

PEMBAKUAN METODE UJI FISIKO KIMIA PIN PWR PASCA IRADIASI

Arif Nugroho, Dian Anggraini, Yusuf Nampira
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

Pengujian unjuk kerja bahan bakar pasca iradiasi perlu dilakukan untuk mengetahui tingkatan kinerja reaktor nuklir. Pengujian dapat dilakukan secara mekanik, metalografi maupun fisikokimia. Pada makalah ini pembakuan metode uji fisiko kimia pin PWR pasca iradiasi belum dapat dilaksanakan, hal ini disebabkan karena sampel bahan bakar pin PWR pasca iradiasi belum tersedia serta keterbatasan peralatan uji analisis yang digunakan. Persiapan metode uji fisiko kimia seperti penentuan *burn up* dan kandungan isotop U dan Pu hanya diperoleh dengan cara penelusuran pustaka dari penelitian-penelitian sebelumnya. Tujuan penulisan makalah ini adalah melakukan penelusuran literatur tentang penyiapan metode uji fisikokimia untuk penentuan *burn up* dan analisis kuantitatif isotop U dan Pu pada pin PWR pasca iradiasi. Dari hasil penelusuran pustaka diperoleh bahwa dengan memisahkan dan menganalisis isotop U, Pu, dan Nd secara pertukaran ion, nilai-nilai parameter *burn up* dapat diperoleh, sehingga nilai *burn up* dapat dihitung.

Kata Kunci : Pin PWR, *Burn up*, Fisiko kimia

PENDAHULUAN

Berdasarkan fungsinya, reaktor nuklir dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu reaktor penelitian/riset dan reaktor daya (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir/PLTN). Reaktor penelitian memanfaatkan radiasi neutron yang dihasilkan dari reaksi nuklir untuk kepentingan penelitian dan produksi radioisotop, sedangkan pada reaktor daya energi panas yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghasilkan uap panas dan selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin-generator yang bisa menghasilkan listrik. Ada beberapa jenis PLTN yang sudah beroperasi di dunia ini diantaranya jenis reaktor berpendingin air ringan (*Light Water Reactor/LWR*), reaktor berpendingin air berat (*Heavy Water Reactor/HWR*) serta jenis reaktor yang masih dikembangkan seperti reaktor suhu tinggi (*High Temperatur Gas cooled Reactor/HTGR*) dan reaktor pembiak cepat (*Fast Breeder Reactor/FBR*). Reaktor jenis reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor/PWR*) merupakan jenis reaktor tipe LWR. Jenis reaktor tipe PWR menggunakan bahan bakar yang sedikit diperkaya (kurang dari 3% ^{235}U) dan sebagai bahan kelongsong digunakan bahan zircaloy-4. Uranium dengan pengkayaan sekitar tiga persen digunakan sebagai bahan bakar dalam bentuk uranium oksida. Serbuk UO_2 ini dikompakkan menjadi bentuk pelet yang dikenai proses *cold pressing* dan sintering, selanjutnya perakitan pelet UO_2 sinter secara aksial didalam tabung kelongsong zircaloy yang dilas rapat pada kedua ujungnya membentuk sebuah batang bahan bakar (fuel pin). Batang bahan bakar ini diberi tekanan gas helium untuk mengurangi besarnya tegangan/regangan yang dialami

pada operasinya di dalam reaktor. Susunan menurut kisi persegi yang berukuran 17x17 baris batang bahan bakar ditambah dengan kisi alas, kisi atas dan kisi-kisi antara akan membentuk suatu perangkat bahan bakar^[1]. Selanjutnya untuk mengetahui unjuk kerja bahan bakar setelah dilakukan proses iradiasi di dalam reaktor, maka perlu dilakukan pengujian-pengujian baik secara mekanik, metalografi maupun secara fisikokimia. Beberapa pengujian secara fisiko kimia yang dilakukan diantaranya : penentuan burn up pin PWR pasca iradiasi, penentuan profil *burn up* secara radial pada pin pasca iradiasi, penentuan kuantitatif isotop uranium, plutonium dan hasil produksi fisi lain dalam pin pasca iradiasi.

Nilai *burn up* merupakan parameter yang sangat penting dalam proses pasca iradiasi. Nilai *burn up* dapat dihitung dari komposisi dan isotop-isotop yang berada dalam bahan bakar pasca iradiasi. Nilai ini berguna untuk menilai unjuk kerja reaktor. Beberapa metode telah dikembangkan untuk melakukan analisis *burn up*, baik secara uji merusak maupun uji tak merusak^[2]. Dalam uji tak merusak (*non destructive test*, NDT), analisis menggunakan uji spektrometri gamma merupakan metode yang paling banyak digunakan. Metode ini biasanya melakukan investigasi pada isotop-isotop hasil fisi umur paruh panjang^[3]. Pada uji merusak, analisis *burn up* yang sering digunakan adalah pengujian secara kimia. Hal ini dilakukan karena mengingat dalam analisis *burn up*, bahan bakar bekas yang dianalisis memiliki beberapa komponen isotop yang dapat terdiri dari senyawa aktinida dan hasil produk fisi dalam berbagai komposisi dan status kimiawi. Senyawa-senyawa tersebut harus dipisahkan dan dianalisis untuk dikaitkan dengan parameter *burn up* yang diperlukan. Beberapa metode pemisahan yang umum digunakan adalah ekstraksi dengan pelarut dan pertukaran ion^[4].

Kegiatan pembakuan metode fisiko kimia untuk pin PWR pasca iradiasi belum dapat dilakukan dikarenakan sampel bahan bakar pin PWR pasca iradiasi belum tersedia, serta keterbatasan peralatan uji analisis yang digunakan. Penyiapan metode uji fisiko kimia untuk pin PWR hanya dilakukan dengan cara penelusuran literatur dari peneliti sebelumnya yang sudah melakukan. Dengan keterbatasan tersebut, maka tujuan penulisan makalah ini adalah melakukan penelusuran literatur tentang penyiapan metode uji fisiko kimia untuk penentuan *burn up* dan analisis kuantitatif isotop U dan Pu pada pin PWR pasca iradiasi. Penelusuran literatur ini dibatasi pada masalah penentuan *burn up* dan kandungan isotop U dan Pu pada pin PWR pasca iradiasi.

METODOLOGI

A. Penentuan *Burn up* Pin PWR Pasca Iradiasi

Pada literatur yang diacu^[5,6], pengukuran *burn up* didasarkan pada kandungan isotop Nd yang dihasilkan dari pembelahan isotop ²³⁵U. Adapun bahan-bahan yang dibutuhkan adalah sebagai berikut : sampel cuplikan pelet pin PWR yang telah diradiasi, larutan standar Nd, resin penukar ion dowex 1x4 (200-400 mesh), HNO₃ pekat, larutan HONH₂HCl 5%, bahan elusi 1 (campuran HNO₃ 1:1 dengan 90% metanol), bahan elusi 2 (campuran HNO₃ 1N dengan 90% metanol), dan bahan elusi 3 (campuran HNO₃ 0,5N dengan 60% metanol).

Peralatan yang digunakan adalah kolom penukar ion, beaker gelas, pipet endorf, pipet gondok, pemanas listrik, seperangkat alat spektrometri massa, filamen rhenium. Adapun langkah kerja sebagai berikut :

Pemisahan Nd dari hasil belah lainnya.

Sebanyak 500 mg sampel pelet pin PWR yang telah diiradiasi dilarutkan dalam 50 mL larutan HNO₃ 0,5N. Larutan uranium teriradiasi diambil 1 mL dan ditempatkan dalam beaker gelas. Larutan ditambah 25 µL larutan standar Nd dan 2 mL larutan HONH₂HCl 5% selanjutnya didiamkan selama 5 menit (untuk mereduksi U dan Pu). Kemudian larutan ini ditambah 0,5 mL HNO₃ pekat (untuk mengoksidasi U dan Pu menjadi U(IV) dan Pu(IV) dan dipanaskan hingga kihat. Digunakan kolom resin penukar ion yaitu panjang resin 10 cm, diameter 0,3 cm dan panjang resin 6 cm, diameter 0,2 cm

Hasil perlakuan ditambah dengan 200 µL eluen 1, kemudian dipindahkan ke dalam kolom resin 1. Setelah terserap dalam kolom kemudian dielusi dengan 4 mL eluen 1 dan ditampung dalam beaker gelas. Larutan hasil dipanaskan hingga kihat, kemudian dilarutkan dalam 200 µL eluen 2, larutan ini dipindahkan dalam kolom resin 2. Setelah terserap dalam resin kemudian dielusi dengan 1 mL eluen 2 dan ditampung dalam beaker gelas. Larutan ini mengandung unsur-unsur tanah jarang, Nd akan didapatkan dengan mengelusi 1,5 mL eluen 3 dan ditampung dalam beaker gelas. Larutan yang mengandung Nd ini dipanaskan hingga mendekati kering, kemudian dilarutkan dalam 20 µL HNO₃ 0,5 N untuk dianalisis dengan spektrometer massa.

Pengukuran dengan spektrometer massa termoinisasi

Sebanyak 20 µL larutan cuplikan+standar (hasil pemisahan) ditempatkan pada 2 buah filamen tepi. Kemudian dilakukan pengukuran menggunakan spektrometer massa.

B. Penentuan Kandungan Isotop Pu dan U Dalam Larutan Pin PWR Dengan Kolom Penukar Anion

Pada penentuan kandungan isotop Pu dan U, metode yang digunakan mengacu pada ASTM C1411-01 dan ASTM C1415-01^[7,8]. Bahan yang digunakan adalah larutan uranil nitrat dari Pin PWR pasca iradiasi yang sudah dipisahkan isotop Cs-nya menggunakan metode pengendapan CsClO_4 , larutan standar campuran AMR 43 (^{239}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm), larutan standar U_3O_8 20% ^{235}U (^{238}U , ^{235}U , ^{234}U , ^{236}U) bersertifikat, resin dowex 1x8 Cl^- 100-200 mesh, HCl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4OH , aquadest.

Sedangkan peralatan yang digunakan adalah kolom penukar anion, spektrometer- α EG & G ORTEC, seperangkat alat elektrodeposisi, planset stainless steel, pemanas listrik, timbangan analitik, gelas beker, pipet endorff.

Adapun langkah kerja sebagai berikut:

Pemisahan isotop Pu dan U di dalam larutan Pin PWR pasca iradiasi dilakukan menggunakan metode penukar anion dengan penambahan resin DOWEX 1x8. Supernatan sebanyak 100 μL dipanaskan sampai kering, kemudian dilarutkan lagi dengan HNO_3 8M, dan dipanaskan sampai kering, kemudian dilarutkan dengan 8 mL HNO_3 3M dan ditambah 1 tetes 0,1M FeSO_4 , sambil diaduk dan ditambah 3 mL HNO_3 16M, sehingga konsentrasi HNO_3 dalam larutan menjadi 8M. Larutan umpan dilewatkan dengan laju alir 0,5 mL per menit ke dalam kolom penukar anion dengan diameter kolom 0,9 mm yang telah berisi resin DOWEX 1x8 seberat 1,2 g dan telah terkondisikan dengan ion NO_3^- . Isotop Pu terikat oleh resin dan isotop U dan pengotor lainnya keluar sebagai efluent yang ditampung di dalam gelas beker (larutan tersebut digunakan untuk analisis isotop U). Isotop Pu yang terikat dengan resin kemudian dielusi menggunakan campuran HCl 0,36M dan HF 0,01M sebanyak 10 mL. Larutan efluen Pu yang keluar dari kolom ditampung dalam gelas beker, kemudian dipanaskan sampai kering dan ditambah dengan 1 mL HNO_3 pekat dan dipanaskan lagi sampai kering, selanjutnya efluent isotop Pu dikenakan proses ED sebelum dilakukan pengukuran dengan spektrometer- α .

Larutan efluen isotop U hasil pemisahan dari isotop Pu, selanjutnya dipanaskan sampai kering, dan setelah dingin ditambah 5 mL HCl 12M. Larutan tersebut dilewatkan ke dalam kolom penukar anion dengan mengalirkan 10 mL HCl 12M melalui kolom yang berisi 1,2 g resin DOWEX 1x8 dalam bentuk $^- \text{Cl}$. Larutan yang keluar dari kolom ditampung dalam beker gelas, kemudian kolom dibilas dengan 10 mL HCl 12M dan hasil tampungan dalam beker dibuang ke dalam botol limbah pasca iradiasi. Isotop U yang keluar dari kolom dielusi dengan 10 mL HCl 0,1M dan efluen U-nya ditampung dalam beker gelas.

Larutan efluen U diuapkan sampai kering dan dinginkan, kemudian ditambahkan 5 mL HNO_3 pekat dan diuapkan sampai kering dan dinginkan. Efluen isotop U dikenakan proses elektrodeposisi sebelum dilakukan pengukuran dengan spektrometer- α .

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Penentuan Burn Up Pin PWR Pasca Iradiasi

Dari pengukuran komposisi isotopik neodimium dari neodimium alam akan diperoleh spektrum isotopik neodimium dari neodimium alam. Masing-masing isotop ¹⁴²Nd, ¹⁴³Nd, ¹⁴⁴Nd, ¹⁴⁵Nd, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁸Nd, dan ¹⁵⁰Nd mempunyai intensitas yang berbeda pada Nd alam maupun Nd_{cuplikan+standar} isotop ¹⁴²Nd dan ¹⁴⁸Nd setelah mengalami pemisahan.

Selanjutnya untuk menghitung banyaknya ¹⁴⁸Nd yang dihasilkan dari pembelahan uranium digunakan persamaan sebagai berikut :

$$N = \frac{(I - H \times \frac{\% \text{ } ^{148}\text{Nd}}{\% \text{ } ^{142}\text{Nd}})}{(H \times \frac{\% \text{ } ^{148}\text{Nd}}{\% \text{ } ^{142}\text{Nd}})} \times \% \text{ } ^{148}\text{Nd} \times \text{Nd standar} \dots \dots \dots (1)$$

dengan :

- N = banyaknya ¹⁴⁸Nd yang dihasilkan dari pembelahan ²³⁵U
- I = Intensitas/tinggi puncak ¹⁴⁸Nd
- H = Intensitas/tinggi puncak ¹⁴²Nd
- % ¹⁴⁸Nd = persen atom ¹⁴⁸Nd (standar)
- % ¹⁴²Nd = persen atom ¹⁴²Nd (standar)
- Nd_{std} = Nd standar yang ditambahkan (a.m.u)

Jumlah Nd yang ditambahkan dalam cuplikan, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$Nd_{std} = \text{volume} \times \text{konsentrasi} \times 6,025 \cdot 10^{23} \dots \dots \dots (2)$$

Sehingga jumlah Nd dalam setiap 1 mL cuplikan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1). Setelah diperoleh jumlah Nd dalam 1 mL, maka dapat dihitung jumlah Nd dalam 1 g sampel.

Perhitungan ¹⁴⁸Nd dari hasil belah secara teoritis dapat dilakukan dengan persamaan 3 dibawah ini :

$$N_{pf} = N_0 (U-235) \times \Phi \times \sigma_f \times \rho \times t_{irr} \dots \dots \dots (3)$$

dengan :

- N₀ (U-235) = (W x %atom x 6,025.10²³)/238,03
- W = berat uranium diiradiasi (a.m.u)
- T_{irr} = waktu iradiasi (detik)
- Φ = fluks neutro (cm⁻²det⁻¹)
- σ_f = tampang lintang pembelahan ²³⁵U (cm²)
- ρ = fission yield
- % atom = persen atom ²³⁵U

Untuk menghitung harga pembelahan ^{235}U :

$$N_f = N_{pf} / \rho \dots\dots\dots(4)$$

Dengan persamaan (4) dapat diperoleh harga pembelahan ^{235}U dari pengukuran dan teori.

Biasanya *burn up* (derajat bakar) dinyatakan dalam satuan tenaga (Mega watt hari/ton). Dengan mengambil asumsi bahwa untuk satu pembelahan ^{235}U membebaskan tenaga total sebesar 200 MeV (4) sehingga derajat bakarnya dapat dihitung :

Untuk mempermudah pemahaman tentang perhitungan nilai *burn up*, maka dilakukan pemisalan pada nilai *burn up*.

Misal : nilai pembelahan ^{235}U dari pengukuran sebesar $4 \cdot 10^{12}$, maka nilai

$$\begin{aligned} N_f &= 4 \cdot 10^{12} \text{ pembelahan} / 500 \text{ mg sampel} \\ &= 8 \cdot 10^9 \text{ pembelahan} / \text{mg} \\ &= 8 \cdot 10^9 \times 200 \text{ MeV/mg} \\ &= 16 \cdot 10^{11} \text{ MeV/mg} \\ &= 16 \cdot 10^{11} \times 10^9 \text{ MeV/ton} \\ &= 16 \cdot 10^{20} \times 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ watt dt/ton} \\ &= 2,56 \cdot 10^8 \text{ watt dt/ton} \\ &= (2,56 \cdot 10^8) / (10^6 \times 24 \times 3600) \text{ MWd/t} && 1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ joule} \\ &= 2,96 \cdot 10^{-3} \text{ MWd/t} && 1 \text{ joule} = 1 \text{ watt det} \end{aligned}$$

Dari uraian diatas, maka dapat diketahui nilai *burn up* secara perhitungan analisis. Untuk mengetahui apakah nilai *burn up* secara perhitungan analisis benar, perlu dilakukan uji banding dengan nilai *burn up* secara teori. Hasil penelitian pada literatur^[4] mendapatkan perbedaan nilai *burn up* secara teori tidak jauh dengan secara analisis (dibawah 8,5%). Sehingga metode analisis *burn up* pada literatur dapat digunakan.

B. Penentuan Kandungan Isotop Pu dan U Dalam Larutan Pin PWR Dengan Kolom Penukar Anion

Pemisahan uranium dan plutonium didasarkan pada prosedur ASTM C1411-01 dan ASTM C1415-01, dimana isotop uranium diubah dari bentuk kation menjadi bentuk anion menggunakan HCl dan selektif dengan jenis resin dowex 1x8 Cl⁻. Bahan eluen yang dipakai adalah HCl 0,1 M yang dapat memperbesar pori resin sehingga uranium yang terikat di dalam resin dapat terlepas lebih banyak. Hasil efluen dilakukan proses elektrodeposisi, dan diperoleh endapan yang menempel pada planset diukur menggunakan spektrometer- α . Hasil pemisahan ini menunjukkan perbandingan tinggi puncak spektrum radioisotop uranium lebih tinggi dari tinggi puncak radioisotop plutonium.

Pemisahan isotop U dan Pu dilakukan dengan metode kolom penukar ion dengan penambahan resin Dowex 1x8. Resin Dowex 1x8Cl⁻ mempunyai selektivitas yang sangat tinggi terhadap isotop U dan Dowex 1x8NO₃⁻ selektif terhadap isotop Pu. Untuk pemisahan isotop Pu dari isotop U digunakan resin Dowex 1x8 dengan larutan HNO₃ 8M sebagai bahan media asam, sedangkan untuk mengelusi isotop Pu dari resin digunakan campuran larutan HCl 0,36M dan HF 0,01M sebagai eluen^[9,10].

Pemisahan isotop ²³⁵U menggunakan resin Dowex sebagai penukar anion yang dapat ditukarkan dengan anion-anion dalam larutan umpan, dimana umpan terlebih dahulu dikondisikan dalam suasana HCl 12M. Efluen U yang keluar dari kolom dielusi dengan HCl 0,1M, dikisatkan menggunakan media pemanas. Sampel yang sudah dikisatkan dilakukan proses elektrodeposisi, kemudian dicacah menggunakan spektrometer-α.

Hasil pengukuran menggunakan alat spektrometer-α, berupa luas puncak untuk masing-masing spektrum isotop U maupun Pu. Untuk mendapatkan nilai secara kuantitatif digunakan bahan standar yang sudah diketahui aktifitasnya. Kandungan isotop U dan Pu dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$eff = \frac{Ci}{Akt \times Yield} \dots\dots\dots(5)$$

$$Akt = \frac{\text{laju cacah (cps)}}{Yield \times eff} \dots\dots\dots(6)$$

$$W = \frac{Akt \times BA}{\lambda \times NA} \dots\dots\dots(7)$$

dengan:

- C_i : jumlah cacahan per detik
- Y_i : faktor *yield* intensitas dari isotop-i (lihat daftar tabel isotop).
- W : jumlah isotop dalam berat tertentu sampel bahan bakar nuklir
- Akt : keaktifan isotop, dps atau Bq
- Eff : efisiensi detektor

Untuk mengetahui apakah nilai kandungan isotop U dan Pu yang dihasilkan valid atau tidak, perlu dilakukan uji *t_{recovery}*. Uji *t_{recovery}* dilakukan menggunakan larutan standar isotop U dan Pu bersertifikat yang sudah diketahui nilai kandungannya. Larutan standar ini dikenakan proses pemisahan yang sama dengan sampel larutan uranil nitrat, selanjutnya dilakukan pengukuran kandungan isotop U dan Pu dalam larutan hasil pemisahan. Hasil nilai kandungan radionuklida ²³⁵U yang diperoleh dibandingkan dengan nilai kandungan radionuklida ²³⁵U secara perhitungan teoritis. Hasil perbandingan ini

disebut dengan *recovery* hasil perhitungan. Nilai $t_{recovery}$ hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai $t_{recovery}$ tabel. Nilai $t_{recovery}$ tabel diperoleh dengan melihat tabel *recovery* pada pustaka^[11]. Apabila nilai $t_{recovery}$ hitung $<$ $t_{recovery}$ tabel, maka nilai hasil perhitungan kandungan isotop dalam PEB tidak perlu dikoreksi dengan nilai *recovery*^[12].

Persamaan yang digunakan untuk menghitung $t_{recovery}$ adalah:

$$t_{recovery} \text{ hitung} = (1-rec)/\mu_{rec} \dots\dots\dots(8)$$

$$\mu_{rec} = S_{rec}/(n)^{0.5} \dots\dots\dots(9)$$

dengan : rec adalah nilai *recovery* standar

S_{rec} adalah nilai standar deviasi *recovery*

μ_{rec} adalah hasil pembagi nilai standar deviasi standar dan akar nilai pengulangan pengukuran

KESIMPULAN

Pada makalah ini pembakuan metode uji fisiko kimia pin PWR pasca iradiasi khususnya tentang penentuan *burn up* dan penentuan kandungan isotop U dan Pu belum dapat dilaksanakan, hal ini disebabkan karena sampel bahan bakar pin PWR pasca iradiasi belum tersedia serta keterbatasan peralatan uji analisis yang digunakan. Persiapan metode uji fisiko kimia seperti penentuan *burn up* dan kandungan isotop U dan Pu hanya diperoleh dengan cara penelusuran pustaka dari peneliti sebelumnya yang telah melakukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Drs. Purwadi Kasino Putro, M.Sc. Sebagai penanggung jawab komponen pembakuan metode uji fisikokimia Pin PWR Pasca Iradiasi yang telah memberikan kepercayaan untuk menjadi salah satu bagian dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Haryoto Djojotubroto dkk, "Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir", Badan Tenaga Atom Nasional, Jakarta, 1986.
2. Kim J.S, et, al, *Burnup Determination of High Burnup and Dry Processed Fuels Based on Isotope Dilution Mass Spectrometric Measurements*, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 44, No. 7, 2007. p. 1015–1023.

3. R. Khan, S. Karimzadeh, H. Böck, *TRIGA fuel burn-up calculations and its confirmation, Nuclear Engineering and Design*, Volume 240, Issue 5, May 2010, Pages 1043–1049.
4. Lee, C. H., et al.. *Separation of fission products from spent pressurized water reactor fuels by anion exchange and extraction chromatography for inductively coupled plasma atomic emission spectrometric analysis. Instrumentation*, 428-00, 2001. p.133–142.
5. Yusuf Nampira, “Penentuan Derajat Bakar Uranium Teriradiasi Secara Spektrometri Massa”, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Bahan Murni dan Instrumentasi Nuklir, Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi, Badan Tenaga Atom Nasional, Yogyakarta 22-26 April 1985.
6. Jung Suk Kim, Young Shin Jeon, Soon Dal Park, Yeong-Keong Ha and Kyuseok Song, “*Analysis of High Burnup Pressurized Water Reactor Fuel Using Uranium, Plutonium, Neodymium, and Cesium Isotope Correlations With Burnup*”, Elsevier Journal Nuclear Engineering Technology 47. 2015, p. 924-933.
7. AMERICAN STANDARD TEST METHODS, “*Standar Practice for The Ion Exchange Separation of Uranium and Plutonium Prior to Isotopic Analysis*”: ASTM No C-1411 Vol. 12.01, 2014
8. AMERICAN STANDARD TEST METHODS, “*Standard Test Method for ²³⁸Pu Isotopic Abundance By Alpha Spectrometry*”: ASTM No C-1415-14 Vol. 12.01, 2014.
9. Arif Nugroho, Yusuf Nampira, Yanlinastuti, “Analisis Radionuklida ²³⁵U Dalam Pelat Elemen Bakar U₃Si₂-Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Spektrometri- α ”, Prosiding Seminar Nasional IX SDM Teknologi Nuklir, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 31 Oktober 2013, hal. 140-145.
10. Aslina Br. Ginting, Dian Anggraini, Boybul, Arif Nugroho, dkk, “Pengembangan Metoda Pengujian Fisiko Kimia Bahan Bakar Nuklir Pasca Iradiasi”, Dokumen Teknis, Pusat Teknologi Bahan Bakar nuklir Nasional, Jakarta, 2012.
11. Robert L. Anderson, “*Practical Statistics for Analytical Chemists*”, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987.
12. Julia Kantasubrata, “Uji *Recovery*”, Diklat Ketidakpastian Pengukuran Pada Hasil Analisa Kimia, PTBBN BATAN, Serpong, Februari 2015.