

TINJAUAN TEKNOLOGI SINTILATOR PLASTIK UNTUK DETEKTOR NUKLIR

Marliyadi Pancoko^{1,2}, Azwar Manaf¹, Sudirman², Hafni Lissa Nuri²

¹Departemen Fisika, FMIPA – Universitas Indonesia, Kota Depok Jawa Barat 16424

²Pusat Riset Teknologi Deteksi Radiasi dan Analisis Nuklir, ORTN - BRIN, Kawasan Puspiptek Gd.71, Tangsel 15310

e-mail: pancokom@gmail.com ; azwar@ui.ac.id

Diterima: 12 September 2022, diperbaiki : 13 Oktober 2022, disetujui : 17 Oktober 2022

ABSTRAK

TINJAUAN TEKNOLOGI SINTILATOR PLASTIK UNTUK DETEKTOR NUKLIR. Sintilator plastik banyak dikembangkan untuk penggunaan dibidang detektor nuklir, positron emission tomography di kedokteran bahkan untuk hadronic calorimeter dalam riset fisika energi tinggi. Berbeda dengan kristal anorganik seperti NaI(Tl) yang higroskopis dan relatif mahal, sintilator plastik meskipun menghasilkan light output di kisaran 10.000 foton/MeV, seperempat dari sintilator anorganik, tetapi menghasilkan waktu peluruhan 2- 4 ns yang sangat responsif sebagai detektor nuklir, disamping keuntungan sifat fleksibel, dapat difabrikasi dalam volume besar serta relative ekonomis. Matrik dasar sintilator plastik umumnya menggunakan polystyrene, polyvinyl toluene, bahkan epoxy, yaitu semua polimer aromatik yang mengandung cincin benzene, yang di dalamnya dilarutkan bahan pendar atau dopan seperti PPO (2,5-diphenyloxazole), p-TP (para-terphenyl) serta wavelength shifter (WLS) seperti POPOP (1,4-bis [2- (phenyl oxazolyl)] - benzene) untuk mendapatkan spektrum cahaya tampak di 400 - 425 nm. Artikel tinjauan teknologi ini akan mengulas empat metode sintesis sintilator plastik dan karakterisasinya, dari banyak referensi terkini, yaitu metode polimerisasi adisi, polimerisasi termoset, metode injeksi dan metode 3D printing. Hasil karakterisasi menggunakan sumber gamma ²²Na, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co maupun sumber beta ⁹⁰Sr dalam kajian ini telah memberi gambaran bahwa sintilator plastik dapat diaplikasikan sebagai detektor nuklir. Terkhusus metode sintesis polimerisasi termoset dapat digunakan untuk fabrikasi sintilator volume besar sampai 5x60x300 cm³ yang diperlukan pada Radiation Portal Monitor (RPM).

Kata kunci: Plastik, Sintilator, Detektor, Nuklir.

ABSTRACT

STUDI OF PLASTIC SCINTILLATOR TECHNOLOGY FOR NUCLEAR DETECTORS. Plastic scintillators have been widely developed for use in the field of nuclear detectors, positron emission tomography in medicine, and even for hadronic calorimeters in high-energy physics research. In contrast to inorganic crystals such as NaI(Tl) which are hygroscopic and relatively expensive, plastic scintillators, although they produce a light output in the range of 10,000 photons/MeV, provide a decay time of 2-4 ns which is very responsive as a nuclear detector. Another advantage of plastic scintillators is can be fabricated in various forms large in size, and are relatively economical. The basic matrix of plastic scintillators generally uses polystyrene, polyvinyl toluene, and even epoxy, which are all aromatic polymers containing a benzene ring. In the polymer matrix dissolved organic luminescent compounds (dopants) such as PPO (2,5-diphenyloxazole), p-TP (para-terphenyl), and wavelength shifter (WLS) such as POPOP (1,4-bis [2- (phenyl oxazolyl)] - benzene) to obtain the visible light spectrum at 400 - 425 nm. This article will review four plastic scintillator synthesis methods, namely the addition polymerization,

thermoset polymerization, injection, 3D printing method, and their characterization, based on a recent publication. The results of characterization using a gamma source ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co , and a beta source ^{90}Sr in this study have shown that a plastic scintillator can be applied as a nuclear detector. In particular, the thermoset polymerization method can be applied for the fabrication of large volume scintillators up to $5 \times 60 \times 300 \text{ cm}^3$, for the development of Radiation Portal Monitor (RPM).

Keywords: Plastic, Scintillator, Detector, Nuclear.

PENDAHULUAN

Kristal NaI(Tl) adalah generasi pertama sintilator anorganik dengan kinerja handal, menghasilkan *light yield* 38.000 foton/MeV dengan waktu peluruhan (*decay time*) 250 ns, dan energi resolusi dikisaran 6% untuk sumber gamma ^{137}Cs [1][2]. Kemajuan penelitian dan pengembangan kristal anorganik sangat pesat melibatkan kristal alkali halida, silicate, oksida termasuk oksida logam tanah jarang, sampai awal milenium muncul LaBr₃(Ce) yang menghasilkan *light yield* di kisaran 60.000 foton/MeV dengan waktu peluruhan 16 ns [1][3]. Tetapi kristal anorganik juga mempunyai kelemahan, diantaranya sifat higroskopis yang membutuhkan penanganan dan pengepakan menggunakan gas inert dengan pelindung kedap [4], selain juga biaya produksi yang relatif mahal.

Sintilator organik terbagi menjadi tiga, yaitu kristal tunggal, organik cair dan plastik. Sintilator kristal tunggal organik yang sering digunakan anthracene, trans-stilbene, tolan, para-terphenyl. Sintilator organik cair biasanya terbuat dari larutan organik pendar (*luminescent*) atau dopan yang dilarutkan dalam pelarut organik seperti toluene, p-xylene, pseudocumene dan α -methyl naphthalene. Sedangkan sintilator plastik adalah dopan yang dilarutkan dalam polimer organik seperti polystyrene, polyvinyl toluene, polyvinyl xylene dan polymethyl methacrylate [5][6][7].

Sintilator plastik, dengan densitas lebih tinggi dari organik cair, yaitu 1- 2 g/cm³, menghasilkan *light yield* di kisaran 10.000 photon/MeV, seperempat dari sintilator anorganik. Tetapi mempunyai keunggulan pada karakter respon deteksi cepat, yaitu waktu peluruhan 2 – 4 ns [8], dapat dibentuk fleksible dalam ukuran besar sampai $5 \times 60 \times 300 \text{ cm}^3$, dengan cara *cast*, *injection mold* maupun ekstrusi dan harganya jauh lebih ekonomis [8][9][10]. Dominasi di area hamburan Compton sehingga *peak* energi sumber gamma tidak terlihat sudah mulai teratasi dengan penambahan material nomer atom tinggi (*high Z material*) seperti bismuth tripvalate atau triphenyl bismuth (BiPh₃) [11][12].

Dalam artikel kajian ini, kami akan membandingkan keempat metode pembuatan sintilator plastik, yaitu metode polimerisasi adisi, polimerisasi termoset, injeksi, metode 3D printing beserta karakterisasinya menggunakan sumber radiasi nuklir. Tujuannya untuk mendapatkan gambaran yang jelas keunggulan masing-masing metode terkait dengan Prioritas Riset Nasional dalam pengembangan sintilator untuk *radiation portal monitor (RPM)* di Organisasi Tenaga Nuklir – BRIN.

METODOLOGI

Dalam sesi ini akan diulas empat metode sintesis dan karakterisasi sintilator plastik yang banyak menjadi

obyek riset dan dipublikasikan.

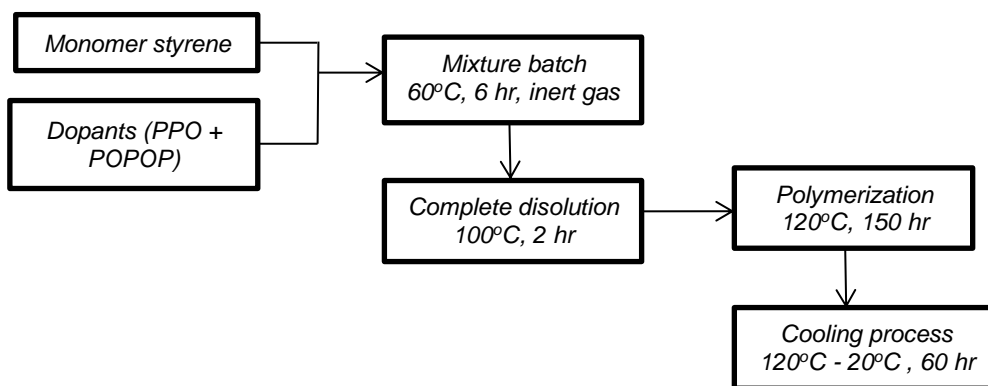
a. Metode polimerisasi adisi

Metode ini disebut juga *bulk polymerization* adalah metode tradisional untuk mendapatkan produk dengan ukuran besar dalam pabrik maupun untuk ukuran kecil di laboratorium. Pabrik material sintilator skala besar untuk keperluan eksperimen fisika energi tinggi seperti ISMA di Kharkov Ukraina, menggunakan matrik dasar polistiren, dopan primer p-terphenyl 2% dan dopan sekunder POPOP 0.03% [13].

Untuk skala riset laboratorium Cheol Ho Lee dkk [14] membuat sintilator plastik dengan metode ini menggunakan monomer styrene yang tersedia secara komersial dengan kemurnian 99,5% sebagai matrik dasar. Komponen kedua sebagai dopan primer, digunakan PPO (2,5-difenilxazol) 1 wt%, dalam bentuk bubuk putih dan merupakan bahan kimia pendar dengan panjang gelombang emisi puncaknya adalah 330 nm, yang terletak di dalam spektrum ultraviolet. Komponen ketiga menggunakan POPOP (1,4-bis [2-(phenyloxazolyl)] - benzena) 0.05 wt%, yang merupakan dopan sekunder berwarna kuning, sebagai pengubah

panjang gelombang (*Wavelength shifter* – WLS) di 410 nm, di spektrum cahaya biru.

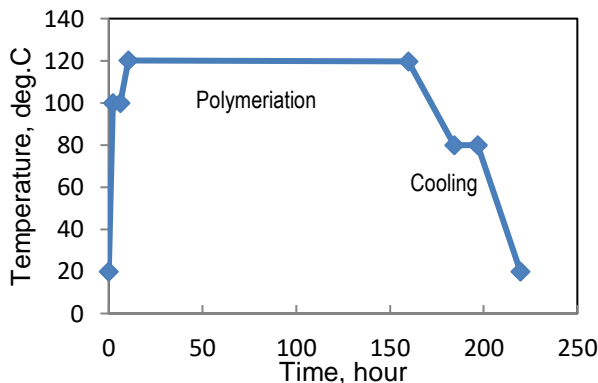
Monomer stirena 80 g dicampur dengan PPO 1% dan POPOP 0.05%, dan beberapa variasi rasio massa dopan primer maupun sekunder, untuk mendapatkan sampel sintilator plastik dengan ukuran diameter 4,5 cm dan tebal 2,5 cm. Pengadukan larutan dilakukan selama 6 jam pada temperatur 60°C. Setelah itu, larutan ditempatkan dalam pemanas suhu tinggi untuk menginduksi reaksi polimerisasi. Untuk disolusi sempurna, suhu pemanas harus dijaga pada 100°C selama 2 jam karena pengadukan saja terbukti tidak cukup. Setelah itu, suhu pemanas dinaikkan hingga 120°C selama 150 jam saat polimerisasi berlangsung. Setelah reaksi polimerisasi berakhir, proses pendinginan dilakukan selama 60 jam di dalam pemanas (Gambar 1). Suhu pemanas secara bertahap diturunkan untuk mencegah timbulnya gelembung udara karena tekanan internal di dalam polystyrene. Profil temperatur dan hasil fabrikasi dengan metode ini diperlihatkan pada gambar 2a dan 2b.



Gambar 1. Diagram alir proses pembuatan sintilator plastik dengan metode polimerisasi adisi

Evaluasi karakteristik sintilator plastik dilakukan dengan menganalisis panjang gelombang emisi menggunakan *fluorecence spectrophotometer*, evaluasi kalibrasi energi tiga sumber gamma

(^{137}Cs , ^{22}Na , dan ^{60}Co) dan yang terakhir *light output* relatif yang dihitung menggunakan metode M. Bertolaccini [15].



(a)

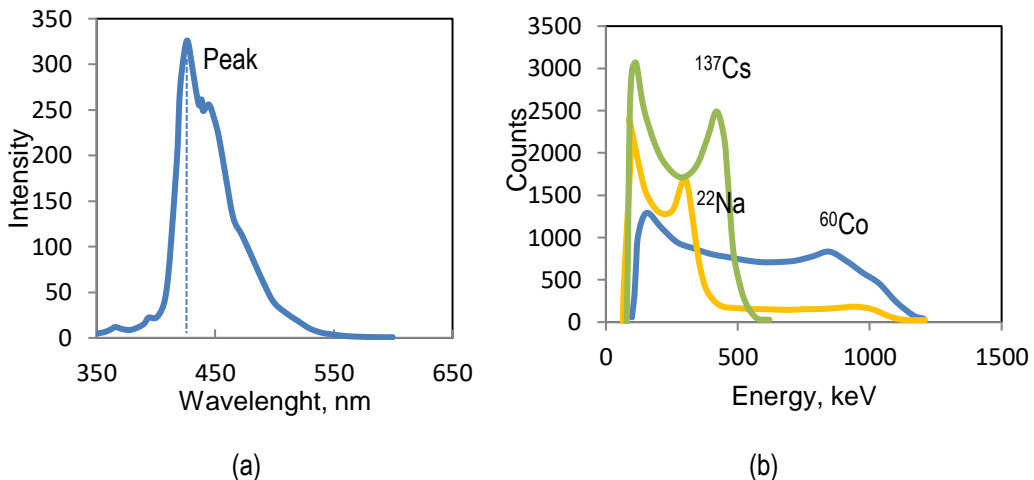
(b)

Gambar 2. (a) Profil temperatur proses, dan (b) produk sintilator plastik [14]

Gambar 3a menunjukkan intensitas panjang gelombang emisi dari tiga sintilator plastik yang diukur dengan spektrofotometer fluoresensi. Hasilnya adalah untuk masing-masing sintilator plastik panjang gelombang emisi puncak di kisaran 425 nm dengan standard error 0,2%. Gambar 3b hasil analisis spektrum sumber gamma ^{137}Cs , ^{22}Na , dan ^{60}Co yang diukur dengan *multi channel analyzer* (MCA) menunjukkan nilai *compton edge* masing-masing di 477 keV, 340 keV dan 1040 keV. Pada tabel 1 ditunjukkan perhitungan *light yield* dan *light output* dari sampel sintilator plastik yang dibuat dan dibandingkan dengan data sintilator plastik komersial produk Saint Gobain, BC-408. *Light yield* ditentukan dari pengukuran jumlah fotoelektron per unit energi (Nphe), yaitu dengan membandingkan posisi puncak spektrum single photoelectron (PP1phe) dengan suatu titik spektrum yang merupakan karakter energi sumber

gamma yang dalam pengukuran ini digunakan ^{137}Cs (*Compton edge* 477 keV, *photopeak* 662 keV). Jumlah fotoelektron per unit energi (Nphe) ditentukan menggunakan persamaan (1) dibawah ini [14][15]. Parameter seperti gain amplifier dan posisi peak diperoleh dengan menganalisis spektrum hasil percobaan. *Quantum efficiency* (QE) dari PMT (Hamamatsu H6614-70) digunakan dalam perhitungan *light output* karena nilai QE berbeda mengikuti parameter panjang gelombang. Dengan menggunakan data dari produsen Hamamatsu akan dapat dihitung nilai QE dikisaran 21%, dan kemudian *light output* dapat dihitung dengan membagi *light yield* dengan QE. Dari perhitungan didapat bahwa *light output* dari sampel plastik sintilator ada dikisaran 59-64% dari output plastik sintilator komersial BC-408 (Tabel).

$$N_{phe} = (P_{Pe}/KE) / (PP1_{phe}/K1_{phe}) / 0.477334 \text{ (phe/MeV)} \quad (1)$$



Gambar 3. (a) Analisis gelombang emisi, dan (b) spektrum energy masing-masing sumber gamma ^[14].

Tabel 1. Pengukuran *light output* pada sampel sintilator dan sintilator plastik komersial ^[14].

Parameter	Sintilator 1	Sintilator 2	Sintilator 3	BC-408
Peak position (P _{Pe})	344	317	331	644
Peak position (PP _{1phe})	119	108	121	140
Light yield (phe/MeV)	605.60	614.91	573.09	963.69
Light output (ph/MeV)*	2890.05 ± 14.45	2934.47 ± 14.68	2728.07 ± 13.64	4587.44 ± 22.94

* dengan setting Gain (K_E) = 10, Gain (K_{1phe}) = 1000, Quantum eff. = 21%.

Dari gambar 3b, hasil spektrum energi untuk masing-masing sumber gamma ¹³⁷Cs, ²²Na, dan ⁶⁰Co menunjukkan karakter sintilator plastik dengan dominasi spektrum di area hamburan Compton. Tidak terlihat *photopeak* yang merupakan karakter khas masing-masing sumber gamma, seperti misalnya ¹³⁷Cs dikisaran 662 keV yang akan terlihat jika pengukuran menggunakan sintilator anorganik NaI(Tl).

Cherepy dkk^[11] berusaha memunculkan efek fotolistrik dalam sintilator plastik dengan menambahkan molekul atom besar (*high Z*) Bismuth ke dalam plastik

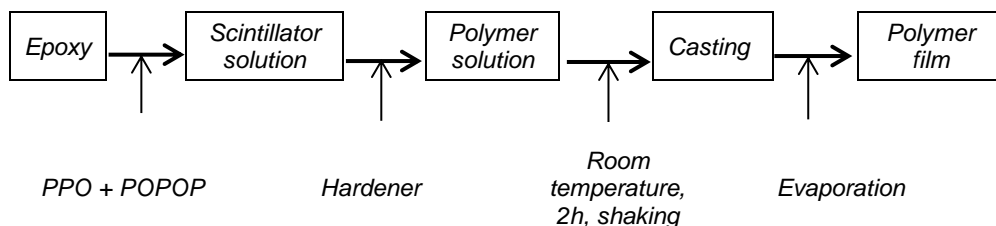
sintilator. Mereka melaporkan bahwa penambahan Bismuth tripalate 15 wt% dalam sintilator plastik akan menghasilkan *photopeak* energy ¹³⁷Cs di 662 keV dengan resolusi 15%, meskipun *light yield*-nya hanya 35% dari sintilator plastik komersial EJ200 ^[16]. Dominasi efek fotolistrik terlihat jelas untuk energi sumber gamma dibawah 500 keV, terlihat kontras jika dibandingkan dengan sintilator PVT plastik tanpa penambahan Bismuth yang didominasi spektrum hamburan Compton.

b. Metode Polimerisasi Termoset

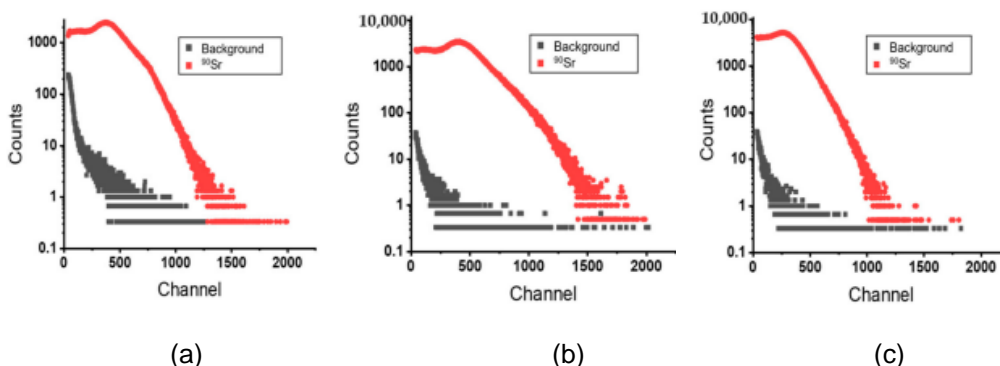
Plastik sintilator dari resin termoset seperti epoksi telah diproduksi oleh Eljen technology dengan produk EJ-290 dan Saint Gobain dengan BC-600. Vasil'chenko [17] menggunakan epoxy BC-600 Saint Gobain untuk karakterisasi sumber radioaktif Sr-90. Sedangkan Hara Kang dkk [18] serta Jong Soo Nam dkk [19] melakukan sintesis plastik sintilator menggunakan epoxy resin WE-300 (Won Chemical Korea), umumnya jenis epoxy bisphenol A diglycidylethers dengan hardener cycloaliphatic diamine, yang ke dalamnya dilarutkan dopan primer PTP/PPO dan dopan sekunder

POPOP/TPDB (tetraphenylbutadiene) seperti pada diagram alir gambar 4.

Hara Kang dkk juga mencoba menambahkan aditif nomor atom besar yaitu Perovskite ($\text{CsPbBr}_3(\text{Cl})$) untuk melihat perubahan intensitas sintilasi melalui mekanisme *Fluorescence Resonance Energy Transfer* (FRET). Karakter sensitivitas terhadap sumber radioaktif diuji menggunakan ^{90}Sr dan dibandingkan dengan sintilator plastic komersial BC-400, seperti ditampilkan pada gambar 5.



Gambar 4. Diagram alir proses fabrikasi sintilator plastik metode polimerisasi termoset [19].



Gambar 5. Spektrum ^{90}Sr pada 3 jenis plastik sintilator (a) epoxy-PPO/POPOP, (b) epoxy-PPO/perovskite, dan (c) komersial plastik sintilator BC-400 [18].

Radioaktif ^{90}Sr yang digunakan dalam eksperimen ini adalah tipikal produk fisi dari fasilitas nuklir, pemancar beta. Interaksinya dengan materi

menghasilkan fenomena bremsstrahlung. Hara Kang menggunakan 10 g Epoxy dan 10 g Hardener, dengan PPO 0.2 wt%, POPOP 0.01 wt% untuk sampel

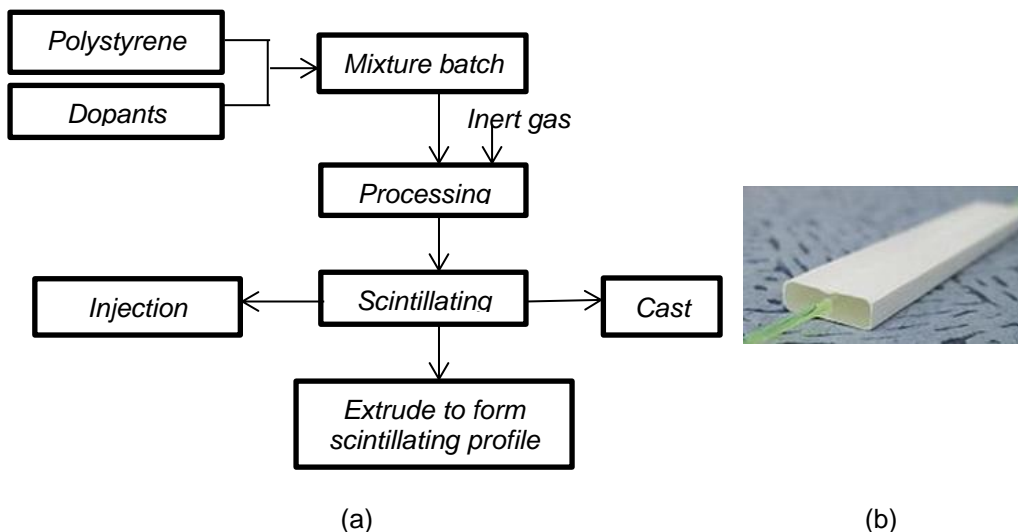
pertama, sampel kedua POPOP digantikan perovskite 0.5 wt%.

Hasil pengukuran radioaktivitas menggunakan sumber ^{90}Sr menunjukkan ada peningkatan pada puncak jumlah *counting* pada sampel PPO/perovskite dibandingkan sampel PPO/POPOP (Gambar 5b). Peningkatan *counting* untuk sampel PPO/perovskite juga terlihat pada channel 1500 keatas yang dapat dikaitkan dengan peningkatan efisiensi kuantum mekanisme FRET antara *nanomaterial* perovskite dengan sintilator plastik, yaitu berkurangnya tingkat reabsorpsi cahaya yang dipancarkan karena stokes shift yang lebih lebar. Spektrum strontium pada epoxy-PPO/perovskite ini mempunyai karakter yang sama seperti yang dilaporkan Tam dkk yang menggunakan aditif *nanomaterial quantum dot* cadmium sulfide [20].

c. Metode injeksi

AnnaPla-Dalmau dkk [21] dan Sung Hyun Chang dkk [22] menggunakan metode Injeksi untuk membuat sintilator plastik. Metode ini menggunakan bahan baku pelet polimer yang ada di pasaran dengan mempertimbangkan kualitas optikal pelet tersebut. Dopan dicampur secara mekanik dengan pelet dan dimasukkan kedalam hopper mesin *screw extruder*.

Campuran pelet polimer dilelehkan dalam mesin melalui tiga tahap pemanasan, mulai dari area *feed*, area *compression* dan area *metering*, dimana pelet sudah meleleh sempurna di kisaran 220°C dan didorong ke dalam cetakan dan didinginkan seperti pada diagram alir proses gambar 6(a) [21]. Karakter sensitivitas terhadap sumber radioaktif diuji menggunakan ^{90}Sr , mengukur yield jumlah foton yang dihasilkan.



Gambar 6. (a) Diagram alir fabrikasi sintilator plastik metode injeksi/ekstrusi [21], (b) strip sintilator plastik 3x10mm dengan WLS fiber [22].

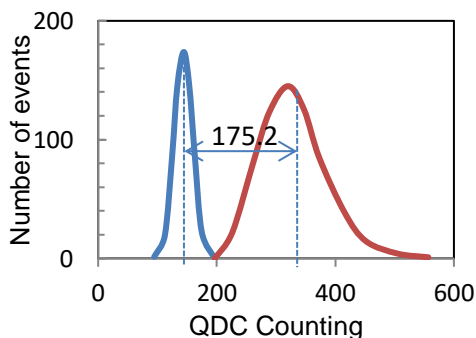
Sung Hyun Chang dkk melakukan fabrikasi strip sintilator ukuran 3 mm x 10

mm dengan ukuran panjang disesuaikan, yang di tengahnya disediakan *hole* untuk

fiber WLS. Sintilator dibuat dari pellet polystyrene komersial dengan 1% PPO sebagai dopan primer dan 0.1% POPOP sebagai dopan sekunder. Ketiga bahan tersebut dicampur secara mekanik dan dipanaskan ke dalam mesin ekstruder, meleleh dan didorong ke dalam *dies* (cetakan), menghasilkan kotak strip sintilator seperti pada gambar 6(b).

Evaluasi kinerja sintilator plastik ekstrusi dilakukan dengan pengukuran spektrum energi menggunakan sumber radioaktif ^{90}Sr . Sintilator dengan fiber WLS dihubungkan dengan Hamamatsu *multi anode photomultiplier tube* (MAPMT) R-5900, akuisisi data menggunakan QDC (*charge to digital converter*) v792 berbasis VME (*Versa Module Euro card*) dari CAEN.

Analisis jumlah foton yang dihasilkan oleh sintilator ekstrusi sample dilakukan dengan pengukuran menggunakan sumber radioaktif ^{90}Sr dan kemudian dibandingkan dengan sintilator ekstrusi komersial produksi Kuraray, menggunakan sistem data akuisisi yang sama.



Gambar 7. Distribusi pulsa sintilator ekstrusi sample pada radiasi ^{90}Sr [22].

Gambar 7 menunjukkan pulsa pedestal (kiri hijau) dan pulsa dari ^{90}Sr (kanan, merah), yang nilai selisihnya adalah 175,2 *counts*, setara dengan jumlah *photo-electron* 6,08. nilai ini jika

dibagi dengan efisiensi kuantum alat MAPMT R-5900 sebesar 13% akan didapatkan jumlah foton yang dihasilkan oleh sintilator ekstrusi sebesar 46,8 foton. Dengan cara yang sama, sintilator ekstrusi komersial menghasilkan selisih sinyal 212,1, setara dengan 7,36 foton, dibagi dengan efisiensi kuantum alat menghasilkan jumlah foton oleh sintilator ekstrusi komersial 56.6 foton. Sehingga dapat dinilai bahwa sintilator ekstrusi yang difabrikasi oleh S.H. Chang dkk mempunyai kinerja 83% relatif dari sintilator ekstrusi komersial Kuraray.

d. Metode 3D printing

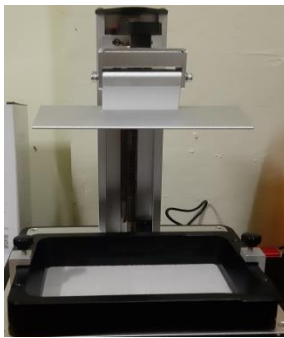
Berns dkk [23] menggunakan metode *Filament 3D printing*, material filamen polystyrene menggunakan dopan PTP dan POPOP. 3D printing mempunyai keunggulan proses fabrikasi relatif cepat dan akurasi geometri terkontrol secara komputasi, meskipun untuk obyek volume besar membutuhkan mesin yang besar pula. Sintilator plastik yang difabrikasi oleh Berns dkk dievaluasi karakternya dengan pengukuran dan analisis spektrum gamma ^{137}Cs . Karakter waktu peluruhan, energy resolution dan efisiensi deteksi dibandingkan dengan sintilator plastik komersial. Sedangkan Dong-geon Kim dkk [24] melakukan fabrikasi sintilator plastik 3D printing *Digital Light Processing* (DLP, Gambar 11a). DLP menggunakan matrik utama Bisphenol A dimethacrylate (BPADMA) yang adalah resin epoksi dan methyl-naphthalene, dengan tambahan dopan primer, WLS dan aditif dengan formula seperti Tabel .

Evaluasi kinerja sintilator plastik dilakukan dengan pengukuran spektrum energi menggunakan sumber gamma ^{137}Cs , ^{54}Mn dan ^{60}Co , yang hasilnya akan dibandingkan dengan sintilator plastik komersial BC-408 dari Saint Gobain. Sintilator sampel dibuat dengan ukuran diameter 50 mm dan tinggi 50 mm

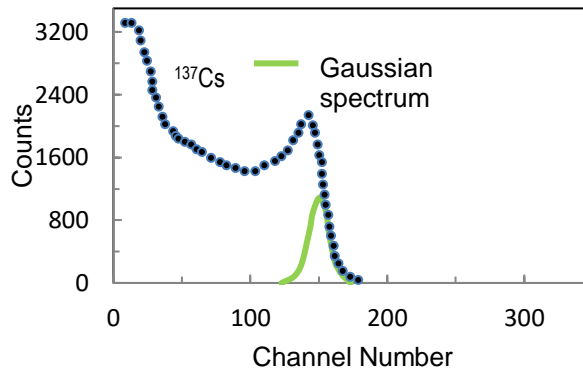
seukuran dengan sintilator referensi BC-408, sintilator disambungkan dengan PMT Hamamatsu H7195 dan sumber gamma diletakan pada jarak 25 mm dari permukaan sintilator.

Tabel 2. Formula fabrikasi sintilator menggunakan 3D printing ^[24].

Types	Names	Ratio
Primary solvent	BPA(EO) ₁₅ DMA	40%
Secondary solvent	1-methyl-naphthalene	60%
Primary dye	PPO	1.5%
Wavelength shifter	ADS086BE	0.005%
Photoinitiator	TPO	0.03%



(a)



(b)

Gambar 8. (a) 3D printer, (b) spektrum energi sumber gamma sintilator sampel ^[24].

Salah satu karakter yang dievaluasi dalam riset Kim ini adalah resolusi sintilator, yaitu kemampuan sintilator untuk membedakan puncak – puncak energi. Nilai resolusi semakin kecil semakin baik, yang artinya sintilator mampu membedakan puncak energi yang berdekatan. Karena sintilator plastik didominasi oleh interaksi hamburan Compton dan tidak menghasilkan *photopeak* interaksi fotolistrik, maka resolusi yang ditentukan dari nilai FWHM

harus diukur pada *Gaussian spectrum* yang puncaknya di titik *compton edge* – nya (Gambar 8b, hijau). Terlihat dari spektrum ¹³⁷Cs, lebar FWHM 21.0, dengan perhitungan yang sederhana, dibagi dengan tinggi maksimum Gaussian hasilnya di kisaran 16%. Sehingga dapat dinilai sintilator sampel mempunyai resolusi relatif lebih kasar dibanding sintilator referensi BC-408 yang mempunyai angka resolusi 9,66% (**Error! Reference source not found.**).

Tabel 3. Hasil pengukuran FWHM dan resolusi sintilator sampel dan sintilator referensi BC-408 ^[24]

Source	Compton edge energy, keV	BC408			Sample		
		GP Channel	FWHM, ch	Resolusi, %	GP Channel	FWHM, ch	Resolution, %
¹³⁷ Cs	477	149 ± 0.03	15.6 ± 0.1	9.66 ± 0.04	123 ± 0.05	21.0 ± 0.1	15.4 ± 0.1
		315 ± 0.1	24.3 ± 0.3	7.42 ± 0.08	264 ± 0.24	30.7 ± 0.7	11.1 ± 0.2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari studi keempat metode yang telah dijabarkan diatas, karakterisasi terhadap sampel menunjukkan bahwa masing-masing sintilator plastik terbukti dapat digunakan sebagai detektor nuklir yaitu sebagai pencacah sumber gamma ¹³⁷Cs, ²²Na, dan ⁶⁰Co maupun sumber beta ⁹⁰Sr. Uji karakter untuk setiap sintilator plastik yang dihasilkan masing-masing metode seperti spektrum emisi cahaya tampak, spektrum energi sumber radiasi, *light yield* dan resolusi, memperlihatkan bahwa sintilator plastik cukup handal untuk aplikasi deteksi radiasi atau partikel energi tinggi. Sintilator plastik, dengan densitas yaitu 1 - 2 g/cm³ menghasilkan *light yield* 12240 foton/MeV, karakter respon deteksi lebih cepat dari sintilator anorganik, yaitu waktu peluruhan 2 – 4 ns, dapat dibentuk

fleksibel dan difabrikasi untuk volume besar sampai 5x60x300 cm³ [8] untuk keperluan industri nuklir, kedokteran maupun riset fisika energi tinggi, serta harganya yang ekonomis, menjadi daya tarik yang lebih dibandingkan sintilator konvensional kristal anorganik. Dominasi di area hamburan Compton yang mengakibatkan peak energi sumber gamma tidak terlihat, sudah mulai teratasi dengan penambahan material nomor atom besar seperti bismuth tripvalate, triphenyl bismuth (BiPh₃), Perovskite (CsPbBr₃(Cl)), atau nanomaterial quantum dot cadmium sulfide. Studi lanjutan terkait pengembangan sintilator plastik volume besar untuk radiasi portal monitor akan mempertimbangkan karakter proses masing-masing metode seperti ditampilkan pada tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4. Karakter proses pembuatan sintilator plastik.

Polimerisasi adisi	Polimerisasi termoset	Injeksi	3D printing
Proses termal 120°C, membutuhkan waktu yang relatif panjang (220 jam).	Proses tidak membutuhkan panas dan relatif cepat (2jam).	Proses termal 220°C dalam mesin Extruder dan relatif cepat.	Proses tidak membutuhkan panas dan relatif cepat.
Fabrikasi produk volume besar membutuhkan infrastruktur skala pabrik seperti di ISMA [13].	Fabrikasi produk volume besar relatif mudah dengan menggunakan cetakan /mold volume besar.	Fabrikasi produk volume besar membutuhkan mesin Extruder besar.	Fabrikasi produk volume besar membutuhkan 3D printer ukuran besar.

KESIMPULAN

Secara umum sintilator plastik disintesis dalam empat metode, yaitu pertama polimerisasi adisi pada kisaran temperatur 120°C menggunakan monomer styrene atau vinyltoluene menjadi polystyrene/polyvinyltoluene sebagai matriks dasar, di-doping dengan p-TP (p-terphenyl) atau PPO (2,5-difenilxazol) sebagai dopan primer dan POPOP (1,4-bis [2- (phenyloxazolyl)] - benzena) sebagai dopan sekunder atau *wavelength shifter*. Metode kedua yaitu, polimerisasi plastik termoset menggunakan resin epoxy yang direaksikan dengan hardener pada temperatur kamar, dan dilarutkan dopan primer-sekunder yang sama. Metode ketiga, dengan bahan dasar pelet polystyrene/polyvinyltoluene bersama dopan primer-sekunder dimasukkan ke dalam mesin ekstruder, dilelehkan pada temperatur 220°C dan diinjeksikan dalam cetakan/mold serta ditengah sintilator disediakan *hole* untuk menyisipkan fiber WLS. Metode keempat menggunakan teknologi terkini yaitu *3D printing*, menggunakan formula khusus polimer UV semacam resin epoxy atau filament yang sudah di-*doping* dengan dopan primer-sekunder.

Karakterisasi sampel dari masing-masing metode menggunakan sumber gamma ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co maupun sumber beta ^{90}Sr menunjukkan hasil bahwa sintilator plastik yang telah dibuat dapat digunakan sebagai detektor nuklir. Studi lanjutan terkait pengembangan sintilator plastik untuk aplikasi RPM akan mempertimbangkan pilihan pada metode polimerisasi termoset karena relatif mudah dilaksanakan dalam skala laboratorium dengan biaya rendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih

kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional yang menyediakan beasiswa untuk program *Degree by Research*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Wiley, 2010.
- [2] M. Swoboda *et al.*, "Spectral gamma detectors for hand-held Radioisotope Identification Devices (RIDs) for nuclear security applications," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 3111–3118, 2005.
- [3] G. Bizarri, J. T. M. Dehaas, P. Dorenbos, and C. W. E. Vaneijk, "Scintillation properties of 1 x 1 Inch³ LaBr₃: 5% Ce Crystal," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 53, no. 2, pp. 615–619, 2006.
- [4] C. Cuesta *et al.*, "Slow scintillation time constants in NaI(Tl) for different interacting particles," *Opt. Mater. (Amst)*, vol. 36, no. 2, pp. 316–320, 2013.
- [5] J. B. BIRKS, *The theory and practice of scintillation counting*. New York U.S.A: Pergamon Press, 1964.
- [6] N. Tsoufanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, Second. Taylor & Francis, 1995.
- [7] S. N. Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection*, First. Elsevier, 2007.
- [8] "Crystals Saint Gobain, Solid Plastic and Liquid Scintillation Materials." [Online]. Available: <https://www.crystals.saint-gobain.com/products/organic-scintillation-materials>. [Accessed: 29-Nov-2021].
- [9] C. Grupen and I. Buvat, Eds., *Handbook of particle detection and imaging*. Springer, 2012.
- [10] M. S. Ł. Kapłan, S. Prof, P.

- Moskal, D. Ph, and D. Sc, "PhD thesis Synthesis and characterization of polystyrene scintillators and their application in positron emission tomography," 2017.
- [11] N. J. Cherepy *et al.*, "Bismuth-loaded plastic scintillator portal monitors," in *Proc. SPIE 10762, Hard X-Ray, Gamma-Ray, and Neutron Detector Physics XX*, 2018, p. 12.
- [12] M. Hamel *et al.*, "Plastic scintillators modifications for a selective radiation detection," *2015 4th Int. Conf. Adv. Nucl. Instrum. Meas. Methods their Appl.*, 2015.
- [13] Y. N. Kharzheev, "Scintillation counters in modern high-energy physics experiments," *Phys. Part. Nucl.*, vol. 46, no. 4, pp. 678–728, 2015.
- [14] C. H. Lee, J. Son, T. Kim, and Y. K. Kim, "Characteristics of Plastic Scintillators Fabricated by a Polymerization Reaction," *Nucl. Eng. Technol.*, 2016.
- [15] M. Moszyński, M. Kapusta, M. Mayhugh, D. Wolski, and S. O. Flyckt, "Absolute light output of scintillators," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 44, no. 3 PART 1, pp. 1052–1061, 1997.
- [16] N. J. Cherepy *et al.*, "Bismuth- and lithium-loaded plastic scintillators for gamma and neutron detection," *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A Accel. Spectrometers, Detect. Assoc. Equip.*, vol. 778, pp. 126–132, 2015.
- [17] V. G. Vasil'chenko and A. S. Solov'ev, "Scintillation Process in Dynamically Changing Media," *Instruments Exp. Tech.*, vol. 45, no. 1, pp. 24–28, 2002.
- [18] H. Kang, S. Min, B. Seo, C. Roh, S. Hong, and J. H. Cheong, "Preliminary studies of perovskite-loaded plastic scintillator prototypes for radioactive strontium detection," *Chemosensors*, vol. 9, no. 3, pp. 1–14, 2021.
- [19] J. S. Nam, Y. S. Choi, S. B. Hong, B. K. Seo, J. K. Moon, and J. W. Choi, "Study on the Characteristics of a Scintillator for Beta-ray Detection using Epoxy Resin," *EPJ Web Conf.*, vol. 153, pp. 1–6, 2017.
- [20] A. K. Tam, O. Boyraz, J. Unangst, P. Nazaretas, M. Schreuder, and M. Nilsson, "Quantum-dot doped polymeric scintillation material for radiation detection," *Radiat. Meas.*, vol. 111, no. August 2017, pp. 27–34, 2018.
- [21] A. Pla-dalmou, A. D. Bross, and K. L. Mellott, "Extruded Plastic Scintillation Detectors," in *DPF99 Conference*, 1999, pp. 1–7.
- [22] S. Hyun, D. Hee, M. Adil, D. Jung, J. Suhk, and Y. Do, "Production of Extruded Fine Scintillator Strips," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 53, no. 6, pp. 3178–3181, 2008.
- [23] S. Berns *et al.*, "A novel polystyrene-based scintillator production process involving additive manufacturing," *J. Instrum.*, vol. 15, no. 10, 2020.
- [24] D. geon Kim *et al.*, "Performance of 3D printed plastic scintillators for gamma-ray detection," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 12, pp. 2910–2917, 2020.