

## PENGAJIAN TEKNOLOGI PEMBUATAN DETEKTOR PLASTIK SINTILASI

Tanti Ardiyati, Hafni Lissa Nuri, Marliyadi Pancoko,  
Ausatha Rabbanny Yanto  
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir – BATAN  
Gedung 71 Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314  
[tanti.ardiyati@batan.go.id](mailto:tanti.ardiyati@batan.go.id)

### ABSTRAK

**PENGAJIAN TEKNOLOGI PEMBUATAN DETEKTOR PLASTIK SINTILASI.** Telah dilakukan kegiatan pengkajian tentang detektor plastik sintilasi dalam rangka untuk persiapan percobaan laboratorium. Detektor plastik sintilasi merupakan bagian komponen dari portal monitor radiasi (PMR) yang berfungsi untuk mendeteksi adanya sinar gamma. Bahan dasar untuk membuat detektor plastik adalah polimer yang memiliki cincin aromatik yang berfluoresensi dan transparan terhadap panjang gelombang. Polimer atau monomer yang banyak digunakan dalam industri adalah polystyrene (PS) dan polyvinyltoluene (PVT). PVT tidak banyak tersedia di pasaran sedangkan PS banyak tersedia dan harganya relatif murah. Selain bahan dasar, diperlukan juga bahan aditif yaitu aditif primer (PPO atau p-terphenyl) dan aditif sekunder (POPOP). Aditif primer dan sekunder berfungsi mengubah emisi foton energi tinggi menjadi kerlipan sintilasi pada panjang gelombang sinar tampak 400 ~ 500 nm. Pencampuran bahan dasar dan aditif dilakukan pada titik lelehnya. Metode pembuatan detektor plastik dipilih dengan metode ekstrusi dengan waktu proses yang singkat, sekitar 15 menit. Hasil analisis dilakukan dengan menggunakan photomultiplier tube (PMT).

Kata kunci : detektor plastik sintilasi, portal monitor radiasi, aditif primer dan sekunder.

### ABSTRACT

**ASSESSMENT ON FABRICATION TECHNOLOGY OF PLASTIC SCINTILLATION DETECTORS.** An assessment on scintillation plastic detectors has been conducted for preparation of laboratory experiments. Plastic scintillation detector is a component of the radiation portal monitor (RPM), which functions as a detector of gamma ray radiation. The basic material for making plastic scintillation detectors are polymers, that aromatic ring, which is fluorescent and transparent to wavelengths. Polymers or monomers that are widely used in industry are polystyrene (PS) and polyvinyltoluene (PVT). PVT is not widely available in the market, while PS is widely available and relatively inexpensive. Besides the basic materials, additives are also needed, namely primary additives (PPO or p-terphenyl) and secondary additives (POPOP). Primary and secondary additives convert high-energy photon emissions into scintillation at wavelengths of visible light 400 ~ 500 nm. Mixing of base material and additives is carried out at the melting point. Extrusion is chosen as a method to make plastic scintillation detectors since it has a short processing time of about 15 minutes. Meanwhile the results of the analysis are carried out using a photomultiplier tube (PMT).

Keywords: plastic scintillation detector, radiation portal monitor, primary and secondary additive.

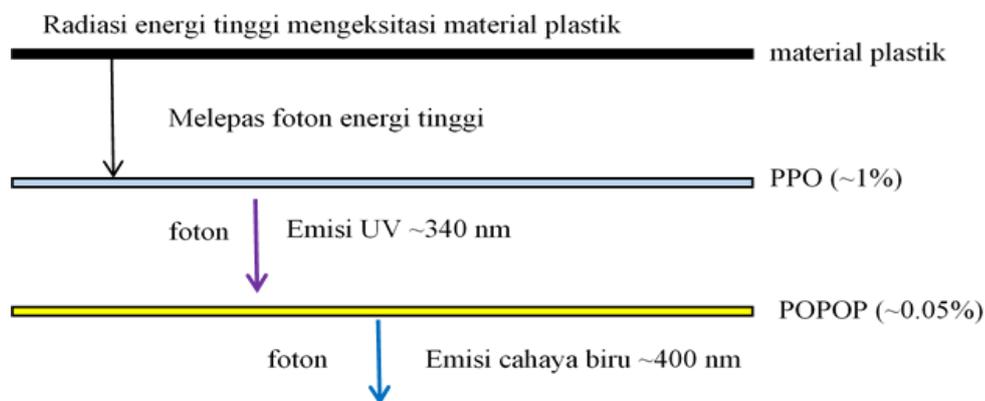
## 1. PENDAHULUAN

Detektor plastik sintilasi merupakan bagian komponen dari alat Portal Monitor Radiasi (PMR) dan salah satu dari Prioritas Riset Nasional (PRN). PMR merupakan alat deteksi bahan radioaktif (bahan nuklir atau sumber radioaktif) yang dapat diaplikasikan pada pelabuhan laut, perbatasan darat negara, hingga bandar udara. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa bahan radioaktif tersebut dapat terdeteksi dan

terkontrol agar tidak jatuh ke pihak yang tidak berwenang<sup>[1]</sup>. Saat ini, PMR terus dikembangkan sehingga alat deteksi tersebut dapat bergerak dan berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya (*mobile*) sebagai perangkat pendeteksi bahan radioaktif tambahan<sup>[2]</sup>.

Sistem PMR beroperasi dengan membandingkan tingkat radiasi gamma dan/atau neutron dengan ambang alarm yang biasanya diukur berdasarkan tingkat radiasi alam. Sebelum PMR digunakan, diperlukan pengukuran tingkat radiasi alami, karena sumber radiasi di alam sangat beragam. Sumber radiasi secara alami yang paling banyak ditemukan dan paling menonjol saat hujan biasanya berasal dari turunan <sup>222</sup>Rn, <sup>214</sup>Pb, dan <sup>214</sup>Bi yang tersimpan di dalam tanah<sup>[3]</sup>. Salah satu komponen penting yang digunakan untuk monitoring radiasi dalam PMR adalah detektor.

Detektor sintilasi merupakan detektor radiasi yang digunakan untuk mendeteksi adanya pancaran radiasi dari suatu sumber radiasi pengion serta radiasi neutron. Detektor sintilasi mengubah energi radiasi ke dalam bentuk cahaya (efek fotoluminesensi) pada rentang panjang gelombang 400 ~ 500 nm (Gambar 1), kemudian diubah lagi ke dalam sinyal listrik oleh *photomultiplier tube* (PMT)<sup>[4]</sup>.



Gambar 1. Cara Kerja Detektor Sintilasi Plastik<sup>[5]</sup>.

Sintilator yang baik dapat mengubah sebesar mungkin fraksi energi radiasi yang mengenainya untuk mendorong terjadinya fluoresensi, sambil meminimalkan fosforesensi yang tidak diinginkan dan fluoresensi yang tertunda<sup>[6]</sup>.

Bahan sintilator organik biasanya berasal dari cairan, kristal, atau plastik. Kelebihan sintilator berbahan cair adalah dapat mendeteksi secara efektif neutron cepat dengan harga rendah dan dapat membedakan neutron dari *background* sinar gamma berdasarkan *pulse shape discrimination* (PSD)<sup>[7]</sup>, sedangkan kelemahannya antara lain, kesulitan dalam penanganan, penyegelan, beracun, mudah terbakar, pembuangan limbah dan oksigen terlarut yang dapat menurunkan efisiensi fluoresensi serta lebih sulit digunakan daripada detektor padat<sup>[6,8,9]</sup>.

Untuk sintilator berbahan kristal, kesulitannya adalah ukuran yang kecil, kesulitan pada proses *growing* dan pemrosesan dengan mesin, serta biaya yang tinggi<sup>[8]</sup>. Sementara itu, sintilator berbahan plastik lebih mudah difabrikasi, dapat dibuat dalam bentuk yang berbeda dalam dimensi yang besar, stabilitas mekanis sesuai yang diinginkan, biaya produksi yang lebih murah dibandingkan dengan detektor berbahan cair dan kristal, respon yang cepat terhadap radiasi pengion, serta mempunyai *decay time* yang singkat<sup>[4,6,10]</sup>. Selain beberapa kelebihan tersebut, kekurangan penggunaan plastik sebagai bahan dasar sintilator adalah resistensi terhadap radiasi yang rendah<sup>[4]</sup>.

Dari ketiga jenis bahan dasar sintilator di atas, sintilator plastik sangat sesuai digunakan pada PMR, yang membutuhkan detektor dalam jumlah besar dan biaya yang relatif lebih murah, serta penanganan yang mudah. Makalah ini bertujuan untuk membahas mengenai kajian teknologi pembuatan detektor plastik sintilasi yang akan

digunakan pada PMR, dengan lingkup terbatas pada pembahasan komposisi bahan dan metode pembuatan.

## 2. DASAR TEORI

### 2.1. Bahan Dasar dan Aditif

Plastik yang digunakan untuk dapat digunakan sebagai detektor sintilasi harus memiliki beberapa syarat berikut<sup>[7]</sup>, antara lain:

- memiliki cincin aromatik yang dapat berfluoresensi saat dikenai oleh radiasi pengion;
- memiliki indeks refraksi yang mendekati jendela masuk pada *photodetector* (*photomultiplier tube/ PMT, Si-photodiode*);
- dapat terlihat secara transparan terhadap panjang gelombang cahaya yang dikeluarkannya;
- serta mempunyai kekerasan yang tinggi, sehingga dapat dibentuk dengan mesin dalam segala bentuk dan ukuran.

Polimer plastik yang sesuai dengan syarat-syarat di atas antara lain seperti *polyvinyltoluene* (PVT), *polystyrene* (PS), *polyester*, *polysiloxanes*, *polyepoxides*, *benzyl-methacrylate*<sup>[7,11]</sup>. Diantara plastik cincin aromatik di atas, PS dan PVT adalah polimer yang paling baik digunakan<sup>[11,12]</sup>. PVT merupakan jenis polimer yang memiliki sifat sintilasi paling baik diantara polimer lain<sup>[13]</sup>, tetapi PVT tidak beredar di pasaran karena dapat digunakan untuk membuat peledak. Sementara itu, PS terdapat banyak di pasaran dan harganya relatif murah.

Proses pembuatan detektor plastik sintilasi dengan bahan dasar terbuat dari polimer, perlu ditambahkan aditif supaya mencapai sifat luminensi yang diinginkan. Aditif ditambahkan untuk meningkatkan mekanisme sintilasi dan keluaran cahayanya, juga sebagai *wavelength shifter*<sup>[7]</sup>. Aditif tersebut terdiri dari:

- Aditif primer  
Aditif primer berguna untuk menyerap energi dari bahan dasar sintilator dan mengeluarkannya melalui fluoresensi (dalam rentang UV)<sup>[13]</sup>. Contoh aditif primer antara lain *2-phenyl-5-(4-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole* (PBD), *2,5-diphenyloxazole* (PPO), *p-terphenyl* (PTP), *2,5-diphenyl-1,3,4-oxadiazole* (PPD), *2,5-bis(4-bisphenyl)-1,3,4-oxadiazole* (BBD) dan *2-(4-tert-butylphenyl)-5-(4-biphenyl)-1,3,4-oxadiazole* (BPBD).
- Aditif sekunder  
Aditif sekunder berfungsi sebagai *wavelength shifter*, yaitu mengubah panjang gelombang pendek yang dikeluarkan oleh aditif primer, menjadi panjang gelombang yang lebih panjang<sup>[10]</sup>. Contoh aditif sekunder antara lain *trans-4-4-diphenylstilbene* (DPS), *9,10-diphenylanthracene* (DPA), *1,4-bis-[2-(5-phenyl-2-oxazolyl)]-benzene* (POPOP), *1,4-bis(4-methyl-5-phenyl-2-oxazolyl)benzene* (DM-POPOP), *1,4-bis(2-methylstyryl)benzene* (Bis-MSB), *2,5-di(4-biphenyl)oxazole* (BBO).

Pada aditif primer, PPO lebih efektif daripada PTP untuk meningkatkan *light yield* pada sintilator berbahan dasar PS atau PVT<sup>[7,14]</sup>. Bahan aditif seperti PPO, PTP dan juga POPOP banyak dijual di pasaran.

### 2.2. Karakteristik Umum Detektor Plastik Sintilasi

Secara umum, detektor plastik sintilasi memiliki *emission* maksimum sebesar 425 nm<sup>[15]</sup>, dan *decay time* sebesar 2-3 ns<sup>[15,16]</sup>. Selain itu, berdasarkan data yang dihimpun oleh Grupen<sup>[17]</sup>, detektor plastik sintilasi organik memiliki karakteristik umum seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik Umum Detektor Plastik Sintilasi Organik<sup>[17]</sup>

Bahan	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	Emission Maksimum, nm	Decay time constant, ns	Light yield, ph/MeV
Plastik ( <i>unloaded</i> )	1,03	375-600	1-300	6.400-10.000
Plastik (B)	1,02-1,03	425	2,2	7.500-9.200
Plastik (Pb)	1,08	425	2,1	5.200

\*B boron loaded, Pb 5% lead loaded

Tabel 2 menunjukkan detektor plastik sintilasi yang tersedia di pasaran, yang diproduksi oleh *Eljen Technology* (seri EJ), *Saint-Gobain Crystals* (seri BC), dan *Scintitech, Inc* (seri UPS). Pada umumnya, *decay time* dari detektor plastik sintilasi tersebut berada pada rentang 1-3 ns. Namun demikian, terdapat beberapa detektor plastik sintilasi dengan *decay time* sangat cepat dan sangat lambat.

Tabel 2. Jenis Detektor Plastik Sintilasi dan Karakteristiknya

Jenis Detektor Plastik Sintilasi	Komposisi Bahan Detektor Plastik Sintilasi	Light Output, % <i>anthracene</i>	Emission peak, nm	Rise time, ns	Decay time, ns	Light attenuation length, cm	Aplikasi
UPS 923A	PS, 2% PTP, 0,03 % POPOP	60	425	0,9	3,3	400	Semua kebutuhan
UPS 92 RH	PS	60	425	-	3,5	350	Kalorimeter
UPS 91 F	PS	39-45	390	0,7	0,6-0,4	350	Kalorimeter
UPS 92 S	PS	44	380	0,9	380-450	350	Detektor <i>phoswich</i>
EJ 240	PVT	41	430	-	285	240	Detektor <i>phoswich</i>
EJ 232 Q	PVT 0,5 % <i>Benzophenone</i>	19	370	0,11	0,7	-	Perhitungan cepat
EJ 254	PVT, 5% boron loaded	48	425	0,85	1,51	-	Deteksi neutron termal, spektrometri neutron cepat
BC 400	PVT	65	423	-	2,4	250	Semua kebutuhan
BC 444	PVT	41	428	-	285	180	Detektor <i>phoswich</i>
BC 422 Q	PVT	11	370		0,7	<8	Perhitungan cepat dan pengukuran waktu cepat
BC 454	PVT, 1% boron loaded	60	425	-	2,2	120	Deteksi neutron cepat dan lambat
EJ 200	PVT, 3% aditif organik						
BC 408	PVT	64	425	0,9	2,1	380	Semua kebutuhan
EJ 256	PVT, 5% lead loaded						
BC 452	PVT, 2% lead loaded	34	425	-	2,1	-	X-ray Dosimetri

Sumber: *Eljen Technology*, *Saint-Gobain Crystals*, dan *Scintitech, Inc*.

Detektor plastik sintilasi dengan *decay time* sangat cepat antara lain UPS 91 F, EJ 232 Q, dan BC 422 Q dengan *decay time* pada rentang 0,7 – 0,4 ns yang dapat diaplikasikan sebagai kalorimeter, dapat digunakan untuk perhitungan cepat dan pengukuran waktu cepat. Sedangkan detektor plastik sintilasi dengan *decay time* sangat lambat antara lain UPS 92 S, EJ 240, dan BC 444 dengan rentang *decay time* 285 - 450 ns, yang digunakan sebagai detektor *phoswich*. Dari tabel di atas, pada umumnya, detektor plastik sintilasi dengan bahan dasar PS dan PVT memiliki karakteristik yang hampir sama.

### 3. TATA KERJA

#### 3.1. Metode Teknologi Pembuatan Detektor Plastik Sintilasi

##### a. Metode Polimerisasi

Polimerisasi dengan pemanasan digunakan untuk membuat detektor plastik sintilasi yang berbahan dasar dari monomer cair. Teknik polimerisasi berbeda-beda tergantung pada komposisi dan ukuran dari detektor plastik sintilasi yang diinginkan. Proses polimerisasi dimulai pada suhu rendah hingga tinggi<sup>[10]</sup>. Polimerisasi dilakukan pada suhu 30 – 140 °C dalam kondisi bebas oksigen hingga beberapa hari atau minggu tergantung dari ukuran dan volume dari detektor plastik sintilasi yang diinginkan<sup>[7]</sup>. Teknik polimerisasi ini biasanya didahului dengan pemurnian monomer.

Rahmanifard *et.al.*<sup>[14]</sup> melakukan pemurnian monomer *vinyltoluene* dari inhibitor menggunakan air distilasi dan NaOH, yang kemudian dicampur dengan *vinyltoluene* dan didiamkan selama 10 menit. Proses ini kemudian diulangi sebanyak tiga kali untuk mendapatkan kemurnian yang akurat. Selanjutnya, *vinyltoluene* terdistilasi tersebut dicampur dengan PTP dan PPO sebagai aditif primer, serta POPOP sebagai aditif sekunder. Polimerisasi dilakukan pada suhu 78 – 160 °C selama 5 hari<sup>[14]</sup>.

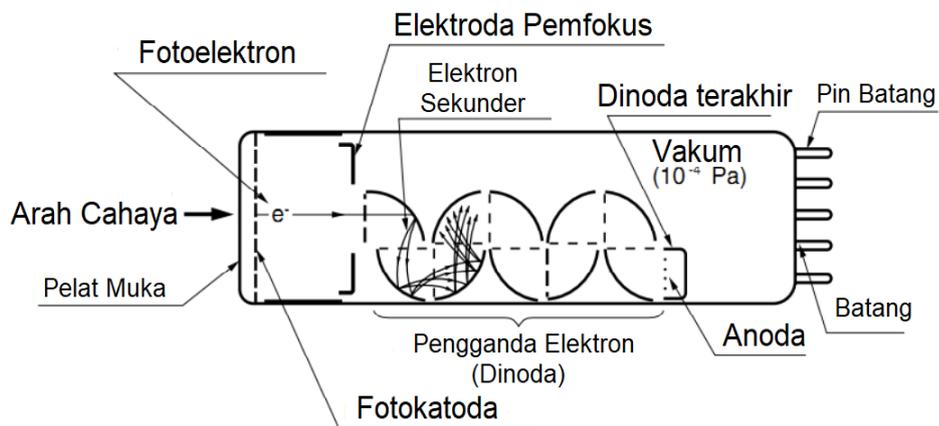
Penelitian yang dilakukan oleh Lee *et.al.*<sup>[10]</sup> membahas monomer *styrene* yang dicampur oleh PPO sebagai aditif primer dan POPOP sebagai aditif sekunder, pengadukan dilakukan selama 6 jam pada suhu 60 °C. Kemudian didiamkan pada suhu 100 °C selama 2 jam untuk menjaga larutan tetap menyatu. Setelah itu, polimerisasi dilakukan pada suhu 120 °C selama 150 jam, kemudian didiamkan selama 60 jam dengan suhu diturunkan secara bertahap hingga larutan mengeras dan siap dicetak<sup>[10]</sup>.

##### b. Metode Ekstrusi

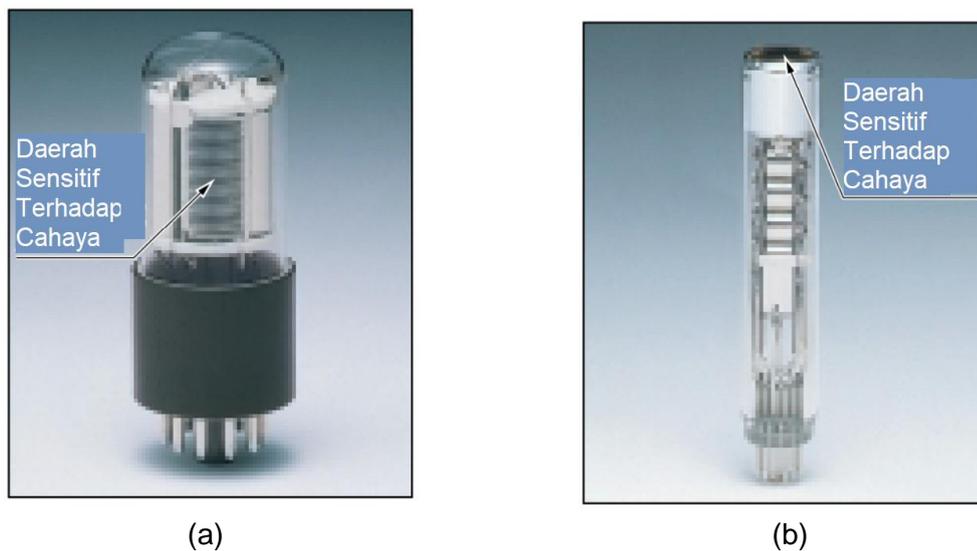
Proses pembuatan detektor plastik sintilasi dengan metode ekstrusi, telah dilakukan oleh Dalmau<sup>[4]</sup> dengan menggunakan polimer dalam bentuk pelet atau bubuk untuk melewati proses pemurnian monomer dan polimerisasi yang panjang dan mahal. Kelemahan dari proses ini adalah kualitas optik dari sintilator plastik ekstrusi lebih rendah daripada *cast material*. Pada teknik ini terdapat 2 (dua) langkah ekstrusi yang digunakan. Langkah pertama adalah dengan memurnikan pelet PS dengan gas inert (argon) selama beberapa hari untuk menghilangkan oksigen terlarut dan uap lembab. Kemudian pencampuran pelet PS (*tumble-mixed*) dengan aditif primer dan sekunder dilakukan selama 15 menit, setelah itu dimasukkan ke dalam *hopper* sebuah *extruder* yang dilengkapi dengan gas inert (argon). Material yang keluar dari kepala *extruder* berupa benang kemudian di-peletisasi kembali menghasilkan pelet sintilator. Langkah kedua adalah dengan menggunakan pelet sintilator untuk mengekstrusi profil sintilator dengan lubang di tengah sebagai tempat serat *wavelength shifting* (WLS).

#### 3.2. Metode Analisis dengan PMT

Untuk menganalisis atau membaca detektor plastik sintilasi, digunakan PMT (Gambar 2 dan 3). PMT mempunyai fungsi untuk mengubah cahaya yang dikeluarkan oleh sintilator menjadi sinyal elektronik.



Gambar 1. Potongan melintang dari PMT jenis *Head-on*<sup>[18]</sup>

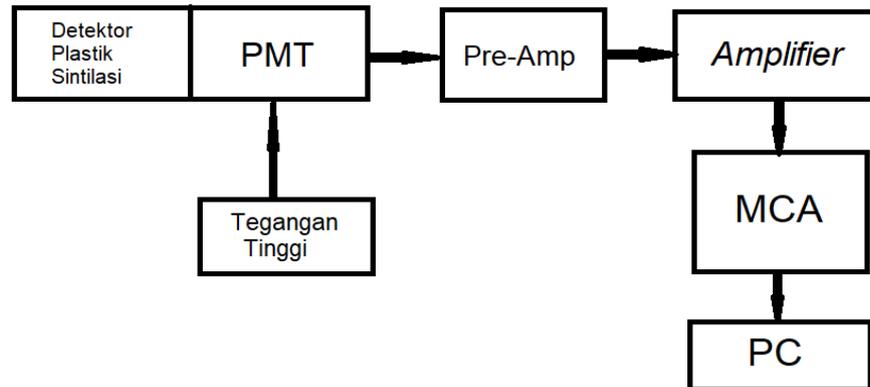


Gambar 2. PMT a) Tipe *Side-on* dan b) Tipe *Head-on*<sup>[18]</sup>.

PMT terdiri dari beberapa bagian, antara lain: fotokatoda, elektroda pemfokus, dinoda, anoda dan tabung vakum. Prinsip kerja PMT adalah sebagai berikut: ketika terdapat cahaya yang mengenai fotokatoda, fotokatoda tersebut akan mengeluarkan fotoelektron dan kemudian diteruskan ke dalam tabung vakum. Fotoelektron kemudian akan diarahkan ke dinoda oleh elektroda pemfokus. Pada dinoda, jumlah elektron digandakan melalui proses emisi sekunder (elektron yang dilepaskan karena ditumbuk oleh elektron lain). Elektron-elektron yang telah digandakan tadi, kemudian dikumpulkan oleh anoda dan diolah sebagai sinyal keluaran untuk kemudian dapat dibaca.

Detektor plastik sintilasi yang akan dianalisis, dipasang pada PMT yang diberi tegangan tinggi. Tegangan tinggi ini berfungsi untuk memberi catu daya pada PMT, supaya terdapat beda potensial pada anoda-katoda PMT, sehingga terjadi lonjakan elektron pada PMT. Lonjakan elektron distabilkan oleh penguat awal (*pre-amp*) sebelum dikuatkan oleh penguat (*amplifier*). Pulsa yang telah dikuatkan oleh *amplifier*, kemudian dicacah oleh penganalisis multi-saluran (*multi-channel analyzer/ MCA*) sehingga dihasilkan spektrum sinar gamma. Spektrum sinar gamma ini kemudian

dapat dibaca dengan perangkat lunak yang telah dipasang pada sebuah komputer (PC). Gambar 4 di bawah menampilkan blok diagram analisis detektor plastik sintilasi dengan PMT.



Gambar 3. Blok Diagram Analisis Detektor Plastik Sintilasi dengan PMT.

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Polimer sebagai bahan dasar pembuatan detektor plastik harus memiliki cincin aromatik yang berfluoresensi dan transparan terhadap gelombang cahaya. Polimer yang memenuhi syarat serta banyak digunakan di industri adalah PS atau *monostyrene* dan PVT. Di pasaran, PVT tidak dijual bebas, sedangkan PS terdapat banyak di pasaran dan harganya relatif murah. Bahan aditif seperti PPO, PTP dan juga POPOP dijual banyak di pasaran, sehingga tidak akan terdapat kendala dalam pengadaannya.

Terdapat 2 (dua) metode pembuatan detektor plastik sintilasi yaitu melalui proses polimerisasi dan ekstrusi. Proses polimerisasi membutuhkan waktu proses yang cukup lama sekitar 6-8 hari dengan suhu proses yang relatif rendah antara 30 – 160 °C, sedangkan metode ekstrusi membutuhkan waktu proses pendek sekitar 15 menit dan panas pada titik lelehnya (suhu tinggi). Pembuatan detektor plastik sintilasi dalam skala industri tentu memerlukan modal yang besar, yang harus dapat cepat kembali, sehingga metode ekstrusi dengan waktu singkat dan suhu tinggi lebih menguntungkan.

Pembuatan detektor plastik sintilasi ini harus memperhatikan pula karakteristik detektor plastik sintilasi yang ada di pasaran, supaya detektor dapat bekerja secara maksimal. Detektor plastik sintilasi yang berbahan dasar dari PS sebaiknya memiliki karakteristik standar seperti *emission* maksimum sebesar 380 - 425 nm, *decay time* sebesar 2-3 ns, dan *light attenuation* sebesar 350 – 400 cm.

Detektor plastik sintilasi mengubah energi foton dari radionuklida yang mengenyainya menjadi cahaya tampak untuk kemudian diubah menjadi sinyal elektronik oleh PMT. Dalam proses analisisnya, PMT dihubungkan ke beberapa alat, diantaranya ke *pre-amp*, *amplifier*, dan MCA. Spektrum sinar gamma yang dihasilkan oleh MCA kemudian dapat dibaca oleh sebuah perangkat lunak di komputer.

#### 5. KESIMPULAN

Telah dilakukan pengkajian teknologi pembuatan detektor plastik sintilasi. Bahan dasar pembuatannya harus memenuhi syarat yaitu mempunyai cincin aromatik berfluoresensi dan transparan terhadap panjang gelombang dan tersedia banyak di pasaran (PS atau *monostyrene*). Bahan aditif dipilih yang tersedia dengan mudah di

pasaran, yaitu aditif primer PPO atau PTP, sedangkan aditif sekunder POPOP. Metode pembuatan detektor plastik sintilasi dipilih ekstrusi dengan waktu proses 15 menit dan suhu titik lelehnya. Pembuatan detektor plastik sintilasi harus memperhatikan karakteristik detektor plastik sintilasi yang ada di pasaran, supaya detektor dapat bekerja secara maksimal. Analisis detektor plastik dilakukan dengan menggunakan PMT, karena alat tersebut sudah tersedia.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Cahyono, J. Triyanto, dan D. Handoyo, 2014 , *Desain Dasar Portal Monitor Radiasi untuk Kendaraan*, PRIMA, vol. 11, no. 1, hal.. 32–43.
- [2] R. Coogan, C. Marianno, dan W. Charlton, 2019, *A strategic analysis of stationary radiation portal monitors and mobile detection systems in border monitoring*, Nucl. Eng. Technol., vol. 52, no. 3, hal.. 626–632.
- [3] R. J. Livesay, C. S. Blessinger, T. F. Guzzardo, dan P. A. Hausladen, 2014, *Rain-induced increase in background radiation detected by Radiation Portal Monitors*, J. Environ. Radioact., vol. 137, hal.. 137–141.
- [4] A. Pla-dalrau, A. D. Bross, dan K. L. Mellott, 2001, *Low-cost extruded plastic scintillator*, Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip., vol. 466, no. August 2000, hal.. 482–491.
- [5] D. Kim, “Detector with Plastic Scintillators, 2005, *International Workshop on a Far Detector in Korea for the J-PARC Neutrino Beam*, KIAS, Korea.
- [6] G. F. Knoll, 2000, *Radiation Detection and Measurement*, 3rd ed. New York: John Wiley and Sons.
- [7] E. V. Van Loef, G. Markosyan, U. Shirwadkar, dan K. S. Shah, 2014, *Plastic scintillators with neutron/gamma pulse shape discrimination*, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 1, hal. 467–471.
- [8] P. N. Zhmurin, V. N. Lebedev, A. F. Adadurov, V. N. Pereymak, dan Y. A. Gurkalenko, 2014, *Plastic scintillator for pulse shape neutrons and gamma quanta discrimination*, Radiat. Meas., vol. 62, hal.. 1–5.
- [9] M. D. Palma dkk., 2014, *Red emitting phenyl-polysiloxane based scintillators for neutron detection*, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 61, no. 4, hal.. 2052–2058.
- [10] C. H. Lee, J. Son, T. Kim, dan Y. K. Kim, 2016, *Characteristics of Plastic Scintillators Fabricated by a Polymerization Reaction*, Nucl. Eng. Technol., hal.. 1–6.
- [11] G. H. V Bertrand, M. Hamel, dan F. Sguerra, 2014, *Current Status on Plastic Scintillators Modifications*, Chem. Eur. J., vol. 20, hal.. 15660–15685.
- [12] S. A. Ponomarenko dkk, 2014, *Nanostructured organosilicon luminophores and their application in highly efficient plastic scintillators*.
- [13] A. Wiczorek, 2017, *Development of novel plastic scintillators based on polyvinyltoluene for the hybrid J-PET / MR tomograph*, Jagiellonian University.
- [14] R. Rahmanifard, F. Katebi, A. R. Zahedi, dan R. Gholipour-peyvandi, 2018, *Synthesis and development of a vinyltoluene-based plastic scintillator*, J. Lumin., vol. 194, no. September 2017, hal.. 456–460.
- [15] Saint-Gobain, 2015, *Organic Scintillation Materials and Ssemblies*, Catalogue. hal. 16.
- [16] AMCRYS, 2009, *Scintillation Material Data Sheet*, vol. d, no. September. hal. 1–5.
- [17] C. Grupen dan I. Buvat, 2012, *Handbook of Particle Detection and Imaging*. Berlin: Springer.
- [18] Hamamatsu Photonics, 2016, *Opening The Future with Photonics*. Jepang.