

STUDI LITERATUR “PENGUKURAN LAJU EMISI NEUTRON (FLUENS) DENGAN SISTEM MANGANESE SULPHATE BATH (MnSO₄.H₂O)”

Nazaroh

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan
nazaroh_s@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI LITERATUR “PENGUKURAN LAJU EMISI NEUTRON (FLUENS) DENGAN SISTEM MANGANESE SULPHATE BATH (MnSO₄.H₂O)”. Salah satu tugas PTKMR-BATAN sebagai laboratorium acuan nasional atau SSDL (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) di bidang metrologi radiasi adalah pemeliharaan ketertelusuran standar tingkat nasional untuk satuan aktivitas, dosis, (termasuk juga fluens). PTKMR-BATAN belum memiliki fasilitas, sarana dan prasarana manganese bath, namun tujuan penulis melakukan studi literature ini karena pengukuran laju emisi neutron dengan metode manganese sulphate bath sangat penting dan bila telah memiliki peralatannya, metode ini dapat digunakan untuk mensertifikasi sumber neutron “orphan source”. Interkomparasi pengukuran laju emisi neutron AmBe, telah diselenggarakan oleh BIPM pada tahun 2005, diikuti oleh 8 partisipan : CIAE (China), CMI (Republik Czech), KRISS (Korea), LNE-LNHB (Perancis), LNMRI (Brazil), NPL (UK), VNIIM (Rusia), dan NIST (USA). Prinsip dari metode MnSO₄.H₂O bath adalah neutron yang datang dan memasuki bath, ditermalkan dan ditangkap larutan MnSO₄ oleh berbagai inti yang ada di dalam bath dan dengan fraksi tertentu ditangkap oleh ⁵⁵Mn. Laju disintegrasi absolut dari ⁵⁶Mn diukur dengan sistem pencacah koinidensi 4πβγ atau metode lain dan dengan menggunakan persamaan Axton, dapat diperoleh laju emisi neutron yang datang”. Koreksi dilakukan terhadap *neutron leakage*, *self capture* dan *fast neutron capture* oleh sulfur dan oksigen menggunakan sistem kode transport MCNP (Monte Carlo N-particle)-ENDF/B-VI cross section. Berdasarkan uji χ^2 , hasil interkomparasi laju emisi neutron rata-rata dari ke 6 partisipan adalah : $(2,438 \pm 0,088) \cdot 10^6$ n/s.

Kata kunci: laju emisi neutron dan Manganese sulphate bath

ABSTRACT

LITERATURE STUDY "MEASUREMENT OF NEUTRON EMISSION RATE (FLUENCE) WITH MANGANESE SULPHATE BATH SYSTEM (MnSO₄.H₂O)". One of PTKMR-BATAN's duties as a national reference laboratory or SSDL (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) in the field of radiation metrology is maintenance of national standard traceability for units of activity, dose, (including fluence). PTKMR-BATAN does not yet have facilities, equipment and infrastructure of manganese bath, but the author's purpose is to study this literature because the measurement of neutron emission rate by manganese sulphate bath method is very important and if PTKMR have had the equipment, this method can be used to certify the source of neutron "orphan source". Intercomparison of AmBe neutron emission rate measurement, have held by BIPM in 2005, followed by 8 participants: CIAE (China), CMI (Czech Republic), KRISS (Korea), LNE-LNHB (France), LNMRI (Brazil), NPL UK, VNIIM (Russia), and NIST (USA). The principle of the MnSO₄.H₂O bath method is a neutron that comes and enters the bath, terminated and captured by MnSO₄ solution with various nuclei present in bath and with a certain fraction captured by ⁵⁵Mn. The absolute disintegration rate of ⁵⁶Mn is measured by a 4 πβγ coincidence counting system or other method and by using the Axton equation, an incoming neutron emission rate can be obtained ". Correction is made to neutron leakage, self capture and fast neutron capture by sulfur and oxygen using MCNP transport system code (Monte Carlo N-particle) -ENDF / B-VI cross section. Based on the test χ^2 , the intercomparison result of the average neutron emission rate from the 6 participants is: $(2,438 \pm 0.088) \cdot 10^6$ n / s.

Keywords: emission rate and Manganese sulphate bath.

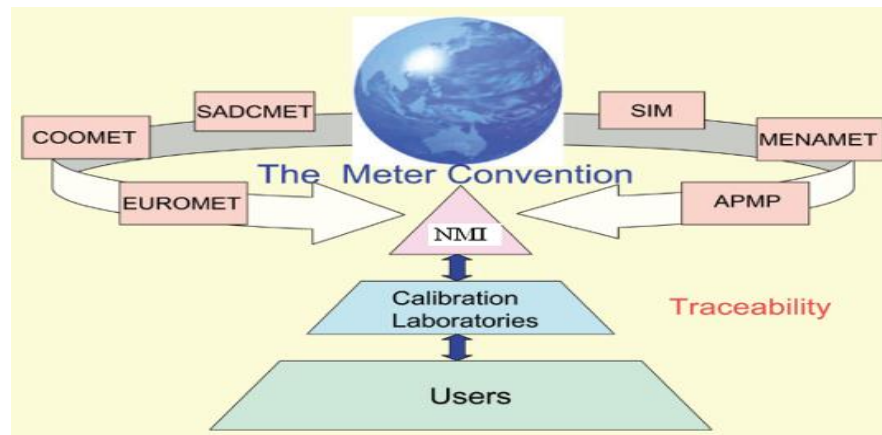
PENDAHULUAN

Metrologi Neutron adalah ilmu pengetahuan yang mempelajari tentang pengukuran neutron. Besaran fisika primer dalam metrologi neutron adalah laju emisi neutron dan fluens neutron. Laju emisi neutron, dN/dt adalah jumlah neutron yang dipancarkan oleh suatu sumber, dan fluens neutron, dN/dA adalah jumlah neutron yang melalui suatu area persatuan waktu [1].

BIPM (*Bureau Internationale des Poids et Mesures*) adalah badan internasional yang

mengurus tentang ukuran. Salah satu tugasnya mengkoordinir NMI (*National Metrology Institute*) dengan kewenangan “Konvensi meter” [2], yang merupakan sebuah perjanjian diplomatik antara 55 negara, beroperasi melalui serangkaian Komite Konsultatif, yang anggotanya adalah NMI dari negara penandatangan. Komite Konsultatif untuk Radiasi Pengion (CCRI) memiliki tiga bagian: bagian (I) berkaitan dengan dosimetri radiasi, bagian (II) berkaitan dengan metrologi radionuklida dan bagian (III) berkaitan dengan metrologi neutron.

Pada Gambar 1 disajikan hierarki *traceability* pengukuran berdasarkan *The Meter Convention*.



Gambar 1. Hierarki *Traceability* Pengukuran berdasarkan *The Meter Convention* [2].

Di Indonesia, PTKMR-BATAN adalah NMI (*National Metrology Institute*) di bidang radiasi, namun belum memiliki fasilitas dan peralatan *manganese sulphate bath* apalagi berpartisipasi dalam interkomparasi di bidang metrologi neutron.

Pada Pasal 159, Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 14 Tahun 2013 [3] tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional, dalam melaksanakan tugas, bidang Metrologi Radiasi, PTKMR-BATAN menyelenggarakan fungsi: pelaksanaan penelitian dan pengembangan di bidang standarisasi radionuklida, kalibrasi alat ukur dosis radiasi, audit dosimetri dan pemeliharaan ketertelusuran standar tingkat nasional satuan ukuran aktivitas zat radioaktif dan dosis radiasi pengion.

Salah satu tugas PTKMR-BATAN sebagai laboratorium acuan nasional atau SSDL-Jakarta (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) di bidang metrologi radiasi adalah memelihara ketertelusuran standar tingkat nasional untuk satuan aktivitas, dosis, (termasuk juga fluens). Di samping itu melakukan standarisasi : aktivitas radionuklida dan dosis (termasuk juga fluens).

PTKMR-BATAN belum memiliki fasilitas, sarana dan prasarana *manganese sulphate bath*, namun penulis melakukan studi literatur ini karena metode *manganese sulphate bath* sangat penting dan bila PTKMR telah memiliki peralatan ini, metode ini bermanfaat untuk menentukan laju emisi sumber neutron sehingga dapat mensertifikasi sumber neutron ‘orphan source’.

Metode ini telah *establish* di beberapa laboratorium seperti : CIAE (China), CMI (Republik Czech), KRISS (Korea), LNE-LNHB (Perancis), LNMRI (Brazil), NPL (UK), VNIIM (Rusia), dan NIST (USA). Bahkan 8 laboratorium

ini telah mengikuti kegiatan antar banding pengukuran laju emisi neutron yang diselenggarakan oleh BIPM pada tahun 1999 dan 2005 [2], sebagai perwujudan *traceability* pengukuran neutron.

Ada 3 metode untuk penentuan laju emisi neutron secara absolut, yaitu : metode partikel gabungan (*the associated particle method*), metode *cross section* standar, dan metode *bath*. Namun banyak laboratorium di dunia yang memilih metode *bath* karena lebih simpel dan tampak lintang neutron thermal *manganese* besar dan akurat. Metode *manganese bath* rentang neutronnya lebar dari 1 keV – 10 MeV. Pada sistem *bath* ini, diperlukan sistem sirkulasi yang kontinu selama iradiasi, sehingga memungkinkan kita untuk mengukur aktivitas induksi mangan terus menerus selama penyinaran [4]

TEORI

Teknik *manganese sulphate bath* ($\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) merupakan metode penentuan laju emisi neutron secara absolut dari sumber neutron radionuklida. Prinsip utama dari pengukuran tersebut merupakan aplikasi khusus dari analisis aktivasi neutron (AAN).

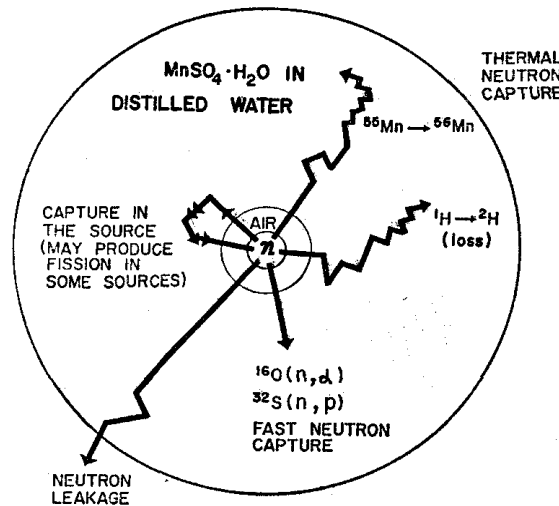
Sphere bath diisi dengan larutan MnSO_4 pekat yang sangat murni dan dilarutkan dalam *distilled water*. Untuk mengaktifkan larutan $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, sumber neutron (misal AmBe) ditempatkan di tengah *bath*.

Neutron yang dipancarkan oleh sumber AmBe akan berinteraksi dengan larutan $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan akan melambat menjadi neutron thermal, terutama oleh interaksi elastis dengan inti hidrogen. Selanjutnya neutron thermal ditangkap oleh inti mangan dan

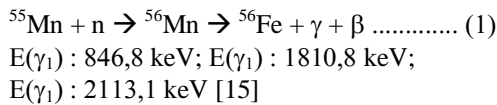
oleh inti lain dari komponen larutan (H, S, dan O), lihat Gambar 2 [4,8,11].

Penampang lintang neutron thermal inti oksigen, $\sigma_{th}(O)$ terlalu kecil karena itu interaksinya

dapat diabaikan. Tangkapan oleh hidrogen dan sulfur menghasilkan isotop stabil. Tangkapan neutron oleh inti mangan (Mn) menghasilkan inti ^{56}Mn yang radioaktif (persamaan 1).



Gambar 2. Diagram Prinsip Metode $MnSO_4.H_2O$ bath dalam *distilled water* [8]



Seperti yang telah disebutkan di atas, bagian tertentu dari neutron thermal juga ditangkap oleh inti dari komponen larutan. Jika *vessel spherical bath* memiliki dimensi yang terbatas, beberapa neutron, bocor dari *vessel*, karena itu kedua efek tsb perlu dikaji dengan pengukuran atau perhitungan faktor koreksi. Rincian dan evaluasi individu semua faktor koreksi dapat ditemukan di berbagai makalah [4, 9, 10].

^{56}Mn memiliki waktu paruh ($2,5785 \pm 0,0002$) jam. Dari pengukuran jumlah inti ^{56}Mn dengan menggunakan sistem pencacah spektrometri gamma atau sistem koinsidensi $4\pi\beta\gamma$, aktivitas ^{56}Mn dapat ditentukan dan dengan persamaan (2) laju emisi neutron, Q dapat dihitung.

$$Q = \frac{Am.M}{f(1-\delta)} \dots\dots\dots(2)$$

- Q : Laju emisi neutron dalam $4\pi sr$ [n/s]
- Am : Aktivitas massa ^{56}Mn dari bath saat saturasi [Bq/kg]
- M : Massa total larutan [kg]
- f : Probabilitas tangkapan neutron oleh Mn dalam bath dibagi inti lain dalam larutan

δ : Factor Koreksi terdiri dari probabilitas reaksi neutron (n, α) dan (n, p) dengan belerang, reaksi(n, α) dengan oksigen, probabilitas tangkapan kembali oleh sumber itu sendiri dan oleh fraksi neutron yang lolos dari vessel [4, 9, 10].

Mayoritas laboratorium, menghitung fraksi tangkapan neutron oleh inti Mn dengan menentukan kehilangan fraksi (*fraction loss*). Dua pengecualian : CMI dan KRIS menghitung fraksi *Mn capture* secara langsung menggunakan MCNP. Dengan menggunakan pers. Axton [6], Laju emisi sumber neutron dapat dihitung dengan persamaan (3)

$$Q = \frac{A}{\epsilon f (1 - O - S - L)} \dots\dots\dots(3)$$

Efisiensi pencacahan, ϵ dapat dihitung dengan persamaan (4)

$$\epsilon = \frac{N(t)}{A(t)} \dots\dots\dots(4)$$

- Q :laju emisi sumber neutron
- A :aktivitas ^{56}Mn yang dihasilkan di dalam bath.
- ϵ :efisiensi pencacahan, yang didefinisikan sebagai laju cacah persatuan disintegrasi Mn
- O :fraksi kehilangan neutron akibat tangkapan fast neutron (di dalam O dan S).
- S :fraksi neutron yang ditangkap oleh sumber

dan penyangga.
 L :fraksi neutron yang lolos dari bath
 f :fraksi neutron yang tinggal dan ditangkap Mn.

TATA KERJA

Sumber neutron yang digunakan dalam interkomparasi pengukuran laju emisi neutron adalah $^{241}\text{Am-Be}$ (α, n) (model AMN22, nomor seri AMN1000 / 1096) milik NPL, aktivitas nominal 37 GBq (1 Ci). Sumber AmBe dibungkus dalam kapsul X3 (panjang: 31 mm, diameter : 22,4

mm), diproduksi oleh QSA global. Sumber ini dipilih karena waktu paruhnya panjang, dan umumnya digunakan di laboratorium kalibrasi.

Setelah NPL melakukan pengukuran pertama, sumber dikirim ke peserta pertama, setelah selesai pengukuran, peserta tersebut mengirimkan ke peserta berikutnya sesuai jadwal yang dibuat NPL, terakhir sumber kembali ke NPL untuk pengukuran ulang.

Pada Tabel 1. Disajikan peralatan *manganese bath* di NIST (USA) dan NPL (united Kingdom)

Tabel 1. Contoh Peralatan *manganese bath* di NIST (USA) dan NPL (united Kingdom)

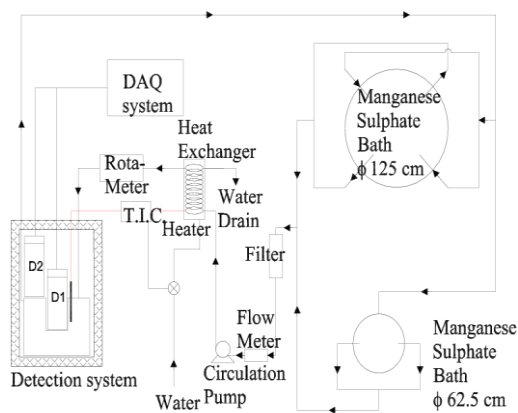
Peralatan <i>manganese bath</i> di NIST	Peralatan <i>manganese bath</i> di NPL [11]
<i>Manganese bath (MnSO₄.H₂O)</i>	<i>Large and small baths (98 dan 50 cm)</i>
Sumber neutron AmBe (model AMN22, S/N : AMN1000/1096)	<i>Manganese sulphate solution (> 500 litres)</i>
Pompa Marathon Electric, untuk sirkulasi larutan MnSO ₄	<i>Large and small stainless steel spheres and vacuum rods for mounting the source in the bath</i>
Pemegang sumber dari bahan teflon	<i>Moderator detector Assembly</i>
<i>Stepping motor</i> , beberapa katrol dan tali	<i>Long counter</i>
Sistem filter air (<i>Barnstead B-pure</i>)	<i>Circulating and stirring pumps</i>
	<i>In-line filter</i>
Peralatan di ruang kontrol NIST (Gambar 4	<i>Four NaI scintillators and photo-multiplier tubes (PMTs)</i>
<i>Manipulator remote</i>	<i>Large and small counting reservoirs</i>
<i>Step-Pak MCU-2 stepping motor controller</i>	<i>Float gauge</i>
2 detektor Bicron ("main" dan "remote") : Kristal sodium iodide dan photomultipliers	<i>Lead castles around counting reservoirs</i>
<i>Marinelli beaker stainless steel housing the "main" detector</i>	<i>Biscuit tin" neutron shielding around counting reservoirs</i>
2 Ortec 556 high voltage (HV) power supplies untuk photomultiplier tubes	<i>Electronics for NaI detector, long counter and moderator detector</i>
2 Ortec preamps for photomultiplier outputs	<i>Data acquisition PC</i>
2 Ortec linear amplifiers	<i>Balance</i>
2 NIST-built constant deadtime discriminators	<i>Furnace</i>
3 buah counter Ortec 772	
Counter timer Ortec 776	
Tennelec TC 566A time of day, year clock	
Ortec 779 interface controller	
Computer running Procomm and in-house analysis software	
<i>Generic precision pulse generator</i>	
Tracor Northern TN-7200 multichannel analyzer (MCA)	



Gambar 3: Ruang MnSO₄ bath di NIST



Gambar 4: Ruang Kontrol MnSO₄ bath di NIST



Gambar 5a. Skema Sistem *Manganese Sulphate Bath* di KRISS.



Gambar 5b. Dua bath dan sistem transfer sumber pada sistem manganese bath NPL

Ada dua *spherical manganese sulphate bath* di KRISS (*Korea Research Institute of Standards and Science*), berdiameter 125 cm dan 62.5 cm, disajikan pada Gambar 5a. Kedua bath terbuat dari stainless steel tebal 3 mm. Bath yang lebih kecil didisain untuk pengukuran laju emisi lebih rendah. Di NPL juga terdapat dua *spherical bath* (berdiameter 98 cm dan 50 cm), Gambar 5b..

Spherical bath diisi dengan larutan MnSO₄ kemurnian tinggi (99,98 %). Konsentrasi berat Mn dalam larutan : 0,046798 ± 0,16 %, dan densitas larutan : 1,0459 g/cm³ ± 0,0091 % pada 20 °C. Rasio densitas inti hydrogen (H) terhadap inti mangan (Mn), $N_H/N_{Mn} = 341,44 \pm 0,16$ %. Parameter *manganese sulphate bath* di KRISS dan lab-lab lain untuk pengukuran laju emisi neutron disajikan pada Tabel 2.

Di KRISS, ⁵⁵Mn diiradiasi menggunakan medan thermal neutron di reaktor HANARO [5,11] dan dilarutkan dengan 50 ml dari 0.1N larutan HCl. Aktivitas ⁵⁶Mn yang diproduksi di reaktor dapat dikontrol dengan perubahan fluks neutron dan waktu irradiasi di reaktor, sehingga perhitungan sederhana menggunakan tampang lintang tangkapan neutron dapat memberikan taksiran kasar aktivitas sampel.

Larutan ⁵⁶Mn dibagi dua bagian melalui proses penimbangan, satu bagian dituang ke dalam bath dan digunakan untuk pengukuran laju cacah *system manganese sulphate bath*. Lainnya digunakan untuk menentukan aktivitas spesifik dengan metode Pencacah koinidensi 4πβγ.

Selama pengukuran, larutan diaduk dan disirkulasi dengan laju aliran ±10 liter/menit, melalui *beaker Marinelli*- volume (±10 liter). Skema dari sistem sirkulasi dan sistem deteksi disajikan pada Gambar 3. Dua detector NaI(Tl) (D₁ dan D₂) yang disajikan pada Gambar 5a), mengukur gamma yang dipancarkan ⁵⁶Mn. Energi primer gamma adalah 846,8 keV, 1810,8 keV, dan 2113,1 keV [4,10,15]. Pengukuran dimulai ketika ⁵⁶Mn saturasi (setelah penyinaran 10x waktu paro ⁵⁶Mn).

Detektor bath diberi perisai Pb, tebal 10 cm, untuk mengurangi radiasi *background* ruangan. Dua pengukuran absolut terhadap laju emisi dilakukan dengan 2 detector NaI(Tl) yang berdimensi sama ϕ: 3.81cm × 3.81 cm. Detector yang satu diletakkan pada pusat lubang beaker Marinelli dan yang lainnya di atas beaker dan parallel ke pusat detector. Efisiensi pencacahan diukur 3x secara independen, dan hasil dari semua pengukuran konsisten.

Tabel 2. Parameter *Manganese Sulphate Bath* di KRIS dan di beberapa laboratoria [5]

Laboratorium	Ukuran bath (cm)	N _H /N _{Mn}	Metode Koreksi	Sistem Pencacahan
CIAE	100	58,08	In-house	Sirkulasi larutan
CMI	100	61,4	MCNP	Detector statis
KRIS	125	341,44	MCNP	Sirkulasi larutan
LNE-LNHB	100	49,17	MCNP	Ekstraksi sampel
LNMRI	100	30,09	MCNP-inhouse	Detector statis
NIST	129	54	In-house	Sirkulasi larutan
NPL	98	33,5	MCNP	Sirkulasi larutan
VNIIM	85	48,846	inhouse	Detector statis

Tabel 3. Faktor Koreksi O, S, dan L dari berbagai laboratorium untuk perhitungan laju emisi neutron [5]

Laboratorium	N _H /N _{Mn}	Tangkapan cepat O & S (O) %	Tangkapan <i>Source Assembly</i> (S) %	Kebocoran (L) %	Fraksi tangkapan thermal Mn (f)	f(1-O-S-L)
CIAE	58,08	3	0,4	1,5	0,4088	0,3888
CMI	61,4					0,367
KRIS	341,44					0,1023
LNE-LNHB	49,17	3,5	20	1,5	0,4434	0,424
LNMRI	30,09	2,731	0,08	1,112	0,563	0,5369
NIST	54	2,879	0,823	0,257	0,5371	
NPL	33,5	3,33	1,57	1,41	0,4474	0,5032
VNIIM	48,85	2,8	0,1	3,2		0,4201

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tampang lintang neutron thermal inti O ($\sigma < 0,002$ barn) sangat kecil, dibandingkan dengan inti lainnya (Mn, S, dan H). Tangkapan neutron oleh H menghasilkan inti yang stabil, Tangkapan neutron oleh belerang menghasilkan inti ³³S. Tangkapan neutron oleh ⁵⁵Mn menghasilkan ⁵⁶Mn radioaktif, yang mempunyai waktu paro (2,5785±0,0002) jam. Dari pengukuran jumlah inti ⁵⁶Mn, akan mencerminkan laju emisi (Q) dari sumber neutron.

Aktivitas ⁵⁶Mn dapat ditentukan dengan pencacah koinidensi 4πβγ atau system pencacah spektrometri gamma. Efisiensi pencacahan (ε) dari detektor sintilator ditentukan menggunakan larutan ⁵⁶Mn yang sudah diketahui aktivitasnya. Larutan ⁵⁶Mn yang sudah diketahui aktivitasnya dicampur dengan larutan MnSO₄ di dalam bath. Gamma yang dipancarkan dari peluruhan ⁵⁶Mn kemudian diukur dengan system pencacah. Efisiensi pencacahan, ε dapat dapat dihitung menggunakan persamaan (4);

$$\epsilon = \frac{N(t)}{A(t)} \dots\dots\dots(4)$$

N(t) : laju cacah dikoreksi *dead-time*, diukur oleh detektor pada waktu t.

A(t) : aktivitas ⁵⁶Mn dalam bath pada waktu t. Karena waktu paro ⁵⁶Mn agak pendek (2,5785 jam), maka pengukuran ⁵⁶Mn dilakukan segera setelah diproduksi.

MCNP code version 4C digunakan untuk menghitung probabilitas produksi ⁵⁶Mn per neutron yang dipancarkan dari sumber. Penghitungan laju emisi neutron dikoreksi terhadap *neutron leakage*, *neutron capture*, oleh materi sumber dan perangkat penyangga, reaksi neutron dengan hidrogen, oksigen dan inti sulfur, dan tangkapan epitermal oleh inti Mn.

Pada Tabel 3. disajikan factor koreksi O, S, dan L dari berbagai laboratorium, yang digunakan dalam menghitung laju emisi neutron. Nilai O, S, L bergantung pada energi sumber, konsentrasi larutan, materi dan geometri dari penyangga sumber, ukuran dan bentuk bath. Bagian dari spectrum energi, parameter lain bervariasi dari partisipan satu ke partisipan lain. Jadi tidak mungkin membandingkan nilai O, S, L secara langsung. Fraksi thermal, f terhadap Mn (f_{Mn}), bervariasi dengan konsentrasi larutan jika impuritas larutan diabaikan.

Laju emisi neutron AmBe yang dikirim partisipan ke BIPM disertai dengan ketidakpastian

bentangan, disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4: Laju Emisi neutron AmBe yang dikirim ke BIPM disertai dengan ketidakpastian bentangan [5].

Laboratorium	Laju Emisi ($\times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$)	
CIAE	2,380	0,031
CMI	2,432	0,039
KRISS	2,442	0,029
LNE-LNHB	2,299	0,064
LNMRI	2,440	0,028
NIST	2,409	0,053
NPL*	2,432	0,030
VNIIM#	2,470	0,024
Rata-rata =	2,413	0,038

Dari pengukuran laju emisi neutron AmBe yang dikirimkan 8 partisipan ke BIPM diperoleh rata-rata = $(2,413 \pm 0,038) \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$ (disajikan pada Tabel 3).

Dengan me-*reject* pengukuran CIAE dan LNE-LNHB, laju emisi rata-rata dari 6 partisipan $2,438 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$, ketidakpastian standar gabungan $0,088 \times 10^6 \text{ n.s}^{-1}$. Hasil VNIIM tidak di-*reject* karena nilai tersebut tidak *significant difference* dibandingkan dengan nilai dari 6 partisipan.

CIAE menghitung kembali faktor koreksi cross-sections menggunakan MCNP dengan ENDF/B-VI, nilai laju emisinya menjadi $2,43 \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$. Nilai revisi ini bersesuaian dengan hasil dari partisipan lain, tetapi nilai laju emisi neutron CIAE tidak dimasukkan ke dalam hasil interkomparasi karena revisi datanya dikirim setelah hasil interkomparasi diluncurkan.

LNE-LNHB melakukan penyelidikan dan memperkirakan konsentrasi N_H/N_{Mn} rendah sehingga mengakibatkan kemungkinan tidak homogen ketika mengambil sampel dari bath, dan akivitasnya cenderung lebih rendah dan biasanya dikarenakan *error* di dalam perhitungan fraksi tangkapan (n, \square) oleh inti mangan. Perhitungan diulang dan laju emisi diperoleh $2,40 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$. Nilai ini sedikit lebih rendah dari yang diharapkan, karena koreksi $O(n, \alpha)$ dihitung menggunakan *cross section* ENDF/B-VI.0.

Tidak ada penjelasan dari VNIIM mengapa nilai VNIIM lebih tinggi dari yang lain. Dua nilai pengukuran laju emisi neutron dari VNIIM adalah

$(2,471 \text{ dan } 2,469) \cdot 10^6 \text{ n.s}^{-1}$ dari metode mangan bath dan metode partikel gabungan.

Hasil pengukuran NIST sedikit lebih rendah dibandingkan CMI, KRISS, LNMRI dan NPL karena NIST tidak menggunakan faktor koreksi *cross section* ENDF/B-VI, tetapi menggunakan ENDF/B-V.

Pada Tabel 4. disajikan contoh perhitungan ketidakpastian pengukuran laju emisi neutron oleh LNMRI, dengan *uncertainty budget* yang diperhitungkan adalah : pencacahan (0,07%), efisiensi pencacahan (0,53%), kehilangan O dan S (0,058%), tangkapan sumber (0,15%), kebocoran (L) (0,07%), F(0,13%), *timing* (0,04%), *dead-time* (0,015%), waktu paro ($3,2 \cdot 10^{-7}\%$), sehingga $u_c = 0,5776\%$.

Tabel 4. Komponen Ketidakpastian pengukuran MnSO₄.H₂O bath LNMRI [3]

Sumber ketdkpastian	Nilai	Ktdpastian U(xi) (%)	Distribusi	Pembagi	Ktdkpastian standar u(xi) (%)
Pencacahan	1393,196	0,07	Normal	1	0,07
Eff. Pencacah	1,06855 × 10 ⁻³	0,53	Normal	1	0,53
Kehilangan O dan S	2,731	0,10	Rect.	1,73	0,058
F	0,800	0,26	Rect.	1,73	0,15
Timing	1,112	0,12	Rect.	1,73	0,07
Dead-time	0,563	0,13	Rect.	1,73	0,004
Waktu paro	5,21 × 10 ⁻⁷	0,01	Normal	1	0,015
	5,08 × 10 ⁻¹¹	0,02	Rect.	1,73	3,2 × 10 ⁻⁷
Jumlah Ketidakpastian =					0.5776

Untuk menganalisis hasil interkomparasi laju emisi neutron, digunakan uji Chi Square. Uji chi-square bertujuan untuk menilai independensi/membandingkan dua variabel Dalam tabel kontingensi (untuk mengetahui apakah itu terkait/ada hubungan), atau data yang kita amati sesuai dengan data yang kita harapkan. Jika nilai χ_c^2 (hitung) lebih rendah dari χ_{crit}^2 (tabel) berarti korelasinya tinggi antara dua set data sebaliknya jika nilai χ_c^2 (hitung) lebih besar dari χ_{crit}^2 (tabel) berarti tidak berkorelasi (*significant difference*).

Analisis Chi Square, χ^2 , menggunakan persamaan (5).

$$\chi_c^2 = \sum \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \dots (5)$$

χ_c^2 : *calculated Chi Square*

E_i : *expected value*, nilai KCRV (*Key Comparison Reference Value*)

O_i : *observed value*, nilai laju emisi yang diukur partisipan

i : posisi dalam tabel kontingensi = (baris-1)*(kolom-1)

Hasil analisis pengukuran laju emisi neutron disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil analisis pengukuran laju emisi neutron 6 partisipan berdasarkan χ^2 .

Hasil	VNIIM		CMI		KRISS		LNMRI		NIST		NPL*	
	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E	O	E
Xi	2,470	2,454	2,432	2,435	2,442	2,440	2,440	2,439	2,409	2,423	2,432	2,435
\hat{Y}	2,438	2,454	2,438	2,435	2,438	2,440	2,438	2,439	2,438	2,424	2,438	2,435
Sum =	4,908	4,908	4,87	4,87	4,88	4,88	4,878	4,878	4,847	4,847	4,87	4,87
df =	5											
χ^2 tabel =	11,07											

$\chi_c^2 = 0,000401$, Taraf signifikansi (α) = 0,05; df (*degrees of freedom*) = 5; $\chi_{crit}^2 = 11,07$.

$\chi_c^2 < \chi_{crit}^2 \rightarrow$ artinya hasil pengukuran laju emisi neutron 6 partisipan berkorelasi kuat (tidak berbeda nyata).

DAFTAR PUSTAKA

- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir.

- Lina Quintieri (2015), The neutron metrology laboratory of ENEA INMRI: Measurement Services and Research Activities, RAIN15—Radiazione per Innovazione 2015.
- Peraturan Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional Nomor 14 Tahun 2013 tentang

- Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional.
4. Mien-Win W.V. and Jen Chang Chou (1973), *Absolute Determination of the Fast Neutron Fluxes by Using the Flow-Type Manganese Bath Method*, *Nuclear Energy Research, Atomic Energy Council P. O. Box 3 Lung-Tan, CHINESE JOURNAL OF PHYSICS*, vol. 11 no. 2, Taiwan.
 5. N.J. Roberts^{1*} and L.N. Jones, et al (2011), International Key Comparison of Measurements of Neutron Source Emission Rate (1999-2005) – CCRI(III)-K9.AmBe, *Metrologia* 48.
 6. Axton E J, (1987). *Intercomparison of Neutron-Source Emission Rates* (1979-1984), *Metrologia*, **23**, 129-144.
 7. Sun Tae Hwang, et al (1987), *Impurity Analysis of Domestic MnSO₄.H₂O Introduce of Manganese Bath Method*, *Journal of Korean Association for radiation Protection*, Vol., 12, No,1 (1987).
 8. Branislav Vrban, Štefan Čerba, Jakub Lúley, Filip Osuský, Lenka Dujčíková, Ján Haščik (2016), *Measurement of the neutron emission rate with manganese sulphate bath technique*, *Institute of Nuclear and Physical Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava, 81219 Bratislava, Slovakia*, E-mail: branislav.vrban@stuba.sk.
 9. N. J. Roberts, (2011): *MCNP Calculations of Correction Factors for Radionuclide Neutron Source Emission Rate Measurements using the Manganese Bath*, NPL Report CIRM 45, Crown, Teddington, UK.
 10. F. Ogheard, J. L. Chartier, P. Cassette (2012): *Monte-Carlo simulation of the new LNHB manganese bath facility*. *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 70, No. 4, 794-801.
 11. H., Park, et al. (2005): *Absolute Measurements of the Neutron Emission Rate with a Manganese Sulphate Bath System*, *Journal of the Korean Physical Society*, Volume 47, No. 4, 603-609.
 12. Neil J Roberts and Lawrence N Jones (2008), NPL Report IR-11, *Commissioning of the new Manganese Bath Suite at the National Physical Laboratory*, ISSN 1754-2952, June, 2008.
 13. Sandro P.Leite, Walsan W. Pereira, Ademir X. Silva, Evaldo S. Fonseca, and Karla C.S. Patrao, *Alternative Irradiation System For Efficiency For Manganese Bath Determination*, 2009, International Nuclear Atlantic Conference – IN AC 2009, Rio de Janeiro,RJ, Brazil, September 27 to October 2, 2009 ISBN: 978-85-99141-03-8
 14. Sun Tae Hwang, Kyung-Ju Lee, Kil Oung-Choi, Won Sik Kim, The Development Study of a Manganese Sulphate Bath System, *J. Korean Assoc. for Radiat. Prot.* Vol. 11, 1986.
 15. Richard B.Firestone, table of Isotopes, 8th edition, Wiley InterScience, New York, 1996.
 16. ISO-8529-1, 2001, Neutron Reference Radiations for Calibrating neutron measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy, ISO, 2001.