

## PERHITUNGAN KETEBALAN BAHAN KOMPOSIT KARET ALAM TIMBAL OKSIDA UNTUK PROTEKSI RADIASI SINAR – X 100 Kev

Gunarwan Prayitno  
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir – BATAN

### Abstrak

*Perhitungan ketebalan Bahan Komposit Karet Alam Timbal Oksida Untuk Proteksi Radiasi Sinar-x 100 Kev.* Telah dilakukan perhitungan ketebalan bahan komposit karet alam timbal oksida untuk proteksi radiasi sinar-x 100 kev. Perhitungan bertujuan untuk memperoleh ketebalan bahan proteksi radiasi yang aman bagi lingkungan atau pekerja dilingkungan medan radiasi. Perhitungan kemampuan daya serap bahan komposit karet alam timbal oksida dilakukan pada energi sinar-x 100 kev. Dasar perhitungan daya serap diawali dengan komposisi timbal oksida sebesar 50 pphr (part per one hundred rubber) sampai dengan 1000 pphr, tebal komposit karet alam yang akan dihitung setebal 2,5 mm. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa ketebalan bahan komposit karet alam timbal oksida yang aman bagi pengguna atau para pekerja dimedan radiasi, apabila karet alam dicampur dengan timbal oksida sebanyak 550 pphr. Nilai daya serap pada 550 pphr telah memenuhi standar yang diizinkan.

### Abstract

*The Thickness Calculation Of Lead Oxide Natural Rubber Composite For X-Ray Radiation Protection.* The thickness calculation of lead oxide natural rubber composite for x-ray radiation protection has been done for 100 kev energy x-ray. The calculation is to obtain the thickness of radiation protection that was safe for environment or worker who works in radiation field. The calculation of absorption strength of lead oxide natural rubber composite is started by lead oxide composite 550 part per one hundred rubber (pphr) until 1000 part per one hundred rubber. the lead okside natural rubber composite thickness to be calculated is 2.5 mm. The result of calculation shows that the thickness of substance lead oxide natural rubber composite was safe for environment or worker who works in radiation field, if the 550 part per one hundred rubber lead oxide was mixed with natural rubber. The value of absorption strength on 550 part per one hundred rubber is standart permitted.

### 1. Pendahuluan

Rekayasa pembuatan bahan perisai radiasi harus mempunyai dua sifat sebagai karakteristik pokok. Diantaranya, pertama mampu menyerap radiasi sinar-x dan radiasi lain yang mempunyai karakteristik sama dengan sinar-x, kedua, mempunyai daya serap terhadap sinar-x yang tinggi. Karena bahan perisai radiasi yang akan dibuat diperuntukkan atau dipergunakan oleh para pekerja yang berada di medan radiasi, maka persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah tidak terlalu tebal dan elastis. Tujuannya apabila dipakai tidak terlalu berat dan tidak kaku. Yang dimaksud dengan mempunyai daya serap tinggi terhadap radiasi sinar-x adalah untuk keamanan para pengguna. Koefisien daya serap bahan perisai

yang dibuat dibandingkan dengan daya serap timbal dengan ketebalan tertentu. Dengan suatu perhitungan akan didapatkan ketebalan bahan perisai, dan daya serap radiasi sesuai dengan standart nasional, sehingga pengguna terhindar dari paparan radiasi yang tidak diinginkan atau masih dalam batas yang diizinkan.

### 2. Teori

Perhitungan ketebalan bahan perisai radiasi hanya untuk energi sinar-x 100 kev. Sedangkan perhitungan daya serap komposit karet alam berdasarkan pada komposisi timbal oksida. Bahan komposisi timbal oksida yang akan dicampur dari nilai 50 pphr (part per one hundred rubber) sampai dengan nilai 1000 pphr. Dalam hal ini karet alam

sebagai material komposit, sedangkan timbal oksida sebagai filler (bahan pengisi) komposit. Diharapkan hasil campuran karet alam dan timbal oksida pada tingkat homogenitas yang tinggi. Disamping itu distribusi timbal oksida dalam karet alam dapat terdistribusi sampai dengan pori-pori molekul karet alam. Telah dilakukan berbagai perhitungan ketebalan bahan perisai dengan dua kombinasi parameter, yaitu ketebalan karet alam dan timbal oksida sebagai pengisi. Hasil akhir yang diinginkan adalah setipis mungkin karet alam dan sesedikit mungkin bahan pengisi timbal oksida, tetapi mempunyai daya serap yang tinggi. Nilai daya serap bahan komposit diekivalenkan terhadap daya serap pelat timbal tebal tertentu dengan radiasi yang sama. Untuk menentukan daya serap komposit, terlebih dahulu menghitung koefisien serapan linier  $\mu$  komposit berdasarkan energi sinar-x 100 keV. Nilai koefisien serapan linier komposit dihitung dari jenis unsur pembentuk komposit, antara lain timbal (Pb), karbon (C) dan hidrogen (H), karet alam mempunyai rumus kimia  $C_{10}H_{16}$ , dan timbal oksida mempunyai rumus kimia  $Pb_3O_4$ . Perhitungan untuk menentukan daya serap komposit, terlebih dahulu menghitung koefisien serapan linier  $\mu$  pada energi 100 keV.

### 3. Metoda Perhitungan

Dalam makalah ini akan dilakukan perhitungan daya serap bahan perisai radiasi setebal 2,5 cm karet alam dengan campuran timbal oksida. Untuk menghitung koefisien serapan linier diperlukan parameter koefisien serapan masa untuk setiap unsur pembentuk senyawa karet alam dan timbal oksida pada energi 100 keV, parameter tersebut terlihat pada tabel 1.

Tabel 1. koefisien serapan masa pada 100 keV.

Nama unsur	Koefisien serapan masa ( $\mu/\rho$ ) $cm^2/gr$
H	0,294
O	0,152
C	0,149
Pb	5,62

Dengan menggunakan data koefisien serapan masa untuk setiap unsur pembentuk senyawa, maka dapat dihitung koefisien serapan masa senyawa karet alam. Dengan menggunakan persamaan 1.

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{senyawa} = \sum W_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \dots\dots 1.$$

Dimana : w = fraksi berat unsur dalam senyawa.

Jadi bila koefisien serapan masa senyawa karet alam ( $C_{10}H_{16}$ ) akan dihitung dengan persamaan 1. dengan mensubstitusi semua parameter, berat unsur, koefisien serapan unsur pada 100 keV, didapat hasil perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\rho_{karet}} &= \frac{10 \times 12}{120 + 16} \times 0,149 + \frac{16 \times 1}{120 + 16} \times 0,294 \\ &= 0,1661 \text{ cm}^2/\text{gr} \end{aligned}$$

dengan cara yang sama, didapat koefisien serapan masa senyawa timbal oksida ( $Pb_3O_4$ ) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{\mu}{\rho_{Pb_3O_4}} &= \frac{3 \times 207}{621 + 64} \times 5,62 + \frac{4 \times 16}{621 + 64} \times 0,152 \\ &= 5,1091 \text{ cm}^2/\text{gr} \end{aligned}$$

Kedua hasil perhitungan koefisien unsur diatas dipergunakan untuk menghitung koefisien serapan komposit, dengan campuran atau komposisi dari 50 pphr (*part per hundred rubber*) sampai 1000 pphr. Artinya dengan komposisi 50 pphr berarti berat karet 100 gram dan berat timbal oksida 50 gram. Sebagai contoh, koefisien serapan komposit dengan komposisi 50 pphr :

$$\begin{aligned} \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{50\text{pphr}} &= \frac{100}{150} \times 0,1661 + \frac{50}{150} \times 5,1091 \\ &= 1,8137 \end{aligned}$$

dengan cara yang sama untuk setiap kenaikan komposisi 50 pphr, maka dapat ditabelkan seperti terlihat pada tabel 2.

Tabel 2. koefisien serapan komposit

Komposisi pphr	Koefisien serapan komposit ( $\mu/\rho$ ) $\text{cm}^2/\text{gr}$
50	1,8137
100	2,6376
150	3,1318
200	3,4613
250	3,6968
300	3,8733
350	4,0106
400	4,1205
450	4,2103
500	4,2852
550	4,3486
600	4,4029
650	4,4500
700	4,4912
750	4,5275
800	4,5598
850	4,5887
900	4,6148
950	4,6383
1000	4,6597

Dengan mengetahui masa jenis karet alam 0,95  $\text{gr}/\text{cm}^3$  dan masa jenis timbal oksida 9,3  $\text{gr}/\text{cm}^3$ , maka dapat dihitung volume masing-masing unsur dalam satu komposit setiap kenaikan nilai pphr. Volume karet alam =  $100/0,95 \text{ cm}^3 = 105,2631 \text{ cm}^3$  dan volume timbal oksida =  $50/9,3 = 5,3763 \text{ cm}^3$ . Untuk komposisi pphr yang berlainan didapat volume timbal oksida yang berbeda, dapat ditabelkan sebagai berikut, lihat tabel 3.

Tabel 3. volume timbal oksida untuk komposisi pphr yang berlainan.

Komposisi pphr	Volume timbal oksida ( $\text{Pb}_3\text{O}_4$ )
50	5,3763
100	10,7526
150	16,1290
200	21,5053
250	26,8817
300	32,2580
350	37,6344
400	43,0107
450	48,3870
500	53,7644
550	59,1397
600	64,5161
650	69,8924
700	75,2688
750	80,6451

800	86,0215
850	91,3978
900	96,7741
950	102,1505
1000	107,5268

Bahan perisai radiasi yang akan dihitung daya serapnya berukuran panjang 14,87 cm, lebar 14,68 cm dan tebal 2,5 cm, maka dapat dicari volume bahan perisai radiasi sebesar  $54,5729 \text{ cm}^3$ . Dengan demikian volume karet alam dalam bahan komposit dihitung menurut persamaan :

$$V_{k.a} = \frac{V_{k.a}}{V_{k.a} + V_{\text{timbal oksida}}} \times I_{\text{bahan perisai}} \dots\dots 2$$

Dengan menggunakan persamaan 2. dapat dihitung volume karet alam untuk setiap kenaikan pphr, ditabelkan dalam tabel 4.

Tabel 4 Volume karet alam dalam bahan komposit.

Komposisi pphr	Volume karet alam dalam bahan komposit ( $\text{cm}^3$ )
50	51,9203
100	49,5149
150	47,3219
200	45,3150
250	43,4713
300	41,7718
350	40,2992
400	38,7452
450	37,3869
500	36,1227
550	34,9416
600	33,8351
650	32,7966
700	31,8199
750	30,8997
800	30,0312
850	29,2102
900	28,4329
950	27,6959
1000	26,9961

Setelah mengetahui volume karet alam dalam bahan komposit, maka dapat diketahui volume timbal oksida dalam bahan komposit, yaitu dengan cara,

$$V_{\text{Pb}_3\text{O}_4} = V_{\text{volume bahan perisai}} - V_{k.a} \dots\dots 3$$

Tabel 5. menunjukkan volume timbal oksida dalam bahan komposit, dengan kenaikan komposisi pphr yang berbeda.

Tabel 5. Volume timbal oksida dalam bahan komposit.

Komposisi pphr	Volume timbal oksida (Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) dalam bahan komposit (cm <sup>3</sup> )
50	2,6519
100	4,6580
150	7,2510
200	9,2579
250	11,1016
300	12,8011
350	14,3727
400	15,8277
450	17,1860
500	18,4502
550	19,6313
600	20,7378
650	21,7763
700	22,7530
750	23,6732
800	24,5417
850	25,3627
900	26,1400
950	26,8770
1000	27,5767

Setelah mengetahui volume karet alam yang telah dicampur dengan timbal oksida dengan kenaikan nilai pphr yang berbeda. Dilanjutkan dengan perhitungan berat karet alam yang dicampur timbal oksida, dengan pphr yang berbeda. Perhitungan berat karet alam tersebut berdasarkan persamaan ;

$$G_{\text{karet alam}} = V_{\text{karet alam}} \cdot \rho_{\text{karet alam}} \quad 4$$

Harga kerapatan karet alam sebesar 0,95 gram/cm<sup>3</sup> dan substitusikan nilai parameter yang lain ke dalam persamaan tersebut diatas. Didapatkan tabel 6. sebagai berikut ;

Tabel 6. Volume timbal oksida dalam bahan komposit

Komposisi pphr	Volume timbal oksida (Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ) dalam bahan komposit (cm <sup>3</sup> )
50	49,3249

100	47,0391
150	44,9558
200	43,0492
250	41,2977
300	39,6832
350	38,1902
400	36,8070
450	35,5175
500	34,3165
550	33,945
600	32,1433
650	31,1567
700	30,2289
750	29,3547
800	28,5296
850	27,7496
900	27,0112
950	26,3111
1000	25,6463

Langkah berikutnya menghitung berat timbal oksida dengan masa jenis timbal oksida 9,3 gram/cm<sup>3</sup>, mengikuti persamaan berikut ,

$$G_{\text{Pb3O4}} = \rho_{\text{Pb3O4}} \times V_{\text{Pb3O4}} \dots\dots\dots 5$$

Dimana G adalah berat dan V adalah volume. Dengan mensubtitusi masa jenis timbal oksida dan volume timbal oksida dengan komposisi pphr yang berlainan akan didapat tabel 7.

Tabel 7. Berat timbal oksida

Komposisi pphr	Berat timbal oksida (Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )
50	24,6626
100	43,3139
150	67,4343
200	86,0984
250	103,2448
300	119,0502
350	133,6661
400	147,1976
450	159,8298
500	171,5868
550	182,5710
600	192,8615
650	202,5195
700	211,6029
750	220,1607
800	228,2378
850	235,8731
900	243,1020
950	249,9561
1000	256,4633

Dilanjutkan dengan perhitungan masa jenis komposit untuk setiap komposisi pphr yang berbeda, mengikuti persamaan berikut ;

$$\rho = (G_{\text{karet alam}} + G_{\text{Pb3O4}}) / (V_{\text{karet alam}} + V_{\text{Pb3O4}}) \dots\dots\dots 6.$$

Subtitusikan parameter yang ada dalam persamaan dari data tabel-tabel sebelumnya, kemudian hasil perhitungan dapat ditabelkan seperti dalam tabel 8.

Tabel 8. Masa jenis komposit

Komposisi pphr	Masa jenis komposit ( $\rho$ ) (gram/cm <sup>3</sup> )
50	1,3557
100	1,6557
150	2,0594
200	2,3665
250	2,6486
300	2,9086
350	3,1491
400	3,3717
450	3,5795
500	3,7729
550	3,9537
600	4,1230
650	4,2819
700	4,4313
750	4,5721
800	4,7050
850	4,8306
900	4,9495
950	5,0623
1000	5,1694

Pencampuran kedua unsur (karet alam dan timbal oksida) tersebut sesuai dengan aturan standart nasional, serta pengujiannya. Setelah bahan atau unsur karet alam dicampur dengan unsur timbal oksida (bahan komposit) menjadi bahan apron. Perlu dihitung koefisien serapan linier komposit. Perhitungan serapan linier mengikuti persamaan dibawah ini ;

$$\mu = \text{Koef serapan masa komposit} \times \text{masa jenis komposit} \dots\dots 7$$

Untuk setiap kenaikan pphr akan mempunyai koefisien serapan linier

yang berbeda. Hasil perhitungan ditabelkan dalam tabel 9.

Tabel 9. Koefisien serapan linier bahan komposit

Komposisi pphr	Koefisien serapan linier bahan komposit ( $\mu$ )
50	2,4588
100	4,3670
150	6,4496
200	8,1911
250	9,7913
300	11,2658
350	12,6297
400	13,8930
450	15,0707
500	16,1676
550	17,1930
600	18,1531
650	19,0544
700	19,9018
750	20,7001
800	21,4538
850	22,1661
900	22,8409
950	23,4804
1000	24,0878

Setelah data-data yang diperlukan untuk menghitung daya serap radiasi sinar-x 100 keV. Dilanjutkan dengan perhitungan daya serap radiasi sinar-x. dengan menaikkan harga komposisi pphr yang berlainan, dari 50 pphr sampai dengan 1000 pphr. Perhitungan mengikuti persamaan :

$$Ds = (1 - e^{-\mu x}) \times 100\% \dots\dots\dots 8.$$

Dimana  $\mu$  = koefisien serapan linier bahan komposit,  
 $x$  = tebal karet alam (2,5 mm). Hasil perhitungan daya serap bahan komposit ditabelkan pada tabel 9.

Tabel 9. Daya serap bahan komposit

Komposisi pphr	Daya serap radiasi sinar-x (Ds) (%)
50	45,92 %
100	66,44 %
150	80,06 %
200	87,10 %
250	91,35 %
300	94,02 %
350	95,57 %

400	96,90 %
450	97,68 %
500	98,24 %
550	98,89 %
600	98,93 %
650	99,15 %
700	99,31 %
750	99,43 %

#### 4. Pembahasan dan Hasil

Hasil perhitungan yang ditabelkan diatas hanya untuk serapan energi sinar-x 100 keV. Perhitungan daya serap berdasarkan nilai pphr (*part per one hundred rubber*). Dimisalkan nilai pphr 50, artinya dengan komposisi 50 pphr berat karet alam 100 gram dan berat timbal oksida 50 gram. Setiap kenaikan pphr akan mempengaruhi daya serap. Untuk mendapatkan koefisien serapan linier bahan komposit (dalam persamaan 8,  $\mu$ ), parameter-parameter penunjang untuk menuju nilai tersebut harus dicari terlebih dahulu. Tabel 1-7 diatas merupakan hasil perhitungan parameter penunjang. Hasil perhitungan daya serap bahan komposit karet alam timbal oksida diverifikasi dengan daya serap plat timbal terhadap sinar-x. verifikasi yang dilakukan pada tebal plat timbal dari 0,1 mm sampai dengan 0,75 mm. Pada tebal berapa karet alam harus dicampur dengan timbal oksida, berdasarkan nilai pphr. Sehingga mempunyai nilai daya serap sinar-x sesuai standart nasional yang diizinkan. Nilai daya serap bahan komposit yang diizinkan masih dalam rentang 0,1 mm sampai 0,75 mm, plat timbal. Batasan yang harus dipenuhi dalam perhitungan campuran karet alam dengan timbal oksida adalah :

1. Mempunyai daya serap yang tinggi terhadap sinar-x 100 keV,
  2. Ringan, tidak menambah beban para pengguna,
  3. Elastis, fleksibel dan lentur,
  4. Tahan terhadap gaya tarik,
- Dengan demikian hasil perhitungan (tabel 8.) untuk memenuhi 4 kriteria diatas, disimpulkan bahwa dengan tebal karet alam 2,5 mm dapat dicampur dengan nilai 300 pphr. Pada harga ini

equivalent dengan daya serap plat timbal setebal 0,3 mm. Hanya dengan mencampur 300 pphr telah memenuhi standart SNI. Dengan daya serap 94,02 % diatas nilai SNI, para pengguna akan merasa aman.

#### 5. Pustaka

1. STANDART NASIONAL INDONESIA (SNI) 18-6478-2000 : Apron Proteksi Radiasi Sinar-X, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta 2000.
2. STANDART NASIONAL INDONESIA (SNI) 06-6041-1999: Lembaran Vulkanisasi Karet Timbal untuk Perisai Sinar-X. Badan Standarisasi Nasional, Jakarta 1999.
3. STANDART NASIONAL INDONESIA (SNI) 18-6479-2000 : Pakaian Proteksi Sinar-X untuk Pasien, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta 2000.
4. STANDART NASIONAL INDONESIA (SNI) 18-6480-2000 : Metode Pengujian Ekvivalen Timbal untuk Peralatan Sinar-X , Badan Standarisasi Nasional, Jakarta 2000.