

BOLUS BERBAHAN SILICONE DAN NATURAL RUBBER

(Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Pada Radioterapi)



Heri Sutanto
Eko Hidayanto
Gede Wiratma Jaya
Santi Yuli Astuti
Astri Suppa Supratman

BOLUS BERBAHAN SILICONE DAN NATURAL RUBBER

(Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi pada Radioterapi)

Penyusun:

Prof. Dr. Heri Sutanto, S.Si., M.Si.

Dr. Eng. Eko Hidayanto, S.Si., M.Si.

Gede Wiratma Jaya, S.Pd., M.Si.

Santi Yuli Astuti, S.Si, M.Si.

Astri Suppa Supratman, S.Si, M.Si.



**Undip Press
Semarang**

BOLUS BERBAHAN SILICONE DAN NATURAL RUBBER

(Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi pada Radioterapi)

Penyusun:

Prof. Dr. Heri Sutanto, S.Si., M.Si.

Dr. Eng. Eko Hidayanto, S.Si., M.Si.

Gede Wiratma Jaya, S.Pd., M.Si.

Santi Yuli Astuti, S.Si, M.Si.

Astri Suppa Supratman, S.Si, M.Si.

Divisi Material Medis

Smart Material Research Center (SMARC)

Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika

Universitas Diponegoro

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.



Diterbitkan oleh

Undip Press

Semarang

ISBN: 978-979-097-526-2

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Puji syukur kami haturkan kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat-dan karunia-Nya, sehingga kami bisa menyelesaikan penyusunan buku ini. Buku yang telah ditulis ini dimaksudkan untuk memberikan informasi mengenai pembuatan material setara jaringan lunak tubuh manusia (selanjutnya disebut bolus) dengan bahan alternatif yaitu *silicone rubber* (SR) dan *natural rubber* (NR). Selain itu, di dalam buku ini dijelaskan secara teoritik mengenai karakteristik yang dimiliki oleh SR dan NR serta hasil pengujian kemampuan bolus dalam peningkatan dosis permukaan dengan menggunakan pesawat radioterapi *linear accelerator* (LINAC). Hasil-hasil pengujian dan pengembangan material bolus yang disajikan pada buku ini bertujuan memberikan informasi yang dapat memperkaya wawasan kepada pembaca, peneliti maupun fisikawan medik untuk bersama-sama dapat melakukan pengembangan material medis salah satunya bolus untuk menunjang pelayanan radioterapi khususnya pada penyakit kanker yang posisinya berada dipermukaan jaringan tubuh hingga kedalaman 7 cm dari permukaan tubuh manusia. Penyajian buku ini menitikberatkan pada cara dan proses sintesis bolus dengan bahan SR dan NR. Walaupun bolus telah dibuat dengan teknologi yang modern, namun pengembangan material bolus masih terus berkembang dalam hal

peningkatan dosis permukaan dengan menggunakan material tambahan seperti material komposit.

Penyusun menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membiayai penelitian, pihak yang membantu dalam diskusi dan eksperimen yang telah menghasilkan beberapa publikasi ilmiah dari hasil penelitian penelitian. Kami menyadari buku ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran pembaca sangat kami harapkan untuk penyempurnaan isi buku dimasa mendatang. Akhir kata semoga buku ini bermanfaat dalam bidang Fisika Medis khususnya di negara tercinta Indonesia.

Terima kasih.

Wassalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Semarang, November 2018

Heri Sutanto

Eko Hidayanto

Gede Wiratma Jaya

Santi Yuli Astuti

Astri Suppa Supratman

KATA SAMBUTAN

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunianya pada kita semua. Perkembangan teknologi di bidang kesehatan khususnya pelayanan terapi penyakit kanker menggunakan *linear accelerator* (LINAC) telah memberikan berbagai manfaat dan peningkatan kesembuhan kepada penderita penyakit kanker. Disisi lain penggunaan radiasi pengion berenergi tinggi juga dapat memicu kerusakan jaringan dan memicu timbulnya penyakit kanker baru, sehingga penyebab negatif ini perlu diatasi.

Salah satu sarana yang digunakan dalam bidang radioterapi adalah penggunaan bahan yang setara jaringan lunak tubuh manusia (bolus). Penggunaan bolus sebagai sarana radioterapi terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah pasien radioterapi. Penggunaan bahan yang setara dengan jaringan telah banyak digunakan seperti parafin, *ethyl methacrylate* dan *elasto gel*. Sampai saat ini di Indonesia masih belum banyak buku yang membahas tentang sintesis material untuk bidang radioterapi. Dalam buku yang berjudul " **BOLUS BERBAHAN SILICONE DAN NATURAL RUBBER (Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi pada Radioterapi)** yang ditulis oleh Heri Sutanto, Eko Hidayanto, Gede Wiratma Jaya, Santi Yuli Astuti dan Astri Suppa Supratman, membahas mulai dari konsep dasar radioterapi, teknik

LINAC, potensi SR dan NR, sintesis bolus, dan karakterisasi bolus pada LINAC. Buku ini dapat menjadi sumber informasi awal pemanfaatan material medis untuk menunjang modalitas radioterapi menggunakan LINAC.

Wassalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Semarang, November 2018

Ketua AFISMI JATENG

Zaenal Arifin, M.Si

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
Kata Pengantar	ii
Kata Sambutan	iv
Daftar Isi	Vi
1. Pendahuluan	1
2. Radioterapi	4
2.1. Konsep Dasar Radioterapi.....	4
2.2. Radioterapi Berkas Elektron.....	7
2.3. Interaksi Berkas Elektron dengan Medium.	10
3. Linear Accelerator (LINAC)	15
4. Bolus	19
5. Silicone Rubber	22
6. Natural Rubber	26
7. Sintesis Bolus	31
7.1. Sintesis Bolus Berbahan SR.....	31
7.2. Sintesis Bolus Berbahan NR.....	33
8. Karakterisasi Bolus	38
8.1. Menentukan Nilai <i>Relative Electron Density</i> (RED).....	38
8.2. Menentukan Persentase Dosis Permukaan.	40
9. Hasil Karateriasasi	43
9.1. Hasil Pembuatan Bolus.....	43

9.2. Citra Tomografi Bolus.....	44
9.3. <i>Relative Electron Density</i> (RED) Bolus.....	45
9.4. Persentase Dosis Permukaan.....	48
10. Bolus SR dengan Komposit Silika.....	53
11. Bolus NR dengan Variasi Ketebalan.....	62
Daftar Pustaka.....	70
Biografi Singkat Penulis.....	78

Pengobatan kanker pada umumnya dilakukan dengan proses radioterapi secara eksternal menggunakan *linear accelerator* (LINAC). LINAC dapat menghasilkan dua berkas radiasi yaitu berkas elektron dan foton. Penggunaan kedua berkas radiasi tersebut bergantung pada posisi maupun letak kanker yang diukur pada permukaan kulit. Jika posisi kanker berada di permukaan kulit atau sekitar 5 cm dari permukaan kulit maka pengobatan kanker tersebut dapat menggunakan berkas radiasi elektron dengan energi dalam orde mega elektron volt (MeV). Untuk posisi kanker yang berada jauh dari permukaan kulit maka berkas radiasi yang digunakan adalah berkas foton dengan energi dalam orde mega volt (MV) (Suharni dkk, 2013).

Pada saat dilakukan proses radioterapi menggunakan LINAC ditemukan beberapa masalah antara lain adanya sebagian berkas radiasi yang kemungkinan mengenai jaringan sehat (normal) sehingga berpotensi memunculkan kanker baru yang tidak diinginkan. Kemudian, pada saat mengobati kanker yang berada di permukaan kulit (*superficial*),

dosis permukaan yang dihasilkan dari penggunaan berkas elektron masih belum mencapai 100%. Sehingga untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan sebuah sarana radioterapi yang dikenal sebagai bolus.

Bolus merupakan sarana radioterapi yang sering digunakan untuk kasus tumor maupun kanker yang letaknya di area permukaan kulit dengan tujuan memberikan peningkatan dosis permukaan di area permukaan kulit (Richmond, 2017). Selain itu, penggunaan bolus dalam radioterapi memiliki berbagai macam tujuan, yaitu: (1) mengurangi kerusakan pada jaringan sehat (normal) sebagai akibat adanya kemungkinan berkas radiasi yang tidak mengenai target, (2) mengurangi daya tembus berkas radiasi yang kemungkinan menuju jaringan sehat (normal) di sekitar area kanker kulit, dan (3) untuk meratakan permukaan tubuh pasien agar mendapatkan distribusi dosis permukaan yang seragam (Park dan Yea, 2015; Günhan dkk, 2003; Lothfy dkk, 2015).

Pembuatan bolus telah dilakukan oleh beberapa peneliti dengan berbagai jenis bahan seperti *parafin granules*, *elasto-gel pad*, *superflab*, *thermoplastic sheets*, *dental wax*, *polypropylene*, dan *rayon cloth* (Seppala dkk, 2004; Chang dkk, 1992; Visscher dan

Barnett, 2016). Penggunaan bahan tersebut khususnya di Indonesia masih sulit untuk digunakan, dikarenakan bahan tersebut harus diimpor terlebih dahulu. Dampaknya adalah durasi pelayanan radioterapi kepada pasien menjadi terlambat dikarenakan harus menunggu waktu yang sedikit lama agar bisa memulai proses radioterapi menggunakan bolus. Alternatif bahan bolus yang bisa digunakan adalah dengan menggunakan *silicone rubber* dan *natural rubber*.

Silicone rubber (SR) merupakan salah satu jenis polimer sintetis, sedangkan *natural rubber* (NR) merupakan salah satu jenis polimer alam. Pemilihan bahan tersebut didasarkan pada ketersediaan bahan yang ada di Indonesia mengingat terdapatnya fasilitas industri petrokimia yang dapat menghasilkan SR dan adanya perkebunan karet untuk menghasilkan NR. Bahan SR telah digunakan dalam bidang aplikasi medis seperti pembuatan tiruan organ *rectum* (Li dkk, 2015). Sedangkan bahan NR telah dicoba untuk pembuatan jaringan tubuh manusia tiruan sebagai pengganti bahan kegiatan praktek ilmu kedokteran (Murniati dkk, 2017). Untuk itu diperlukan eksplorasi yang jauh lebih banyak dalam mempelajari karakteristik SR dan NR beserta pengaplikasiannya dalam radioterapi menggunakan LINAC.

Radioterapi merupakan salah satu metode alternatif yang bersifat non bedah yang dilakukan pada proses penyembuhan penyakit kanker dengan memanfaatkan radiasi pengion sebagai sumber radiasi terapi (Khifitiyah dkk, 2014). Tujuan dilakukan radioterapi adalah untuk menghancurkan jaringan kanker dan dapat digunakan untuk mengobati hampir semua kanker seperti nasofaring, kanker kepala dan leher, kanker paru-paru, kanker prostat, kanker kulit, kanker otak, kanker serviks dan kanker payudara (Azizah dkk, 2016).

2.1. Konsep Dasar Radioterapi

Istilah radiasi sering dianggap sebagai sesuatu yang membahayakan maupun mengganggu kesehatan dan keselamatan manusia atau makhluk hidup. Namun di sekitar kita baik di rumah, di kantor, maupun di tempat-tempat umum, ternyata banyak sekali radiasi yang diterima oleh kita baik dari sinar matahari maupun pengaruh dari radiasi sinar kosmik.

Radiasi merupakan suatu perpindahan energi dari suatu sumber radiasi terhadap medium lain, dimana

transmisi ini dapat berupa partikel (radiasi partikel) maupun berupa gelombang atau cahaya (radiasi elektromagnetik). Dalam radioterapi, digunakan radiasi pengion karena dapat membentuk ion (partikel bermuatan listrik) dan menyimpan energi ke sel-sel jaringan yang dilewatinya. Energi yang tersimpan ini bisa mematikan sel kanker atau menyebabkan perubahan genetik yang mengakibatkan kematian bagi sel kanker. Radiasi pengion sendiri merupakan radiasi dengan energi tinggi yang mampu melepaskan elektron dari orbit suatu atom dan mengakibatkan terbentuknya muatan atau terjadinya ionisasi. Radiasi pengion terdiri dari radiasi elektromagnetik dan radiasi partikel (Fitriyatuzzakiyyah dkk, 2017).

Radiasi elektromagnetik merupakan radiasi dimana energi dibawa oleh osilasi medan listrik dan medan magnet yang merambat dengan kecepatan cahaya. Contoh radiasi elektromagnetik adalah radiasi sinar-x dan sinar gamma, kedua sinar tersebut paling sering digunakan dalam radioterapi. Sinar-x dihasilkan dari suatu proses ketika partikel elektron berkecepatan tinggi bertabrakan dengan material yang memiliki nomor atom tinggi seperti Tungsten dan Molibdenum pada anoda tabung sinar-x. Sinar gamma secara fisik identik dengan sinar-x, namun dipancarkan dari inti

atom (*intranuclearly*) atau berasal dari proses peluruhan radioaktif (*radioactive decay*) seperti Cobalt-60, Radium dan Cesium. Inti atom yang tidak stabil melepaskan energi yang berlebih dalam bentuk elektron intranuklear (partikel beta) atau inti Helium (partikel alfa). Jika masih memiliki kelebihan energi setelah itu, sinar gamma dipancarkan untuk mencapai keadaan stabil (*steady state*) (Fitriyatuazzakiyyah dkk, 2017).

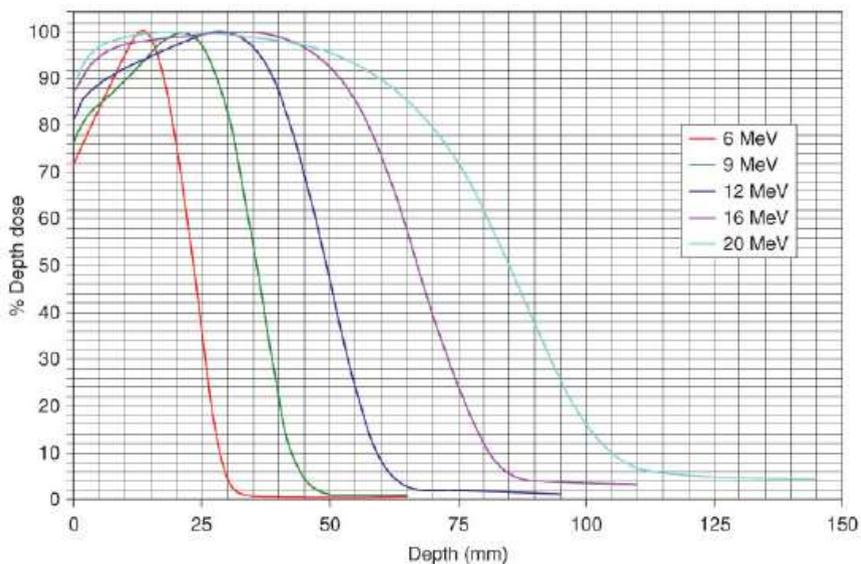
Radiasi partikel adalah radiasi yang terdiri dari partikel atom atau subatomik yang membawa energi dalam bentuk energi kinetik atau massa yang bergerak. Radiasi partikel terdiri dari berkas radiasi bermuatan dan tidak bermuatan. Untuk radiasi partikel bermuatan yaitu partikel alfa, beta, elektron dan proton. Sedangkan radiasi partikel yang tidak bermuatan yaitu partikel neutron. Berkas elektron merupakan salah satu metode konvensional yang telah terlebih dahulu digunakan pada proses radioterapi untuk mematikan sel-sel tumor yang berada dekat dengan permukaan tubuh dikarenakan berkas elektron tidak dapat menembus terlalu jauh ke dalam jaringan. Berkas proton merupakan radiasi partikel yang lebih baru digunakan untuk mengobati kanker. Radiasi ini memiliki distribusi dosis yang lebih baik karena profil

penyerapannya yang unik dalam jaringan yang dikenal sebagai puncak *Bragg* (*Bragg peak*) sehingga memungkinkan terjadi pengendapan energi destruktif dengan maksimal di lokasi tumor dan meminimalkan kerusakan pada jaringan sehat di sepanjang jalur penetrasinya. Dalam aplikasi klinis, radiasi ini sangat berguna untuk terapi tumor pediatrik dan dewasa yang berada di dekat bagian vital seperti tumor tulang belakang dan tumor tengkorak dimana paparan radiasi terhadap jaringan normal sangat penting untuk diminimalkan terkena radiasi. Berkas neutron mampu menyimpan energi secara maksimal pada target jaringan di ujung lintas terapinya. Secara keseluruhan radiasi partikel memiliki *linear energy transfer* (LET) yang lebih tinggi dibandingkan radiasi foton (sinar-x), namun karena biaya produksinya mahal maka penggunaan radiasi partikel masih terbatas (Fitriyatuzzakiyyah dkk, 2017).

2.2. Radioterapi Berkas Elektron

Sejak awal tahun 1950-an, elektron berenergi tinggi telah digunakan dalam radioterapi dalam orde mega elektron volt (MeV) untuk mengobati tumor atau kanker di area permukaan kulit seperti di hidung, telinga, kulit kepala, kulit tangan maupun di kulit

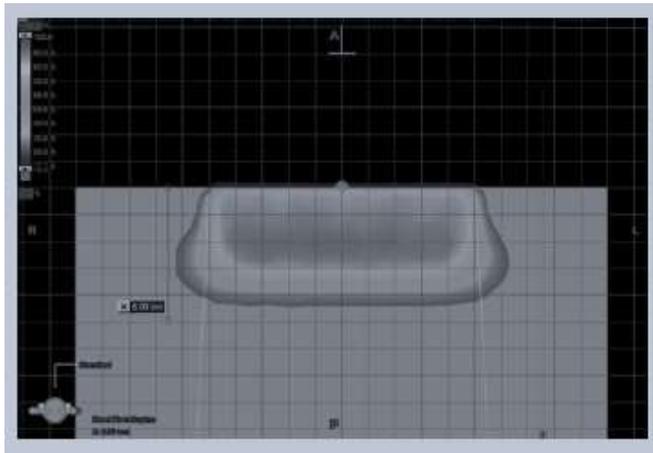
badan. Hal ini dikarenakan berkas elektron memiliki distribusi dosis yang seragam di area permukaan (Wulandari dkk, 2016). Secara umum berkas elektron yang dihasilkan pada pesawat *linear accelerator* (LINAC) memiliki energi dari 4 MeV sampai dengan 25 MeV, walaupun beberapa mikrotron pada pesawat LINAC mampu memberikan energi yang lebih tinggi (Mayles dkk, 2007). Bentuk kurva dosis kedalaman atau dikenal sebagai *percentage depth dose* (PDD) ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Bentuk kurva dosis kedalaman atau *percentage depth dose* (PDD) pada berkas elektron untuk ukuran lapangan 10 cm x 10 cm (Barret dkk, 2009).

Pada Gambar 2.1, kurva dosis kedalaman atau PDD berkas elektron secara umum menunjukkan dosis

permukaan sekitar 70% sampai dengan 90% dan dosisnya menghasilkan nilai maksimum (100%) ketika berada pada kedalaman tertentu yang dikenal sebagai z_{maks} . Ketika jangkauan penetrasi berkas elektron melebihi z_{maks} maka dosis yang dihasilkan mengalami penurunan yang lebih cepat dengan kehilangan energi secara rata-rata sebesar 2 MeV/cm di dalam air maupun pada jaringan yang seperti air (Podgorsak, 2005). Gambar 2.2 menunjukkan karakteristik distribusi dosis untuk berkas elektron dimana tepian dari pancaran elektron tidak menyimpang secara geometris karena penyebarannya lateral dengan penyebaran lebih besar untuk energi rendah (Barret dkk, 2009).



Gambar 2.2. Distribusi dosis berkas elektron untuk energi 9 MeV (Barret dkk, 2009).

Berdasarkan Komisi Internasional tentang Unit

dan Pengukuran Radiasi (*International Commission on Radiation Units and Measurements-ICRU*) telah merekomendasikan dalam laporan No. 24 bahwa ketidakpastian dalam pengiriman dosis ke pasien dalam radioterapi harus berada dalam nilai ketidakpastian sebesar $\pm 5\%$. Guna mencapai tingkat akurasi, semua jenis kesalahan dan ketidakpastian pada berbagai langkah terapi seperti perhitungan dosis, perencanaan pengobatan dan pemberian dosis harus diminimalkan (Ghorbani dkk, 2015).

2.3. Interaksi Berkas Elektron dengan Medium

Berkas elektron yang melewati suatu medium, elektron tersebut akan mengalami interaksi dengan atom-atom pada medium tersebut dikarenakan adanya pengaruh gaya Coulomb. Interaksi berkas elektron dengan medium terdiri dari (1) interaksi berkas elektron dengan elektron orbital, (2) interaksi elektron dengan inti atom, (3) *mass stopping power* dan (4) *mass scattering power*.

2.3.1. Interaksi Elektron dengan Elektron Orbital

Interaksi gaya Coulomb yang terjadi antara elektron yang datang dengan elektron orbital (elektron di lintasan orbital atom) akan menghasilkan ionisasi

dan eksitasi pada atom. Proses ionisasi dan eksitasi dihasilkan dari tumbukan yang tidak elastis (inelastis) antara elektron datang dengan elektron orbital. Tumbukan yang tidak elastis menyebabkan terjadinya kehilangan energi kinetik yang digunakan untuk proses ionisasi dan eksitasi. Proses ionisasi merupakan proses terlepasnya elektron dari lintasan orbital atom sedangkan eksitasi merupakan proses pindahnya elektron dari lintasan orbital terluar ke lintasan orbital yang lebih dalam sambil melepaskan energi (Podgorsak, 2005).

2.3.2. Interaksi Elektron dengan Inti Atom

Adanya interaksi pengaruh gaya Coulomb antara elektron datang dengan inti atom menyebabkan terjadinya tumbukan elastis dan tidak elastis. Tumbukan elastis antara elektron datang dengan inti atom akan menghasilkan hamburan elastis yang ditandai dengan perubahan arah namun tidak mengalami kehilangan energi. Tumbukan yang tidak elastis dengan inti atom menyebabkan elektron mengalami kehilangan energi yang diubah dalam bentuk foton (sinar-x) yang dikenal sebagai *bremstrahlung* yang ditandai dengan daya henti radiatif (*radiative stopping power*) (Podgorsak, 2005).

Produksi *bremstrahlung* diatur oleh interaksi Lamor yang menyatakan bahwa kekuatan yang dipancarkan P dalam bentuk foton (sinar-x) dari partikel bermuatan yang dipercepat sebanding dengan kuadrat percepatan partikel a dan kuadrat muatan partikel q yang dinyatakan pada persamaan sebagai berikut:

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad (2.1)$$

Energi yang hilang dalam bentuk radiasi yaitu sinar-x (*bremstrahlung*) meningkat secara langsung dengan nomor atom Z dan energi kinetik elektron. Artinya produksi sinar-x (*bremstrahlung*) lebih efisien untuk energi kinetik elektron dan nomor atom yang tinggi. Hasil radiasi untuk target sinar-x (*bremstrahlung*) pada kisaran energi radiologis diagnostik (~ 100 keV) dalam orde 1%, sedangkan pada kisaran energi mega volt (MV) jumlahnya mencapai 10-20% (Podgorsak, 2005).

2.3.3. Mass Stopping Power

Kehilangan energi pada saat terjadinya tumbukan tidak elastis (inelastis) oleh elektron pada saat bergerak melalui sebuah medium dengan kerapatan (densitas) ρ dinyatakan sebagai total *mass stopping*

power $(S/\rho)_{tot}$ (Podgorsak, 2005). Berdasarkan *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) (8), *mass stopping power* dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$(S/\rho)_{tot} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dl} \text{ (MeV.cm}^2\text{/g)} \quad (2.2)$$

dengan dE adalah total energi elektron yang hilang pada saat melewati material dan dl adalah panjang medium yang dilewati oleh elektron (Khan dan Gibbons, 2014). $(S/\rho)_{tot}$ terdiri dari dua komponen yaitu *mass collision stopping power* $(S/\rho)_{col}$ yang berasal dari interaksi antara elektron datang dengan elektron yang berada pada lintasan orbital atom (ionisasi dan eksitasi atom) dan *mass radiative stopping power* $(S/\rho)_{rad}$ yang berasal dari interaksi antara elektron datang dengan inti atom (produksi *bremsstrahlung*). Adapun bentuk lain dari persamaan $(S/\rho)_{tot}$ dinyatakan sebagai berikut (Podgorsak, 2005):

$$(S/\rho)_{tot} = (S/\rho)_{col} + (S/\rho)_{rad} \quad (2.3)$$

2.3.4. Mass Scattering Power

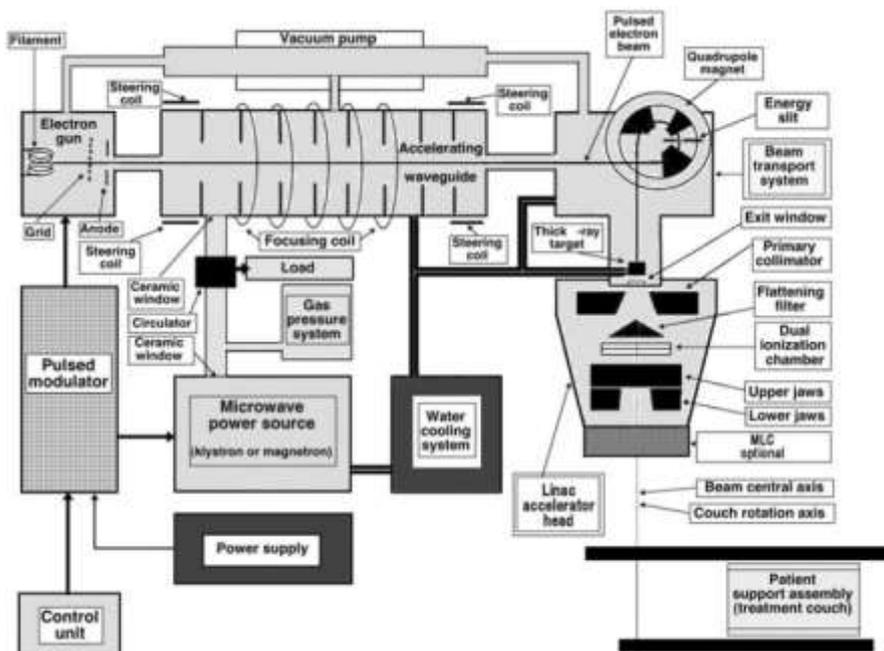
Partikel elektron pada saat melewati suatu medium penyerap, elektron mengalami banyak hamburan melalui interaksi gaya Coulomb antara elektron datang dengan inti atom. Penyebaran arah

sudut dan spasial elektron dapat dicari menggunakan pendekatan distribusi Gaussian. Beberapa hamburan elektron yang melintasi panjang lintasan l melalui media penyerap umumnya digambarkan oleh sudut persegi rata-rata hamburan $\overline{\theta^2}$ yang sebanding dengan ketebalan massa medium penyerap ρl . Hal yang sama dengan definisi *mass stopping power*, *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU) mendefinisikan *mass scattering power* T/ρ dalam bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\frac{T}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\overline{\theta^2}}{dl} \quad (2.4)$$

Mass scattering power bervariasi kira-kira sebagai kuadrat dari jumlah atom penyerap dan berbanding terbalik dengan kuadrat dari energi kinetik elektron (Podgorsak, 2005).

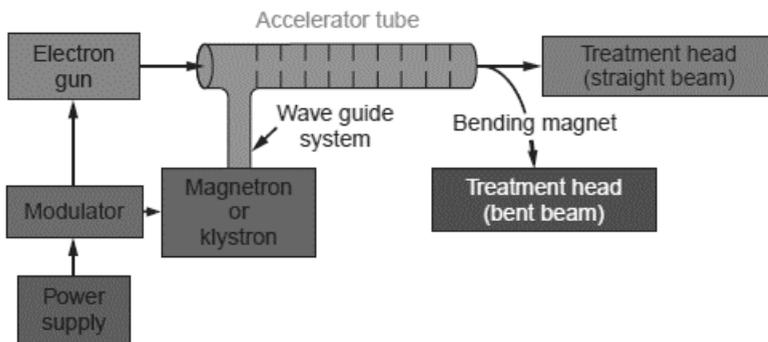
Linear Accelerator (LINAC) adalah alat yang menggunakan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tinggi untuk mempercepat gerak partikel bermuatan seperti elektron agar menghasilkan energi yang lebih tinggi melalui tabung linier (dengan beda potensial ~ 25 MeV). Gerak partikel elektron dipercepat menggunakan medan pada gelombang radio frekuensi (RF) *microwave* non konservatif dalam rentang frekuensi 1 GHz (S band). LINAC memiliki beberapa komponen utama yang dikelompokkan ke dalam enam bagian, yaitu (1) sistem injeksi, (2) sistem pembangkit tenaga radio frekuensi, (3) *accelerating waveguide*, (4) sistem *auxiliary*, (5) sistem *beam transport* dan (6) sistem *beam collimation* dan *beam monitoring* (Podgorsak, 2005). Komponen LINAC ditampilkan pada Gambar 3.1. Berkas elektron berenergi tinggi tersebut dapat dibuat untuk menghasilkan sinar-x dengan cara menembakkan berkas elektron ke sebuah target dengan nomor atom yang tinggi. Sinar-x yang dihasilkan akan digunakan untuk mengobati tumor yang jangkauannya lebih dalam pada tubuh pasien (Khan dan Gibbons, 2014).



Gambar 3.1. Gambaran komponen *linear accelerator* (LINAC) (Podgorsak, 2005).

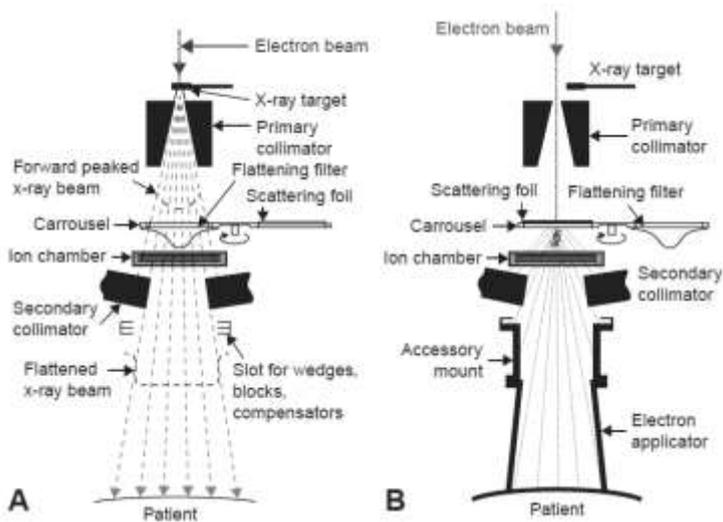
Sebuah *power supply* menghasilkan daya arus searah (DC) yang diberikan kepada modulator, termasuk *pulse-forming network* dan sebuah *switch tube* yang dikenal sebagai *hydrogen thyatron*. Arus searah (DC) yang diberikan kepada modulator digunakan untuk menghasilkan pulsa bertegangan tinggi, kemudian pulsa tersebut diberikan kepada *magnetron* atau *klystron* dan secara bersamaan diberikan kepada *electron gun*. Pada *magnetron* atau *kylstron* pulsa bertegangan tinggi digunakan untuk

menghasilkan pulsa gelombang mikro, pulsa ini selanjutnya diinjeksikan ke dalam tabung akselerator melalui sistem *waveguide*. Pada saat yang sama, *electron gun* menghasilkan elektron dalam jumlah yang sangat banyak. Elektron tersebut diinjeksikan ke dalam tabung akselerator dengan energi awal sekitar 50 keV. Di dalam tabung akselerator, elektron-elektron berinteraksi dengan medan elektromagnetik dari gelombang mikro dan elektron memperoleh energi dari medan listrik sinusoidal dengan proses pemercepatan. Elektron dengan energi tinggi keluar dari jendela tabung akselerator, dan elektron tersebut berbentuk sebagai berkas pensil (*pencil beam*) berdiameter sekitar 3 mm (Khan dan Gibbons, 2014). Diagram blok LINAC ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Diagram blok LINAC (Khan dan Gibbons, 2014).

Berkas foton (sinar-x) dari LINAC dapat dihasilkan dengan menggunakan berkas elektron berenergi tinggi yang keluar dari tabung akselerator menumbuk sebuah target dari suatu material dengan nomor atom (Z) yang tinggi misalnya tungsten. Pada saat terjadi tumbukkan, energi elektron diubah menjadi sebuah spektrum energi foton (sinar-x) dengan energi maksimum yang sama dengan jumlah energi elektron yang datang. Sedangkan berkas elektron pada LINAC dihasilkan partikel elektron dalam bentuk pensil yang keluar dari tabung akselerator tanpa menumbuk sebuah target, melainkan diteruskan menuju *scattering foil* untuk menyebarkan berkas elektron serta untuk mendapatkan *fluence* berkas elektron yang seragam pada lapangan penyinaran. *Scattering foil* berasal dari foil logam tipis dengan nilai Z yang tinggi seperti timbal (Pb) dan tantalum (Khan dan Gibbons, 2014). Proses terjadinya berkas foton dan elektron pada LINAC ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Skema LINAC untuk menghasilkan berkas (a) foton dan (b) elektron (Khan dan Gibbons, 2014).

Bolus merupakan salah satu sarana radioterapi yang terbuat dari bahan yang setara dengan jaringan dan ditempatkan secara langsung di permukaan kulit pada saat dilakukan proses radioterapi (Podgorsak, 2005). Pada saat dilakukan radioterapi menggunakan berkas elektron, bolus memiliki beberapa fungsi antara lain (1) mengurangi kerusakan pada jaringan sehat yang berada di area sekitar kanker kulit, (2) meningkatkan dosis permukaan untuk mengobati kanker yang berada di area permukaan kulit, (3) meratakan permukaan tubuh pasien yang tidak rata pada saat dilakukan proses penyinaran agar diperoleh keseragaman distribusi dosis permukaan dan (4) mengurangi penetrasi elektron yang kemungkinan mengenai jaringan sehat agar tidak terjadi proses ionisasi yang berpotensi memunculkan kanker yang tidak diinginkan (Park dan Yea, 2016; Günham dkk, 2003; Demir dkk, 2008).

Guna meningkatkan dosis permukaan, ketebalan bolus yang digunakan harus memiliki lapisan ketebalan yang seragam berkisar 0,5 cm sampai dengan 1,5 cm. Ketebalan bolus tersebut secara signifikan tidak

mengubah bentuk kurva isodosi berdasarkan kedalaman (Podgorsak, 2005). Idealnya, dalam membuat bolus harus menggunakan bahan yang sesuai dengan jaringan agar bolus dapat menghentikan gerakan partikel dan hamburan (Visscher dan Barnett, 2016). Namun membuat bolus dengan bahan yang sesuai dengan jaringan tidak mudah, beberapa alternatif bahan yang telah digunakan dalam pembuatan bolus antara lain *parafin granules, elasto-gel pad, superflab, thermoplastic sheets, dental wax, polypropylene*, dan *rayon cloth* (Seppala dkk, 2004; Chang dkk, 1992; Visscher dan Barnett, 2016).

Bentuk bolus sebagian besar berupa lembaran dengan luas lapangan dan ketebalan bolus yang bervariasi sesuai dengan kebutuhan pada saat dilakukan proses radioterapi. Untuk kasus yang lebih kompleks, misalnya untuk kasus penyinaran pada permukaan yang tidak rata seperti pada daerah hidung dan telinga, bolus dibuat dalam bentuk tiga dimensi yang menyesuaikan bentuk permukaan dari daerah lapangan yang akan disinari menggunakan mesin printer tiga dimensi. Bentuk bolus dan penggunaannya ditampilkan pada Gambar 4.1.



(a)



(b)



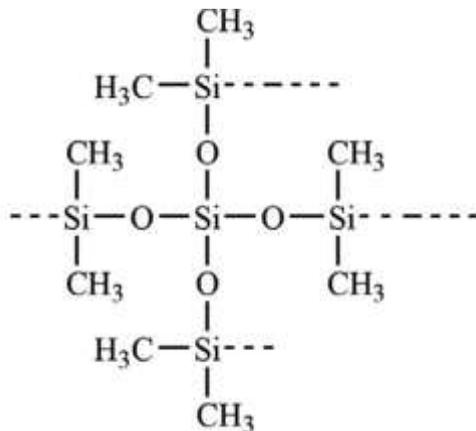
(c)

Gambar 4.1. Bolus dalam berbagai jenis bentuk (a) bolus dalam bentuk lembaran dengan bahan *thermoplastic sheet* (Visscher dan Barnett, 2016), (b) bolus dalam bentuk tiga dimensi dan (c) penggunaan bolus tiga dimensi pada pasien untuk kasus *Kimura's disease* (Park dan Yea, 2016).

BAB
5

SILICONE RUBBER

Silicone Rubber (SR) merupakan salah satu bahan polimer sintetis yang berasal dari bahan *polydimethylsiloxane* (PDMS) (Braun dkk, 2016). Berdasarkan kegunaannya, secara garis besar SR dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *high temperature vulcanizing* (HTV) dan *room temperature vulcanizing* (RTV). Untuk SR dengan jenis HTV digunakan pada temperatur 55 °C-200 °C dan digunakan sebagai isolasi kabel dan bahan isolator tegangan tinggi. Sedangkan SR dengan jenis RTV digunakan pada temperatur 25 °C- 200 °C dan digunakan sebagai bahan untuk melapisi isolator keramik (Yuniarti dan Afandi, 2007).

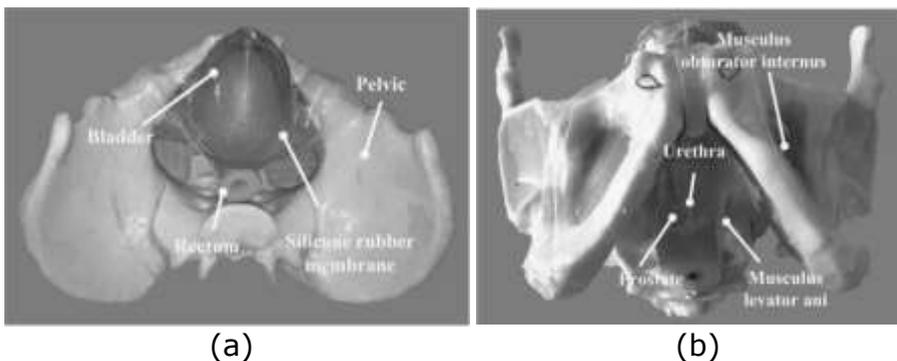


Gambar 5.1. Struktur ikatan kimia *silicone rubber* (Segura dan Burillo, 2013)

Berdasarkan struktur kimia yang dimiliki oleh SR pada Gambar 5.1, SR mayoritas tersusun dari bahan silikon yang lebih fleksibel dibandingkan dengan polimer lainnya. Kemudian jarak ikatan Si-O memiliki panjang ikatan sebesar 1,64 Å yang lebih panjang dibandingkan dengan jarak ikatan polimer organik yaitu C-C dengan panjang ikatan sebesar 1,5 Å (Anton dan Angraini, 2004). SR memiliki berat molekul yang tinggi dan memiliki tingkat (derajat) polimerisasi antara 4000 sampai dengan 10000 (Yuniarti dan Afandi, 2007). SR memiliki beberapa karakteristik, antara lain (1) memiliki sifat anti air (*hydrophobicity*) yang tinggi, (2) mempunyai sifat dielektrik yang tinggi, (3) memiliki tingkat elastisitas yang tinggi, (4) memiliki sifat kelenturan yang tetap ketika berada pada suhu yang sangat rendah, (5) memiliki daya tahan terhadap sinar ultraviolet dan (6) memiliki sifat yang sangat baik terhadap panas (Yuniarti dan Afandi, 2007; Zhou dkk, 2013; Solihin dkk, 2016; Seyedmehdi dkk, 2015).

Adanya sifat tersebut menjadikan bahan SR banyak digunakan dalam berbagai sektor industri seperti sebagai bahan untuk *outdoor polymer insulator*, sebagai bahan membran bioreaktor dan sebagai bahan untuk *power insulation* (Thongom dkk, 2011; Xiao dkk, 2008; Boutempo dkk, 2016). Selain digunakan dalam

sektor industri, Li dkk (2015) telah menggunakan bahan SR dalam bidang medis untuk membuat organ tiruan antara lain *rectum*, *musculus obturator internus*, dan *musculus levator ani* sebagai bagian dari group organ untuk aplikasi prostat *brachytherapy*. Hal ini dikarenakan SR memiliki sifat mekanik yang sama dengan otot manusia (Li dkk, 2015).



Gambar 5.2. Group organ prostat (a) ditunjukkan organ tiruan *bladder*, *rectum*, *silicone rubber membrane* dan *pelvic* (b) ditunjukkan organ tiruan *musculus oburator internus*, *urethra*, *prostate*, dan *musculus levator ani* (Li dkk, 2015).

Aplikasi lainnya, Spunei dkk (2014) menggunakan SR sebagai sarana radioproteksi dibidang radioterapi menggunakan berkas elektron. Hasil yang didapatkan menunjukkan SR mampu mengurangi penetrasi radiasi elektron dari 100% hingga menjadi 57,1% pada energi 6 MeV dengan tebal sampel sebesar 0,6 cm. Sehingga SR memiliki potensi dalam bidang medis.

BAB 6

NATURAL RUBBER

Natural Rubber (NR) merupakan cairan getah (*latex*) dari tumbuhan pohon *Hevea brasiliensis* yang diperoleh melalui proses penyadapan kulit batang pohon karet dengan menggunakan pisau sadap (Pratama, 2017). *Latex* adalah cairan getah yang didapat dari bidang sadap pohon karet antara kambium dan kulit pohon. *Latex* yang belum mengalami penggumpalan dengan atau tanpa penambahan bahan pemantap (zat anti penggumpal) akan berwarna putih seperti susu. Para petani menyadap getah karet pada waktu pagi hari. Karet yang disadap akan mengalami peristiwa koagulasi (Purbaya dkk, 2011).



(a)



(b)

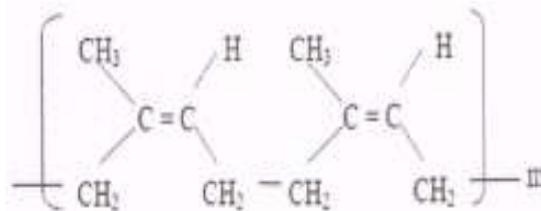
Gambar 6.1. *Natural rubber* (NR) di daerah Ungaran Kab. Semarang, Provinsi Jawa Tengah (a) proses penyadapan getah karet dan (b) NR jenis *latex*.

Koagulasi dapat terjadi baik secara alami maupun

disengaja atau adanya perlakuan khusus pada *latex* seperti penambahan bahan penggumpal (Purbaya dkk, 2011). Penggumpalan secara alami terjadi akibat aktivitas bakteri pengurai yang banyak terdapat di udara. Para petani karet umumnya menggunakan asam semut (asam formiat) yang berasal dari zat kimia untuk proses koagulasi. Mekanisme koagulasi pada karet merupakan proses penurunan pH *latex* pada titik isoelektrik. Penurunan pH pada *latex* akan membuat *latex* menjadi membeku dengan kondisi pH berkisar 4,5-4,7. Adanya asam (ion H^+) akan bereaksi dengan basa (ion OH^-) pada protein senyawa lainnya untuk menetralkan muatan listrik sehingga terjadi koagulasi pada *latex* (Pratama, 2017).

Latex atau polimer alam dengan monomer *isoprane* $(C_5H_8)_m$ terdiri dari 97% polimer *1,4 cis-polyisoprene* yang tersusun sekitar 5000 unit *isoprene* dengan rantai polimer $(C_5H_8)_m$, dimana m merupakan koefisien polimerisasi (Fachry dkk, 2012). Komposisi kadar latex segar pada umumnya terdiri atas senyawa hidrokarbon, protein, karbohidrat, lipid, senyawa organik lainnya, mineral, dan air dimana komposisi kimia pada *latex* segar adalah 25-40% karet dan 60-75% bahan bukan karet. Kandungan bukan karet ini selain air adalah protein (globulin dan havein),

karbohidrat (sukrosa, glukosa, galaktosa dan fruktosa), lipida (gliserida, sterol, dan fosfolipida). Struktur molekul karet alam digambarkan pada Gambar 6.2.



Gambar 6.2. Struktur molekul karet alam (Fachry dkk, 2012).

Komposisi ini bervariasi tergantung pada jenis tanaman, umur tanaman, musim, sistem deres dan penggunaan stimulan (Purbaya dkk, 2011). Secara umum, karet alam memiliki dua sifat yaitu sifat fisik dan sifat kimia. Sifat fisik karet alam setelah koagulasi akan berubah menjadi warna coklat. Kemudian elastisitas karet akan meningkat setelah dipanaskan, tidak larut dalam air, serta sensitif terhadap perubahan suhu. Sedangkan sifat kimia karet alam mudah teroksidasi oleh udara, dan bila karet alam terbakar akan berubah menjadi CO₂ dan H₂O (Saputra, 2016). Persentase kadar komposisi *latex* segar ditunjukkan pada tabel 6.1.

Tabel 6.1. Komposisi *latex* segar (Saputra, 2016)

Kandungan	Persentase (%)
Karet (Cis 1,4 poliisoprene)	25,0-40,0
Karbohidrat	1,0-2,0
Protein dan senyawa nitrogen	1,0-1,5
Lipid	1,0-1,5
Senyawa anorganik	0,1-1,5
Air	60-75

Faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas *latex* antara lain (Purbaya dkk, 2011):

1. Iklim

Musim hujan akan mendorong terjadinya prokoagulasi, sedangkan musim kemarau akan mengakibatkan keadaan *latex* menjadi tidak stabil.

2. Alat pengumpulan dan pengangkutan

Peralatan yang digunakan harus dijaga baik dan terbuat dari bahan aluminium maupun yang terbuat dari baja tahan karat.

3. Pengaruh pH

Perubahan pH dapat terjadi dengan penambahan asam, basa atau karena penambahan elektrolit. Penurunan pH ini akan mengganggu kestabilan atau kemantapan *latex* akibatnya *latex* akan menggumpal.

4. Pengaruh jasad renik

Setelah *latex* keluar dari pohon, *latex* akan segera tercemar oleh jasad renik yang berasal dari udara

luar atau dari peralatan yang digunakan. Jasad renik tersebut mula-mula akan menyerang karbohidrat terutama gula yang terdapat dalam serum dan menghasilkan asam lemak yang mudah menguap (asam eteris). Terbentuknya asam lemak eteris ini secara perlahan-lahan akan menurunkan pH *latex* akibatnya akan menggumpal. Sehingga makin tinggi jumlah asam lemak eteris, maka semakin buruk kualitas *latex* tersebut.

5. Pengaruh mekanis

Jika *latex* sering tergoncang akan dapat mengganggu gerakan Brown dalam sistem koloid *latex*, sehingga partikel akan bertabrakan satu sama lain dan dapat menyebabkan terpecahnya lapisan pelindung yang mengakibatkan terjadinya penggumpalan.

Pemanfaatan NR dalam berbagai sektor telah banyak dikembangkan dan bahkan dijadikan sebagai bahan penelitian. Seperti penggunaan material NR sebagai bahan pembuatan memori, untuk isolasi vibro-akustik, aplikasi sensor, untuk modifikasi bahan aspal, dan antimikroba (Wee dkk, 2017; Rahim dkk, 2018; Selvan dkk, 2016; Zancanela dkk, 2017; Mansob dkk; 2017). Dalam bidang biomedis oleh Watthanakaroon dkk tahun 2017 menggunakan NR sebagai *dressing* luka dengan menggabungkan

biopolimer untuk penyerapan eksudat, pelepasan obat, aktivitas antimikroba, dan proliferasi seluler yang mencegah invasi mikrobial induktif pada sel, dan merangsang respon sel target untuk memperbaiki proses penyembuhan luka (Wattanakaroon dkk, 2017). Kemudian di tahun yang sama Murniati dkk telah menggunakan NR yang dicampur dengan nanokomposit sebagai jaringan manusia untuk bahan pengganti kadaver dalam praktik bedah medis (Murniati dkk, 2017). Berdasarkan potensi NR tersebut maka NR sangat berpeluang untuk dikembangkan lebih lanjut dimasa depan khususnya dalam bidang biomedis.

Proses sintesis bolus dengan menggunakan bahan SR dan NR memiliki cara yang berbeda. Hal ini dikarenakan SR dan NR memiliki karakteristik yang berbeda seperti komponen kimia dan perlakuan sampel yang diberikan. Pada Bab kali ini dibahas secara rinci mengenai proses pembuatan bolus dengan kedua bahan tersebut. Berikut ini penjelasan masing-masing proses sintesis bolus.

7.1. Sintesis Bolus Berbahan SR

Proses sintesis dimulai dengan menyiapkan alat dan bahan terlebih dahulu seperti figura kayu dengan ukuran luas 17 cm x 17 cm, papan plastik, gelas ukur plastik 500 ml, gelas ukur plastik 10 ml, *mixer*, lem kayu, *silicone oil*, spatula, kuas dan tisu. Bahan SR pada pada proses sintesis bolus menggunakan *Silicone Rubber RTV-52* dalam bentuk cair yang dapat dipesan melalui toko-toko online maupun di toko kimia secara langsung. Alasan penggunaan *Silicone Rubber RTV-52* adalah bahan tersebut memiliki kekentalan yang tidak terlalu pekat sehingga sangat memudahkan untuk

proses penuangan ke dalam gelas ukur. Untuk mengeringkan SR tersebut digunakan katalis dengan merk *Bluesil Catalyst 60 R* yang satu paket dengan pembelian bahan *Silicone Rubber RTV-52*. Bolus yang akan disintesis memiliki ukuran dimensi sebesar 17 cm x 17 cm x 1 cm.

Prosedur pertama adalah membuat cetakan bolus terlebih dahulu dengan memberikan lem ke figura kayu dan dipasang di papan plastik. Ditunggu hingga benar-benar mengering dan dipastikan kembali agar setiap sisi cetakan sudah dilem secara maksimal. Setelah itu cetakan yang sudah siap dilapisi dengan *silicone oil* dengan tujuan bolus bisa dilepas dari cetakan tanpa ada yang lengket. Prosedur kedua adalah dengan melakukan perhitungan perbandingan volume antara SR dan katalis, sehingga didapatkan volume SR sebesar 278 ml dan volume katalis 11 ml. Tujuannya adalah agar proses pengerasan sampel menjadi lebih cepat dan tidak memakan waktu yang lama. Prosedur ketiga adalah dengan menuangkan SR ke dalam gelas ukur 500 ml dan katalis ke dalam gelas ukur 10 ml sesuai dengan hasil perhitungan volume. Langkah selanjutnya adalah melakukan proses pencampuran menggunakan metode *sol-gel*, adapun skema pembuatan bolus berbahan SR dapat dilihat pada Gambar 7.1



Gambar 7.1. Skema pembuatan bolus dengan bahan SR

Waktu yang diperlukan untuk bisa mengambil SR dari cetakan diperlukan waktu kurang lebih selama dua hari agar bolus benar-benar mengeras secara optimal diseluruh area. Perlu diperhatikan kembali jika bolus masih terdapat permukaan yang masih belum mengeras disarankan untuk menunggu terlebih dahulu agar sampel benar-benar mengeras secara optimal dan bisa diangkat dari cetakan tanpa ada bolus yang masih menempel karena lengket.

7.2. Sintesis Bolus Berbahan NR

Proses sintesis bolus NR dimulai dari menyiapkan alat dan bahan seperti cetakan plastik berukuran 23 cm x 16 cm x 6 cm, mistar 30 cm, gelas beaker plastik ukuran volume 1 L, gelas ukur kaca dengan volume 25

ml, pipet, spatula, dan pisau. Bahan NR yang digunakan adalah jenis *latex* yang diperoleh dari petani kebun karet di daerah Ungaran, Kabupaten Semarang, Provinsi Jawa Tengah. *Latex* yang diambil dari tempat pengumpul para petani yang telah dicampur amonia dengan kadar sebesar 25% sebagai pengawet *latex* agar tidak mudah terjadi pembekuan (koagulan) ketika dalam perjalanan.



(a)

(b)

Gambar 7.2. *Latex* yang berasal dari tempat pengumpul para petani kebun karet (a) *latex* ditampung di dalam tempat penampungan sementara dan (b) *latex* yang digunakan untuk membuat bolus NR

Bahan yang telah siap kemudian dilakukan proses pembekuan (koagulan) dengan menyiapkan *latex* sebanyak 148 ml untuk membuat bolus NR dengan ketebalan sekitar 0,5 cm. *Latex* tersebut kemudian dituangkan ke dalam cetakan plastik yang sudah disiapkan, agar terjadi proses pengentalan dan

pembekuan maka *latex* yang berada dicetakkan ditambahkan asam formiat sebanyak 15 ml ke dalam *latex* tersebut. Lalu diaduk selama 20 detik menggunakan spatula agar terjadi proses pembekuan (koagulan) yang homogen sehingga menghasilkan bolus NR dengan kualitas yang baik. Selanjutnya didiamkan hingga mengental selama kurang lebih 3 jam dan kemudian membuang cairan yang terdapat pada sampel.



Gambar 7.3. *Latex* yang telah mengental di cetakan plastik

Setelah *latex* mengental seperti ditunjukkan pada Gambar 7.3, proses selanjutnya adalah pengeringan dengan cara ditiriskan dan diletakkan di bawah sinar matahari selama kurang lebih 2 minggu. Proses pengeringan ini bertujuan untuk memisahkan cairan-cairan yang ada pada *latex*.



Gambar 7.4. *Latex* yang sedang dikeringkan dibawah sinar matahari.

Setelah *latex* mengering maka ukurannya menjadi menyusut dari ukuran semula. Untuk menyesuaikan ukuran dengan luas lapangan aplikator LINAC, penyesuaian ukuran dilakukan dengan cara memotong *latex* yang telah mengeras dengan luas lapangan sebesar 11 cm x 11 cm. Adapun prosedur pembuatan bolus NR secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 7.5.



Gambar 7.5. Prosedur pembuatan bolus NR dari bahan latex.

Karakterisasi bolus dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui tingkat homogenitas, kesesuaian dengan jenis jaringan dan kemampuan bolus dalam memberikan peningkatan persentase dosis permukaan. Pada bab ini dibahas secara rinci bagaimana melakukan tahapan-tahapan karakterisasi pada bolus sehingga diperoleh informasi mengenai bolus yang terbuat dari bahan SR dan NR.

8.1. Menentukan Nilai *Relative Electron Density* (RED)

Nilai *relative electron density* (RED) dapat ditentukan dengan terlebih dahulu melakukan pengambilan citra tomografi bolus menggunakan CT-Scan. Metode pengambilan citra tomografi bolus menggunakan metode *axial scanning* dengan tegangan dan arus tabung yang digunakan sebesar 120 kV dan 160 mA, namun penggunaan tegangan dan arus tabung dapat disesuaikan dengan pemeriksaan klinis. Hasil citra tomografi pada bolus dikirim ke komputer agar bisa dibaca nilai *CT-Number* di program *treatment*

planning system (TPS). Pada program TPS dilakukan pengambilan *CT-Number* pada citra aksial bolus dengan membuat daerah *region of interest* (ROI) sebanyak 10 daerah atau lebih dengan bentuk lingkaran. Luas ROI yang digunakan kira-kira sebesar 36,9 mm² atau disesuaikan dengan ukuran lingkaran terkecil pada masing-masing program dengan jarak antar daerah ROI sebesar 1 cm. Peletakan ROI dapat dilakukan dengan posisi sampel dalam arah aksial maupun koronal. Data *CT-Number* yang sudah didapatkan digunakan untuk mencari nilai RED bolus dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho_a = 1.052 + 0.00048N_{CT} \quad (8.1)$$

$$\rho_b = 1.000 + 0.001N_{CT} \quad (8.2)$$

dengan ρ_a adalah nilai RED dengan *CT-Number* yang lebih besar dari 100, ρ_b adalah nilai RED dengan *CT-Number* yang kurang dari 100, dan N_{CT} adalah *CT-Number* (Montaseri dkk, 2012). Untuk nilai RED masing-masing jaringan dapat dilihat pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1. Nilai RED Masing-Masing Jaringan

Jaringan	RED	Referensi
Otot	1,043	Saw dkk, 2005
Payudara	0,976	Lothfy dkk, 2015
Tulang Padat	1,512	Lothfy dkk, 2015

8.2. Menentukan Persentase Dosis Permukaan

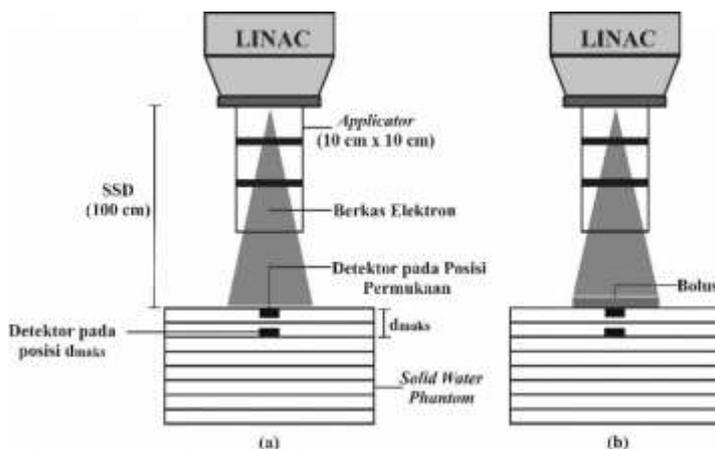
Untuk mengetahui nilai persentase dosis permukaan digunakan alat berupa *Linear Accelerator (LINAC)*, *solid phantom*, detektor *plan parallel chamber*, aplikator dengan luas lapangan 10 cm x 10 cm. Elektrometer untuk melakukan pengukuran dosis radiasi menggunakan berkas elektron dengan energi 8 dan 10 MeV. Langkah pertama adalah melakukan pengaturan *source to surface dose (SSD)* atau jarak dari sumber radiasi (kepala LINAC) dengan posisi permukaan *solid water phantom* pada jarak sebesar 100 cm menggunakan *mechanical pointer*.



Gambar 8.1. Pengaturan nilai SSD pada jarak 100 cm dari kepala LINAC ke permukaan *solid water phantom*.

Langkah selanjutnya melakukan pengukuran data

radiasi tanpa menggunakan bolus dengan meletakkan detektor *plan parallel chamber* pada posisi permukaan dan di posisi kedalaman dosis maksimum (d_{maks}) pada *solid water phantom*. Nilai d_{maks} untuk energi 8 MeV dan 10 MeV masing-masing sebesar 1,7 cm dan 2,2 cm. Setelah melakukan pengukuran tanpa menggunakan bolus, kemudian bolus diletakkan diatas permukaan *solid water phantom* yang terdapat detektor dan dilakukan proses pengukuran dengan cara yang sama pada saat tanpa menggunakan bolus. Hasil pengukuran dari detektor *plan parallel chamber* dibaca nilai muatan (*charge*) yang ditampilkan pada elektrometer dengan satuan nanocoulomb (nC). Skema pengambilan data radiasi dapat dilihat pada Gambar 8.2.



Gambar 8.2. Skema pengambilan data radiasi (a) tanpa menggunakan bolus dan (b) menggunakan bolus.

Nilai persentase dosis permukaan dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_A = \frac{D_S}{D_M} \times 100\% \quad (8.3)$$

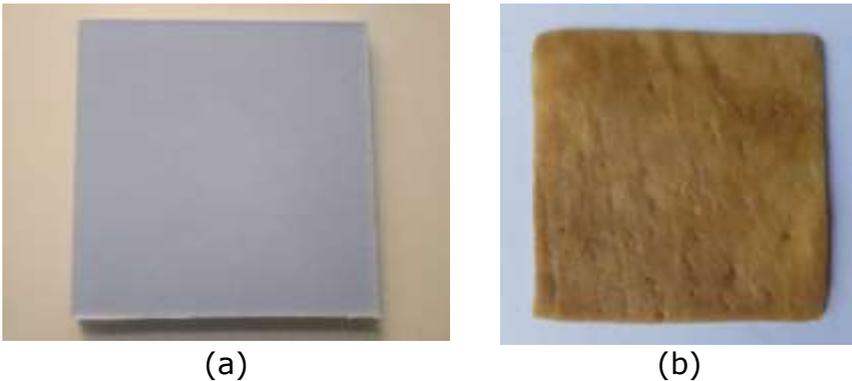
$$P_B = \frac{D_{SB}}{D_M} \times 100\% \quad (8.4)$$

dengan P_A adalah persentase dosis permukaan yang diukur tanpa menggunakan bolus, P_B adalah persentase dosis permukaan yang diukur menggunakan bolus, D_S adalah dosis radiasi yang diukur pada permukaan solid water phantom tanpa menggunakan bolus, D_{SB} adalah dosis radiasi yang diukur pada permukaan solid water phantom menggunakan bolus dan D_M adalah dosis radiasi yang diukur pada posisi d_{maks} tanpa menggunakan bolus (Günham dkk, 2003).

Hasil karakterisasi atau pengujian bolus meliputi hasil pembuatan bolus, citra tomografi bolus, nilai *relative electron density* (RED) bolus dan nilai persentase dosis permukaan bolus. Pada bab ini dijelaskan secara rinci mengenai hasil karakterisasi bolus dengan bahan SR dan NR.

9.1. Hasil Pembuatan Bolus

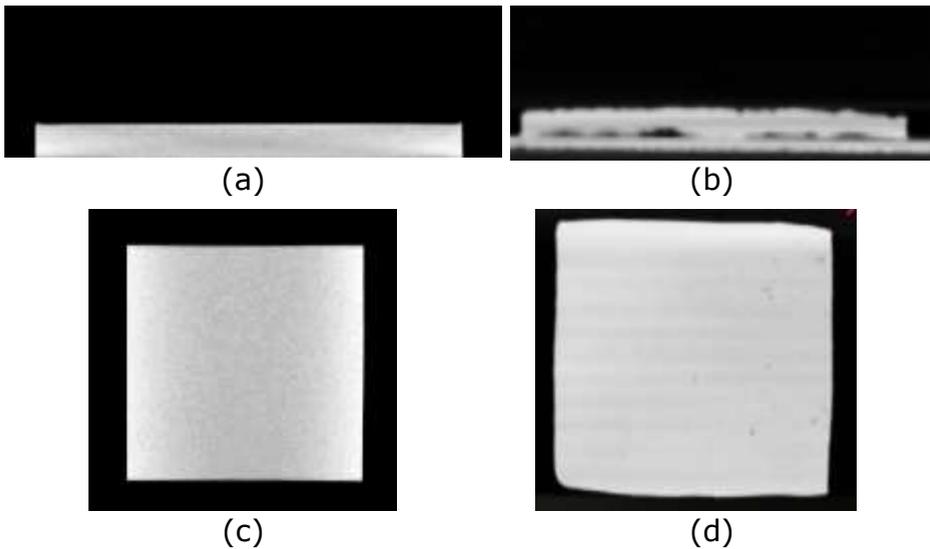
Bolus SR dan NR telah berhasil dibuat, bolus SR dan NR dari hasil sintesis dapat dilihat pada Gambar 9.1. Berdasarkan Gambar 9.1 dapat dilihat untuk bolus SR memiliki permukaan yang rata dan tidak terdapat gelembung udara pada bagian permukaannya. Hal ini dikarenakan gelembung udara pada sampel dapat dicegah dengan cara diletuskan dengan menggunakan spatula. Ukuran bolus SR memiliki dimensi panjang x lebar x tebal sebesar 17 cm x 17 cm x 1 cm. Untuk bolus NR memiliki permukaan yang terlihat tidak rata dikarenakan proses pengerasan (koagulan) yang terjadi tidak terlalu begitu baik. Untuk ukuran bolus NR yang dibuat dengan dimensi sebesar 11 cm x 11 cm x 0,5 cm.



Gambar 9.1. Bolus hasil sintesis (a) SR dan (b) NR.

9.2. Citra Tomografi Bolus

Bolus SR dan NR dilakukan proses *scanning* menggunakan *CT-Scan* untuk memperoleh citra tomografi bolus dalam arah aksial dan koronal dengan tujuan untuk mengambil nilai *CT-Number*. Citra tomografi bolus SR dan NR pada arah aksial dan koronal dapat dilihat pada Gambar 9.2. Berdasarkan pada Gambar 9.2 masing-masing sampel terlihat homogen dan tidak ada lubang-lubang kecil yang diakibatkan oleh gelembung udara. Hal ini sesuai dengan salah satu syarat utama yang harus dimiliki sebuah bolus yang dimana tidak ditemukannya gelembung udara pada setiap sisi permukaan bolus (Lothfi dkk, 2015).



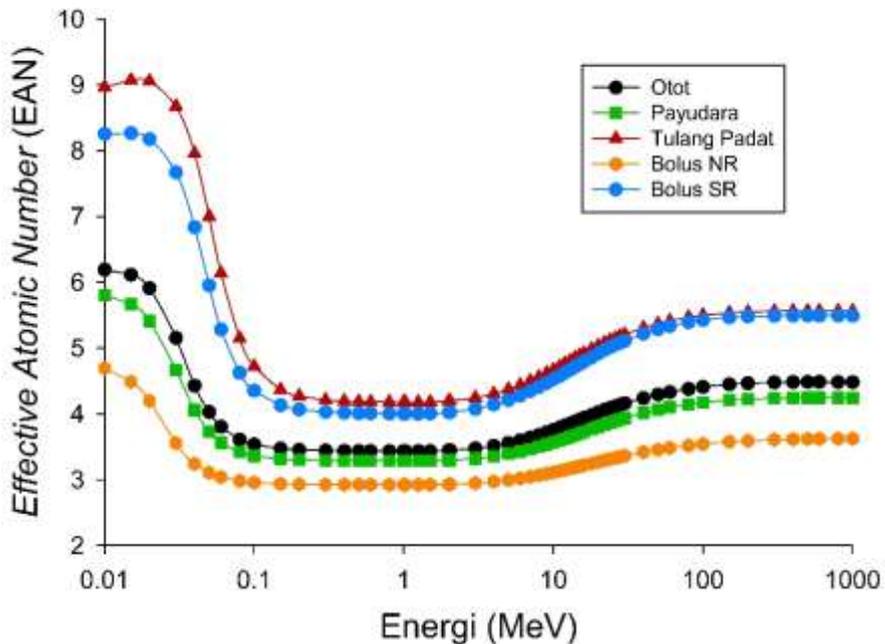
Gambar 9.2. Citra tomografi bolus (a) bolus SR dalam arah aksial, (b) bolus NR dalam arah aksial, (c) bolus SR dalam arah koronal dan (d) bolus NR dalam arah koronal.

9.3. *Relative Electron Density (RED) Bolus*

Bolus SR dan NR dilakukan proses *scanning* menggunakan *CT-Scan* untuk memperoleh citra tomografi bolus dalam arah aksial dan koronal dengan tujuan untuk mengambil nilai *CT-Number*. *CT-Number* yang telah didapatkan kemudian dimasukkan ke dalam persamaan (8.1) dan (8.2) tergantung besar nilai *CT-Number* yang didapatkan. Nilai *relative electron density* (RED) bolus SR dan NR masing-masing sebesar 1,168 dan 0,893. Jika dibandingkan dengan nilai RED bolus pada Tabel 8.1 nilai RED bolus SR berada diantara jaringan lunak (otot dan payudara) dan jaringan padat (tulang padat) sedangkan nilai RED bolus NR berada

dibawah jaringan padat dan jaringan lunak. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kandungan maupun komposisi material antara jaringan (lunak dan padat) dengan bolus. Untuk material jaringan lunak (otot dan payudara) mayoritas terdiri dari atom-atom penyusun seperti hidrogen (H), karbon (C), oksigen (O), nitrogen (N), fosfor (P), sulfur (S), klorin (Cl), natrium (Na), kalium (K) dan potasium (P) (ICRU Report 44, 1989; Torikoshi dkk, 2003). Untuk bolus SR tersusun atas ikatan polimer anorganik yaitu ikatan siloksan yang terdiri dari atom silikon (Si) dan oksigen (O) serta ikatan metil yang terdiri dari atom karbon (C) dan hidrogen (H) (Segura dan Burillo, 2013). Untuk bolus NR tersusun oleh ikatan polimer organik yaitu C_5H_8 dan terdapat kandungan air (H_2O) sehingga jika dibandingkan dengan jaringan lunak, bahan penyusun NR memiliki kemiripan dengan komposisi jaringan lunak. Jaringan padat (tulang padat) terdiri dari fase mineral, *hydroxyapatite* ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$), fase organik dan air (Boskey, 2013), sehingga tulang padat tersusun atas atom dengan nomor atom tinggi dibandingkan dengan nomor atom penyusun jaringan lunak dan bolus. Sehingga kepadatan material memberikan pengaruh pada serapan bahan terhadap sinar-x yang diterima oleh bahan tersebut.

Nilai RED bolus yang telah diketahui memiliki peran penting ketika dilakukan proses perhitungan distribusi dosis pada saat pasien menggunakan bolus, sehingga dapat diketahui berapa besar estimasi dosis radiasi yang diterima oleh pasien pada area permukaan kulit maupun di bawah permukaan kulit (Thomas, 1999; Montaseri dkk, 2012). Untuk memastikan kembali hasil kesesuaian bolus dengan jenis jaringan dilakukan sebuah perhitungan berdasarkan komposisi variasi atomik masing-masing bolus dan berbagai jaringan menggunakan perhitungan *effective atomic number* (EAN). Perhitungan EAN menggunakan program Auto Zeff Version 1.7 yang telah dikembangkan oleh Taylor dkk (2012). Adapun hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 9.3. Berdasarkan Gambar 9.3 dapat dilihat bahwa bolus SR dan NR sesuai dengan nilai RED yang dihasilkan dengan SR berada diantara jaringan lunak dan padat, sedangkan NR berada dibawah jaringan lunak. Sehingga bisa menjadi salah satu alternatif karakterisasi selain menggunakan nilai RED.

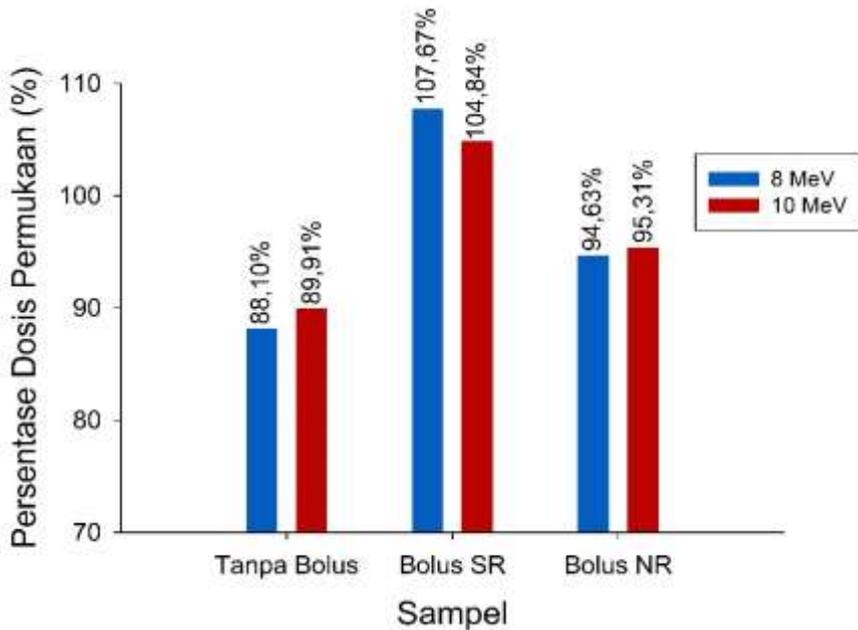


Gambar 9.3. Grafik *effective atomic number* (EAN) untuk bolus (SR dan NR) dan beberapa jaringan.

9.4. Persentase Dosis Permukaan

Bolus SR dan NR masing-masing dilakukan pengujian menggunakan LINAC untuk mengetahui seberapa besar persentase dosis permukaan yang dihasilkan pada berkas elektron dengan energi 8 MeV dan 10 MeV. Berdasarkan dari hasil pengukuran dan perhitungan yang telah dilakukan diperoleh hasil persentase dosis permukaan untuk bolus SR dan NR yang ditampilkan pada Gambar 9.4. Pada Gambar 9.4 dapat dilihat nilai persentase dosis permukaan yang dihasilkan pada saat tanpa menggunakan bolus sebesar

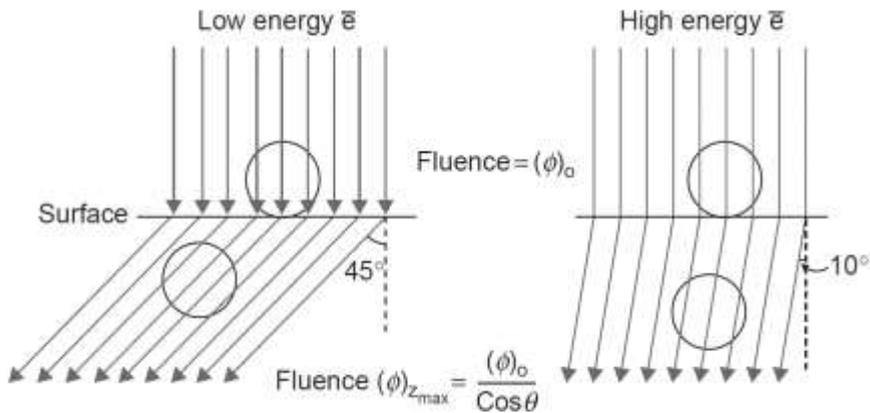
88,10% dan 89,91% pada energi 8 MeV dan 10 MeV. Pada saat menggunakan bolus SR nilai persentase dosis permukaan menjadi 107,67% dan 104,84% untuk energi 8 MeV dan 10 MeV. Sedangkan untuk bolus NR menghasilkan persentase dosis permukaan sebesar 94,63 % dan 95,31% pada energi 8 MeV dan 10 MeV.



Gambar 9.4. Grafik persentase dosis permukaan untuk bolus SR dan NR.

Hasil persentase dosis permukaan pada Gambar 9.4 menunjukkan semakin tinggi energi radiasi yang digunakan maka persentase dosis permukaan tanpa menggunakan bolus menjadi lebih meningkat (Podgorsak, 2005). Peningkatan ini terjadi dikarenakan adanya perbedaan hamburan (*scattering*) yang terjadi

pada saat partikel elektron melewati medium (*solid phantom*). Untuk berkas elektron dengan energi rendah, elektron menjadi lebih mudah terhambur pada saat berinteraksi dengan medium (*solid phantom*), akibatnya *fluence* berkas elektron menjadi lebih meningkat karena sudut hamburan (θ) yang semakin besar seperti yang ditampilkan pada Gambar 9.5 (Podgorsak, 2005; Khan dan Gibbons, 2014).



Gambar 9.5. Ilustrasi peningkatan persentase dosis permukaan karena perbedaan hamburan (*scattering*) yang berbeda antara energi berkas elektron yang rendah dengan energi berkas elektron yang tinggi (Khan dan Gibbons, 2014).

Hal ini mengakibatkan daerah *build up* yang terjadi tidak terlalu dalam setelah melewati permukaan *solid phantom*, sehingga rasio dosis permukaan terhadap dosis maksimum menjadi lebih kecil pada pemakaian elektron dengan energi rendah (Elia dkk, 2012). Namun secara keseluruhan peningkatan persentase dosis

permukaan di *solid phantom* belum mencapai 100%. Untuk meningkatkan nilai persentase dosis permukaan maka digunakan sebuah bolus dengan lapisan ketebalan yang seragam berkisar 0,5 cm sampai dengan 1,5 cm (Podgorsak, 2005; Demir dkk, 2018).

Hasil tersebut menunjukkan penggunaan bolus SR menghasilkan nilai persentase dosis permukaan diatas 100% dibandingkan dengan bolus NR. Hal ini dikarenakan bolus NR memiliki ketebalan sebesar 1 cm sedangkan bolus SR memiliki ketebalan sebesar 0,5 cm. Sehingga bolus dengan ketebalan 1 cm membuat penetrasi partikel elektron menjadi lebih rendah dikarenakan berkurangnya energi kinetik elektron dan menghasilkan persentase dosis permukaan yang lebih besar. Namun, untuk bolus SR dapat dilihat semakin tinggi energi radiasi yang digunakan menghasilkan penurunan nilai persentase dosis permukaan, sedangkan bolus NR menghasilkan peningkatan persentase dosis permukaan seiring bertambahnya energi radiasi yang diberikan. Seharusnya secara teori, pada saat menggunakan bolus SR persentase dosis permukaan yang digunakan mengalami peningkatan akan tetapi tidak sesuai dengan teori. Hal ini bisa dikarenakan faktor ketebalan antara bolus SR dan NR yang kemungkinan besar menghasilkan sebuah

elektron sekunder. Ketika partikel elektron dengan energi tinggi melewati bolus SR terjadi interaksi dengan partikel penyusun SR berupa tumbukan elastis maupun inelastis yang menyebabkan terjadinya pelepasan elektron sekunder sebagai akibat proses ionisasi, sehingga elektron sekunder tersebut bisa melakukan penetrasi lebih dalam menuju ke posisi kedalaman dosis maksimum (d_{maks}). Peningkatan persentase dosis permukaan pada bolus NR terjadi sebagai akibat adanya radiasi hambur (*scatter radiation*) ketika partikel elektron melewati bolus NR. Bolus dengan ketebalan kecil mengakibatkan elektron lebih mudah mengalami hamburan dibandingkan dengan bolus yang memiliki ketebalan lebih besar. Sehingga nilai persentase dosis permukaan yang dihasilkan meningkat seiring dengan bertambahnya energi radiasi.

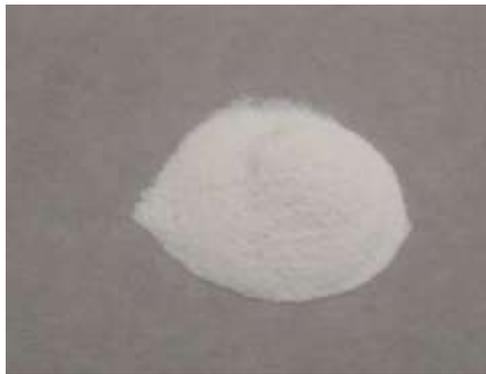
Material SR telah berhasil disintesis dan berfungsi dengan baik sebagai bolus untuk aplikasi radioterapi dengan menggunakan berkas elektron. Meskipun demikian, masih terus dilakukan pengembangan dengan melakukan penambahan material kedalam SR yang dikenal sebagai material komposit. Pada bab ini akan dibahas mengenai pengembangan dari pembuatan bolus SR menggunakan material komposit. Material komposit merupakan suatu material yang kompleks dimana terkomposisikan dari dua material atau lebih yang digabungkan atau disatukan secara bersamaan pada skala makroskopik membentuk suatu produk yang berguna, yang didesain untuk menghasilkan kualitas maupun sifat terbaik dari suatu material (Lutfi, 2017).

Material komposit yang digunakan dalam pengembangan bolus SR adalah silika. Material silika merupakan senyawa hasil polimerisasi asam silikat yang tersusun dari rantai satuan SiO_4 tetrahedral dengan formula umum SiO_2 . Di alam senyawa silika ditemukan dalam beberapa bahan alam seperti pasir, kuarsa, gelas, dan sebagainya. Sedangkan sebagai

senyawa sintesis berbentuk amorph (Sulastri dan Kristianingrum, 2010). Silika mempunyai sifat kimia yaitu berwarna putih (dalam keadaan murni), berat molekul sebesar 60,1 dan kerapatan bahan sebesar 2,2 gr/cm³. Silika termasuk material yang tidak mudah terbakar, memiliki stabilitas yang baik pada suhu tinggi, dan silika juga merupakan material yang tidak menghantarkan listrik (isolator). Berdasarkan karakteristiknya material silika telah banyak digunakan dalam bidang industri seperti elektronik dan penyegelan produk (*sealing products*). Lalu, penggunaan material komposit silika pada SR telah banyak dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan densitas dan sifat mekanik material SR (Namitha dkk, 2015; Dengke dkk, 2004; Wu dkk, 2016) sehingga silika dapat memberikan peningkatan sifat fisis dari material SR.

Bagaimana cara mensintesis bolus SR dengan komposit silika? Pada proses sintesis bolus SR-silika, bolus dibuat dengan ukuran dimensi panjang x lebar x tebal sebesar 12 cm x 12 cm x 0,5 cm. Kemudian dilakukan penambahan material silika dengan variasi persentase sebesar 0%, 2%, 4% dan 6% dari massa SR dengan volume 72 cm³. Masing-masing sampel diberikan kode nama A, B, C dan D. Silika yang

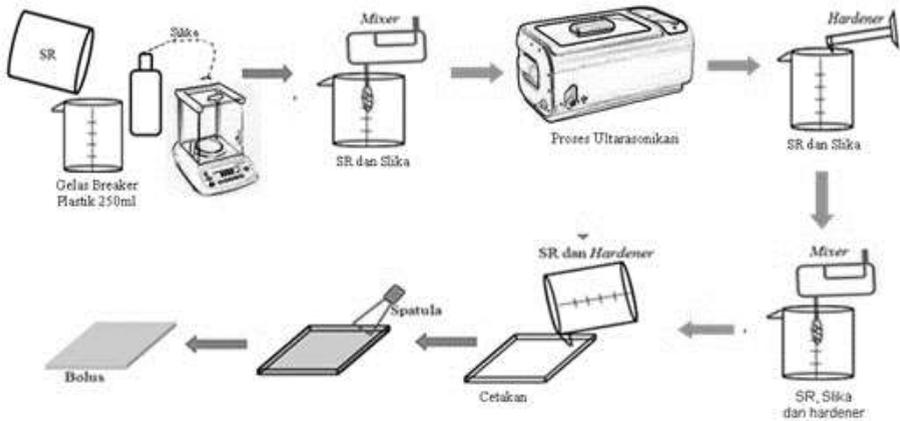
digunakan berasal dari proses pengolahan limbah geotermal dari pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTPB) yang telah disintesis di Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika, Universitas Diponegoro dengan kemurnian silika sebesar 75%.



Gambar 10.1. Serbuk silika dengan kemurnian 75% yang berasal dari limbah geotermal pada pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTPB).

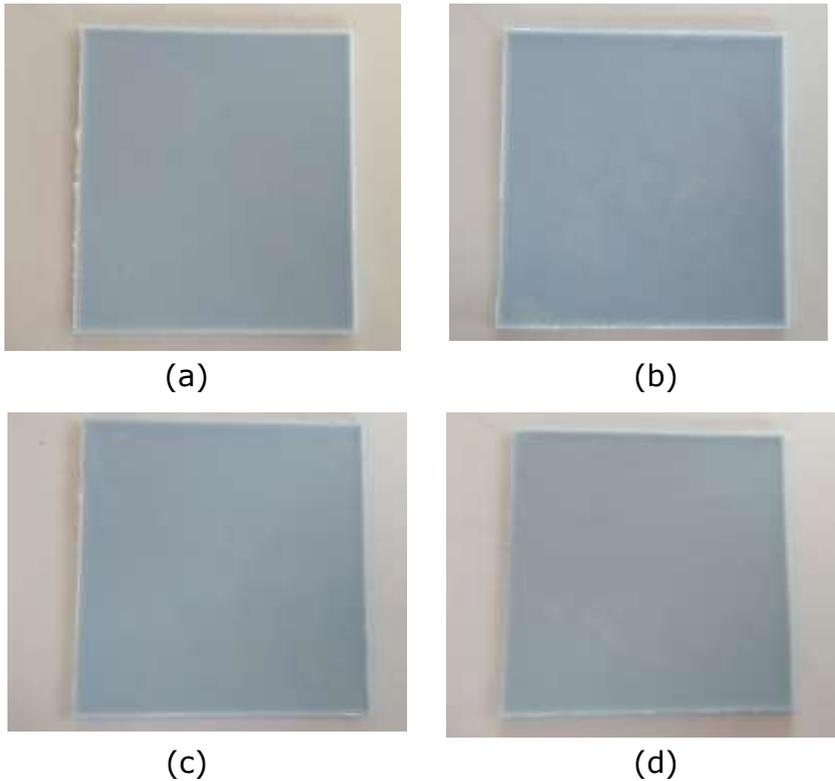
Proses sintesis bolus SR menggunakan komposit silika sedikit berbeda dengan proses sintesis bolus SR tanpa menggunakan komposit seperti yang telah dijelaskan pada Bab 7. Perbedaan tersebut adalah adanya penambahan proses ultrasonifikasi yang dilakukan selama 30 menit menggunakan alat *ultrasonic clean bath*. Tujuan melakukan proses ultrasonifikasi adalah untuk menghomogenkan proses pencampuran antara material SR dengan komposit silika. Adapun proses sintesis bolus SR-silika dapat

dilihat pada Gambar 10.2.



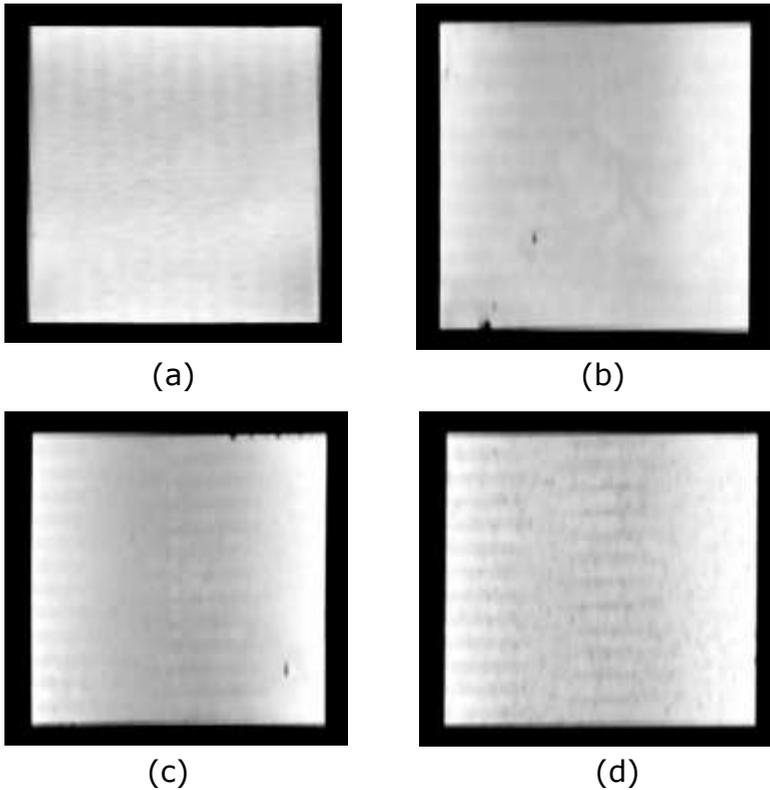
Gambar 10.2. Proses pembuatan bolus SR-silika.

Hasil sintesis bolus SR-silika ditunjukkan pada Gambar 10.3. Berdasarkan Gambar 10.3, bolus SR-silika terlihat sama dengan bolus SR tanpa menggunakan silika. Hal ini dikarenakan komposit silika telah tecampur secara merata (homogen) ke dalam material SR dan tidak ada bekas gelembung udara pada bagian permukaannya.



Gambar 10.3. Hasil sintesis bolus (a) Bolus SR, (b) Bolus SR-silika 2% (c) Bolus SR-silika 4% dan (d) Bolus SR-silika 6%.

Karakterisasi selanjutnya adalah menggunakan *CT-Scan* untuk mengetahui nilai *relative electron density* (RED). Berdasarkan hasil *scanning* diperoleh citra tomografi bolus dalam arah koronal yang ditunjukkan pada Gambar 10.4. Berdasarkan citra tomografi tersebut dapat dilihat bahwa setiap sampel terlihat homogen dan tidak terdapat adanya gelembung-gelembung udara.



Gambar 10.4. Citra tomografi bolus dalam arah koronal (a) Bolus SR, (b) Bolus SR-silika 2% (c) Bolus SR-silika 4% dan (d) Bolus SR-silika 6%.

Nilai RED bolus diambil menggunakan metode yang sama seperti yang dijelaskan pada Bab 8. Adapun hasil RED masing-masing bolus ditunjukkan pada tabel 10.1. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan komposit silika memberikan peningkatan nilai RED bolus seiring dengan bertambahnya material komposit silika yang diberikan. Hal ini dikarenakan silika telah meningkatkan densitas dari material SR, adanya

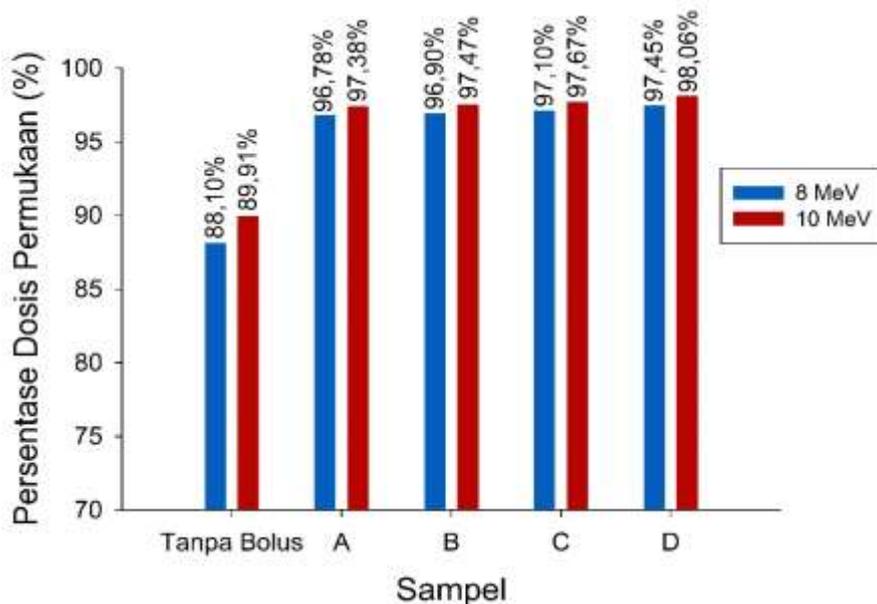
peningkatan densitas ini menyebabkan atom-atom penyusun material SR mempunyai rapat elektron yang tinggi sehingga nilai RED semakin tinggi. Jika dibandingkan dengan jenis jaringan pada Tabel 8.1 menunjukkan bolus SR-silika masih berada diantara nilai RED jaringan padat dengan jaringan lunak. Namun untuk melakukan perhitungan *effective atomic number* (EAN) menggunakan bantuan software Auto Zeff masih belum bisa dilakukan karena belum diketahui komposisi atom-atom penyusunnya. Hal ini dikarenakan jika menggunakan alat SEM EDS memiliki keterbatasan berupa tidak bisa mengukur jumlah komposisi atom hidrogen (H) sehingga diperlukan alat lain yang bisa mendeteksi komposisi atom H pada suatu material.

Tabel 10.1. Nilai *Relative Electron Density* Bolus SR-Silika

Sampel	<i>Relative Electron Density</i>
A	1,167
B	1,172
C	1,174
D	1,186

Karakterisasi selanjutnya adalah menggunakan alat *linear accelerator* (LINAC) untuk mencari nilai persentase dosis permukaan dengan berkas elektron. Energi yang digunakan sama yaitu 8 MeV dan 10 MeV.

Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 10.5.



Gambar 10.5. Persentase dosis permukaan untuk masing-masing bolus.

Berdasarkan Gambar 10.5, nilai persentase dosis permukaan pada saat tanpa menggunakan sampel untuk energi 8 MeV dan 10 MeV masing-masing sebesar 88,10% dan 89,91%. Pada saat menggunakan bolus terjadi peningkatan persentase dosis permukaan walaupun belum mencapai 100%. Untuk bolus A menghasilkan nilai persentase dosis permukaan sebesar 96,78% dan 97,38% pada energi 8 MeV dan 10 MeV. Kemudian terus meningkat untuk bolus B, C dan D dengan persentase dosis permukaan yang tertinggi adalah sampel D dengan nilai sebesar 97,45%

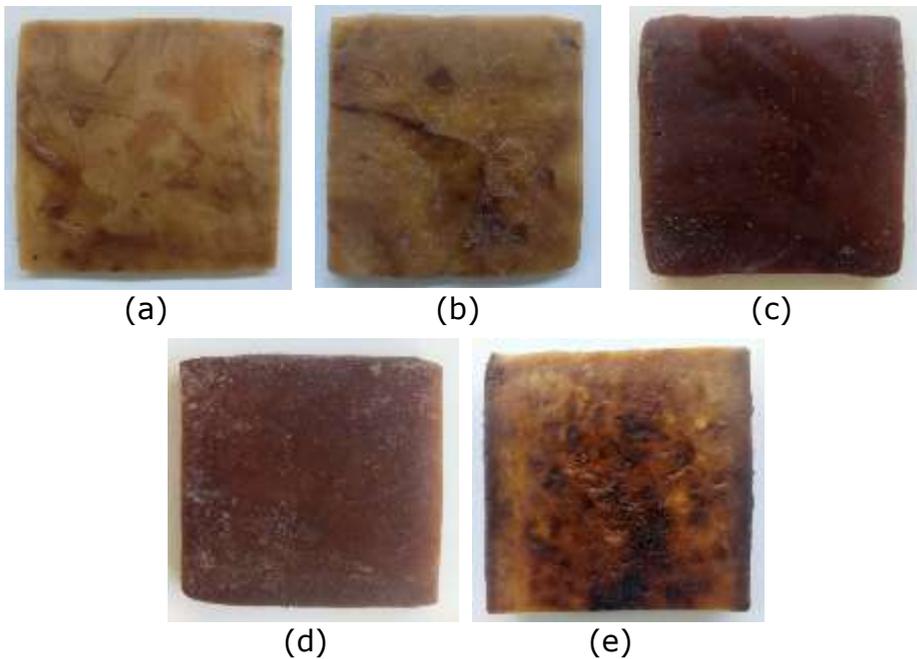
dan 98,06% untuk energi 8 MeV dan 10 MeV. Hasil ini menunjukkan penggunaan komposit silika bisa memberikan kontribusi yang baik untuk meningkatkan persentase dosis permukaan dengan ketebalan sampel sebesar 0,5 cm. Hal ini dikarenakan material komposit silika memberikan kenaikan densitas pada material SR (Namitha, 2015). Semakin besar kerapatan materialnya maka memiliki nilai *stopping power* yang lebih kecil sehingga partikel elektron akan sedikit mengalami kehilangan energi kinetik dan membuat dosis di area permukaan *solid phantom* menjadi lebih bertambah (Lambert, 1999). Adanya penambahan komposit silika menghasilkan hamburan yang lebih banyak sehingga penetrasi partikel elektron menjadi berkurang dan meningkatkan nilai persentase dosis permukaan. Kedepannya diharapkan dilakukan pengembangan penelitian lanjutan untuk membuat bolus SR berkomposit silika dengan variasi ketebalan untuk mencari nilai optimasi 100% dan bisa menggunakan material komposit lain untuk dilakukan pengembangan bolus lebih lanjut.

Bolus NR pada bab sebelumnya telah berhasil dibuat dengan ketebalan 0,5 cm dan berhasil memberikan peningkatan persentase dosis permukaan menggunakan berkas elektron. Namun, masih terus dilakukan berbagai pengembangan salah satunya adalah variasi ketebalan. Berbeda dengan bolus SR yang dapat ditambahkan dengan material komposit, untuk bolus NR tidak bisa ditambahkan dengan material komposit. Hal ini dikarenakan bahan NR dari getah pohon karet tidak berhasil menyatu dengan material komposit silika dan bila dilakukan proses pengadukan menggunakan *mixer* maka akan terjadi pengumpalan (koagulasi) pada material NR. Sehingga pengembangan bolus NR saat ini adalah menggunakan variasi ketebalan.

Proses pembuatan bolus NR dengan variasi ketebalan bisa dikatakan sama dengan metode sebelumnya (Bab 8) namun yang membedakan adalah volume NR yang digunakan untuk mendapatkan variasi ketebalan. Variasi ketebalan yang digunakan adalah 0,2 cm, 0,4 cm, 0,6 cm, 0,8 cm dan 1,0 cm dengan luas lapangan sebesar 11 cm x 11 cm. Adapun hasil sintesis

Bolus Berbahan *Silicone* dan *Natural Rubber*: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Pada Radioterapi | 2018

dapat dilihat pada Gambar 11.1.



Gambar 11.1. Bolus NR dengan berbagai variasi ketebalan (a) 0,2 cm, (b) 0,4 cm, (c) 0,6 cm, (d) 0,8 cm dan (e) 1,0 cm.

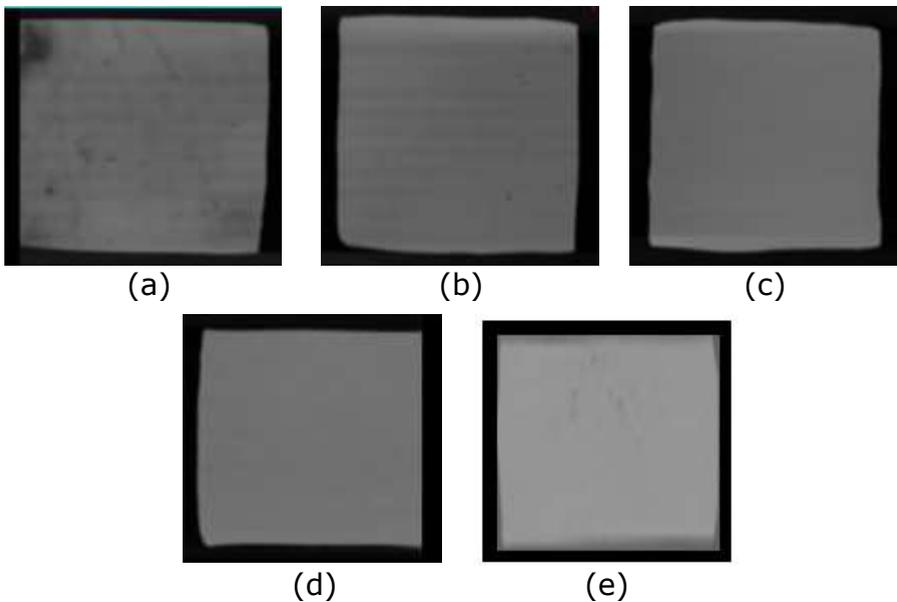
Gambar 11.1 dapat dilihat bahwa untuk masing-masing bolus memiliki warna permukaan yang berbeda-beda. Bolus dengan ketebalan 0,2 cm dan 0,4 cm memiliki warna coklat-kekuningan, bolus dengan ketebalan 0,6 cm dan 0,8 cm memiliki warna coklat-kehitaman, sedangkan bolus dengan ketebalan 1,0 cm memiliki warna kuning-kehitaman pada permukaannya. Secara umum, warna NR setelah mengalami penggumpalan (koagulasi) dan pengeringan akan berubah warna menjadi coklat (Purbaya dkk, 2011).

Bolus Berbahan Silicone dan Natural Rubber: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Pada Radioterapi | 2018

Perbedaan warna dari masing-masing bolus dikarenakan adanya beberapa faktor yang mempengaruhi diantaranya umur tanaman, pengaruh musim, sistem deres dan penggunaan stimulan serta adanya pengaruh iklim pada saat proses pengambilan dan pembuatan sampel. Bolus NR dengan warna coklat-kehitaman dibuat pada musim hujan, sedangkan bolus NR berwarna coklat-kekuningan dan kuning-kehitaman dibuat pada musim kemarau. Jika terjadi musim hujan akan mengakibatkan *latex* NR menjadi tidak stabil dikarenakan banyaknya jumlah air yang terkandung. Sedangkan pada musim kemarau akan mendorong terjadinya *prokoagulasi* (Purbaya dkk, 2011). Selain itu, *latex* NR yang diperoleh berasal dari berbagai pohon dengan umur yang kemungkinan berbeda-beda telah disatukan dalam suatu wadah penampungan, sehingga bolus NR memiliki bentuk dan warna permukaan yang tidak merata. Meskipun demikian, bentuk permukaan bolus NR tidak menunjukkan adanya gelembung udara.

Karakterisasi selanjutnya adalah menggunakan CT-Scan untuk melihat homogenitas bolus pada masing-masing ketebalan dengan arah koronal dan mencari nilai *relative electron density* (RED). Adapun citra bolus dari hasil proses *scanning* pada arah koronal

ditampilkan pada Gambar 11.2.



Gambar 11.2. Citra tomografi bolus dalam arah koronal untuk ketebalan (a) 0,2 cm, (b) 0,4 cm, (c) 0,6 cm, (d) 0,8 cm dan (e) 1,0 cm.

Berdasarkan Gambar 11.2, masing-masing bolus menunjukkan tingkat keseragaman (homogenitas) yang baik dan tidak ada ditemukan gelembung-gelembung udara. Walaupun bentuk permukaan yang dihasilkan tidak rata seperti bolus SR, meskipun demikian sudah memenuhi salah satu syarat utama bolus yaitu tidak ditemukan adanya gelembung udara pada bagian permukaan bolus (Lothfy dkk, 2015).

Penentuan nilai RED bolus dilakukan dengan cara yang sama seperti yang dijelaskan pada Bab 8, adapun

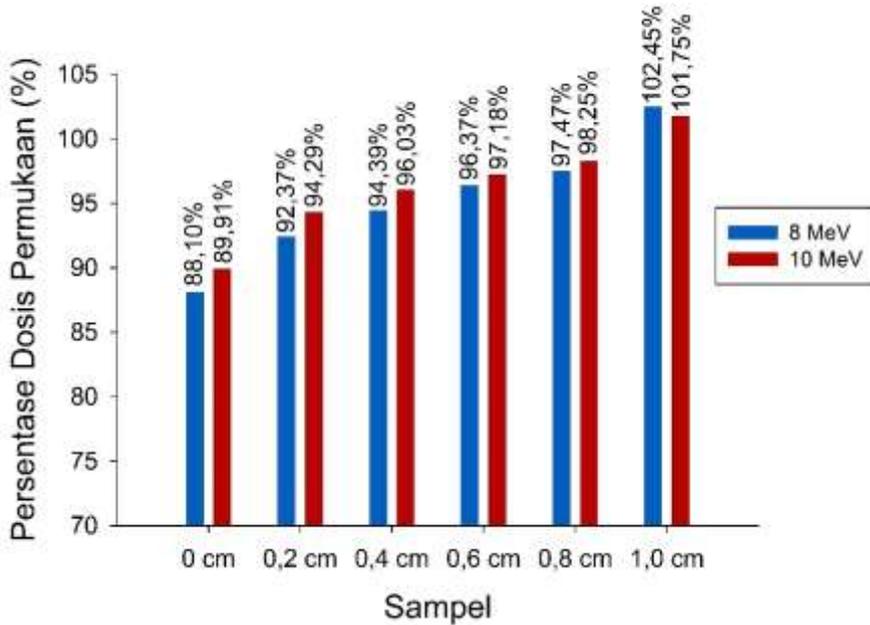
nilai RED bolus ditunjukkan pada Tabel 11.1. Berdasarkan Tabel 11.1, nilai RED bolus untuk setiap ketebalan memiliki hasil yang berbeda. Dimana semakin tebal bolus NR menyebabkan terjadinya peningkatan nilai RED walaupun tidak terlalu signifikan antar bolus. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kepadatan, semakin tebal bolus NR maka bolus tersebut memiliki kepadatan yang lebih meningkat. Selain itu, perbedaan ini terjadi karena kemungkinan besar disebabkan adanya berbagai macam kandungan atau komposisi bahan NR jenis *latex* seperti air, protein (*globulin* dan *havein*), karbohidrat (sukrosa, glukosa, galaktosa dan fruktosa) dan *lipida* (*gliserida*, *sterol*, dan *fosfolipida*) (Purbaya dkk, 2011). Pada penjelasan sebelumnya masing-masing bolus dibuat pada perbedaan musim sehingga terjadi perbedaan jumlah kandungan pada bahan NR.

Tabel 11.1. Nilai *Relative Electron Density* Bolus NR

Sampel	<i>Relative Electron Density</i>
0,2 cm	0,754
0,4 cm	0,755
0,6 cm	0,790
0,8 cm	0,852
1,0 cm	0,903

Pengujian menggunakan LINAC dilakukan untuk

mengetahui pengaruh ketebalan bolus NR terhadap persentase dosis permukaan yang dihasilkan dan hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 11.3.



Gambar 11.3. Persentase dosis permukaan untuk masing-masing ketebalan bolus NR.

Berdasarkan Gambar 11.3, nilai persentase dosis permukaan bolus tanpa menggunakan bolus untuk energi 8 MeV dan 10 MeV sebesar 88,10% dan 89,91%. Ketika menggunakan bolus dengan ketebalan awal 0,2 cm menghasilkan nilai sebesar 92,37% dan 94,29% untuk energi 8 MeV dan 10 MeV. Seiring dengan bertambahnya ketebalan bolus maka terjadi peningkatan persentase dosis permukaan dengan nilai maksimum pada bolus NR 1,0 cm sebesar 102,45%

dan 101,75% untuk energi 8 MeV dan 10 MeV. Hasil ini sesuai dengan teori yang menunjukkan semakin tebal bolus NR pada tiap energi maka semakin tinggi dosis permukaan yang dihasilkan (Podgorsak, 2005).

Peningkatan persentase dosis permukaan pada bolus NR terjadi dikarenakan adanya hamburan (*scattering*) elektron yang dialami oleh masing-masing sampel ketika partikel elektron melewati sebuah medium (*solid phantom*). Ketika elektron melewati sebuah medium, maka elektron tersebut akan berinteraksi dengan atom pada medium melalui interaksi *Coulomb*. Sehingga menyebabkan elektron menjadi kehilangan energi kinetik (kehilangan energi radiasi) atau terjadi perubahan arah (hamburan). Dengan demikian untuk bolus yang ketebalannya kecil membuat elektron lebih mudah mengalami hamburan dibandingkan bolus yang memiliki ketebalan lebih besar. Namun pada bolus NR dengan ketebalan 1 cm, diperoleh hasil yang sama dengan bolus SR pada Bab 9. Dimana pada saat energi berkas elektron yang digunakan semakin bertambah persentase dosis permukaannya menjadi lebih kecil. Hal ini bisa disebabkan, pada saat partikel elektron melewati bolus NR yang lebih tebal akan mengalami kemungkinan hamburan yang tidak terlalu banyak menyebabkan

energi kinetik dari elektron pada saat setelah melewati bolus masih ada tersisa cukup banyak. Sehingga partikel elektron tersebut dapat digunakan untuk melakukan penetrasi ke dalam *solid phantom* dengan menghasilkan elektron sekunder yang dapat bergerak menuju ke posisi d_{maks} .

Melihat keunikan yang terjadi pada bolus dengan ketebalan 1 cm, diperlukan suatu penelitian yang lebih lanjut agar dapat dilakukan analisa lebih dalam mencari penurunan persentase dosis permukaan. Kemudian, bolus NR yang sudah dibuat pada penelitian ini, secara umum telah memenuhi fungsi untuk memberikan peningkatan persentase dosis permukaan. Bolus NR ke depannya harus mempertimbangkan variasi ketebalan yang sesuai dengan kebutuhan secara klinis.

Daftar Pustaka

- Anton, A., dan Angraini, A. 2004. *Karakteristik Permukaan Bahan Isolator Karet Silikon Terhadap Kemampuan Menolak Air*. Jurnal R & B 4, pp. 44-50.
- Azizah, M., Miltiva Dian., Herlida, S., dan Sandy, K.Y.P. 2016. *Verifikasi Dosis Radiasi Kanker menggunakan TLD-100 pada Pasien Kanker Payudara dengan Penyinaran Open System*. Jurnal Fisika Unand 5, pp. 147-152.
- Barret, A., Dobbs, J., Morris, S., and Roques, T. 2009. *Practical Radiotherapy Planning (Fourth Edition)*. Macmilan Publishing Solutions: Italy.
- Bountempo, R.C., Dellalibera, A.A., Costa, E.C., Pissolato, J., Mello, D.R., and Mei, L.H.I. 2016. *Electrical assessment of commercial 6.0-kV HTV silicone rubber for power insulation*. Measurement 89, pp. 114–119.
- Boskey, A.L. 2013. *Bone composition: Relationship to Bone Fragility and Antiosteoporotic Drug Effects*. BoneKey Repots 2, pp.1-11.
- Braun, U., Lorenz, E., Weimann, C., Sturm, H., Karimov, I., Ettl, J., Meier, R., Walter, A., Wohlgemuth., Berger, H., and Wildgruber, M. 2016. *Mechanic and surface properties of central-venous port catheters after removal: A comparison of polyurethane and silicon rubber materials*. Journal of The Mechanical Behavior Of Biomedical Material 64, pp. 281-291.

- Chang, F., Chang, P., Benson., K., and Share, F. 1992. *Study of Elasto-Gel Pads Used as Surface Bolus Material in High Energy Photon and Electron Therapy*. J. Radiation Oncology. Biology. Physics 22, pp. 191-193.
- Demir, B., Okutan, M., Cakir, A., Goksel, E., and Bilge, H. 2008. *The Effect of Oblique Electrom Beams to the Surface Dose Under the Bolus*. Medical Dosimetry 34, pp. 311-316.
- Dengke, C., Xishan, W., Lei, L., and Jianhui, Y. 2004. *Study on RTV silicone rubbed SiO₂ electrical insulation nanocomposites*. International Conference on Solid Dielecitics, Toulouse, France, pp. 1-4.
- Elia, A.B.K., Djakaria, H.M., Amalia, T., dan Arianty, D. 2012. *Karakteristik dan Profil Electron Beam Therapy*. Radioterapi dan Onkologi Indonesia 3, pp. 35-64.
- Fachry, A.R., Sari, T.I., Putra, B.A., dan Kristianto, D.A. 2012. *Pengaruh Penambahan Filler Kaolin Terhadap Elastisitas dan Kekerasan Produk Souvenir dari Karet Alam (Hevea Brasiliensis)*. Prosiding SNTK Topi, pp. 205-210.
- Fitriyatuzzakiyyah, N., Sinuraya, R.K., Puspitasari, I.M. *Terapi Kanker dengan Radiasi: Konsep Dasar Radioterapi dan Perkembangannya di Indonesia*. Jurnal Farmasi Klinik Indonesia 6 No 4, hal. 311-320.
- Ghorbani, M., Tabatabaei, Z.S., Noghreiyan, A.V., Vosoughi, H., and Knaup, C. 2015. *Effect of Tissue Composition on Dose Distribution in Electron Beam Radiotherapy*. Journal of Biomedical & Physics Engineering 5(1), pp. 15-24.

- Günhan, B., Kemikler, G., and Koca, A. 2003. *Determination of Surface Dose and The Effect of Bolus To Surface Dose In Electron Beams*. Medical Dosimetry 28, pp. 193-198.
- International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) Report 44. 1989. *Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement*. Bethesda, Maryland, USA.
- Khan, F.M., and Gibbons J.P. 2014. *The Physics of Radiation Therapy Fiveth Edition*. Philadelphia: Wolters Kluwer.
- Khifitiyah, M., Hidayanto, E., dan Arifin, Z. 2014. *Analisa Kurva Percentage Depth Dose (PDD) dan Profile Dose Untuk Lapangan Radiasi Simetri dan Asimetri Pada Linear Accelerator (LINAC) 6 dan 10 MV*. Youngster Physics Journal 3, pp. 279-286.
- Lambert, G.F., Richmond, N.D., Kermode, R.H., and Porter D.J.T. 1999. *The Use of High Density Metal Foils to Increase Surface Dose in Low-Energy Clinical Electron Beams*. Radiotherapy and Oncology 53, pp. 161-166.
- Li, P., Jiang, S., Yu, Y., Yang, J., and Yang, Z. 2015. *Biomaterial characteristics and applicatoion of silicone rubber and PVA hydrogels mimicked in organ groups for prostate brachytherapy*. Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Material 49, pp. 220-234.
- Lothfy, F.A., Mustafa, I.S., Yahya, Z.S., Ishak, S.A., and Daud, N. M. 2015. *To Study The Durian Seed As A New Substrate For Bolus In Radiotherapy*. Proceedings of Sixteenth The IIER International Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 110-113.
- Lutfi, Z. 2017. *Studi Sifat Mekanik dan Fisik Bahan Akustik Silicone Rubber Berpenguat Filler*

Cangkang Kelapa Sawit. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November: Surabaya.

- Mansob, R. A. A., Ismail, A., Rahmat, R.A.O.K., Borhan, M.N., Alsharif, J.M.A., Albrka, S.I., and Karim, R.M. 2017. *The Performance of Epoxidised Natural Rubber Modified Asphalt Using Nano-Alumina as Additive*. Construction and Building Materials 155, pp. 680-687.
- Mayles, P., Nahum, A., and Rosenwald, J.C. 2007. *Handbook of Radiotherapy Physics Theory and Practies*. New York: Taylor & Francis Group.
- Montaseri, A., Alinaghizadeh, M., and Mahdavi, S.R. 2012. *Physical Properties of Ethyl Methacrylate as a Bolus in Radiotherapy*. Iranian Journal of Medical Physics 9, pp. 127-134.
- Murniati, R., Sutisna, S., Wibowo, E., Rokhmat, M., Iskandar, F., dan Mikrajuddin Abdullah. 2017. *Natural Rubber Nanocomposite as Human-Tissue-Mimicking Materials for Replacement Cadaver in Medical Surgical Practice*. Procedia Engineering 170, pp.101-107.
- Namitha, L.K., dan Sebastian, M.T. 2015. *Fused Silica Filled Silicone Rubber Composites for Flexible Electronic Applications*. International Conference on Advanced Material and Manufacturing Process for Strategic Sectors 830-831, pp. 537-540.
- Park, JW., and Yea, JW. 2015. *Three-dimensional customized bolus for intensity-modulated radiotherapy in a patient with Kimura's disease involving the auricle*. Cancer/Radiothérapie 20, pp. 205-209.

- Podgorsak, E.B. 2005. *Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teacher and Students*. Vienna: Internasional Atomic Energy Agency.
- Pratama, E.A. 2017. *Kekuatan Tarik Karet Alam (Natural Rubber) yang Dikoagulasi dengan Menggunakan Buah Mengkudu (Morinda Citrifolia) dan Tawas ($Al^2(SO^4)^3$)*. Skripsi: Fakultas Teknik Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Purbaya, M., Sari, T.I., Saputri, C.A., Fajriaty, M.T. 2011. *Pengaruh Beberapa Jenis Bahan Penggumpal Lateks dan Hubungannya dengan Susut Bobot, Kadar Karet Kering dan Plastisitas*. Journal Prosiding Seminar Nasional AvoER 3, ISBN: 979-587-395-4.
- Rahim, M.I.S.A., Horoshenkov, K.V., Rongong, J., Ahmadi, H., and Picken, J. 2018. *Epoxidized Natural Rubber for Vibro-Acoustic Isolation*. Polymer Testing 67, pp. 92-98.
- Richmond, N. 2017. *The accuracy of treatment planning system dose modelling in the presence of brass mesh bolus*. Reports of Practical Oncology and Radiotherapy 22, pp. 354-359.
- Saputra, F.A. 2016. *Pengaruh Karbon Hitam Terhadap Sifat Uji Tarik Komposit Karet Alam dengan Pencampuran Metode Manual*. Skripsi: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Saw, C.B., Loper, A., Komanduri, K., Combine, T., Huq, S., and Scicutella, C. 2005. *Determination of Ct-To-Density Conversion Relationship for Image-Based Treatment Planning Systems*. Medical Dosimetry 30, pp.145-148.

- Segura, T., and Burillo, G. 2013. *Radiation modification of silicone rubber with glycidylmethacrylate*. Radiation Physics and Chemistry 91, pp. 101–107.
- Seppala, T., Collan, J., Auterinen, I., Serén, T., Salli, E., Kotiluoto, P., Kortensniemi, M., Leemput, K.V., Kankaanranta, L., Joensu, H., Savolainen, S. 2004. *A dosimetric study on the use of bolus material for treatment of superficial tumors with BNCT*. Applied Radiation and Isotopes 61, pp. 787-91.
- Selvan, N.T., Eshwaran, S.B., Das, A., Stöckelhuber, K.W., Wiebner, S., Pötschke, P., Nando, G.B., Chervanyov, A.I., and Heinrich, G. 2016. *Piezoresistive Natural Rubber-Multiwall Carbon Nanotube Nanocomposite for Sensor Applications*. Sensors and Actuators A 239, pp. 102-113.
- Seyedmehdi, S.A., Zhang, H., and Zhu, J. 2015. *Influence of production method, silicone type and thickness on silicon rubber superhydrophobic coatings*. Progress in Organic Coatings 90, pp. 291-295.
- Solihin, A., Nainggolan, J.M., and Despa, D. .2016. *Karakteristik Peluahan Sebagian (Partial Discharge) Pada Isolasi Karet Silikon (Silicone Rubber) Menggunakan Sensor Emisi Akustik*. Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan 4 (2), pp. 1-6.
- Spunei, M., Malaescu, I., Mihai, M., and Marin, C.N. 2014. *Absorbing Materials with Applications In Radiotherapy and Radioprotection*. Radiation Protection Dosimetry 162, pp. 167-170.
- Suharni S., Kusminarto K., dan Anggraita, P. 2013. *Analisis Hasil Pengukuran Percentage Depth Dose (PDD) Berkas Elektron Linac Elekta RSUP Dr. Sardjito*. Prosiding Pertemuan dan Presentasi

- Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya 15, pp. 84-88.
- Sulastri, S., dan Kristianingrum, S. 2010. *Berbagai Macam Senyawa Silika: Sintesis, Karakterisasi dan Pemanfaatan*. Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Penerapan MIPA, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, hal. 211-216.
- Thomas, S.J. 1999. *Relative Electron Density Calibration of CT-Scanners for Radiotherapy Treatment Planning*. The British Journal of Radiology 72, pp. 781-786.
- Thongom, S., Payakcho, W., Grasasom, J., Oonsivilaiand, A., and Marungsri, B. 2011. *Comparison of Ageing Deterioration of Silicone Rubber Housing Material for Outdoor Polymer Insulators*. Materials and Metallurgical Engineering 5, pp. 1137-1144.
- Torikoshi, M., Tsunoo, T., Sasaki, M., Endo, M., Noda, Y., Ohno, Y., Kohno, T., Hyodo, K., Uesugi, K., and Yagi, N. 2003. *Electron density measurement with dual-energy x-ray CT using synchrotron radiation*. Physics In Medicine and Biology 48, pp. 673-685.
- Visscher, S., and Barnett, E. 2016. *Comparison of Bolus Material to Highly Absorbent Polypropylene and Crayon Cloth*. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences 48, pp. 55-60.
- Wattanakaroon, W., Akanitkul, P., Kaowkanya, W., and Phoudee, W. 2017. *Albumin-Natural Rubber Lateks Composite as a Dermal Wound Dressing*. Proceedings International Conference on Science and Technology of the Emerging Materials 4, pp. 6633-6640.
- Wee, J.S.H., Chai, A.B., dan Ho, J.H. 2017. *Fabrication of Shape Memory Natural Rubber Using Palmitic*

- Acid*. Journal of King Saud University-Science 29, pp. 494-501.
- Wu, L., Wang, X., Ning, L., Han, J., Wan, Z., and Lu, M. 2016. *Improvement of silicone rubber properties by addition of nano-SiO₂ particles*. Journal of Applied Biomaterial and Functional Material 14, pp.11-14.
- Wulandari, C., Wibowo, W. E., dan Pawiro, S.A. 2016. *Penentuan Faktor Keluaran Berkas Elektron Lapangan Kecil Pada Pesawat Linear Accelerator*. Jurnal Fisika dan Aplikasinya 1, pp. 23-28.
- Xiao, Z.Y., Wu, Y.T., Feng, M., Ding, W.W., Tang, X.Y., and Zhong, Y.H. 2008. *Preparation of vanillin by bioconversion in a silicon rubber membrane bioreactor*. Biochemical Engineering Journal 41, pp. 193–197.
- Yuniarti, N., dan Afandi, A.N. 2007. *Tinjauan Sifat Hidrofobik Bahan Isolasi Silicone Rubber*. Jurnal Tekno UM Malang 8, pp. 1-8.
- Zancanela, D.C., Herculano, R.D., Funari, C.S., Marcos, C.M., Almeida, A.M.F., and Guastaldi, A.C. 2017. *Physical, Chemical and Antimicrobial Implications of the Association of Propolis with a Natural Rubber Latex Membrane*. Materials Letters 209, pp. 39-42.
- Zhou, Y., Liu, R., Hou, F., Zhang, Xu., and Xue, W. 2013. *Morphology of electrical trees in silicon rubber*. Journal of Electrostatics 71, pp. 440-448.

Biografi Singkat Penulis



Prof. Dr. Heri Sutanto, M.Si lahir di Pati, 15 Februari 1975. Pendidikan S1 ditempuh di Jurusan Fisika, FMIPA-UNDIP (1992-1997), dilanjutkan studi S2 di ITB (2000-2002) dan S3 di Jurusan Fisika ITB (2003-2008) bidang Fisika Material Elektronika. Sejak tahun 1998 penulis menjadi tenaga dosen di Jurusan Fisika Universitas Diponegoro Semarang. Setelah lulus dari pendidikan Doktorat, penulis mendirikan group riset Smart Material Research Center (SMARC) UNDIP sekaligus menjadi Ketua SMARC UNDIP pada tahun 2008 dengan bidang fokus pengembangan material semikonduktor fotokatalis Seng Oksida (ZnO) dan Titania (TiO₂). Berbagai hasil temuan penelitian material semikonduktor telah berhasil diaplikasikan untuk pengolahan limbah zat pewarna sintesis dan pembunuh bakteri pada proses pengolahan air dan pertanian. Beberapa hasil penelitian ZnO dan TiO₂ telah terdaftar Paten No. P00201100715, S09201300330, dan P00201406488. Pada pertengahan tahun 2017, penulis bersama mahasiswa bimbingannya memulai melakukan riset material medis awal yaitu bolus menggunakan bahan *silicone rubber* (SR) dan di awal tahun 2018 menggunakan bahan *natural rubber* (NR). Hasil penelitian tersebut telah berhasil diterbitkan di *Material Research Express* terindeks Scopus pada tahun 2018. Selain mengembangkan bolus, penulis beserta anggota tim divisi Material Medis SMARC UNDIP mencoba mengembangkan material pelindung sinar-x berbasis bahan SR dengan material komposit

logam.



Dr. Eng. Eko Hidayanto, M.Si. Lahir di Purworejo, 3 Januari 1973. Pendidikan S1 ditempuh di Jurusan Fisika, FMIPA-UNDIP (1992-1997), melanjutkan studi S2 di ITB (2001-2004) Jurusan Fisika bidang Fisika Material Elektronik dan S3 di Kyoto University (2005-2008) Jurusan Materials Science and Engineering. Sejak tahun 1998 penulis telah menjadi tenaga dosen di Jurusan Fisika Universitas Diponegoro Semarang. Semasa kuliah S3, penulis melakukan riset dengan mengembangkan analisis elemen (kandungan) sampel alam secara portabel. Selain itu penulis juga melakukan pengembangan film tipis menggunakan Seng Oksida (ZnO) dan Titania (TiO_2) sebagai metode pengolahan limbah air dan Pembuatan Sel Surya Organik *Dye-Sensitized Solar Cells* (DSSCs). Pada pertengahan tahun 2017 penulis bersama Prof. Dr. Heri Sutanto yang tergabung dalam group riset SMARC UNDIP melakukan penelitian di bidang material medis bersama mahasiswa bimbingannya mengembangkan material Bolus dengan bahan SR dan di awal tahun 2018 mengembangkan bolus dengan bahan NR. Hasil riset tersebut telah berhasil dipublikasikan di *Material Research Express* terindeks Scopus pada tahun 2018. Selain itu penulis juga aktif melakukan riset mengembangkan material pelindung sinar-x alternatif berbasis material logam.



Gede Wiratma Jaya, S.Pd., M.Si lahir di Samarinda, 16 Agustus 1993. Pendidikan S1 ditempuh di Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Mulawarman Samarinda (2011-2015). Kemudian penulis melanjutkan pendidikan S2 di Magister Ilmu Fisika Universitas Diponegoro (2016-2018) dengan bidang minat Fisika Medik. Semasa kuliah S1 penulis mendapat kesempatan menjadi pemakalah di SEMNAS Fisika Universitas Negeri Semarang (2014) dan menjadi peserta nasional ON MIPA PT (2015) bidang Fisika di Surabaya, Jawa Timur. Pada jenjang S2 penulis bersama dosen pembimbingnya sekaligus ketua SMARC UNDIP Prof. Dr. Heri Sutanto memulai riset membuat bolus dengan bahan *silicone rubber* (SR). Di awal tahun 2018, penulis dipercaya menjadi seorang *supervisor* di divisi Material Medis untuk membantu pengembangan bolus dan pembuatan pelindung sinar-x menggunakan bahan SR dengan berbagai material komposit logam dan non logam. Penulis bersama group riset SMARC UNDIP telah berhasil menerbitkan dua makalah dengan topik penelitian bolus di *Material Research Express* terindeks Scopus pada tahun 2018. Selain itu penulis menjadi peserta Seminar Internasional ISNPINSA 7th di Semarang, Jawa Tengah (2017) dan Material Research Society Indonesia di Denpasar, Bali (2018). Prestasi yang pernah dicapai oleh penulis adalah menjadi 15 orang penulis surat yang masuk ke dalam buku *Habibie the Series* dari penerbit Tiga Serangkai dalam rangka ulang tahun mantan Presiden Ketiga Republik Indonesia

Bapak B.J. Habibie yang ke 80 pada tahun 2016.



Santi Yuli Astuti, S.Si., M.Si lahir di Banjarnegara, 26 Juli 1989. Pendidikan S1 ditempuh di Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Semarang (2007-2011), kemudian dilanjutkan pendidikan S2 di Magister Ilmu Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro (2017-2018) dengan bidang minat Fisika Medik. Pada jenjang S1 penulis menempuh pendidikan fisika bidang minat Fisika Material. Penelitian yang diambil adalah pembuatan film tipis untuk aplikasi sel surya dengan menggunakan material Cadmium Telluride dengan doping Cuprum (CdTe:Cu) hingga mengantarkan penulis menjadi seorang sarjana dan telah mengikuti kegiatan ilmiah seperti menjadi pemakalah di Seminar Nasional Fisika Universitas Negeri Semarang (2011) serta berhasil dipublikasikan di Jurnal Terindeks Scopus. Setelah memperoleh gelar Sarjana penulis bekerja di bidang perbankan syariah dan menjadi *staff back office* pada salah satu bank syariah di Indonesia hingga tahun 2016. Setelah itu penulis mengundurkan diri dan melanjutkan pendidikan pasca-sarjana. Pada awal tahun 2018 (Semester 3) penulis bergabung menjadi anggota tim divisi Material Medis SMARC UNDIP dan melakukan penelitian bersama tim dengan mengembangkan bolus berbahan dasar *silicone rubber* (SR) yang dikembangkan dengan menambahkan material komposit silika. Atas penelitian tersebut telah mengantarkan penulis mendapatkan gelas Magister Sains.



Astri Suppa Suppratman, S.Si., M.Si lahir di Palopo, 10 April 1994. Pendidikan S1 ditempuh di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin Makassar (2012-2016) dengan bidang minat Fisika Medik.

Kemudian melanjutkan pendidikan S2 di Magister Ilmu Fisika Universitas Diponegoro Semarang (2017-2018) dengan bidang minat yang sama. Pada jenjang S1 penulis melakukan penelitian berbasis pengolahan citra untuk mendeteksi penyakit malaria dalam darah dan hasil penelitian ini membawa penulis meraih gelar sarjana. Pada awal tahun 2018 (Semester 3) penulis bergabung menjadi anggota divisi Material Medis SMARC UNDIP dan melakukan kegiatan penelitian bersama tim dengan topik pemanfaatan bahan *natural rubber* (NR) sebagai bahan bolus alternatif yang diaplikasikan untuk radioterapi. Hasil penelitian tersebut telah berhasil dipublikasi di jurnal internasional *Material Research Express* terindeks Scopus. Atas penelitian tersebut telah mengantarkan penulis memperoleh gelar Magister Sains.