RMUTT Research Journal
Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

การพัฒนาเทคนิคสำหรับการตรวจวัดของเหลวในขวดแก้วโดยใช้การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

Development of technique for screening liquids in glass bottle using low energy X-ray transmission

ภาคภูมิ อรชร[1] , นเรศร์ จันทน์ขาว[1*], สมยศ ศรีสถิตย์[1*]

Parkphum Orachorn , Nares Chankow , **Somyot Srisatit**

[1] ภาควิชาวิศกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร 10330

Corresponding Author E-mail: pp_orachorn@hotmail.com , naresck@yahoo.co.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received January 2018
Accept Aplil 2018
Online March 2018

Keywords:
X-ray
gamma-ray
liquid explosive
airport security

ABSTRACT

Since August 2006 after the discovery of terrorists' attempts to explode airplanes with liquid explosives in United Kingdom, each airline passenger is allowed to carry only a maximum of 100 ml liquid in each container and a total of not more than 1,000 ml in carry-on luggage. This measure was adopted to prevent bringing sufficient amount of fuel oil, alcohol, hydrogen peroxide or other flammable and explosive liquids into the aircraft. In this research, X-ray transmission technique was experimentally investigated using low energy X-rays between 13.6 – 43.5 keV emitted from 238Pu radioisotopic source and linear attenuation coefficient of liquids were calculated. The results indicated that the technique could clearly distinguish water, alcohol and fuel oil while its sensitivity is dependent upon radiation energy and diameter of the bottle. Other kinds of liquid are also tested. For example, linear attenuation coefficient of water based liquids at 43.5 keV are more than 2.2 cm^{-1} while

flammable liquids are less than 2.0 cm^{-1}. This technique is possible to employ the technique for screening bottled liquids contained in unopened bottles at airports.

บทคัดย่อ

จากเหตุการณ์การการเปิดโปงแผนการก่อการร้ายโดยการใช้วัตถุระเบิดเหลวของสายการบินเส้นทางจากอังกฤษ ไปยังรัฐต่างๆในสหรัฐอเมริกากว่า 10 ลำ ในเดือนสิงหาคม พ.ศ.2549 ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้ประกอบวัตถุระเบิดนั้นเป็นของเหลวที่ยากในการตรวจสอบ สายการบินต่างๆจึงได้มีการกำหนดมาตรการเรื่องของเหลว เจล สเปรย์ หรือวัตถุและสารอื่นๆที่มีลักษณะคล้ายคลึงกัน (Liquids, Aerosols and Gels : LAGs) โดยภาชนะบรรจุของเหลวต้องไม่เกิน 100 มิลลิลิตร และรวมกันได้ไม่เกิน 1,000 มิลลิลิตร บรรจุรวมกันอยู่ในถุงพลาสติกใส การพัฒนาเทคนิคในงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการตรวจสอบและคัดแยกของเหลวที่มีอันตรายในขวดแก้ว เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อะซีโตน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิด และวัสดุที่ติดไฟได้อื่นๆเช่น แอลกอฮอล์ น้ำมันชนิดต่างๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำในช่วง 13.6-43.5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ที่ได้จากต้นกำเนิดรังสีพลูโตเนียม-238 (^{238}Pu) โดยใช้การวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวชนิดต่างๆที่มีค่าขึ้นกับพลังงานของรังสี ซึ่งผลจากการวิจัยพบว่า สามารถคัดแยกของเหลวชนิดต่างๆเช่น น้ำ น้ำมัน แอลกอฮอล์ ออกจากกันได้ แม้อยู่ในขวดแก้วแบบปิดและภาชนะที่มีขนาดต่างๆกัน เช่นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวที่พลังงาน 43.5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในกลุ่มของน้ำจะมีค่ามากกว่า 2.2 ต่อเซนติเมตร ขณะที่ของเหลวที่ติดไฟได้เช่น แอลกอฮอล์ และน้ำมันจะมีค่าต่ำกว่า 2.0 ต่อเซนติเมตร

คำสำคัญ: รังสีเอ็กซ์, รังสีแกมมา, วัตถุระเบิดเหลว, การรักษาความปลอดภัยของสนามบิน

บทนำ

เมื่อเดือนสิงหาคม พ.ศ.2549 ได้มีการเปิดโปงแผนการก่อการร้ายระเบิดเครื่องบินกว่า 10 ลำ ของสายการบิน 4 สายการบิน จากประเทศอังกฤษไปยังเมืองต่างๆของสหรัฐอเมริกา โดยระเบิดที่ใช้มีลักษณะเป็นของเหลวซึ่งยากต่อการตรวจสอบ ซึ่งคาดว่าผู้ก่อการร้ายจะนำสารตั้งต้นไปผสมเพื่อทำระเบิดบนเครื่องบิน วัตถุระเบิดชนิดนี้มีชื่อว่า ทีเอทีพี(TATP) หรือ ไตรอะซีโตนไตรเพอร์ออกไซด์ (triacetone triperoxide) มีลักษณะเป็นผลึกสีขาว เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่พบได้ในน้ำยาล้างแผลหรือน้ำยาย้อมผม กับอะซีโตน (C_3H_6O) ที่พบได้ในน้ำยาล้างเล็บหรือเป็นส่วนประกอบของทินเนอร์ที่ใช้ผสมสี โดยมีกรดซัลฟิวริก หรือกรดอะซีติก เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งสารตั้งต้นดังกล่าวเป็นสารเคมีที่สามารถหาได้ง่าย ทำให้สนามบินต่างๆมีมาตรการในการนำของเหลวติดตัวขึ้นเครื่องบิน โดยของเหลวที่นำขึ้นเครื่องบินต้องบรรจุอยู่ในภาชนะขนาดไม่เกิน 100 มิลลิลิตร รวมกันได้ไม่เกิน 1,000 มิลลิลิตร และทั้งหมดต้องบรรจุอยู่ในถุงพลาสติกใสขนาด 20x20 เซนติเมตร ดังนั้นวิธีการตรวจสอบของเหลวในภาชนะปิดจึงเป็นวิธีที่ช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการนำของเหลวขึ้นเครื่องบิน ซึ่งในปัจจุบันมีวิธีการตรวจวัดของเหลวหลายวิธีเช่น การตรวจสอบจากไอระเหยของสารระเบิด (vapor and trace detection) , การถ่ายภาพทางรังสีเอกซ์, การถ่ายภาพซีที (x-ray

computed tomography (CT)), การใช้เทคนิคทางนิวตรอน, เทคนิคเอ็นเอ็มอาร์ (nuclear magnetic resonance (NMR), เทคนิคเอ็มอาร์ไอ (magnetic resonance imaging (MRI) และเทคนิครามานสเปคโตรสโคปี (Raman spectroscopy) ซึ่งแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกัน [1-5] ในงานวิจัยนี้ใช้หลักการการทะลุผ่านของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาพลังงานต่ำเพื่อตรวจวิเคราะห์และคัดแยกของเหลวในขวดแก้วเนื่องจากภาชนะพลาสติกนั้นมีความบางและมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านที่ต่ำจึงทำให้สามารถยกเว้นหรือประมาณค่าความหนาของภาชนะในการคำนวณได้ แต่ภาชนะแก้วนั้นมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านที่สูงและยากในการตรวจวัดความหนา โดยงานวิจัยนี้ใช้ต้นกำเนิดรังสีพลูโตเนียม-238 (^{238}Pu) ที่มีช่วงพลังงานของรังสีอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์โดยประมาณ และเครื่องวัดความหนาแบบอัลตราโซนิค รังสีที่ทะลุผ่านภาชนะจะถูกบันทึกผ่านหัววัดรังสีแกมมา CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตร และค่าของการทะลุผ่านของรังสีนี้จะขึ้นกับส่วนประกอบของของเหลว ภาชนะที่บรรจุของเหลว ความหนาของภาชนะ และพลังงานของรังสี

งานวิจัยนี้ใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) กล่าวคือ รังสีที่ทะลุผ่านตัวกลาง (I_x) จะมีค่าลดลงขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตัวกลาง (μ) และความหนามของตัวกลาง(X) ดังสมการ

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

เมื่อ I_0 คือปริมาณรังสีเมื่อไม่ผ่านตัวกลาง และสำหรับของผสมหรือสารละลายสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 2 ดังนี้

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{mix} = w_1\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + w_2\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + w_3\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_3 + \cdots \quad (2)$$

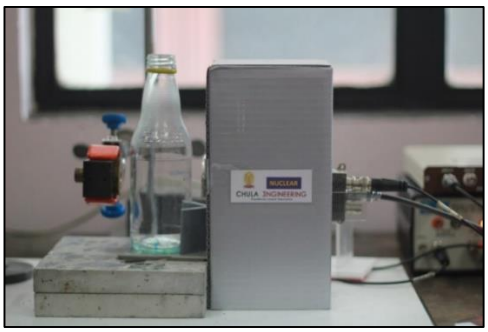
เมื่อ ρ คือความหนาแน่น , $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{mix}$ คือสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงมวลของของผสม และ $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1$, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2$, $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_3$ คือค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงมวลของสารประกอบที่ 1,2 และ3 ตามลำดับ

โดยทฤษฎีค่าความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตัวกลาง(μ) แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันมากเมื่อพลังงานของรังสีต่ำ และเมื่อพลังงานของรังสีสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวจะมีค่าแตกต่างกันน้อยลง จึงสามารถใช้รังสีพลังงานต่ำในการวิเคราะห์และคัดแยกชนิดของของเหลวที่นำมาใช้ทดลอง เช่น น้ำ น้ำมัน แอลกอฮอล์ และอะซีโตนที่เป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิดโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของตัวกลาง(μ) ในการจำแนกประเภทของของเหลว[6-8]

วิธีดำเนินการวิจัย

เนื่องจากของเหลวที่ผู้โดยสารนำติดตัวขึ้นเครื่องบินบรรจุอยู่ภายในภาชนะหลากหลายขนาด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 2-10 เซนติเมตร ซึ่งโดยทฤษฎีรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะสามารถแยกแยะชนิดของของเหลวได้ดีกว่า จึงเลือกใช้ต้นกำเนิดรังสี 238Pu ขนาด 20 mCi เนื่องจากมีพลังงานจากรังสีเอกซ์ในอิเล็กตรอนชั้น L อยู่ที่ 13.6 , 17.2 และ 20.1 keV โดยประมาณ และยังมีรังสีแกมมาพลังงาน 43.5 keV สำหรับใช้ในกรณีที่ภาชนะมีความหนามากกว่า 5 เซนติเมตร ได้ดีอีกด้วย ในการวัดปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านของเหลวใช้หัววัดรังสีแกมมาชนิด CdTe ขนาด 5 มิลลิเมตรซึ่งเป็นหัววัดที่มีความแม่นยำในการวัดและใช้งานได้ง่าย ต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสีจะถูกติดตั้งในระดับเดียวกันซึ่งอยู่ด้านตรงข้ามเพื่อวัดปริมาณรังสีเอกซ์และรังสีแกมมที่ทะลุผ่านดังรูปที่1 และหากขวดแก้วมีอากาศอยู่ภายในสามารถวัดปริมาณรังสีเพื่อหาค่า I0 และ Ix เพื่อใช้คำนวณหาความหนาของขวดแก้ว แต่หาก

ขวด แก้วไม่มีอากาศอยู่ภายในสามารถวัดความหนาของขวดแก้วได้โดยใช้เครื่องวัดความหนาแบบอัลตราโซนิคในการช่วยหาค่าความหนา ดังรูปที่2



รูปที่ 1 การติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

ในการทดลองจะวัดหาค่าปริมาณรังสีที่ผ่านอากาศไปยังหัววัด(I_{empty}) ค่าปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านขวดแก้วบริเวณที่ไม่มีของเหลว(I_0) และค่าปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านขวดแก้วบริเวณที่มีของเหลวภายในแก้ว(I_x) ส่วนค่าความหนาของของเหลว(x) หาได้โดยวัดความหนาภายนอกของขวดแก้วแล้วนำมาหักลบกับค่าความหนาของขวดแก้ว ซึ่งความหนาของขวดแก้วนั้นได้มาจากการคำนวณโดยใช้ I_{empty} และ I_0 หรือหาจากการใช้เครื่องวัดความหนาด้วยอัลตราโซนิคในกรณีที่ไม่มีบริเวณอากาศอยู่ภายในขวด ดังรูปที่ 2 และค่าความหนาของขวดแก้วจากการคำนวณด้วยรังสีและการใช้เครื่องอัลตราโซนิค

ผลการศึกษาและอธิปรายผล

จากผลการทดลองในการใช้พลังงานของรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมา 13.6 , 17.2 , 20.1 และ 43.5 keV หาค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวในภาชนะแก้วขนาด 4-6 เซนติเมตร พบว่า ที่พลังงาน 13.6 keV ไม่สามารถทะลุผ่านขวดแก้วและของเหลวได้เนื่องจากที่พลังงานต่ำๆค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวจะมีค่าสูง ทำให้รังสีไม่สามารถทะลุผ่านขวดแก้วและของเหลวได้ ที่พลังงาน 17.2 และ 20.1 keV รังสีเอ็กซ์และแกมมาสามารถทะลุผ่านขวดแก้วและของเหลวบางชนิดที่มีค่า

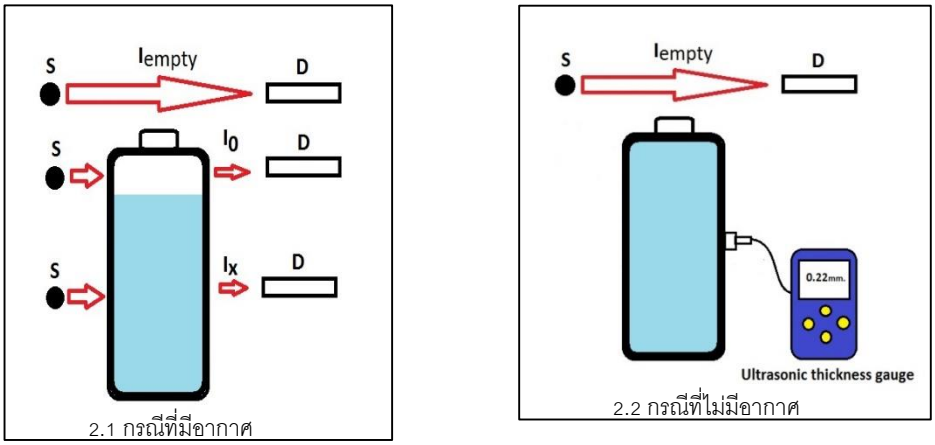
ตารางที่ 1 ความหนาเฉลี่ยของขวดแก้วจากการคำนวณด้วยการทดลองและการวัดด้วยเครื่องอัลตราโซนิค

ความหนาเฉลี่ยจากการคำนวณ	ความหนาเฉลี่ยจากเครื่องอัลตราโซนิค
0.4210±0.0161	0.429±0.002
0.3992±0.0150	0.405±0.002
0.3608±0.0120	0.360±0.002
0.3717±0.0122	0.374±0.002
0.3706±0.0123	0.361±0.002
0.3579±0.0118	0.350±0.002

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านต่ำๆเช่น น้ำมัน แอลกอฮอล์ หรืออะซีโตนได้ แต่ไม่สามารถทะลุผ่านของเหลวที่มีสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านสูงๆเช่น น้ำ น้ำอัดลม หรือนม ส่วนพลังงาน 43.5 keV สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวได้ทุกชนิดแต่เนื่องจากที่พลังงานสูงขึ้นค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแต่ละธาตุจะมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ที่พลังงาน 43.5 keV ไม่สามารถวิเคราะห์ชนิดของของเหลวได้แต่ยังสามารถแยกประเภทของเหลวว่าอยู่ในกลุ่มของน้ำ กลุ่มของแอลกอฮอล์ หรือกลุ่มของน้ำมันได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวที่มีส่วนประกอบหลักเป็นน้ำเช่น น้ำดื่ม น้ำอัดลม นม กาแฟ ที่พลังงาน 43.5 keV จะมีค่ามากกว่า 2.2 cm^{-1} ในขณะที่แอลกอฮอล์จะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 1.8-2.0 cm^{-1} และกลุ่มของน้ำมันและอะซีโตนจะมีค่าอยู่ประมาณ 1.6-1.8 cm^{-1} ทำให้ง่ายในการคัด

กรองของเหลว ของเหลวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านที่พลังงาน 43.5 keV มากกว่าหรือเท่ากับ 2.2 เป็นกลุ่มที่ไม่เป็นอันตราย ส่วนของเหลวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านต่ำกว่า 2 ที่พลังงาน 43.5 keV ถือว่าเป็นของเหลวที่อันตรายที่ติดไฟได้เช่น แอลกอฮอล์ หรือน้ำมัน และเป็นของเหลวที่เป็นสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิดเหลวเช่นอะซีโตน หรืออาจใช้พลังงานที่ต่ำลงมาในการคัดแยกเพื่อความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน เช่นที่พลังงาน 17.2 *keV* ของเหลวที่มีส่วนประกอบของน้ำ รังสีไม่สามารถทะลุผ่านมาได้ในกรณีที่ขวดแก้วมีเส้นผ่านศูนย์กลางเกิน 4 เซนติเมตร แต่หากเป็นของเหลวประเภทที่ติดไฟได้หรืออะซีโตนรังสีสามารถทะลุผ่านขวดแก้วไปยังหัววัดรังสีได้ และใช้ค่ารังสีไปคำนวณหาประเภทของของเหลวต่อไป

ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวนั้นมีค่าคงที่ที่พลังงานนั้นๆไม่ขึ้นกับขนาดของภาชนะที่บรรจุ ดังนั้นการที่ของเหลวชนิดเดียวกันบรรจุอยู่ในภาชนะต่างๆกันจะมีค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเท่ากันทำให้สามารถวิเคราะห์และคัดแยกชนิดของของเหลวได้ ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวที่พลังงานต่างๆแสดงไว้ในตารางที่2



รูปที่ 2 แสดงการวัดค่าต่างๆที่ใช้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลว (S คือต้นกำเนิดรังสีPu-238 ,D คือหัววัดรังสี CdTe

สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองด้านบนสรุปได้ว่าพลังงานรังสีที่เหมาะสมในการตรวจสอบและคัดแยกของเหลวชนิดต่างๆออกจากกันนั้น ต้องเป็นรังสีที่มีพลังงานต่ำอยู่ในช่วง 10 ถึง 20 keV โดยสามารถตรวจสอบภาชนะที่มีขนาดตั้งแต่ 2 ถึง 8 ซม. โดยประมาณ ซึ่งต้นกำเนิดรังสีที่เหมาะในการใช้งานคือ ^{238}Pu ที่มีพลังงาน 13.6-43.5 keV จาก ยูเรเนียม L x-rays และรังสีแกมมา หรืออาจจะใช้ ^{241}Am ที่มีช่วงพลังงาน 13.9-20.8 keV จาก เนปจูเนียม L x-rays โดยในการใช้งานควรคำนึงถึงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะที่บรรจุของเหลว หากภาชนะที่บรรจุมีขนาดใหญ่ก็ควรเลือกใช้พลังงานที่สูงกว่า แต่จะมีความแม่นยำในการคัดแยกชนิดของของเหลวลดลง ในการนำเทคนิคนี้ไปใช้งานตรวจสอบและวิเคราะห์ชนิดของของเหลวในสนามบินสามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวชนิดต่างๆเป็นค่าอ้างอิงเพื่อคัด

แยกวัตถุต้องสงสัยเช่น วัตถุที่ติดไฟได้ (เอทานอลหรือน้ำมัน) หรือสารตั้งต้นในการทำวัตถุระเบิดเช่นอะซีโตน เพื่อป้องกันอุบัติเหตุและการก่อการร้ายบนเครื่องบินได้

ตารางที่2 ค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของของเหลวชนิดต่างๆที่บรรจุอยู่ภายในภาชนะขนาดต่างๆกัน

ชนิดของของเหลวในภาชนะขนาดต่างๆ	ค่า สปส.การทะลุผ่านของของเหลว (cm-1) ที่พลังงานต่างๆ			
	13.6 keV	17.2 keV	20.2 keV	43.5 keV
น้ำดื่ม	ค่า Ix ต่ำเกินไปที่จะคำนวณ	1.1046±0.0027	0.7303±0.0026	0.2371±0.0060
กลีเซอรีน		1.1233±0.0028	0.7636±0.0027	0.2891±0.0063
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(12%)		1.1864±0.0031	0.7844±0.0028	0.2563±0.0061
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(18%)		1.1955±0.0032	0.7960±0.0029	0.2666±0.0062
นมโคสด		1.2098±0.0078	0.7924±0.0053	0.2497±0.0077
น้ำผลไม้		1.1233±0.0061	0.7300±0.0045	0.2491±0.0077
ชาเขียว		1.2000±0.0063	0.7811±0.0047	0.2500±0.0084
น้ำมะพร้าว		1.1508±0.0056	0.7475±0.0044	0.2229±0.0080
น้ำส้มคั้น		1.2461±0.0080	0.8198±0.0055	0.2710±0.0082
น้ำอัดลม		1.1102±0.0072	0.7213±0.0048	0.2653±0.0072
แชมพู		1.4105±0.0078	0.9170±0.0056	0.2953±0.0094
เอทานอล95%	1.2112±0.0045	0.6588±0.0012	0.4596±0.0016	0.1892±0.0056
อะซีโตน	1.0255±0.0032	0.5570±0.0010	0.3948±0.0015	0.1797±0.0055
น้ำมันก๊าด	0.7154±0.0018	0.4230±0.0008	0.3179±0.0013	0.1817±0.0055
น้ำมันดีเซล	0.7395±0.0019	0.4296±0.0008	0.3220±0.0013	0.1720±0.0055
เมทานอล70%	1.2389±0.0048	0.6666±0.0012	0.4613±0.0016	0.1844±0.0055
เอทานอล70%	1.4365±0.0070	0.7664±0.0015	0.5201±0.0018	0.2043±0.0057
น้ำมันแก๊ซโซฮอล์95	0.7036±0.0018	0.4106±0.0008	0.3064±0.0013	0.1675±0.0055
น้ำมัน E85	1.0279±0.0032	0.5695±0.0010	0.4012±0.0015	0.1932±0.0056
น้ำมัน E20	0.7793±0.0021	0.4448±0.0008	0.3308±0.0013	0.1496±0.0056

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจาย์นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยดูแลและให้คำแนะนำในการทำวิจัย รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้คำปรึกษา และนายเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี้ ที่คอยให้คำแนะนำในการทดลอง รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอกราบของพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ผู้ให้กำลังใจในการทำวิจัยและเป็นแรงผลักดันให้สามารถดำเนินงานจนสำเร็จได้ ตลอดจนพี่น้อง และเพื่อนๆ นิสิตภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกคนที่คอยให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณโครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (โครงการ พสวท.) ในการให้ทุนเรียนสนับสนุน

เอกสารอ้างอิง

[1] Schubert H, Kuznetsov A, editors. 2008. **Detection of liquid explosives and flammable agents in connection with terrorism**. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop;2007 Oct 17-19; Springer : St. Petersburg, Russia.

[2] Wells K, Bradley DA. 2012. **A review of X-ray explosives detection techniques for checked baggage**. Appl Radiat Isot.70:1729-1746.

[3] Gong Q, Stoian RI, Coccarelli DS, Greengerg JA, Vera E, Gehm ME. 2018. **Rapid simulation of X-ray transmission imaging for baggage inspection via GPU-based ray-tracing**. Nucl Instrum Methods Phys Res B.415:100-109.

[4] Harding G. 2004. **X-ray scatter tomography for explosives detection**. Radiat Phys Chem.71:869-881.

[5] Eliasson E, Macleod N. A., and Matousek P. 2007. **Noninvasive detection of concealed liquid explosive using Raman spectroscopy**. Anal. Chem. 79:8185-8189.

[6] Gupta MK, Sidhu BS, Mann KS, Dhaliwal AS, Kahlon KS. 2013. **Advanced two media (ATM) method for measurement of linear attenuation coefficient**. Ann Nucl Energy.56:251-4.

[7] Midgley SM. 2005. **Measurements of the X-ray linear attenuation coefficient for low atomic number materials at energies 32-66 and 140 keV**. Radiat Phys Chem.72:525-35.

[8] Dongarge S. M. and Mitkar S. R.. 2012. **Measurement of linear and mass attenuation coefficient of alcohol soluable compound for γ-rays at energy 0.36 MeV**. J Chem Pharm Res. 4(6):3116-3120.