yu, C. X. (2020). Extending the life cycle of radiotherapy phantoms through component replacement: A practical approach. *Medical Dosimetry*, 45(2), 97–103.

Laidlaw, J., Earl, N., Shavdia, N., Davis, R., & Keeble, T. (2023). Design and CT imaging of Casper, an anthropomorphic breathing thorax phantom. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 9(2), 025021.

Lee, K. B., Nam, K. C., Jang, J. S., & Kim, H. C. (2021). Feasibility of the quantitative assessment method for CT quality control in phantom image evaluation. *Applied Sciences*, 11(8), 3570.

Lestariningsih, I., & Dinayawati, M. F. (2023). Implementasi pencegahan paparan radiasi yang tidak diperlukan dalam prosedur optimisasi proteksi pasien di instalasi radiologi diagnostik. *ResearchGate*.

Lestariningsih, I., & Fauzan, M. (2023). *Implementation of prevention of unnecessary radiation exposure in procedures for optimizing patient radiation protection in diagnostic radiology installations*. Proceedings of the Patient Dose Optimization Symposium, IAEA.

Lin, B. Z. H., Zhang, E. T., Ng, H., Tan, M. Y. L., & Soh, Z. H. (2025). Design and additive manufacture of patient-specific head phantom for radiotherapy. *Materials & Design*, 250, 112345.

Litvac, D., & Caldas, L. V. E. (2025). Calibration of $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ planar sources using thermoluminescent dosimeters, radiochromic film, a PMMA phantom and Monte Carlo simulation. *Radiation Measurements*, 177, 107789.

Liu, Y., Ghassemi, P., Depkon, A., & Iacono, M. I. (2018). Biomimetic 3D-printed neurovascular phantoms for near-infrared fluorescence imaging. *Biomedical Optics Express*, 9(6), 2810–2824.

Mahmood, U., Apte, A., Kanan, C., & Fuller, C. (2021). Quality control of radiomic features using 3D-printed CT phantoms. *Journal of Medical Imaging*, 8(3), 033505.

Marshall, H., Selvan, T., Ahmad, R., Bento, M., & Veiga, C. (2023). Evaluation of dimensional accuracy in 3D-printed phantoms for radiotherapy couch QA. *Physica Medica*, 112, 112–120.

Masrochah, S. (2023). *Optimasi pencitraan verifikasi geometri radioterapi dengan computed radiography (CR)*. Inti Medikapustaka.

Masrochah, S., & Abimanyu, B. (2019). Pemeriksaan MRI pelvis dengan menggunakan *ultrasonic gel* pada kasus endometriosis di instalasi radiologi Mayapada Hospital Jakarta Selatan. *Jurnal Imejing Diagnostik*.

McGarry, C. K., Grattan, L. J., Ivory, A. M., Leek, F., & Liney, G. (2020). Tissue mimicking materials for imaging and therapy phantoms: A review. *Physics in Medicine & Biology*, 65(23), 23TR01.

Meyer-Szary, J., Luis, M. S., Mikulski, S., & Patel, A. (2022). The role of 3D printing in planning complex medical procedures and training of medical professionals—cross-sectional multispecialty review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(6), 3331.

Miller, A. F. M. (2025). Fabrication and evaluation of lead-doped plaster of Paris bone phantoms. *Doctoral Dissertation*. ProQuest.

Montazerian, M., Gonçalves, G. V. S., Barreto, M. E. V., & Oliveira, I. R. (2022). Radiopaque crystalline, non-crystalline and nanostructured bioceramics. *Materials*, 15(21), 7477.

Muttaqin, A., & Oktavia, A. (2025). *Uji Kualitas Citra Pesawat CT-Scan Menggunakan Phantom ACR di Instalasi Radiologi Rumah Sakit Universitas Andalas*. Jurnal Fisika Unand, 14(2), 133–141.

Nguyen, P., Stanislaus, I., McGahon, C., Doyle, P., & O'Reilly, M. (2023). Quality assurance in 3D-printing: A dimensional accuracy study of patient-specific 3D-printed vascular anatomical models. *Frontiers in Medical Technology*, 5, 1097850.

Noble, C., Langton, C., Ramachandran, P., & Heggie, R. (2021). A 3D printed phantom to assess MRI geometric distortion. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 7(3), 035017.

Nurchayadin, R. (2022). *Pengaruh waktu tunda pemindaian imaging plate terhadap kualitas citra radiografi pada pesawat computed radiography (CR)*. Universitas Nasional.

Nurkamal, A., Sari, N. L. K., & Ryangga, D. (2024). *Evaluasi dosis CT simulator pada radioterapi head and neck dan pelvis*. Jurnal Ilmiah Giga.

O'Hara, R. P., Chand, A., Vidiyala, S., & Suri, J. S. (2016). Advanced 3D mesh manipulation in stereolithographic files and post-print processing for the manufacturing of patient-specific vascular flow models. *Proceedings of SPIE*, 9789, 978909.

Oates, R., Holloway, L., Greer, P., & Vinod, S. (2018). Cone beam CT for image-guided lung cancer radiotherapy: Impact of

image quality on radiation oncologist confidence in gross tumour volume definition. *Journal of Medical Imaging and Radiation Oncology*, 62(2), 253–260.

Oliveira-Santos, N., Gaêta-Araujo, H., Spin-Neto, R., & Haiter-Neto, F. (2025). Gray values and noise behavior of cone-beam computed tomography machines—an in vitro study. *Dentomaxillofacial Radiology*, 54(2), 140–148.

Osman, S. O. S., Russell, E., King, R. B., Crowther, K., Jain, S., & James, P. (2019). Fiducial markers visibility and artefacts in prostate cancer radiotherapy multi-modality imaging. *Radiation Oncology*, 14(1), 224.

Pelin, G., Sonmez, M., & Pelin, C. E. (2024). The use of additive manufacturing techniques in the development of polymeric molds: A review. *Polymers*, 16(8), 1055.

Peng, X., Yang, S., Zhou, L., Mei, Y., & Shi, L. (2022). Repeatability and reproducibility of computed tomography radiomics for pulmonary nodules: A multicenter phantom study. *Investigative Radiology*, 57(4), 229–237.

Piroddi, L., Abu Zeid, N., Calcina, S. V., & Capizzi, P. (2023). Imaging cultural heritage at different scales: Part I, the micro-scale (manufacts). *Remote Sensing*, 15(10), 2586.

Prihatna, H., Indarto, B. P., Rahmatullah, I., & Sulistyorini, O. G. (2022). *Bahan Ajar Semester 7: Evaluasi Keterampilan Klinis Radiologi dan Penilaian OSCE*. Universitas Ahmad Dahlan.

Purwatiningsih, P., & Prasetyo, H. (2024). *Pengaruh filter citra terhadap CT number pada pesawat CT simulator*. Lontar Physics Journal.

Puteri, A. P. (2020). *Karsinoma serviks: Gambaran radiologi dan terapi radiasi*. Cermin Dunia Kedokteran.

Qiu, H., Nazarenus, J., Egeler, B., & Thode, T. (2024). Hydrogel system with independent tailoring of mechanics, CT, and US contrasts for affordable medical phantoms. *ACS Materials Letters*, 6(4), 500–507.

Rai, R., Holloway, L. C., Brink, C., Field, M., & Kuncic, Z. (2020). Multicenter evaluation of MRI-based radiomic features: A phantom study. *Medical Physics*, 47(8), 3696–3708.

Salari, E., & Parsai, E. I. (2023). Advances in radiotherapy dosimetry techniques and pre-treatment verification. In *Advances in Dosimetry and New Trends in Radiotherapy* (pp. 1–22). IntechOpen.

Salifu, S., Ogunbiyi, O., & Olubambi, P. A. (2022). Potentials and challenges of additive manufacturing techniques in the fabrication of polymer composites. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(5), 3121–3135.

Salim, A. (2023). *Analisis nilai SNR dan CNR phantom hasil pemeriksaan CT-scan dengan metode axial dan helical di RS Haji Makassar*. Universitas Hasanuddin.

Salmi, M. (2021). Additive manufacturing processes in medical applications. *Materials*, 14(1), 191.

Sari, A. P. K. (2023). *Analisis pengaruh perubahan ketebalan dan infill density bahan thermoplastic polyurethane dan*

polyethylene terephthalate glycol sebagai phantom radiologi. Universitas Sebelas Maret.

Sari, A. W., Hapiza, D. M., & Ridwan, A. (2023). *Pembuatan phantom radiologi menggunakan cangkang kerang sebagai pengganti bahan tulang.* *Journal Online of Physics*, Universitas Jambi.

Sari, A. W., Hapiza, D. M., & Ridwan, A. (2023). *Pembuatan phantom radiologi menggunakan cangkang kerang sebagai pengganti bahan tulang.* *Journal Online of Physics*, Universitas Jambi. Tersedia di: <https://mail.online-journal.unja.ac.id/jop/article/view/22303>

Sari, N. L. K. (2024). *Evaluasi dosis CT simulator pada radioterapi pelvis.* *Jurnal Ilmiah Giga.*

Savi, M., Andrade, M. A. B., Villani, D., & Perini, A. P. (2022). Development of radiopaque FFF filaments for bone and teeth representation in 3D printed radiological objects. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 10(2), 1–13.

Setiawati, R. (2023). *Imejing pada penyakit infeksi muskuloskeletal.* Jakarta: EGC.

Singhrao, K., Fu, J., Wu, H. H., Hu, P., & Kishan, A. U. (2020). A novel anthropomorphic multimodality phantom for MRI-based radiotherapy quality assurance testing. *Medical Physics*, 47(5), 2135–2145.

Slagowski, J. M., Ding, Y., Aima, M., & Wen, Z. (2020). A modular phantom and software to characterize 3D geometric distortion in MRI. *Physics in Medicine & Biology*, 65(23), 235012.

Slagowski, J. M., Ding, Y., Aima, M., Wen, Z., Fuller, C. D., & Chung, C. (2020). *A modular phantom and software to characterize 3D geometric distortion in MRI*. arXiv preprint arXiv:2003.10351.

Slagowski, J. M., Ding, Y., Aima, M., Wen, Z., Fuller, C. D., & Chung, C. (2020). *A modular phantom and software to characterize 3D geometric distortion in MRI*. arXiv preprint arXiv:2003.10351.

Slagowski, J. M., Ding, Y., Aima, M., Wen, Z., Fuller, C. D., Chung, C., Debnam, J. M., et al. (2020). A modular phantom and software to characterize 3D geometric distortion in MRI. *arXiv preprint arXiv:2003.10351*.

Soeprijanto, B. (2017). *Imejing diagnostik pada anomali kongenital sistem traktus urinarius*. Jakarta: EGC.

Stella, G., Pace, M., Tonghi, L. B., Mazzaglia, S., & Gueli, A. M. (2020). CT-dose measurement of the spinal cord region using XR-QA2 radiochromic films and TLD 100H dosimeters. *Instruments*, 4(3), 19.

Stocchiero, S., Abdarahmane, I., & Gatta, R. (2025). Assessment and mitigation of geometric distortions in Cartesian MR images at 15.2 T for preclinical radiation research. *Medical Physics*, 52(1), 22–34.

Subramaniyan, S. P., Boehnlein, J. D., & Prabhakar, P. (2024). *Microscale Morphology Driven Thermal Transport in Fiber Reinforced Polymer Composites*. arXiv preprint arXiv:2403.17650.

Sunarsono, H., Handayani, V. A., & Mardiansyah, Y. (2025). *Sains Dasar dalam Mendukung Keilmuan Teknik*. Jakarta: Prenadamedia.

Sutanto, H., Anam, C., & Arifin, Z. (2021). *Development of in-house head computed tomography dose index phantoms based on polyester-resin materials*. Iranian Journal of Medical Physics.

Syah, Z. R., Sinta, E. D., & Suhariningsih. (2023). Optimization of phantom CT-scan image quality using helical and axial methods with variations of mAs and kV. *AIP Conference Proceedings*, 2536(1), 060007.

Syaputra, F. T. (2023). Pembuatan alat peraga *pulmonary artery* berdasarkan rekonstruksi MRI/CT scan dan visualisasi fenomena aliran dengan metode CFD. Universitas Islam Indonesia. Diakses dari <https://dspace.uui.ac.id>

Syaputra, F. T. (2023). *Pembuatan alat peraga pulmonary artery berdasarkan rekonstruksi MRI/CT Scan dan visualisasi fenomena aliran dengan metode CFD*. Universitas Islam Indonesia.

Tino, R., Leary, M., Yeo, A., Kyriakou, E., & Kron, T. (2020). Additive manufacturing in radiation oncology: A review of clinical practice, emerging trends and opportunities. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2(2), 022003.

Tino, R., Yeo, A., Leary, M., Brandt, M., & Kron, T. (2019). *A systematic review on 3D-printed imaging and dosimetry phantoms in radiation therapy*. Technology in Cancer Research & Treatment.

Udyanto, H. M. (2021). *Efisiensi Penggunaan Sumber Daya dalam Produksi Phantom Medis dengan Teknologi 3D Printing*. *Jurnal Manajemen*, Edisi Elektronik, 12(2).

Van der Heide, U. A., Houweling, A. C., Groenendaal, G., Beets-Tan, R. G., & Lambin, P. (2018). Functional MRI for radiotherapy dose painting. *Magnetic Resonance Imaging*, 61, 33–42.

Verreynne, V. C. (2020). Radiation dose and image quality from pelvic localisation computed tomography in oncology. *Central University of Technology*.

Voskamp, T. (2022). *A training phantom for a vesicovaginal approach*. Delft University of Technology.

Wang, Y. (2017). Anthropomorphic head phantom for quantitative image quality assessment in cone beam computed tomography. Delft University of Technology Repository.

Wegner, M., & Krause, D. (2024). 3D printed phantoms for medical imaging: Recent developments and challenges. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 38(4), 1783–1795.

Wegner, M., & Krause, D. (2024). 3D printed phantoms for medical imaging: recent developments and challenges. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 38(2), 775–788.

Weidner, A. (2025). *An abdominal phantom with anthropomorphic organ motion and multimodal imaging contrast for magnetic-resonance-guided radiotherapy*. Heidelberg University.

Wellenberg, R. H. H., Hakvoort, E. T., & Slump, C. H. (2018). Metal artifact reduction techniques in musculoskeletal CT-imaging. *European Journal of Radiology*, 107, 60–69.

Wilby, C. (2024). *The Development of Phantoms for Prostate Brachytherapy and Biopsy*. University of Portsmouth.

Witanto, I. (2023). Simulasi *computational fluid dynamics* dan fabrikasi alat peraga *abdominal aorta* berbasis rekonstruksi data CT-scan/MRI. Universitas Islam Indonesia. Diakses dari <https://dspace.uui.ac.id>

Withouck, J. (2020). *Design and manufacturing of a thoracic phantom using 3D-printing and bone equivalent material*. Hasselt University.

Wong, Y. M. (2025). Evaluation of deformable image registration for contour propagation and dose accumulation in adaptive radiotherapy for prostate cancer. *Nanyang Technological University (NTU) Repository*.

Xu, Q., Vinogradskiy, Y., Grimm, J., & Nie, W. (2024). Evaluation of a novel patient-specific quality assurance phantom for robotic single-isocentre, multiple-target stereotactic radiosurgery, and stereotactic radiotherapy. *British Journal of Radiology*, 97(1155), 660.

Yu, H., Tang, B., Fu, Y., Wei, W., He, Y., & Dai, G. (2024). Quantifying the reproducibility and longitudinal repeatability of radiomics features in magnetic resonance Image-Guide accelerator imaging: A phantom study. *European Journal of Radiology*, 174, 111092.

Yücel, H., & Demirel, S. Z. (2025). Production of anthropomorphic paediatric phantom from 5 age tissue equivalency materials for use in radiological dosimetric studies. *Research Square*.

Yuliandari, A., & Oktamuliani, S. (2023). *Pabrikasi bolus 3D berbahan Polylactic Acid untuk terapi radiasi pada pasien kanker payudara*. JST (Jurnal Sains dan Teknologi).

Yunianto, M., Anwar, F., & Ardyanto, T. D. (2024). *Analysis of 3D printing materials as potential radiological phantoms of lung organs for medical imaging purposes*. Nigerian Journal of Technological Development.

Yusuff, H., Zorn, P. E., Giraudeau, C., & Wach, B. (2024). Development of a cost-effective 3D-printed MRI phantom for enhanced teaching of system performance and image quality concepts. *Magnetic Resonance Materials in Physics, Biology and Medicine*, 37(6), 923–934.

Zhang, S., Zhao, L., Huang, S., Wang, H., & Li, C. (2024). SLAM-TKA: Simultaneously localising X-ray device and mapping pins in conventional total knee arthroplasty. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 6(3), 789–798.

Zrinscak, D., Lorenzon, L., & Maselli, M. (2023). *Soft robotics for physical simulators, artificial organs and implantable assistive devices*. Progress in Biomedical Engineering.

Zrinscak, D., Lorenzon, L., Maselli, M., & Catelani, F. (2023). Soft robotics for physical simulators, artificial organs and

implantable assistive devices. *Progress in Biomedical Engineering*, 5(4), 045003.

Zuber, S. H. (2022). *Fabrication of Rhizophora spp. head phantom for external beam radiotherapy applications*. Universiti Sains Malaysia.

Buku referensi berjudul **Phantom Pelvis untuk Radiologi: Metode, Material, dan QA** adalah buku yang membahas secara komprehensif pembuatan dan pemanfaatan phantom pelvis dalam praktik radiologi. Buku ini menjelaskan berbagai metode pembuatan phantom, pilihan material yang dapat digunakan, serta prosedur pengujian untuk memastikan kualitas citra dan keselamatan penggunaan.

Ditujukan untuk masyarakat umum, buku ini disusun dengan bahasa sederhana dan contoh aplikatif sehingga dapat dipahami oleh pembaca dari berbagai latar belakang. Pembaca akan menemukan penjelasan mengenai fungsi phantom pelvis dalam simulasi radiologi, bagaimana material yang berbeda memengaruhi kualitas citra, hingga peran QA dalam menjaga keandalan peralatan dan hasil pemeriksaan.

Disajikan secara sistematis, buku ini menjadi panduan yang bermanfaat bagi siapa saja yang ingin mengenal lebih dekat konsep phantom radiologi, sekaligus memberikan gambaran bagaimana inovasi di bidang ini berkontribusi pada pengembangan layanan kesehatan yang lebih aman dan berkualitas.