FISIKA: PENERAPANNYA DALAM BIDANG MEDIS

UNIVERSITAS GADJAH MADA

Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada

Oleh:
Prof. Dr. Kusminarto

FISIKA: PENERAPANNYA DALAM BIDANG MEDIS

UNIVERSITAS GADJAH MADA

Pidato Pengukuhan Jabatan Guru Besar
pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Gadjah Mada

diucapkan di depan Rapat Terbuka Majelis Guru Besar
Universitas Gadjah Mada
pada tanggal 27 Februari 2007
di Yogyakarta

Oleh:
Prof. Dr. Kusminarto

FISIKA: PENERAPANNYA DALAM BIDANG MEDIS

Apakah Fisika itu?

Fisika atau yang juga dikenal dengan ilmu alam adalah ilmu yang mempelajari gejala alam. Fisika berhubungan dengan pengamatan, pemahaman dan pendugaan atau peramalan fenomena alam termasuk sifat-sifat sistem buatan manusia. Ruang lingkup fisika sangat luas melibatkan matematika dan teori, eksperimen dan observasi, komputasi, material serta teori dan teknologi informasi. Sistem alam yang dipelajari mulai dari yang paling kecil seperti elektron dan quark sampai yang amat besar seperti tata surya bahkan jagad raya ini. Hasil kajian fisika ini berupa rumus dan hukum fisika atau dalam bahasa awamnya disebut hukum alam yang kita yakini sebagai hukum Tuhan atau dalam bahasa religius disebut sebagai ayat-ayat Tuhan.

Ide-ide dan teknik-teknik fisika juga mendorong kemajuan disiplin ilmu lain seperti kimia, komputer, elektronika dan instrumentasi, ilmu keteknikan, ilmu bahan, matematika dan statistika, kedokteran dan ilmu-ilmu hayati, meteorologi, dan lain-lain. Fisika adalah disiplin ilmu yang mencakup aspek teoritis maupun praktis yang berevolusi secara kontinu. Fisika dicirikan oleh gagasan bahwa sebuah sistem dapat difahami dengan mengidentifikasi beberapa besaran kunci seperti energi dan momentum (pusa) dan prinsip-prinsip universal yang berkaitan. Bagian yang menarik dari fisika adalah bahwa prinsip-prinsip universal itu relatif tidak banyak dan dapat berlaku untuk seluruh sains tidak terbatas pada fisika.

Fisika adalah ilmu pengetahuan empiris. Ketrampilan dan metode yang digunakan adalah bagian integral dari fisika. Tes akhir validitas setiap teori adalah apakah teori tersebut cocok dengan eksperimen. Banyak penemuan-penemuan penting yang dibuat sebagai hasil dari pengembangan suatu teknik eksperimen baru. Sebagai contoh, teknik yang dikembangkan untuk mencairkan gas helium secara berturutan mengarah pada penemuan yang sama sekali tak terduga tentang superkonduktivitas, superfluiditas dan seluruh bidang fisika temperatur rendah. Instrumen yang dikembangkan di

bidang fisika dapat diterapkan di cabang ilmu pengetahuan lain. Sebagai contoh, radiasi elektromagnet yang dipancarkan oleh mesin pemercepat elektron yang semula dirancang untuk mempelajari partikel elementer, sekarang digunakan untuk mempelajari sifat-sifat bahan di dalam ilmu keteknikan, biologi, dan kedokteran.

Kemajuan di dalam fisika memerlukan suatu imaginasi dan kreativitas. Hal ini kebanyakan merupakan hasil kerjasama antar fisikawan dengan ilmuwan berbagai latar belakang yang berbeda dan dapat juga melibatkan pertukaran ide dan teknik-teknik dengan ilmuwan dari luar fisika. Di dalam fisika sendiri terdapat tiga kelompok besar aktivitas yaitu eksperimental, komputasional dan teoritikal, walaupun ada yang memperluas lagi dengan fisika terapan dan lain sebagainya.

Berikut ini adalah contoh fisika dalam memahami fungsi organ tubuh.

Memahami Secara Fisika Hubungan Stroke, Tekanan Darah, dan Kerja Jantung

Stroke dapat disebabkan oleh pembuluh darah otak yang pecah akibat tidak kuat menahan tekanan darah yang sangat tinggi. *Stroke* sangat ditakuti setiap orang karena akibat yang ditimbulkan sangat mengerikan, mulai dari kelumpuhan sebagian organ, koma sampai kepada kematian. Oleh karena itu banyak upaya dilakukan orang untuk menjaga tekanan darahnya agar tetap normal atau paling tidak jangan terlalu jauh di atas normal.

Salah satu biang keladi penyebab tekanan darah tinggi adalah penyempitan pembuluh darah karena pengendapan kolesterol di dinding pembuluh darah. Lantas apa hubungannya penyempitan pembuluh darah dengan tekanan darah? Hukum Poiseuille dalam fisika menjelaskan hubungan antara debit cairan Q, yaitu volume cairan yang mengalir tiap detik, kekentalan cairan η, panjang saluran l, radius saluran r dan beda tekanan ujung-ujung saluran P sebagai $Q=(\pi Pr^4)/(8\eta l)$ (Burns dan MacDonald, 1975).

Untuk menjaga kondisi setiap sel dalam tubuh tetap sehat diperlukan pasokan gizi dan oksigen yang dibawa oleh darah dalam jumlah yang cukup. Oleh karena itu debit aliran darah Q dijaga tetap.

Tubuh kita secara alamiah akan melakukan itu. Jika kekentalan darah η tidak berubah, demikian juga panjang pembuluh darah l maka ketika radius pembuluh darah r mengecil karena mengalami penyempitan, dari rumus tadi kelihatan bahwa tekanan darah P akan naik.

Bagaimana kerja obat penurun tekanan darah? Rumus di muka menunjukkan bahwa agar tekanan P turun, pembuluh darah harus dilebarkan (r membesar) atau darah dicairkan (η mengecil) atau dua-duanya dilakukan. Semuanya tentu memiliki efek samping, oleh karena itu penggunaan obat harus di bawah pengawasan dokter.

Ketika berolah raga atau melakukan aktivitas fisik lain yang berlebih mengapa tekanan darah kita bertambah? Untuk melakukan aktivitas diperlukan energi. Energi ini dapat berasal dari pembakaran sumber energi yang dibawa oleh makanan atau dari energi yang tersimpan di dalam lemak tubuh. Proses pembakaran ini memerlukan pasokan oksigen tambahan melalui aliran darah. Jadi ketika berolah raga, debit aliran darah Q bertambah (detak jantung bertambah cepat) untuk menambah pasokan oksigen yang diperlukan untuk pembakaran tadi. Dari rumus di muka juga dapat dilihat kalau debit Q bertambah akan mengakibatkan tekanan darah P juga bertambah. Oleh karena itu bagi orang usia lanjut disarankan hanya melakukan olah raga ringan saja untuk menjaga kebugaran tubuhnya, disamping untuk menghindari kenaikan tekanan darah juga menghindari tambahan beban kerja jantung.

Jika hasil pemeriksaan kolesterol cukup tinggi tetapi tekanan darahnya normal, apakah kondisi ini cukup aman? Mungkin aman dalam arti tidak akan ada serangan stroke. Tetapi marilah kita lihat rumus di muka tadi. Kandungan kolesterol darah cukup tinggi hampir dipastikan penyempitan pembuluh darah telah terjadi. Karena tekanan darah P tidak berubah sementara jari-jari pembuluh darah mengecil, itu karena debit Q yang menurun. Debit darah yang menurun dapat disebabkan oleh frekuensi detak jantung yang melemah atau volume pemompaan darah yang berkurang. Ini berarti telah terjadi ketidak normalan pada jantung. Penurunan debit darah dalam jangka panjang tentunya akan menurunkan kinerja organ tubuh sebagai akibat dari pasokan nutrisi dan oksigen yang tidak cukup.

Jika kinerja paru-paru dan/atau jantung sudah menurun jangan melakukan aktivitas fisik yang berat. Paru-paru berfungsi mengambil oksigen dari udara dan mengeluarkan sisa pembakaran ke udara. Jantung berfungsi memompa darah agar pembuangan sisa pembakaran dan pengambilan oksigen serta pendistribusiannya ke seluruh tubuh berjalan dengan baik. Ketika ada tambahan aktivitas yang cukup berat diperlukan tambahan pasokan oksigen. Oleh karena itu paru-paru harus bekerja ekstra dengan pernafasan yang semakin cepat terengah-engah, jantung memompa dengan frekuensi yang semakin tinggi. Bahaya muncul ketika dengan kerja ekstra yang dilakukan kedua organ penting tadi pasokan oksigen tetap tidak mencukupi kebutuhan. Secara keseluruhan pasokan oksigen keseluruh tubuh akan berkurang. Jika oksigen yang dipasok ke otak mencapai level di bawah jumlah minimum yang diperlukan dapat mengakibatkan kerusakan sel-sel otak. Gejala yang dirasakan dapat berupa pandangan kabur/kunang-kunang, pingsan, kelumpuhan, koma sampai kepada kematian.

Tinjauan Secara Fisika Tentang Berat Badan yang Berlebih

Walaupun tercatat sebagai pencetak gol terbanyak sampai di pertandingan perdelapan piala dunia 2006, Ronaldo mendapat banyak kritikan bahkan umpatan setelah penampilan pertamanya dalam tim sepak bola Brazil melawan Kroasia dalam putaran final piala dunia 2006. Ronaldo dinilai malas bergerak, jika bergerakpun amatlah lamban. Banyak orang menengarai menurunnya kegesitan Ronaldo ini dimulai sejak tubuhnya mengembang. Lantas apa hubungannya berat badan yang terlalu besar dengan kelambanan gerakannya?

Bergeraklah agar kalori terbakar, demikianlah kesimpulan dari suatu penelitian untuk menjaga berat badan. Para peneliti di Mayo Clinic Amerika Serikat merasa penasaran mengapa orang yang berat badannya berlebih sulit menjadi langsing, sementara orang yang langsing bentuk badannya tidak berubah. Hasil penelitian membuktikan bahwa ada perbedaan aktivitas yang mencolok antara orang gemuk dan orang kurus. Mereka yang berbadan besar cenderung duduk-duduk saja sementara yang kurus terus bergerak. Energi yang diperlukan untuk aktivitas mondar-mandir diukur dan

besarnya mencapai 350 kalori sehari yang cukup untuk membakar lemak tubuh 13 sampai 18 kg setiap tahunnya (Kompas, 2 Juni 2005).

Ada dua kesimpulan yang menyesatkan dalam penelitian tersebut. Yang pertama bahwa orang kegemukan atau berat badannya berlebih disebabkan oleh karena kurang aktivitas geraknya. Ini bertentangan dengan hukum I Newton yang dikenal juga dengan hukum kelembaman. Hukum ini menyatakan bahwa pada dasarnya setiap benda memiliki sifat kelembaman yaitu sifat mempertahankan keadaan geraknya. Benda yang semula rehat (tidak bergerak) mempertahankan keadaannya tetap rehat (Halliday *et al.*, 1997). Untuk mengubahnya menjadi bergerak diperlukan usaha. Dalam hal gerak manusia, usaha tersebut dilakukan dengan mengambil energi dari kalori yang dibawa oleh asupan makanan atau dari pembakaran lemak tubuh. Sifat kelembaman ini dibawa oleh besaran fisika **massa** (berat sama dengan massa dikalikan dengan percepatan gravitasi). Maksudnya adalah semakin besar massa benda (tentunya juga beratnya) semakin lembam benda tersebut yang berarti semakin sukar diubah keadaan geraknya atau semakin **malas** mengubah keadaan geraknya. Orang yang gemuk memerlukan usaha (berarti juga energi) yang lebih besar dibandingkan dengan orang kurus untuk mengubah keadaan rehat menjadi bergerak dengan laju yang sama. Hal inilah yang menimbulkan kemalasan beraktivitas bagi orang yang berat badannya berlebih. **Jadi kegemukan itu sebagai penyebab malas beraktivitas bukan sebaliknya.**

Kesimpulan kedua yang tidak sepenuhnya benar adalah bahwa untuk menjaga berat badan atau bahkan menurunkan berat badan cukup dengan memperbanyak aktivitas. Memang benar untuk melakukan aktivitas diperlukan energi yang diperoleh dari asupan makanan setiap harinya, persoalannya adalah jika asupan energi lewat makanan kita jauh lebih besar daripada energi yang diperlukan untuk beraktivitas maka akan selalu ada kelebihan energi. Disini berlaku hukum kekekalan energi. Lantas dikemanakan kelebihan energi tadi? Energi yang berlebih akan disimpan dalam tubuh sebagai lemak tubuh. Jadi walaupun aktivitasnya ditingkatkan tetapi asupan energi lewat makanan juga ditambah maka tujuan menurunkan berat badan tidak akan tercapai bahkan hasil sebaliknya yaitu peningkatan berat badan yang diperoleh. **Jadi menjaga atau mengatur berat badan**

yang efektif adalah melalui pengaturan pola makan (diet). Jika menginginkan berat badan yang tetap/stabil tentunya antara asupan energi (lewat makan) dan energi yang diperlukan untuk beraktivitas harus seimbang, sedang jika penurunan berat badan yang diinginkan, asupan energinya harus lebih kecil daripada energi yang diperlukan untuk beraktivitas. Sering kita dengar keluhan dari orang yang berbadan subur (biasanya wanita) yang mengatakan mereka tidak pernah sarapan pagi dan makan malam tetapi berat badannya meningkat terus. Menurut fisika hal ini tidak mungkin karena melawan kaedah kekekalan energi. Mereka lupa bahwa sarapan dan makan malamnya telah diganti dengan cemilan yang meskipun volumenya kecil tetapi kandungan energinya jauh lebih banyak dari porsi makan pagi dan malamnya tersebut.

Besar energi untuk melakukan aktivitas tubuh minimum seperti bernafas, memompa darah, metabolisme dimana tubuh dalam keadaan istirahat total disebut *Basal Metabolic Rate* (BMR) yang nilainya sekitar 90 kcal/jam atau sekitar 2200 kcal per hari (Cameron dan Skofronick, 1978). Seperti disebutkan sebelumnya mengatur berat badan paling efektif adalah dengan pengaturan pola makan. Sebagai contoh, seseorang ingin mengurangi lemak tubuh seberat 4,54 kg. Kandungan kalori tiap gram lemak adalah 9,3 kcal maka 4,54 kg lemak mengandung 4,54 kg x 9,3 kcal/gram = $4,2 \times 10^4$ kcal. Bersepeda di jalan datar dengan laju 21,3 km/jam menghabiskan energi sebesar 1198,75 kcal/jam. Untuk menurunkan berat badan dengan cara bersepeda seperti itu diperlukan waktu $4,2 \times 10^4$ kcal dibagi 1198,75 kcal/jam = 35 jam, dengan ketentuan pola makan tidak berubah dari sebelumnya, hal ini sukar dilakukan. Dengan mengubah diet dari 2500 kcal perhari menjadi 2000 kcal perhari atau mengurangi konsumsi makan sebesar 1/5 setiap hari diperlukan waktu $4,2 \times 10^4$ kcal dibagi 500 kcal/hari = 84 hari. Yang terakhir ini lebih mudah dilaksanakan. Umat muslim selama bulan puasa asupan energinya berkurang sampai 1/3 bahkan lebih oleh karena itu terjadi penurunan berat badan antara 3 sampai 5 kg setelah puasa berakhir.

Berikut ini adalah contoh peran fisika dalam pengembangan teknologi alat diagnosa.

Termografi untuk Deteksi Sangat Dini Kanker Payudara.

Khusus kaum wanita (walaupun ada penderita dari kaum pria) kanker payudara (KPD) selalu menghantui sepanjang hidupnya disamping kanker rahim. WHO memperkirakan lebih dari 1,2 juta orang akan terdiagnosa menderita KPD tahun 2005. *The American Cancer Society* memperkirakan 211.240 wanita di Amerika Serikat akan didiagnosa menderita KPD invasive (stadium I-IV) tahun ini dan sejumlah 40.140 orang akan meninggal karena penyakit ini. Kematian wanita di Amerika 3% nya disebabkan oleh KPD (http:// imaginis.com/ breasthealth/statistics.arc.html). Di Kanada di tahun 2005 penderita KPD diperkirakan mencapai jumlah 21.600 wanita dan 5.300 meninggal dunia, demikian sebuah laporan di *Canadian Cancer Society* (http://www.cancer.ca/ccs/internet/ standar/0,3182,3172-14279-langIden,00, html). Sementara itu *Australian Institute of Healt and Welfare* melaporkan satu dari sebelas wanita di Australia menderita KPD sebelum usia 75 tahun. Pada tahun 2001 di Australia 11.791 wanita menderita KPD dan sejumlah 2594 meninggal dunia karena penyakit tersebut (http://www.nbcc.org.au/index.html).

Belum ada data statistik yang menggambarkan penderita KPD di Indonesia. Sebuah perhitungan ektrapolasi statistik didasarkan pada data penderita KPD di Amerika, Kanada dan Australia terdapat di Website *Imaginis the Breast Health Resource* menunjukkan angka prevalensi penderita KPD di Indonesia sebesar 876.665. Kita tahu ada pembunuh yang siap setiap saat menerkam nyawa kita (khususnya kaum perempuan) tetapi kita tidak berbuat banyak untuk menghindarinya.

Dunia kedokteran belum dapat menemukan cara untuk pencegahan terhadap timbulnya KPD. Para dokter berpendapat bahwa banyak nyawa yang dapat diselamatkan jika ada cara efektif untuk deteksi dini KPD ini. Semakin dini diketahui keberadaan KPD ini semakin besar kemungkinan dapat disembuhkan dengan penanganan yang lebih tepat. Sayangnya 50% penderita di Indonesia datang ke tempat pengobatan dalam kondisi stadium lanjut. Selama ini deteksi

dini yang dianjurkan adalah pemeriksaan payudara sendiri (SADARI) sejak usia 20 tahun dan pemeriksaan mamografi 1 sampai 2 kali pada usia 35 hingga 49 tahun. Cara pemeriksaan ini berhasil jika KPD itu memang sudah terjadi dengan ukuran tertentu.

Karena pencegahan KPD belum dapat direalisasikan, maka usaha-usaha kearah deteksi sangat dini terus dilakukan. Sebuah teknik dinamakan *Digital Infrared Imaging* atau Pencitran Inframerah Digital (PID) telah dikembangkan (Infrared Science Corporation, 2005). Metode ini memanfaatkan teknik termografi yaitu pemetaan panas benda. Dengan PID ini memungkinkan seorang wanita dimonitor kesehatan payudaranya untuk melihat proses pra-kanker yang terjadi. Bahkan teknik PID diklaim dapat memberi peringatan 8 sampai 10 tahun sebelum sebuah tumor dapat dideteksi dengan metode lain.

Prinsip Fisika PID

Setiap benda pada suatu temperatur memancarkan radiasi gelombang elektromagnet dari permukaannya. Hukum Stefan-Boltzmann menyatakan hubungan antara energi yang diradiasikan dengan temperatur benda yaitu bahwa energi total yang dipancarkan oleh sebuah benda sebanding dengan luas permukaannya dan berbanding lurus dengan pangkat empat temperaturnya (dalam satuan derajat Kelvin). Radiasi yang dipancarkan tersebut meliputi spektrum panjang gelombang yang lebar namun intensitas terbesar ada pada panjang gelombang tertentu tergantung temperatur benda tersebut (hukum pergeseran Wien) (Eisberg, 1961, Kusminarto, 2007). Pada temperatur sekitar temperatur badan manusia, intensitas maksimum terjadi pada panjang gelombang daerah sinar inframerah yang tidak kasat mata. Menggunakan kamera inframerah, peta suhu badan khususnya pada payudara dapat dicitrakan.

Hubungann radiasi inframerah dengan KPD

Aktivitas kimia dan aktivitas pembuluh darah di dalam jaringan pra-kanker dan di daerah sekitar KPD yang sedang tumbuh selalu lebih tinggi daripada aktivitas di dalam jaringan normal. Hal ini dapat difahami karena kebutuhan nutrisi yang sangat meningkat, jaringan

kanker meningkatkan sirkulasi ke sel-selnya dengan membuka pembuluh darah lebih lebar dan menciptakan pembuluh darah baru (Gautherie, 1983). Proses ini mengakibatkan temperatur di daerah itu meningkat. PID menggunakan kamera inframerah ultra-sensitif dan komputer mendeteksi, menganalisa dan menghasilkan citra diagnostik beresolusi tinggi dari variasi temperatur tersebut.

PID sebagai penanda risiko (*risk marker*) KPD

Citra hasil pemayaran (*scanning*) PID mungkin dapat menunjukkan berbagai abnormalitas payudara seperti mastitis, tumor, penyakit fibrocustic, kanker dan lainnya. Sama uniknya dengan sidik jari, setiap pasien memiliki peta inframerah tertentu dari payudara. Setiap perubahan yang terjadi pada peta inframerah yang diamati secara periodik (dalam periode bulanan atau tahunan) dapat memberikan tanda sebuah abnormalitas (Belliveau dan Keyserlingk, 1998).

Pada pasien tanpa kanker, hasil pemeriksaan digunakan untuk menunjukkan derajat kemungkinan risiko kanker di masa datang. Interval pemeriksaan untuk memonitor kesehatan payudara tergantung pada derajat risiko tersebut. Hal ini memberikan kesempatan pada pasien untuk secara proaktif melakukan sesuatu yang positif untuk menjaga kesehatan payudaranya seperti memulai gaya hidup anti-*carcinogenic* dan mengurangi sebanyak mungkin faktor penyebab resiko kanker.

Pada pasien yang dicurigai menderita KPD, informasi dari hasil pemeriksaan digunakan untuk mengarahkan pemeriksaan lebih lanjut.

PID sebagai alat *screening* (seperti *pap smear* untuk kanker rahim) tidak memerlukan beaya operasional tinggi karena tanpa film, tanpa bahan kimia dan tanpa radiasi, sehingga dapat menjangkau masyarakat luas tanpa membebani keuangan mereka.

Fisika di Balik Kecanggihan *Positron Emission Tomography* (PET) dalam Melacak Kanker dan Menguji Fungsi Jaringan Tubuh

Prof. June-Key Chung M.D. dari Department of Nuclear Medicine, Cancer Research Institute, Seoul National University College of Medicine, Korea, pembicara dalam Konggres Nasional Perhimpunan Kedokteran dan Biologi Nuklir Indonesia VII 10-11 Desember 2004 mengatakan bahwa Kedokteran Nuklir memfokuskan pada pencitran non-invasif pada jaringan tubuh menggunakan zat pelacak radiolabel (Kompas 13 Des 2004). Salah satu teknik pencitraan tersebut adalah tomografi yaitu suatu teknik untuk melihat irisan atau tampang lintang pasien tanpa membedahnya. Ada beberapa jenis tomografi, salah satunya adalah *Positron Emission Tomography* (PET).

Apa positron itu?

Unsur radioaktif adalah unsur tidak stabil yang akan berubah menuju ke kestabilan melalui proses pelepasan energi yang dapat berupa radiasi/pancaran gelombang elektromagnet (radiasi gamma) atau radiasi partikel (alfa, beta, neutron). Radiasi partikel beta ada dua macam yaitu beta negatif dan beta positif. Partikel beta negatif mempunyai sifat fisis sama dengan elektron antara lain massa dan muatan listriknya (negatif). Partikel beta positif mempunyai massa yang sama dengan elektron tetapi bermuatan listrik positif, oleh karena itu beta positif disebut **positron** (elektron positif). Sebuah positron jika bertemu dengan sebuah elektron akan mengalami pemusnahan (*annihilation*/anihilasi). Keduanya lenyap dan muncullah radiasi gelombang elektromagnet (gamma), sesuai dengan hukum kekekalan energi, energi radiasi yang muncul haruslah sama besar dengan energi yang terkandung di dalam massa elektron dan positron yang musnah yaitu $2mc^2$ (dari rumus Einstein yang sangat terkenal $E=mc^2$) dengan m adalah massa elektron atau positron dan c adalah laju cahaya dalam ruang hampa. Sebelum musnah elektron dan positron dalam keadaan rehat/tidak bergerak (keadaan paling mungkin untuk pemusnahan) sehingga momentumnya nol (momentum $p=mv$,

dengan v= kecepatan, untuk benda rehat v=0, demikian juga momentum p=0). Hukum kekekalan momentum mengharuskan jumlah momentum sebelum musnah sama dengan sesudah musnah yaitu tetap nol. Radiasi yang dihasilkan setelah pemusnahan elektron dan positron memiliki momentum. Agar jumlah momentumnya tetap nol, maka radiasi yang dihasilkan haruslah dua buah dengan momentum yang sama besar tetapi berlawanan arah. (momentum adalah besaran vektor yaitu disamping memiliki nilai juga mempunyai arah). Karena kedua radiasi memiliki besar momentum yang sama maka demikian pula energinya. Jadi masing-masing radiasi mempunyai energi sebesar mc^2 dengan arah pancaran bertolak belakang. Dengan massa elektron m= 9,1 x 10^{-31} kg dan laju cahaya c= 3 x 10^8 m/s, besar energi masing-masing radiasi gamma yang dihasilkan adalah 511 keV.

Sifat fisis positron inilah yang dimanfaatkan dalam pengembangan teknologi pencitraan medis PET.

PET

Positron Emission Tomography pada dasarnya adalah tomografi untuk memetakan distribusi unsur pemancar positron dalam jaringan tubuh yang diperiksa. Unsur pemancar positron ini sengaja dimasukkan ke tubuh (secara *oral* maupun *parenteral*). Langkah pertama adalah memilih zat yang jika dimasukkan ke dalam tubuh akan diakumulasikan di dalam jaringan yang akan diperiksa. Zat tersebut diberi label unsur radioaktif pemancar positron. Zat yang telah diberi label radioaktif tersebut biasa disebut radiofarmaka. Unsur radioaktif (radioisotop) yang biasa digunakan untuk label antara lain ^{11}C (20 menit), ^{13}N (10 menit), ^{15}O (2 menit) dan ^{18}F (110 menit). Angka dalam kurung adalah umur paro, yaitu ukuran waktu aktivitas unsur radioaktif tinggal separoh dari semula. Dipilih unsur radioaktif dengan umur paro pendek agar aktivitasnya segera habis walaupun masih ada radiofarmaka tersisa dalam tubuh. Positron yang dipancarkan akan bertemu elektron dalam jaringan (daya tembus positron hanya beberapa mm dalam jaringan tersebut) dan terjadilah peristiwa pemusnahan elektron-positron dan dipancarkan dua buah radiasi elektromagnet (gamma) masing-masing dengan energi 511

keV dan dengan arah saling berlawanan serta dalam waktu bersamaan. Selanjutnya proses pemayaran (*scanning*) tomografi dilakukan menggunakan sepasang detektor yang berhadap-hadapan untuk mendeteksi radiasi 511 keV secara koinsiden (bersamaan) (Kouris, 1982). *Single Chanel Analyzer* (SCA) digunakan untuk memilih energi radiasi yang akan dideteksi untuk memastikan bahwa yang terdeteksi adalah energi 511 keV bukan energi yang lain (radiasi yang ke arah lain tetapi kemudian terhamburkan dan akhirnya masuk ke detektor tidak akan terdeteksi karena energinya sudah berkurang sehingga lebih kecil dari 511 keV). Alat koinsiden hanya mencatat radiasi yang datang ke pasangan detektor secara bersamaan, digunakan untuk memastikan bahwa radiasi berenergi 511 keV yang terdeteksi adalah berasal dari sebuah peristiwa anihilasi. Dengan demikian sepasang detektor tersebut mendeteksi radiasi hasil anihilasi yang terjadi di sepanjang garis penghubung kedua detektor. Jika $A(x,y)$ adalah kerapatan unsur pemancar positron di titik (x,y) maka intensitas radiasi hasil anihilasi sepanjang garis tersebut sebanding dengan $\int A(x,y)ds$. Persamaan ini diperoleh dengan menyederhanakan masalah yaitu mengabaikan efek pelemahan radiasi oleh jaringan yang dilewatinya. Pemayaran dilakukan secara translasi pasangan detektor untuk menyapu seluruh bidang diikuti gerakan rotasi untuk menyapu bidang yang sama dari arah sudut yang lain hingga rotasi 360^0. Pada PET generasi ke 5, gerakan translasi rotasi ini tidak diperlukan lagi karena PET telah dilengkapi dengan deretan detektor yang melingkari objek pemeriksaan/pasien. Dengan bantuan komputer data yang terkumpul tersebut digunakan untuk menghitung $A(x,y)$ yang merupakan distribusi kerapatan unsur pemancar positron yang terakumulasi dalam jaringan yang sedang diperiksa. Selanjutnya hasil perhitungan distribusi kerapatan tersebut ditampilkan dalam bentuk citra dua dimensi. Untuk pemeriksaan fungsi suatu organ, pengambilan citra dilakukan beberapa kali untuk waktu yang berbeda. Perubahan kerapatan unsur pemancar positron di dalam organ yang diperiksa sebagai fungsi waktu dapat memberi informasi tentang kinerja organ tersebut.

Berikut ini adalah contoh peran fisika dalam pengembangan teknologi terapi khususnya pada terapi kanker.

Terapi Radiasi

Terapi radiasi atau radioterapi adalah terapi kanker atau penyakit lainnya menggunakan radiasi pengion. Radiasi pengion ini ketika mengenai atom-atom sel mengakibatkan ionisasi pada atom-atom dalam sel yang pada gilirannya mematikan sel-sel tersebut. Radiasi pengion ini dibedakan dalam dua kelompok yaitu foton (radiasi gamma dan sinar-x) dan partikel (neutron, proton, pion, α).

Semua jenis terapi radiasi memiliki batasan yang sama yaitu memberikan doses radiasi sebanyak mungkin kepada sel-sel jaringan tumor/kanker dan meminimalkan doses yang diterima oleh sel-sel jaringan sehat di sekitarnya. Kerusakan jaringan sehat adalah sumber utama efek samping dalam terapi radiasi. Terapi radiasi menggunakan foton gamma dan sinar-x menghasilkan efek samping yang cukup signifikan karena interaksi foton dengan atom-atom yang dilaluinya menghasilkan ionisasi sepanjang jejaknya. Hal ini membatasi pemberian doses pada sel-sel kanker yang menjadi target. Untuk mengurangi efek samping tersebut pemberian radiasi dapat dilakukan dengan cara memutar sumber radiasi di sekeliling tubuh pasien dengan jaringan target sebagai pusat rotasinya, dengan demikian jaringan kanker menerima radiasi terus menerus sedangkan jaringan sehat di sekitarnya menerima radiasi dalam waktu yang singkat (Kusminarto dkk, 2004). Upaya lain untuk mengurangi efek samping tersebut adalah dengan menggunakan radiasi partikel yang di antaranya dibahas berikut ini.

Terapi proton

Proton adalah nukleon (penyusun inti atom) bermuatan listrik positif satu. Inti isotop ^{1}H adalah proton. Menggunakan mesin akselerator, proton ini dipercepat sampai energi yang diinginkan untuk dapat menembus ketebalan jaringan tubuh tertentu menuju jaringan target. Proton bermuatan listrik dan bermassa oleh karena itu

interaksinya dengan atom-atom yang dilalui yang mengakibatkan ionisasi didominasi oleh interaksi Coulomb.

Pada proton berkecepatan masih tinggi (dan tentu juga energinya), nilai kehilangan energi persatuan panjang jejak/lintasan hanya kecil. Nilai ini semakin besar dengan berkurangnya energi proton dan sangat efektif ketika proton hampir berhenti. Oleh karena itu ionisasi atom-atom terutama terjadi di daerah sekitar berhentinya proton (Meyerhof, 1989). Dengan demikian kerusakan sel terlokalisir di sekitar posisi proton berhenti dan efek samping berkurang sangat signifikan. Pengurangan doses secara signifikan pada jaringan normal dengan terapi proton dibandingkan dengan terapi foton telah dilaporkan oleh Chang *et al* (2006). Dengan memperhitungkan kedalaman jaringan kanker yang menjadi target radiasi, energi proton ditentukan agar jangkaunya tepat pada jaringan tersebut. Tidak seperti terapi radiasi foton, dimana doses terbesar diterima oleh jaringan di permukaan, pada terapi proton doses maksimum dirasakan di pusat kanker itu sendiri (Castellucci, 1998). Di dalam proses perencanaan radioterapi ini seorang fisikawan mutlak diperlukan.

Sebuah pusat terapi proton The Roberts Proton Therapy Center sedang dibangun di The University of Pennsylvania's School of Medicine dan diprogramkan beroperasi pada tahun 2009. Ini merupakan pusat terapi pertama di dunia yang dibangun di sebuah kampus (US Fed News Service, 2006).

Boron Neutron Capture Terapy (BNCT)

Empat tahun setelah neutron ditemukan oleh J. Chadwich pada tahun 1932, seorang biofisikawan Franklin Institute Pennsylvania, G.L. Locher memperkenalkan konsep terapi tangkapan neutron. Reaksi nuklir antara inti boron dengan sebuah neutron termal yang menghasilkan inti lithium dan sebuah partikel α [$^{10}B(n, \alpha)^{7}Li$] dilihat sebagai salah satu cara untuk terapi tumor. Dua buah partikel hasil reaksi tersebut mempunyai energi yang cukup untuk membunuh sel secara permanen. Partikel tersebut berjangkau gerak sangat pendek di dalam material biologis (orde mikrometer). Dengan demikian partikel-partikel ini hanya merusak sel-sel yang secara selektif mengakumulasi boron. Di dalam metode BNCT ini diperlukan

senyawa yang mengandung boron dan setelah dimasukkan ke dalam tubuh (secara *oral* maupun *parenteral*) memiliki sifat hanya terakumulasi di dalam sel-sel kanker dan tidak di dalam sel sehat misalnya boronophenylalanine (BPA) dan sodium borocaptate (BSH) yang telah digunakan oleh van Rij *et al* (2005) dalam terapi *glioblastoma multiforme* (GBM).

Fisikawan berperan dalam menyiapkan berkas neutron yang dapat menembus tubuh dan mencapai kedalaman yang diinginkan dengan energi termal agar dapat bereaksi dengan inti boron yang telah diakumulasi di dalam sel kanker dan menghasilkan radiasi sekunder yang akan mengionisasi atom-atom dalam sel kanker dan mematikannya. Berkas neutron ini tidak hanya dapat diperoleh di instalasi reaktor nuklir, tetapi juga dapat disediakan melalui sumber neutron isotopik seperti Am-Be dan Po-Be atau sebuah mesin generator neutron (Enge, 1975). Jenis yang terakhir ini pada dasarnya adalah menabrakkan patikel (yang telah dipercepat dalam mesin akselerator) pada inti target dan menghasilkan neutron, misalnya dalam reaksi $^{3}H(d,n)^{4}He$.

Terapi Pion

Pion adalah partikel elementer yang termasuk dalam keluarga *meson*. Pion memiliki masa 273 massa elektron sehingga dikategorikan sebagai partikel elementer menengah, dapat bermuatan listrik positif, negatif maupun netral (Littlefield dan Thorley, 1978). Pion adalah partikel yang merajut gaya untuk menjaga nukleon penyusun inti atom terikat dalam inti atom. Pion dalam keadaan menjadi partikel bebas jika sebuah inti atom ditembak dengan partikel berkecepatan tinggi (misalnya proton).

Pion negatif yang dimanfaatkan di dalam terapi pion ini, berinteraksi sangat sedikit dengan atom-atom sepanjang jejaknya karena massanya yang relatif kecil dan karena bergerak mengakibatkan interaksi Coulomb juga rendah. Ketika mendekati keadaan berhenti, terjadilah interaksi Coulomb antara pion negatif ini dengan inti atom bermuatan positif dan menyebabkan inti menjadi pecah. Karena harus memenuhi kekekalan momentum, pecahan hasil reaksi tersebut menyebar ke segala arah membentuk pola seperti

bintang dan dinamakan bintang pion (*pion star*) yang memiliki daya bunuh terhadap sel dalam jangkau yang sangat pendek. Dengan demikian terapi pion ini memiliki efek samping yang sangat rendah dan disamping itu tidak diperlukan lagi atom sasaran khusus yang harus dimasukkan ke dalam tubuh agar diakumulasi di dalam jaringan kanker yang menjadi sasaran.

Terapi pion masih jarang kita dengar khususnya di negara berkembang karena memerlukan fasilitas akselerator yang besar untuk menghasilkan pion. Sebagai contoh di *The Clinton P. Anderson Meson Physics Facility*, Los Alamos, Amerika, sebuah akselerator linear sepanjang setengah mil digunakan untuk mempercepat proton sampai energi 800 MeV (Thomsen, 1978).

Penelitian Dasar dan Fisikawan Kedokteran (*Medical Physicist*)

Uraian di muka memberikan gambaran kepada kita semua betapa pentingnya peran fisika di dalam bidang medis khususnya dalam memahami fungsi kerja organ tubuh, dalam pengembangan alat diagnosa, maupun teknik pengobatan/terapi. Sebagai contoh alat diagnosa PET ini tidak akan terwujud jika tidak ada pengetahuan tentang radioaktif dan sifat-sifatnya, tentang positron dan sifat-sifatnya, pengetahuan tentang bahan-bahan dan interaksinya dengan radiasi sehingga dapat digunakan sebagai detektor, dan lain-lain. Pemanfaatan partikel untuk terapi kanker didasari oleh pengetahuan mengenai sifat mendasar interaksi partikel tersebut dengan atom-atom yang dikenainya. Semua itu diperoleh melalui penelitian yang intensif di bidang fisika. Penelitian semacam ini disebut penelitian dasar. Hasil penelitian dasar inilah yang selanjutnya menjadi modal utama pengembangan teknologi. Oleh karena itu ada ungkapan **fisika hari ini adalah teknologi hari esok**. Yukawa, fisikawan Jepang yang secara teori mengusulkan adanya partikel pion untuk menjelaskan keterikatan nukleon dalam inti atom sangat bahagia bahwa apa yang telah dikerjakannya di masa lalu secara nyata dapat dimanfaatkan untuk terapi kanker yang ia sendiri sedang mengidap penyakit tersebut, melalui ungkapan "*this news brought me great pleasure to see that* **pion**, *which I imagined forty years ago by pure reason of*

theoretical physics, is turned out to be useful for rescuing people from the affliction of cancer." (Thomsen, 1978).

Penelitian dasar ini memerlukan biaya besar sementara nilai ekonominya belum terlihat. Inilah yang menjadi kendala negara berkembang termasuk Indonesia dalam mendanai penelitian dasar. Jika masalah ini tidak dicarikan penyelesaian, selamanya bangsa kita hanya akan menjadi bangsa pembeli teknologi dari bangsa lain.

Kalibrasi terhadap alat-alat kesehatan (alat diagnosa maupun terapi) yang tersebar di ribuan rumah sakit masih bermasalah, sementara pasien-pasien masih bergantung pada pemanfaatan alat-alat tersebut. Demikian laporan Supardjo, staf Pusat Sarana Prasarana dan Peralatan Kesehatan, Departemen Kesehatan Republik Indonesia (Kompas, 14 Desember 2006). Seharusnya alat-alat kesehatan tersebut diuji dan dikalibrasi secara rutin untuk keberhasilan pengobatan dan keselamatan pasien. Di Indonesia sudah sangat mendesak untuk dibangun suatu pusat pendidikan yang secara khusus menghasilkan tenaga ahli (*medical physicist*) yang memiliki kompetensi untuk melakukan uji dan kalibrasi alat-alat kesehatan tersebut. Jika setiap rumah sakit memerlukan satu sampai dua orang tenaga ahli tersebut, maka lebih dari dua ribu tenaga diperlukan dan itu memerlukan waktu yang cukup lama untuk memenuhinya, jadi kapan kita akan memulainya kalau tidak saat ini juga?

DAFTAR PUSTAKA

Belliveau N., Keyserlingk J.,1998 ; Infrared Imaging of the Breast: Initial Reappraisal Using High-Resolution Digital Technology in 100 Successive Cases of Stage I and II Breast Cancer, *Breast Journal*, Vol. 4, No. 4.

Burns D.M., MacDonald S.G.G., 1975, *Physics for Biology and Pre-medical Students*, Addison-Wesley Publ. Ltd., London, p. 195.

Cameron J.R dan Skofronick J.G., 1978, *Medical Physics*, John Wiley & Sons, New York.

Castellucci L., 1998, Why Proton Therapy Differ, *Journal of the National Cancer Institute,*Vol. 90, No. 23, December 2, p. 1769.

Chang, Joe Y.;Zhang, Xiaodong; Wang, Xiaochun;Kang, Yixiu; Riley, Beverly;Bilton, Stephen;Mohan, Radhe; Komaki, Ritsuko;Cox, James D.,2006, Significant reduction of normal tissue dose by *proton* radiotherapy compared with three-dimensional conformal or intensity-modulated radiation *therapy* in Stage I or Stage III non–small-cell lung cancer. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics;* Jul2006, Vol. 65 Issue 4, p1087-1096,

Eisberg R.M., 1961, *Fundamentals of Modern Physics*, John Wiley & Sons Inc., New York, p. 49.

Enge H.A.., 1975, *Introduction to Nuclear Physics*, Edisson-wesley Publ. Co., Reading, p.369.

Gautherie M., 1983, Thermobiological Assessment of Benign and Malignant Breast Diseases. *Am. J. Obstet. Gynecol*.,; V 147, No. 8: 861-869.

Halliday D., Resnick R., Walker J., 1997, *Fundamentals of Physics Extended*, John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 82.

Kompas, 2005, Bergeraklah agar kalori terbakar, *KOMPAS*, Kamis 2 Juni 2005, halaman 10.

Kompas, 2006, *Teknologi Kesehatan: Alat-Alat Kesehatan Di RS tidak Terkalibrasi*, Kamis, 14 Desember

Kouris K, Spyrou N.M., Jackson D.F., 1982, *Imaging with Ionizing Radiation*, Surey University Press, London, p.143.

Kusminarto, Supangkat dan Bagaswoto, 2004, "Perhitungan Superposisi Isodosis dalam Perencanan Radioterapi", *Jurnal Fisika, Himpunan Fisika Indonesia,* Vol A4, No. 0215.

Kusminarto, 2007, *Pokok-Pokok Fisika Modern,* dalam proses terbit.

Littlefield T.A. and Thorley N., 1979, *Atomic and Nuclear Physics, an Introduction,* p.385-391, Van Nostrand Reinhold Co., New York.

Meyerhof W.E., 1989, *Elements of Nuclear Physics,* McGraw-Hill Book Co., New York, p.74-82.

Infrared Sciences Corp., 2005; Maker of breast cancer detection system receives $2.1 million additional funding, *Medical Imaging,* Sep 3, Atlanta:. p. 26

Thomsen D.E., 1978, Pions in Tumor Therapy, *Science News*; 12/9/1978, Vol. 114 Issue 24, p.410-414

US Fed News Service, Including US State News. Washington, D.C.: Dec 6, 2006.

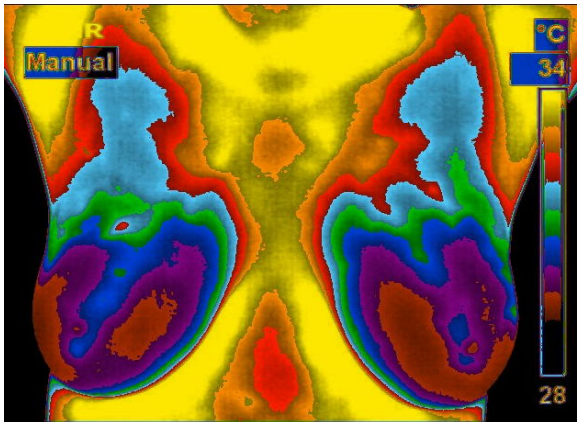
Van Rij C.M., Wilhelm A.J., Saurwein W.A., van Loenen A.C., 2005, Boron Neutron Capture Therapy for Glioblastome multiforme, *Pharmacy World & Science (NLM-Medline)* vol 27, iss 2, p-92.

http://imaginis.com/breasthealth/statistics.arc.html, diakses 20 Agustus 2006.

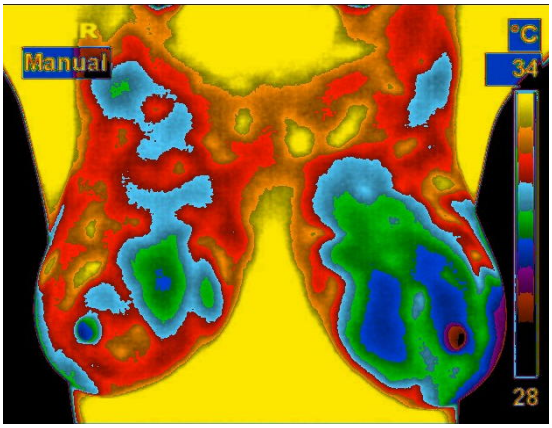
http://www.cancer.ca/ccs/internet/standar/0,3182,3172-14279-langIden,00,html, diakses 17 September 2006

http://www.nbcc.org.au/index.html, diakses 11 Januari 2006.

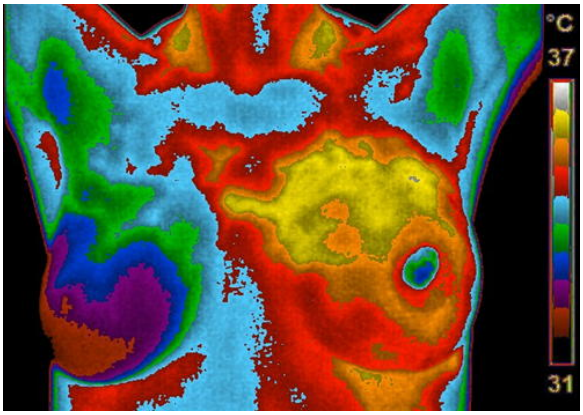
LAMPIRAN



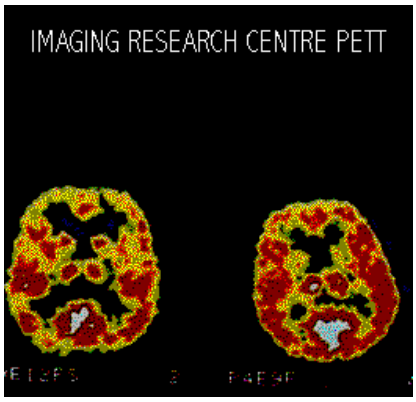
Gambar 1. Citra inframerah payudara normal.



Gambar 2. Citra inframerah payudara dengan abnormalitas.



Gambar 3. Citra inframerah payudara dengan beberapa abnormalitas.



Gambar 4. Citra hasil pemeriksaan otak

Gambar 5. Seorang pasien sedang disuntik radiofarmaka untuk diperiksa dengan mesin PET generasi terbaru