

การทดลองหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาสำหรับวัสดุเหลือใช้จากเปลือกถั่วลิสงและกากอ้อยในประเทศไทย

Experimental investigation of γ - ray attenuation coefficients for agriculture waste in Thailand: peanut shell and bagasse

จุฑารัตน์ นุชนารถ ลัดดาวัลย์ ภูเอี่ยม และ ศุภรัตน์ ทัศนเจริญ

โปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
Jutarat_red@live.com and tuscharoen@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของเปลือกถั่วลิสงและกากอ้อยในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยอัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ใช้มีอัตราส่วน ดังนี้ 3:7, 4:6, 5:5, 6:4 และ 7:3 ตามลำดับแล้วทำการอัดขึ้นรูป โดยใช้เครื่องอัดโดยขนาดของแรงที่ใช้อัดเท่ากับ 25 ตันเป็นแผ่นวงกลมและนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงมวลโดยวิธีการส่งผ่านรังสีแบบลำรังสีแคบที่พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผ่านไปยังวัสดุที่มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.50, 0.55, 0.76, 0.59 และ 0.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และมีความหนาเท่ากับ 0.7, 0.8, 0.7, 0.9 และ 0.9 เซนติเมตรตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลได้มาจากการทดลองและการคำนวณโดยโปรแกรม XCOM ผลที่ได้พบว่าทั้งสองมีค่าที่แตกต่างอยู่ในช่วงระหว่าง 1.05-26.70 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลที่พลังงานต่างๆ โดยใช้โปรแกรม XCOM พบว่าเมื่อพลังงานมีค่าสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีก็จะลดลงด้วย

คำสำคัญ: ถั่วลิสง สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล อ้อย

Abstract

This research is to determine the mass attenuation the coefficient of the reduced gamma rays through the bark's peanuts and the sugar cane molasses in the different ratios. The ratios between the sugar cane molasses and the bark's peanuts are 3:7, 4:6, 5:5, 6:4 and 7:3 respectively. These materials are compress to the circle by the compact machine with the pressure of 25 tons. The mass attenuation coefficients determined by narrow beam radiation with the 60 keV from Am-241 source. The sample materials which are dense to 0.50, 0.55, 0.76, 0.59 and 0.48 grams per cubic centimetre and the thickness to 0.7, 0.8, 0.7, 0.9 and 0.9 centimetre respectively. Then, using the program XCOM calculates to find the coefficient. The result shows that there are relative the difference between 1.05 - 26.70 %. Moreover found that, when the energies are increased the mass attenuation is decrease.

Keywords: Peanut shell, Radiation shielding, Bagasse

1. บทนำ

ปัจจุบันได้มีการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆกัน อาทิเช่น ทางด้านการแพทย์ ด้านการเกษตร ด้านการถนอมอาหารและด้านพลังงาน เป็นต้น จากที่กล่าวมาเป็นการนำสารกัมมันตรังสีมาใช้ประโยชน์ แต่ในขณะเดียวกัน

สารกัมมันตรังสีก่อให้เกิดโทษเช่นกัน รังสีที่แผ่ออกมาได้จากธาตุบางชนิดส่วนหนึ่งอยู่ในธรรมชาติและส่วนหนึ่งเกิดจากฝีมือมนุษย์ สารกัมมันตรังสีที่สลายตัวนี้จะปะปนในสิ่งแวดล้อมทั่วไปซึ่งสามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์สิ่งมีชีวิตและถ้าได้รับรังสีสูงมากทำให้มีอาการป่วยทางรังสีได้ถ้าไม่มีระบบป้องกันที่ดีเพียงพอและบ้านก็เป็นอีกสถานที่หนึ่งที่เราสามารถใช้ในการหลบหรือป้องกันรังสีได้ส่วนหนึ่ง ดังนั้นจึงได้มีผู้ทำวิจัยศึกษาเกี่ยวกับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนทางรังสีของวัสดุต่างๆที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือน เช่น Medhat [1] ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของวัสดุบางชนิดที่ใช้ในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนในประเทศอียิปต์ โดยได้ทำการทดสอบกับวัสดุอิฐแดง ยิปซัม ซีเมนต์ และคอนกรีตที่พลังงาน 60, 357, 662, 1173 และ 1333 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ Akkurt และคณะ [2] ได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของคอนกรีต หินอ่อน และกรวด ที่พลังงาน 662, 1173 และ 1333 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ Bradley [3] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของไม้โองก้างที่พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ Marshdeh [4] ได้ทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอ็กซ์จากซีลื้อของไม้โองก้าง โดยนำมาอัดเป็นแผ่นทรงกระบอกเพื่อทดลองเป็นแผ่นไม้อัดและนำมาทดสอบกับรังสีเอ็กซ์ที่พลังงานในช่วงระหว่าง 16.56-25.26 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ จากแนวคิดนี้เราจึงได้นำเอาพืชที่หาง่ายที่มีอยู่ในท้องถิ่นของเรา คือ อ้อยและถั่วลิสง ซึ่งเมื่อนำอ้อยไปแปรรูปเป็นน้ำตาลทรายก็จะเหลือกากอ้อยซึ่งไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ และถั่วลิสงเมื่อส่งโรงงานแปรรูปถั่วลิสงแล้วก็จะเหลือแต่เปลือก ดังนั้นเราจึงนำกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสงมาแปรรูปให้เกิดประโยชน์โดยการนำส่วนผสมของกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสงมาเปลี่ยนแบบไม้อัดที่ใช้ในการทำสิ่งปลูกสร้างเพื่อทดสอบคุณสมบัติในการลดทอนรังสีที่พลังงานต่ำของกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสง เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้างที่สามารถลดทอนรังสีได้ต่อไป

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่พลังงานต่ำจากกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสงที่นำมาทำเลียนแบบไม้อัดเพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง

2. ทฤษฎี

การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์

เมื่อมีวัสดุมาทาบรังสีที่มีค่าพลังงานเดียว (Monoenergetic X-Ray) จะมีการดูดกลืนรังสี ซึ่งจะมีผลทำให้ความเข้มข้นของรังสีที่ผ่านไปลดลง

พิจารณารังสีที่มีความเข้ม I ผ่านเข้าไปในวัสดุที่มีความหนา dx ทำให้ความเข้มรังสีลดลง dI โดยที่ความเข้มของรังสีจะลดลงขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุที่ทาบคือ

$$-\frac{dI}{I} \propto dx$$

หรือ

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx$$

จะได้

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^x \mu dx$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

โดยที่ μ เป็นค่าคงที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear absorption coefficient)
 I_0 และ I เป็นความเข้มรังสีก่อนและภายหลังที่ทาบด้วยวัสดุหนา
 x ความหนาของวัสดุที่ทาบ

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 การเตรียมตัวอย่างวัสดุ

1. นำกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสงที่หามาได้ไปตากแดดให้แห้งและนำไปบดให้พอยาบ
2. นำวัสดุที่บดแล้วมาชั่งในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน คือ อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสง มีดังนี้ 3:7, 4:6, 5:5, 6:4 และ 7:3 และทำการอัดขึ้นรูปโดยใช้เครื่องอัด ใช้แรงอัดที่ 25 ตัน

3.2 การหาค่าความหนาแน่น

1. นำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาชั่งน้ำหนัก แล้วบันทึกผล
2. นำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาวัดความสูง และรัศมี แล้วบันทึกผลและคำนวณหาปริมาตรโดยใช้สูตร $V = \pi r^2 h$
3. นำข้อมูลของน้ำหนักที่ชั่ง และปริมาตรที่คำนวณได้ มาหาความหนาแน่นของวัสดุ โดยใช้สูตร $D = \frac{m}{V}$

3.3 การหาค่าประกอบของธาตุของวัสดุตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน

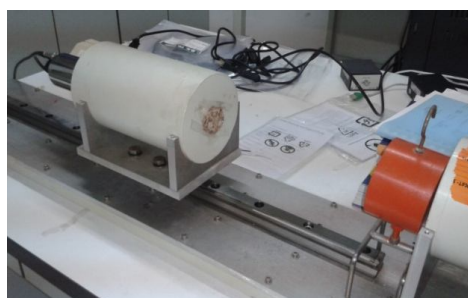
1. นำวัสดุตัวอย่างมาใส่ลงในเครื่องและเปิดเครื่องวิเคราะห์รังสีเอ็กซ์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน
2. ตั้งค่าการใช้งานเช่น ระยะเวลาในการวัด
3. ทำการวัดจนครบ บันทึกผลการวัด

3.4 หาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลด้วยโปรแกรม XCOM

นำผลองค์ประกอบของธาตุของวัสดุตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 3.3 ไปแทนในโปรแกรม XCOM เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีที่พลังงาน 60 keV

3.5 การหาค่าการส่งผ่านของรังสีแกมมา

1. เปิดเครื่องวัดรังสีทิ้งไว้ 3600 วินาที
2. เปิดหัววัดรังสี
3. เข้าโปรแกรมการวัดรังสี
4. ตั้งค่าการใช้งานเช่น ระยะเวลาในการวัด ความต่างศักย์ไฟฟ้า เป็นต้น
5. ทำการวัดรังสีจนครบตามเวลาที่กำหนด บันทึกผลการวัด
6. นำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาวางไว้ตรงกึ่งกลางหัววัดรังสีดังภาพที่ 1
7. ทำการวัดรังสีจนครบตามเวลาที่กำหนด จะได้การวัดรังสีที่ 1 บันทึกผลการวัด
8. เปลี่ยนวัสดุกากอ้อยและเปลือกถั่วลิสงในอัตราส่วน 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7 และทำซ้ำข้อ 5 – 7
9. นำผลการทดลองที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีแกมมา



ภาพที่ 1 นำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาวางไว้ตรงกึ่งกลางหัววัดรังสี

3.6 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุก่อสร้างตัวอย่างที่พลังงานต่างๆโดยใช้โปรแกรม XCOM

นำผลองค์ประกอบของธาตุของวัสดุตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 3.3 ไปแทนในโปรแกรม XCOM ที่พลังงาน 0.05 MeV ถึง 3.00 MeV

4. ผลการวิจัยและอภิปราย

4.1 ผลการหองค์ประกอบของธาตุของวัสดุตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุวัสดุตัวอย่างด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์แบบกระจายพลังงาน ผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของธาตุของวัสดุตัวอย่าง

องค์ประกอบของธาตุ	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	P ₂ O ₅ (%)	SO ₃ (%)	Cl (%)	K ₂ O (%)	CaO (%)	MnO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CuO (%)	ZnO (%)
อัตราส่วน กากอ้อย:เปลือกถั่วลิสง											
3 : 7	12.8	22.6	2.4	15.9	21.8	12.0	9.17	0.086	2.93	0.315	0.082
4 : 6	7.1	12.6	1.3	15.8	32.4	13.8	11.9	0.30	3.83	0.751	0.10
5 : 5	13.0	24.8	2.4	15.2	20.0	13.5	7.81	0.11	2.85	0.281	0.055
6 : 4	5.4	12	1.0	9.68	26.9	12.2	14.6	0.69	14.3	2.81	0.50
7 : 3	5.4	8.8	1.4	15.3	24.2	15.5	15.2	0.62	10.1	2.86	0.60

4.2 ผลการวัดค่าความหนาแน่นและความหนาของวัสดุตัวอย่าง

สำหรับการวัดเพื่อคำนวณการหาความหนาแน่นโดยนำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาซึ่งน้ำหนักและนำวัสดุที่ได้จากการอัดขึ้นรูปมาวัดความสูง และรัศมี และคำนวณหาปริมาตรโดยใช้สูตร $V = \pi r^2 h$ จากนั้นนำข้อมูลของน้ำหนักที่ชั่ง และปริมาตรที่คำนวณได้ มาคำนวณหาความหนาแน่นของวัสดุ โดยใช้สูตร $D = \frac{m}{V}$ ซึ่งผลข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าความหนาแน่นและความหนาของวัสดุตัวอย่างต่างๆ ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นและความหนาของวัสดุตัวอย่าง

อัตราส่วน กากอ้อย : เปลือกถั่วลิสง	มวล (g)	ปริมาตร (cm ³)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ความหนา (cm)
3 : 7	4	7.94	0.50	0.7
4 : 6	5	9.07	0.55	0.8
5 : 5	6	7.94	0.76	0.7
6 : 4	6	10.21	0.59	0.9
7 : 3	5	10.21	0.48	0.9

4.3 ผลการวัดและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

ในส่วนของการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลนั้นประกอบด้วย 2 ส่วนคือการคำนวณทางทฤษฎีโดยใช้โปรแกรม XCOM และการทดลองวัดการส่งผ่านรังสีโดยเครื่องแกมมาสเปกโตมิเตอร์เพื่อเปรียบเทียบระหว่างความถูกต้องกับความน่าเชื่อถือในการที่จะนำไปใช้งานจริง จากการวัดและคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุตัวอย่างทั้งในส่วนของคุณุณและการทดลอง

อัตราส่วน กากอ้อย: เปลือกถั่วลิสง	μ_m (th) (cm ² /g)	μ_m (ex) (cm ² /g)	%error
3 : 7	0.3738	0.3255	12.90%
4 : 6	0.4188	0.4309	2.89%
5 : 5	0.3694	0.3513	4.90%
6 : 4	0.5070	0.5017	1.05%
7 : 3	0.4876	0.3572	26.70%

4.4 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุก่อสร้างตัวอย่างที่พลังงานต่างๆโดยใช้โปรแกรม XCOM ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุตัวอย่างที่พลังงานต่างๆ ผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุตัวอย่างที่พลังงานต่างๆโดยใช้โปรแกรม XCOM

E (MeV)	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (cm ² /g) ของวัสดุตัวอย่าง				
	อัตราส่วน กากอ้อย : เปลือกถั่วลิสง				
	3 : 7	4 : 6	5 : 5	6 : 4	7 : 3
0.05	0.5312	0.6092	0.5235	0.7600	0.7268
0.06	0.3738	0.4188	0.3694	0.5070	0.4876
0.07	0.2918	0.3199	0.2890	0.3757	0.3636
0.08	0.2441	0.2628	0.2422	0.3003	0.2921
0.09	0.2139	0.2269	0.2126	0.2532	0.2476
0.10	0.1935	0.2028	0.1925	0.2220	0.2179
0.15	0.1465	0.1490	0.1463	0.1545	0.1535
0.20	0.1273	0.1282	0.1273	0.1304	0.1300
0.25	0.1156	0.1159	0.1156	0.1169	0.1168
0.30	0.1072	0.1072	0.1072	0.1076	0.1077
0.50	0.0864	0.0861	0.0864	0.0860	0.0861
0.70	0.0743	0.0740	0.0743	0.0739	0.0740
0.80	0.0698	0.0696	0.0699	0.0694	0.0695
1.00	0.0627	0.0625	0.0627	0.0623	0.0624
1.25	0.0561	0.0558	0.0563	0.0557	0.0558
1.50	0.0511	0.0509	0.0511	0.0507	0.0508
1.75	0.0472	0.0471	0.0472	0.0469	0.0470
2.00	0.0441	0.0440	0.0442	0.0439	0.0440
2.50	0.0395	0.0395	0.0395	0.0394	0.0392
3.00	0.0362	0.0362	0.0362	0.0362	0.0363

5. สรุปและอภิปรายผลการทดลอง

5.1 ลักษณะทางกายภาพของวัสดุตัวอย่าง

ลักษณะทั่วไปของวัสดุตัวอย่างจะมีลักษณะที่ทึบแสงและแข็งแรงเมื่อนำไปวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่าง พบว่าความหนาแน่นของวัสดุตัวอย่างมีค่าแตกต่างกันดังนี้ อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ 3:7 มีค่าความหนาแน่น 0.50 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ 4:6 มีค่าความหนาแน่น 0.55 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ 5:5 มีค่าความหนาแน่น 0.76 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ 6:4 มีค่าความหนาแน่น 0.59 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราส่วนระหว่างกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่ 7:3 มีค่าความหนาแน่น 0.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

5.2 ผลจากการวิเคราะห์สมบัติกำบังรังสีของวัสดุตัวอย่าง

จากการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุตัวอย่างทั้ง 5 อัตราส่วนมีค่าที่ใกล้เคียงกับทฤษฎี และมีค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1.05 – 26.70 % โดยพบว่าที่อัตราส่วนของกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่อัตราส่วน 6:4 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสูงที่สุดซึ่งสาเหตุน่าจะมาจากที่อัตราส่วน 6:4 มีปริมาณของเหล็กออกไซด์สูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Marshdeh [4] พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่อัตราส่วน 6:4 ที่พลังงาน 60 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ($0.501 \text{ cm}^2/\text{g}$) มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่เท่ากับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแผ่นไม้อัดจากขี้เลื่อยของไม้โกงกางที่พลังงาน 25.26 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ($0.501 \text{ cm}^2/\text{g}$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของกากอ้อยกับเปลือกถั่วลิสงที่อัตราส่วน 6:4 มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่สูงกว่าถ้าทำการเปรียบเทียบที่ระดับพลังงานเดียวกัน

5.3 ผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของวัสดุก่อสร้างตัวอย่างที่พลังงานต่างๆ โดยใช้โปรแกรม XCOM

พบว่าเมื่อพลังงานของรังสีมีค่าสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลมีค่าลดลง

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Medhat M.E., “Gamma-Ray Attenuation Coefficients of Some Building Materials Available in Egypt”, *Annals of Nuclear Energy*, 36, 2009, pp.849-852.
- [2] Akkurt I., Altindag R., Gunoglu K. and Sarikaya H., “Photon Attenuation Coefficients of Concrete Including Marble Aggregates”, *Annals of Nuclear Energy*, 43, 2012, pp.56-60.
- [3] Bradley D.A., Tajuddin A.A. and Buak S., “Photon Attenuation Studies on tropical Hardwood”, *International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes*, 43(8), 1991, pp.771-773.
- [4] Marshdeh M.W., Bauk S., Tajuddin A.A. and Hashim R., “Measurement of Mass Attenuation Coefficients of Rhizophora spp. Binderless Particleboard in the 16.59-25.26 keV Photon Energy Range and Their Density Profile Using X-Ray Computed Tomography”, *Applied Radiation and Isotopes*, 43, 2012, pp.656-662.