

OA14

## KAJIAN TEKNOLOGI BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) DAN ASPEK REGULASINYA

I Made Ardana<sup>1</sup>, Adi Drajat Noerwasana<sup>1</sup>, Yohannes Sardjono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>DP2FRZR - BAPETEN

<sup>2</sup>PSTA - BATAN

e-mail: [i.madeardana@bapeten.go.id](mailto:i.madeardana@bapeten.go.id)

### ABSTRAK

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) merupakan metode terapi kanker yang memanfaatkan reaksi tangkapan neutron thermal oleh atom <sup>10</sup>B dan telah lama diharapkan dapat menjadi salah satu bentuk radioterapi inovatif yang berpotensi untuk menangani berbagai macam jenis kanker. Keberhasilan metode BNCT tergantung pada kemampuan dalam mendepositkan senyawa <sup>10</sup>B secara selektif hanya berada pada sel kanker dan kemampuan dalam meiradiasikan neutron thermal ke area sel kanker. Uji klinis metode BNCT telah dilakukan untuk beberapa jenis kanker seperti kanker otak, kanker paru-paru, kanker leher dan kepala dan kanker kulit. Di Indonesia, riset dasar BNCT dilakukan melalui suatu konsorsium riset yang beranggotakan lembaga riset, pendidikan tinggi, BUMN dan pihak swasta. Uji pre klinis metode BNCT di Indonesia direncanakan akan dilakukan pada tahun 2019. Uji klinis metode BNCT berbasis siklotron 30 MeV di Indonesia, akan dilakukan di Rumah Sakit Murni Teguh Medan dan Rumah Sakit Akademis UGM. Mengingat pesatnya kemajuan riset dan pengembangan metode BNCT di Indonesia, diperlukan suatu regulasi yang dapat secara eksplisit mengatur tentang perizinan dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan metode BNCT.

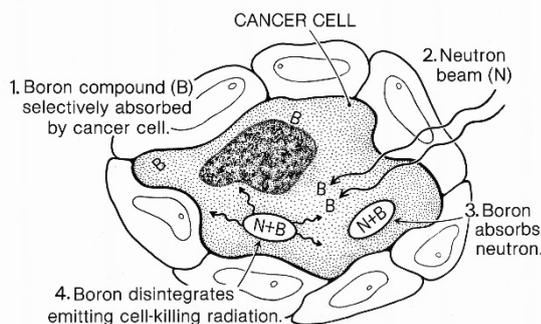
Kata kunci: BNCT, Kanker, Neutron, Uji Pre Klinis, Uji Klinis.

### ABSTRACT

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is a cancer treatment method that utilizes a neutron capture reaction by <sup>10</sup>B atoms and has long been expected to be one form of innovative radiotherapy that potentially to handle various types of cancer. The success of the BNCT method depends on the ability to deposit <sup>10</sup>B compounds to be selectively only in cancer cells and the ability to irradiate the thermal neutrons to cancer cell areas. The clinical trials of BNCT method has been done for several types of cancer such as brain cancer, lung cancer, head and neck cancer and skin cancer. In Indonesia, BNCT's basic research is conducted through a research consortium consisting of Research Institutions, Universities, State Enterprises and Private Parties. The pre-clinical trial of BNCT method in Indonesia is planned to be conducted in 2019. For clinical trial of BNCT method based on cyclotron 30 MeV in Indonesia, will be done at Murni Teguh Hospital, Medan and UGM Academic Hospital. Based on the rapid advances in research and development of BNCT methods in Indonesia, a regulation that explicitly regulates licensing and radiation safety of BNCT methods is required.

Keywords: BNCT, Cancer, Neutron, Pre-Clinical trial, Clinical Trial





Gambar 2. Reaksi  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  di dalam sel [4]

Reaksi  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  akan terjadi ketika neutron thermal berinteraksi dengan  $^{10}\text{B}$  membentuk isotop  $^{11}\text{B}$ . Isotop  $^{10}\text{B}$  bersifat tidak stabil dan meluruh dalam waktu yang sangat singkat ( $10^{-12}$  s). Peluruhan isotop  $^{11}\text{B}$  dapat terjadi dalam dua bentuk. Pertama, dihasilkan inti lithium dalam keadaan dasar dan partikel alpha. Kedua, dihasilkan partikel alpha dan inti lithium dalam keadaan tereksitasi dan menjadi inti stabil dengan melepaskan radiasi gamma [16].

Kedua partikel hasil reaksi  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  memiliki sifat karakteristik LET (Linear Energy Transfer) tinggi dan dapat merusak jaringan kanker hingga susunan komponen sel kanker. LET adalah energi rerata yang didistribusikan oleh suatu radiasi pengion kedalam jaringan, satuannya adalah kiloelektronvolt per micrometer, keV/ $\mu\text{m}$ . Energi partikel- $\alpha$  yang terdepositasi memiliki nilai LET sebesar 150 keV/ $\mu\text{m}$ , sementara inti  $^7\text{Li}$  memiliki LET sebesar 175 keV/ $\mu\text{m}$ . Panjang lintasan kedua partikel tersebut memiliki rentang 4  $\mu\text{m}$  sampai dengan 10  $\mu\text{m}$ , sementara ukuran sel berada pada rentang  $\pm$  18  $\mu\text{m}$  sehingga reaksi tersebut hanya akan terjadi didalam sel-sel yang mengandung  $^{10}\text{B}$  saja (sel kanker) [4, 17].

Radiasi yang ditimbulkan oleh partikel alpha dan inti lithium dapat merusak DNA di dalam sel. LET yang tinggi mengakibatkan DNA mengalami *Double Strands Break* (DSB) [18]. Akibat mengalami DSB, DNA tidak dapat memperbaiki diri dan tidak dapat melanjutkan proses tumbuh serta membelah. Dalam waktu tertentu, sel akan mati. Oleh karena itu, radiasi disebut dikatakan dapat membunuh sel [19]. Apabila radiasi tersebut hanya muncul di dalam sel kanker, maka hanya sel kanker saja yang akan dibunuh tanpa merusak sel sehat lainnya.

Seperti yang telah dijelaskan di awal, terapi BNCT memanfaatkan interaksi antara neutron thermal dengan  $^{10}\text{B}$ . Untuk menghantarkan neutron thermal ke sel target, tubuh pasien akan diradiasi dengan neutron epithermal. Neutron epithermal tersebut kemudian akan mengalami moderasi oleh jaringan sehat dan menjadi neutron thermal di area sel kanker [19]. Saat meradiasi tubuh pasien, neutron akan berinteraksi dengan jaringan yang dilewatinya. Interaksi neutron tersebut dapat mengionisasi jaringan secara tidak langsung. Saat mengionisasi, energi radiasi akan terserap oleh jaringan tubuh sebagai dosis serap. Besarnya dosis serap bergantung pada masing-masing radiasi pengion.

Dalam BNCT, dosis serap bergantung pada beberapa komponen dosis radiasi, yaitu [20]:

1. Dosis gamma ( $D_\gamma$ ), dosis gamma dalam jaringan terbentuk saat radiasi gamma mengionisasi jaringan tubuh. Dosis radiasi gamma dalam BNCT timbul saat neutron thermal berinteraksi dengan hidrogen  $\text{H}(n,\gamma)\text{H}$ . Besar energi gamma yang diradiasikan adalah 2.2 MeV.
2. Dosis neutron ( $D_n$ ), dosis neutron dalam BNCT muncul akibat adanya reaksi hamburan neutron oleh hidrogen dalam jaringan tubuh. Interaksi hamburan tersebut dapat menghasilkan proton melalui reaksi  $\text{H}(n,n')\text{p}$ .
3. Dosis proton ( $D_p$ ), dosis proton dalam BNCT timbul akibat adanya reaksi tangkapan neutron thermal oleh Nitrogen, reaksi ini menghasilkan proton dengan reaksi  $\text{N}(n,p)\text{C}$ . Proton hasil reaksi inilah yang akan mengionisasi jaringan tubuh pasien sehingga perlu dihitung sebagai komponen dosis radiasi.
4. Dosis  $^{10}\text{B}(\text{D}_b)$ , dosis boron timbul akibat adanya reaksi antara neutron thermal dan  $^{10}\text{B}$ . Hasil reaksi ini adalah partikel alpha, inti lithium dan radiasi gamma yang akan mengionisasi sel kanker.

Kemampuan masing-masing radiasi pengion untuk mengionisasi jaringan tidaklah sama. Efek ionisasi pada jaringan tersebut bergantung pada masing-masing radiasi pengionnya. Dalam penghitungan dosis radiasi, kemampuan/kualitas masing-masing radiasi pengion memiliki bobotnya masing-masing. Bobot/ukuran nilai kemampuan radiasi pengion untuk mengionisasi jaringan disebut sebagai faktor kualitas. Untuk menghitung dosis radiasi total, keempat komponen dosis radiasi tersebut harus dikalikan dengan faktor kualitas tersebut [21]. Adapun besar nilai faktor kualitas untuk masing-masing radiasi pengion dalam BNCT disajikan dalam Tabel 3. Dengan demikian maka dosis radiasi total yang diterima jaringan tubuh adalah

$$D_t = D_\gamma \cdot W_\gamma + D_n \cdot W_n + D_p \cdot W_p + D_b \cdot W_b$$

Dosis boron ( $D_b$ ) merupakan dosis yang paling penting dalam BNCT. Dosis boron ( $D_b$ ) inilah yang akan menghancurkan sel-sel kanker [22].

Tabel 3. Faktor kualitas radiasi [22].

Sumber radiasi	Faktor kualitas radiasi	Simbol
Boron	3,8 (tumor) 1,3 (jaringan sehat)	$W_b$
Proton	3,2	$W_p$
Neutron hamburan	3,2	$W_n$
Gamma	1	$W_\gamma$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Status Terkini BNCT di Dunia

Inovasi terapi kanker berbasis *Boron Neutron Captured Therapy* (BNCT) telah banyak dikembangkan oleh berbagai negara, seperti Amerika

Serikat, Taiwan, Jepang, Korea Selatan, Jerman, Swedia, Republik Ceko, Finlandia, dan China. Hal ini dikarenakan BNCT memiliki keunggulan dibanding terapi konvensional menggunakan kemoterapi maupun terapi radiasi lainnya. Keunggulan BNCT dibandingkan dengan terapi lainnya antara lain: senyawa BNCT memiliki target yang selektif pada sel kanker, memiliki toksisitas yang rendah terhadap jaringan normal, terlokalisasi cukup lama pada sel kanker selama aplikasi BNCT, dan hasil uji klinik menunjukkan respon klinik yang lebih baik dibandingkan dengan pasien kanker dengan terapi konvensional. Terapi dengan BNCT juga mampu menurunkan frekuensi treatment dan akhirnya berdampak pada pengurangan biaya yang harus dikeluarkan oleh pasien. Oleh karena itu pengembangan BNCT banyak dikembangkan oleh peneliti dari seluruh dunia hingga saat ini.

Uji klinik BNCT pertama kali dikembangkan di Amerika Serikat pada tahun 1950 hingga awal 1960-an. Senyawa yang digunakan untuk aplikasi BNCT pada saat itu adalah asam borat dan derivatifnya. Namun, senyawa tersebut bersifat toksik, tidak selektif dan hanya terserap dalam jumlah sedikit ke dalam sel kanker. Selanjutnya dikembangkan senyawa generasi kedua yang memiliki toksisitas lebih rendah dan dapat terlokalisasi dalam sel kanker lebih lama. Senyawa BNCT generasi kedua antara lain *p-boronophenylalanine* (BPA) dan *sulphydryl borane* (BSH). Uji klinik dengan BPA dan BSH ini kemudian diadopsi oleh Jepang, Finlandia, Swedia, untuk pasien kanker stadium lanjut. Senyawa BNCT generasi ketiga merupakan senyawa yang lebih stabil dan lebih spesifik dibandingkan dengan generasi sebelumnya. Senyawa ini dikembangkan dari biomolekul berukuran kecil ataupun antibodi monoklonal dengan target antara lain *Epidermal Growth Factor Receptor* (EGFR) yang terekspressi berlebihan pada sel kanker.

Di Jepang, riset dan pengembangan metode BNCT dilakukan dengan melakukan peningkatan kemampuan selektivitas senyawa  $^{10}\text{B}$  untuk hanya terkonsentrasi pada sel kanker dan kemampuan untuk mengantarkan neutron thermal tepat ke area sel kanker. Senyawa  $^{10}\text{B}$  yang dikembangkan berupa BPA dan BSH. BPA memiliki kelebihan yaitu dapat disisipi isotop pelabel  $^{18}\text{F}$ , sehingga distribusi senyawa boron didalam tubuh pasien dapat dideteksi dengan *Positron Emission Tomography* (PET). Metode ini pertama kali diterapkan pada tahun 1994 dengan memanfaatkan sumber neutron yang berasal dari beamport reaktor riset di Kyoto University dengan hasil yang sesuai dengan harapan.

Beberapa uji klinis metode BNCT yang dilakukan di Jepang telah memberikan hasil yang memuaskan. Uji klinis dilakukan terhadap kanker otak, kanker leher dan kepala, kanker paru-paru dan kanker kulit. Untuk kanker otak, melalui pendeposisian dosis BNCT yang terkonsentrasi pada jaringan kanker, menyebabkan penyusutan ukuran kanker dengan sangat cepat (dalam 2 hari). Hasil ini

diamati menggunakan magnetic resonance imaging (MRI). Penyusutan ini terjadi lebih cepat jika dibandingkan dengan penyusutan akibat efek terapi dengan sinar-X. Pada terapi kanker paru-paru, metode BNCT memberikan hasil yang lebih memuaskan. Rasa sakit pasien yang sebelumnya merasakan sesak di bagian dada dan harus diatasi dengan pemberian morfin menghilang beberapa hari setelah ditreatment dengan metode BNCT. Pasien dapat bertahan hidup hingga sepuluh (10) bulan dari diagnose dokter yang memperkirakan usia pasien hanya tersisa paling lama dalam tiga (3) bulan. Pada terapi kanker Leher dan Kepala, BNCT berhasil menyusutkan ukuran kanker dengan signifikan. Selain itu, metode terapi kanker dengan BNCT untuk kanker Leher dan Kepala tidak menimbulkan efek berarti pada kulit pasien. Hal ini berbeda dengan metode terapi kanker dengan metode sinar-X yang dapat menimbulkan efek memar pada kulit pasien. Pada kanker kulit, dimana treatment tidak dapat dilakukan melalui mekanisme pembedahan (pengangkatan) maka BNCT menjadi salah satu pilihan alternative karena dapat menyembuhkan kanker kulit tanpa melalui operasi. Mengingat pesatnya kesuksesan tentang pengembangan metode terapi kanker berbasis BNCT, memicu peneliti-peneliti di Indonesia untuk ikut serta mengembangkan metode terapi kanker terbaru ini.

#### Status Terkini BNCT di Indonesia

Inisiasi pengembangan BNCT di Indonesia berawal dari keprihatinan yang mendalam dari para peneliti terkait insidensi dan prevalensi penyakit kanker. Pada awalnya, secara terpisah PSTA-BATAN dan UGM mengembangkan penelitian kanker sesuai bidangnya masing-masing. PSTA-BATAN mengembangkan teknologi nuklir, sedangkan UGM melalui Fakultas Farmasi mengembangkan obat kanker. Kolaborasi lembaga riset dan Perguruan tinggi ini berkomitmen untuk melakukan kerjasama pengembangan BNCT untuk terapi kanker yang selektif dan modern.

Pada tahun 2014 PSTA-BATAN mendapat kepercayaan untuk menjadi koordinator konsorsium riset insentif sistem inovasi nasional Kemenristek dengan judul Penelitian dan Pengembangan Teknologi dan Aplikasi *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) dengan *Compact Neutron Generator*, yang melibatkan berbagai komponen antara lain dari Balitbangkes, RSUP DR Sarjito, RSUD Prof. Dr. Margono Prov Jateng, RSUD. Dr. Soedarso Pontianak Kalbar, PT. Kimia Farma, Fakultas Farmasi UGM dan UII, Fakultas Kedokteran UGM, UNTAN, Fakultas Teknik UGM, UNY, Fakultas MIPA UGM, UNY, UNS, UNNES, RS Antamedika Jakarta, RSUD Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga, Fakultas Sains dan Teknik UNSOED, serta Badan POM. Saat ini anggota konsorsium semakin bertambah dengan bergabungnya Fakultas Hukum UNSOED, Fakultas Ekonomi dan Bisnis UNSOED,

Universitas Udayana, dan pihak swasta seperti PT. Semesta Eltrindo Pura.

Pengembangan BNCT oleh tim Konsorsium BATAN dan UGM dimulai dari Program Insentif Riset SINas dengan judul topik Pengembangan Teknologi dan Aplikasi *Boron Neutron Capture Therapy* dengan *Compact Neutron Generator* pada bidang prioritas Iptek: Teknologi Kesehatan dan Obat dan Riset Pengembangan Alat Kesehatan pada tahun 2014. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mensinergikan dan mengintegrasikan kegiatan pengembangan teknologi dan aplikasi BNCT dengan CNG yang dimulai dari penyiapan eksperimen sistem BNCT berbasis beamport tembus radial reaktor riset Kartini. Untuk keperluan klinis, siklotron 30 MeV yang dapat menghasilkan neutron thermal sesuai dengan ketentuan IAEA untuk terapi BNCT akan diinstal di rumah sakit melalui program Teaching Factory. Sebagai insiasi, 2 (dua) rumah sakit yang dipilih untuk dijadikan sebagai tempat klinis BNCT adalah Rumah Sakit Murni Teguh Medan (melalui skema B to B) dan Rumah Sakit Akademik UGM (melalui skema G to G).

Berdasarkan hasil analisis rencana bisnis pada aspek keuangan, rencana bisnis pelayanan BNCT layak untuk dijalankan. Hal ini karena kebutuhan modal BNCT dapat diupayakan, selain itu rencana bisnis BNCT juga memiliki *payback period* lebih pendek dibanding dengan umur ekonomisnya, serta memiliki *Net Present Value (NPV)* yang bernilai positif. Sedangkan profitabilitas indeks rencana bisnis BNCT ini lebih tinggi dari 1 dan memiliki *Internal Rate of Return (IRR)* yang lebih tinggi dari tingkat bunga bank, sehingga secara keseluruhan metode-metode analisis keuangan pada rencana bisnis metode BNCT ini dapat dilanjutkan untuk menjadi sebuah bisnis yang berjalan. Tantangan selanjutnya untuk pengembangan metode BNCT di Indonesia terletak pada ketersediaan regulasi yang mengatur persyaratan perizinan dan keselamatan radiasi pemanfaatan metode BNCT.

#### Aspek Regulasi BNCT di Indonesia

Dari sisi regulasi, metode BNCT belum secara eksplisit disebutkan dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion Dan Bahan Nuklir atau dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2013 Tentang Keselamatan Radiasi Dalam Penggunaan Radioterapi maupun dalam Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 17 Tahun 2012 Tentang Keselamatan Radiasi Dalam Kedokteran Nuklir. Metode BNCT merupakan kombinasi antara metode radioterapi dengan kedokteran nuklir terapi. Radioterapi adalah modalitas pengobatan dengan menggunakan Zat Radioaktif Terbungkus dan/atau Pembangkit Radiasi Pengion sedangkan Kedokteran Nuklir Terapi adalah metoda kedokteran yang dalam kegiatannya menggunakan radionuklida dan/atau Radiofarmaka

yang dimasukkan ke dalam tubuh pasien untuk tujuan terapi.

Pada metode BNCT, terapi yang dilakukan memanfaatkan radiofarmaka berupa senyawa  $^{10}\text{B}$  dan juga pembangkit radiasi pengion khususnya partikel neutron. Oleh karena itu, metode BNCT dapat dikatakan sebagai metode kombinasi antara metode radioterapi dengan metode kedokteran nuklir terapi. Meskipun belum disebutkan secara eksplisit didalam peraturan perundang-undangan yang ada, persyaratan izin operasional metode BNCT sebenarnya sudah terwadahi oleh Perka BAPETEN nomor 3 tahun 2013 jika metode BNCT dimasukkan sebagai bagian dari salah satu metode radioterapi atau Perka BAPETEN nomor 17 tahun 2012 apabila BNCT dimasukkan kedalam bagian Kedokteran Nuklir. Mengingat pesatnya pengembangan metode terapi kanker berbasis BNCT ini, maka BAPETEN sebagai lembaga pengawas ketenaganukliran di Indonesia berupaya untuk menyediakan peraturan yang dapat secara spesifik mengatur tentang perizinan dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan metode BNCT di Indonesia.

#### KESIMPULAN

Metode BNCT merupakan metode terapi kanker yang sangat menjanjikan untuk dikembangkan sebagai salah satu metode untuk mengatasi penyakit kanker di Indonesia. Sebagai salah satu metode terapi yang baru, pengoperasiannya membutuhkan perizinan dari lembaga yang berwenang. BAPETEN sebagai lembaga pengawas ketenaganukliran di Indonesia berupaya menyediakan peraturan yang dapat secara spesifik mengatur tentang perizinan dan keselamatan radiasi dalam pemanfaatan metode BNCT di Indonesia. Saat ini, Perka BAPETEN nomor 3 tahun 2013 dan Perka BAPETEN nomor 17 tahun 2012 masih dianggap mampu mewartakan perkembangan metode BNCT di Indonesia.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Moss, R.L., 2014, Critical review, with an optimistic outlook on Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). *Applied Radiation and Isotopes* vol. 88, hal. 2–11
- [2] Saurwein, W.A.G., Wittig, A., Moss, R.L., dan Nakagawa, Y., 2012, *Neutron Capture Therapy*, London: Springer VBH.
- [3] Wang, Z., Morris, C.L., Bacon J.D., Brockwell, M.I., dan Ramsey, J.C., 2014, A double helix neutron detector using micron-size  $^{10}\text{B}$  powder, *LANL*.
- [4] Saurwein, W.A.G., dan Moss, R.L., 2009, Requirements for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) at a Nuclear Research Reactor. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities.
- [5] Kreiner, A.J., Baldo, M., Begueiro, J.R., Cartelli,

- D., Castell, W., Vento, V.T., Asoia, J.G., Mercuri, D., Padulo, J., Sandin, C.S., Erhardt, J., Kesque, J.M., Valda, A.A., Debray, M.E., dan Carranza, O., 2014, Accelerator-based BNCT, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 88, hal. 185–189.
- [6] Kasezas, Y., Khala, H., dan Rahmani, F., 2013, Optimization of the Beam Shaping Assembly in the D – D Neutron Generators-based BNCT using the Response Matrix Method, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 82, hal. 55–59.
- [7] Yu, H.T., Liu, H., Lin, T.L., dan Wang, L.W., 2011, BNCT treatment planning of recurrent head-and-neck cancer using THORplan, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 69, no. 12, hal. 1907–1910.
- [8] Suzuki, M., Tanaka, H., Sakurai, Y., Kashino, G., Yong, L., Masunaga, S., Kinashi, Y., Mitsumoto, T., Yajima, S., dan Ono, K., 2009, Impact of accelerator-based boron neutron capture therapy (AB-BNCT) on the treatment of multiple liver tumors and malignant pleural mesothelioma,” *Radiotherapy and Oncology*, vol. 92, no. 1, hal. 89–95.
- [9] Tanaka, H., Sakurai, Y., Suzuki, M., Takata, T., Masunaga, S., Kinashi, Y., Kashino, G., Mitsumoto, T., Yajima, S., Tsutsui, H., Takada, M., dan Ono, K., 2009, Improvement of dose distribution in phantom by using epithermal neutron source based on the Be(p,n) reaction using a 30 MeV proton cyclotron accelerator, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 67, hal. 258–261.
- [10] Capoulat, M.E., Herrera, M.S., Minsky, D.M., Gonzales, S.J. dan Kreiner A.J., 2014, Be (d,n) 10 B-based neutron sources for BNCT, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 88, hal. 190–194.
- [11] Sakurai, Y., Tanaka, H., Takata, T., Watanabe, T., Kondo, N., Kinashi, Y., Masunaga, S., Suzuki, M., Ono, K., and Maruhashi, A., 2017, Current Status of BNCT based on Research Reactor R&D in Japan, *The 3rd International Symposium On The Application Of Nuclear Technology As A Key To Promote Competitive National Product : Energy, Healty, Agriculture, Industry, and Environment*, UNDIKSHA, Bali: 9-14 Agustus 2018.
- [12] Bavarnegin, E., Kasesaz, Y., Wagner, F. M., 2017, Neutron beams implemented at nuclear research reactorsfor BNCT, *Journal of Instrumentation*, vol. 12, JINST 12 P05005.
- [13] Kreiner, A. J., Bergueiroa, J., Cartelli, D., et al., 2016, Present status of Accelerator-Based BNCT, *Reports OfPractical Oncology And Radiotherapy*, vol. 21, no. 2, hal. 95–101.
- [14] Yokoyama, K., Miyatake, SI., Kajimoto, Y. et al. J Neurooncol (2006) 78: 227.
- [15] Anonim, 2014, PSTA-Batan Kembangkan Teknologi BNCT untuk sembuhkan Kanker, Biro Humas dan Protokol Provinsi Kalbar.
- [16] Martin, J.E., 2006, *Physics for Radiation Protection*, 2nd ed. Weinheim: Willey-Vch Verlag GmbH & Co.
- [17] Podgorsak, E.B., 2010, Biological and Medical Physics, *Biomedical Engineering*, 2nd ed. London: Springer VBH.
- [18] Beyzadeoglu, M., Ebruli, C., dan Gokhan, O., 2010, *Basic Radiation Oncology*, London: Springer VBH.
- [19] American Cancer Society, 2014, The Science Behind Radiation Therapy. [www.cancer.org](http://www.cancer.org), diakses tanggal 26 Februari 2015.
- [20] Deng, L., Chen, C., Ye, T., dan Li, G., 2001, The Dosimetry Calculation for Boron Neutron Capture Therapy. Shanghai-China: INTECH
- [21] Faghihi, F., dan Khalili, S., 2013, Beam Shaping Assembly of a D – T Neutron Source for BNCT and its Dosimetry Simulation in Deeply-seated Tumor, *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 89, hal. 1–13.
- [22] Rasouli, F.S. dan Masoudi, S.F., 2012, Design and Optimization of a Beam Shaping Assembly for BNCT based on D-T Neutron Generator and Dose Evaluation using a Simulated Head Phantom, *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 70, no. 12, hal. 2755-2762.

NO	Nama penanya	Kode Makalah	Nama Penyaji	Pertanyaan dan Jawaban
1.	Mukhlisin (BAPETEN)	OA14	I Made Ardana (BAPETEN)	<p>1. Bagaimana konstruksi shielding BNCT?</p> <p>2. Regulasi yg cocok utk BNCT mengacu pada perka 3 atau Perka 17 ?</p> <p>3. Personil BNCT yg Sp.OnkRad atau Sp. KN?</p> <p>Jawab:</p> <p>1. Utk shielding system BNCT berbasis siklotron 30 MeV telah digunakan shielding berbahan beton barite dg ketebalan 3 meter.</p> <p>2. Regulasi yg sesuai utk BNCT adalah kombinasi antara kedua perka 3 dan perka 17. Karena metode BNCT memanfaatkan partikel radiasi + radiofarmaka.</p> <p>3. Karena memanfaatkan partikel radiasi</p>

				(radioterapi) dan radiofarmaka, maka keduanya terlibat.
2.	Sudradjat (BAPETEN)	OA14	I Made Ardana (BAPET EN)	<p>1. BNCT dihasilkan dari 3 cara, yaitu dari reactor nuklir, linier akselerator, dan linier CNG. Bagaimana produksi BNCT dari sisi cost?</p> <p>Jawab:</p> <p>1. Lebih murah/efisien jika diproduksi dari CNG (Compact Neutron Generator) apabila digunakan di RS. Namun akan lebih efektif jika dengan Siklotron 30 MeV, lebih singkat waktu terapinya. (30 menit/terapi)</p>