

การหาความหนาที่เหมาะสมของตะกั่วและเหล็กเพื่อเก็บ  
กากกัมมันตรังสีจากซอฟต์แวร์แม่ทแลป

OPTIMIZATION OF LEAD AND IRON THICKNESSES FOR  
RADIOACTIVE WASTE STORAGE FROM MATLAB SOFTWARE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2560

KMITL-2017-SC-M-030-019

การหาความหนาที่เหมาะสมของตะกั่วและเหล็กเพื่อเก็บ  
กากกัมมันตรังสีจากซอฟต์แวร์แมทแลป

OPTIMIZATION OF LEAD AND IRON THICKNESSES FOR  
RADIOACTIVE WASTE STORAGE FROM MATLAB SOFTWARE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2017-SC-M-030-019  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTIMIZATION OF LEAD AND IRON THICKNESSES FOR  
RADIOACTIVE WASTE STORAGE FROM MATLAB SOFTWARE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE  
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMITL-2017-SC-M-030-019 อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT**

**FACULTY OF SCIENCE**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์

“การหาความหนาที่เหมาะสมของตะกั่วและเหล็กเพื่อเก็บ  
กากกัมมันตรังสีจากซอฟต์แวร์แมทแลบ”  
(OPTIMIZATION OF LEAD AND IRON THICKNESSES FOR  
RADIOACTIVE WASTE STORAGE FROM MATLAB  
SOFTWARE)

ชื่อนักศึกษา

นายกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์

รหัสประจำตัว

57605080

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ประธานกรรมการ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส อาจารย์บัณฑิตประจำ (ในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง) ดร.บดินทร์ ดำรงค์ศักดิ์ ผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอกสถาบันฯ รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2560 เวลา 10.00 - 12.00 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง 307 อาคารจุฬารามวลัยลักษณ์ 1

คณะวิทยาศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภณี ธนะบริพัทธ์)

คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

วันที่ 24 เดือน มิถุนายน พ.ศ. 60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาความหนาที่เหมาะสมของตะกั่วและเหล็กเพื่อ เก็บกากกัมมันตรังสีจากซอฟต์แวร์แม่ทแลป
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์
รหัสประจำตัว	57605080
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการหาความหนาที่เหมาะสมของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสีที่มีพลังงานรังสีและความเข้มรังสีคือ 1.3325 MeV และ 100 mSv/hr ตามลำดับ ด้วยโมเดลการออปติไมเซชันโดยใช้ซอฟต์แวร์แม่ทแลป การคำนวณนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน ส่วนที่หนึ่งคือวิธี Logarithmic interpolation สำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลส่วนที่สองคือวิธี Bi-logarithmic interpolation สำหรับการคำนวณเอ็กซ์โพเชอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์และ ส่วนที่สามคือเทคนิคการวิเคราะห์ความหนาที่เหมาะสมของวัสดุตะกั่วและเหล็กให้ลดทอนความเข้มรังสีเท่ากับ 0.1 mSv/hr จากเส้นกราฟคอนทัวร์ผลลัพธ์จากการประมวลผลค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและเอ็กซ์โพเชอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์พบว่ามีความถูกต้องแม่นยำสูงเมื่อเทียบกับฐานข้อมูลทางนิวเคลียร์ของ NIST และ ANS-6.4.3 และพบว่าค่าความหนาที่เหมาะสมของวัสดุตะกั่วและเหล็กมีค่าคือ  $x_1 = 3.7$  cm. และ  $x_2 = 16$  cm ตามลำดับ น้ำหนักและงบประมาณของภาชนะที่ความหนานี้คือ 943.9kg และ 188.5 USD ตามลำดับ ในอนาคตโมเดลนี้จะเป็นข้อมูลสำหรับการประเมินความปลอดภัยด้านรังสีสำหรับผู้ปฏิบัติงานรังสีบริเวณภายในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ได้อย่างสะดวกรวดเร็วและมีความแม่นยำสูง

**คำสำคัญ :** กากกัมมันตรังสี การประมาณค่าในช่วงเชิงลอการิทึม การป้องกันรังสี  
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล เอ็กซ์โพเชอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์

<b>Thesis Title</b>	Optimization of Lead and Iron Thicknesses for Radioactive Waste Storage from MATLAB Software
<b>Student Name</b>	Kittiphot Songkaiwong
<b>Student ID</b>	57605080
<b>Degree</b>	Master of Science
<b>Department</b>	Physics
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Sarai Lekchaum

### Abstract

This contribution is aimed to determine the optimal double-layer thickness of lead-iron double layer container to store a radioactive waste releasing the photon energy at 1.3325 MeV and radiation intensity at 100 mSv/hr using optimization design by MATLAB software. This design was consisted of three parts of calculation to achieve 1000 times the radiation attenuation of container. One was the logarithmic interpolation for mass attenuation coefficient. Two was the bi-logarithmic interpolation for exposure buildup factor. Three was the contour-plotting analytical technique for the optimal thickness of container. We have found that calculated results of mass attenuation coefficient and exposure buildup factor were exactly validated as compared with the nuclear data base of NIST and ANS-6.4.3. Furthermore, we have found that the optimal inside and outside layer thickness were 3.7 cm and 16 cm for lead and iron, respectively. Container weight was 943.9 kg, whilst the design cost was 188.5 USD. The merit of this design is going to apply quickly and precisely for the radiation safety assessment of radiation worker who always work within the nuclear reactor building.

**Keywords :** Exposure buildup factor, Logarithmic interpolation, Mass attenuation-coefficient, Radiation protection, Radioactive waste

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าสามารถเขียนวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้สำเร็จลุล่วงเนื่องจากระหว่างทางที่ได้ศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังเป็นระยะเวลาทั้ง 3 ปีเพื่อทำวิจัยนี้ ข้าพเจ้ามีบุคคลที่ไม่เพียงแต่ตัวข้าพเจ้าเองสามารถปรึกษางานวิจัยในระดับปริญญาโทเพียงอย่างเดียว แต่บุคคลที่ข้าพเจ้ากำลังจะกล่าวถึงนี้มีพระคุณอย่างยิ่งสำหรับชีวิตภายในและภายนอกสถาบันซึ่งตัวข้าพเจ้าเองไม่มีวันตอบแทนพระคุณได้หมด นอกจากนี้ข้าพเจ้าคิดอยู่เสมอว่าท่านทั้งหลายเหล่านี้ถึงแม้จะเป็นเพียงแค่อาจารย์มหาลัยซึ่งมีหน้าที่ให้ความรู้นักศึกษาทางด้านวิชาการ แต่สำหรับข้าพเจ้าท่านเหล่านี้เปรียบเสมือนคนในครอบครัวของข้าพเจ้าที่คอยแนะนำสิ่งดีๆ และช่วยแก้ปัญหาทางการศึกษาและทางชีวิตของข้าพเจ้าด้วย ดังนั้นสิ่งนี้ทำให้ข้าพเจ้ามีความรู้สึกอบอุ่นมาตลอด บุคคลที่ข้าพเจ้ากล่าวถึงมีดังต่อไปนี้

อันดับแรกขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ที่ไม่เพียงแต่อุปการะให้คำปรึกษาทางด้านการทำวิทยานิพนธ์เพียงอย่างเดียว แต่ท่านยังสอนหลักธรรมเพื่อให้ข้าพเจ้านำสิ่งนี้ไปใช้ในการดำรงชีวิตอย่างมีความสุขนอกจากนี้ยังคอยดูแลข้าพเจ้าไม่ให้ออกนอกกลุ่มและไม่เคยห่างเหินข้าพเจ้าเมื่อข้าพเจ้ามีปัญหาชีวิต

อันดับที่สองขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมภายในสถาบัน ผศ.ดร.กฤษกร โสเจริญรัตน์ ซึ่งเป็นผู้ที่ข้าพเจ้าเคารพอีกผู้หนึ่งซึ่งพร้อมที่จะช่วยเหลือข้าพเจ้าเมื่อข้าพเจ้าประสบกับปัญหาที่ไม่สามารถแก้ไขได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านภาษาอังกฤษ

ถัดมาอันดับที่สามขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมภายนอกสถาบัน ดร.ชนาธิป ทิพยกุลจากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (สทน.) ซึ่งคอยให้ความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยทางด้านนิวเคลียร์ และคอยชี้แนะหาทางออกเมื่อตัวข้าพเจ้าพบปัญหาในช่วงที่ดำเนินการวิจัย

อันดับสุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และบรรดาญาติพี่น้องของข้าพเจ้าซึ่งคอยสนับสนุนเงินทางการศึกษาทั้งตั้งแต่วัยเด็กจนถึงปัจจุบัน ทั้งภายในสถาบันศึกษาและภายนอกสถาบันศึกษา นอกจากนี้ยังคอยให้กำลังใจและให้คำแนะนำระหว่างที่ข้าพเจ้าได้เป็นนักศึกษาที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ข้าพเจ้ามีความรู้สึกทราบบ้างซึ่งเป็นอย่างยิ่ง

นายกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญ(ต่อ)	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญตาราง (ต่อ)	ช
สารบัญรูป	ซ
สารบัญรูป (ต่อ)	ฌ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>5</b>
2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับสสาร	5
2.1.1 การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกซ์	6
2.1.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	7
2.1.3 การเกิดแฟร์โฟตักชัน	9
2.1.4 การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์	10
2.2 การลดทอนรังสีแกมมา	10
2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอน	10
2.2.2 ความหนาของการดูดกลืนเชิงมวล	13
2.2.3 บิวต์อัพแฟกเตอร์	14
2.3 วิธีการประมาณค่าของฟังก์ชันระหว่างข้อมูลตัวเลข	15
2.3.1 การประมาณค่าของฟังก์ชันตัวแปรเดียว	15
2.3.2 การประมาณค่าของฟังก์ชันสองตัวแปร	16
2.3.3 การประมาณค่าของฟังก์ชันแบบลอการิทึม	18
2.4 การใช้งานซอฟต์แวร์แมทแล็บเบื้องต้น	19
2.4.1 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์แมทแล็บ	20
2.4.2 การเขียนโปรแกรมของซอฟต์แวร์แมทแล็บ	22
2.4.3 คำสั่งพื้นฐานที่ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรม	23
2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยซอฟต์แวร์แมทแล็บ	32
2.5.1 การจัดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการค้าเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.2 ธรรมชาติของการหาคำตอบการออปติไมเซชัน	34
2.5.3 เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด	35
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>41</b>
3.1 การกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน	41
3.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	41
3.1.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด	42
3.1.3 ข้อจำกัดตัวแปร	46
3.2 เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน	46
3.2.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น	47
3.2.2 การคำนวณเอ็กซ์โพเซอรัลบีวต์ออฟแฟกเตอร์	52
3.2.3 การพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน	59
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>63</b>
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่า $\mu/p$ และ $B$ จาก MATLAB	63
4.1.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล	63
4.1.2 เอ็กซ์โพเซอรัลบีวต์ออฟแฟกเตอร์	64
4.2 ผลการคำนวณค่า $\mu/p$ และ $B$ สำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์	66
4.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ( $\mu/p$ ) สำหรับกราฟคอนทัวร์	66
4.2.2 เอ็กซ์โพเซอรัลบีวต์ออฟแฟกเตอร์ ( $B$ ) สำหรับกราฟคอนทัวร์	66
4.3 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์	68
4.4 ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน	69
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	<b>77</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารอ้างอิง	79
ประวัติผู้เขียน	81

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน	3
2.1 เครื่องหมายและคุณสมบัติพิเศษ	21
2.2 สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์	21
2.3 สัญลักษณ์ที่แสดงความละเอียดของตัวเลข	24
2.4 สัญลักษณ์ในการเขียนแผนผังโปรแกรม หรือ flowchart	26
2.5 สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์	27
2.5 (ต่อ) สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์	28
3.1 การคำนวณเวลาดำเนินงานของผู้ปฏิบัติงานจริง	42
3.2 ตารางฐานข้อมูล NIST ของธาตุตะกั่ว	47
3.3 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อ Input ( $E$ ) มีค่าตรงกับข้อมูล	49
3.4 วิธีการระบุข้อมูลด้วยตำแหน่งเซลล์ภายในเงื่อนไขที่หนึ่งสำหรับ $\mu/p$	49
3.5 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อ Input ( $E$ ) อยู่ระหว่างข้อมูล	49
3.6 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สองสำหรับ $\mu/p$	50
3.7 ตารางฐานข้อมูล ANS-6.4.3 ของธาตุตะกั่ว	52
3.8 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อ Input ( $PD$ ) และ Input ( $E$ ) มีค่าตรงกับข้อมูล	54
3.9 วิธีการระบุข้อมูลด้วยตำแหน่งเซลล์ภายในเงื่อนไขที่หนึ่งสำหรับค่า $B$	54
3.10 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อมีเพียง Input ( $PD$ ) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล	54
3.11 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สองสำหรับค่า $B$	55
3.12 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อมีเพียง Input ( $E$ ) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล	55
3.13 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สามสำหรับค่า $B$	55
3.14 กระบวนการวนลูข้อมูลเมื่อ Input ( $PD$ ) และ Input ( $E$ ) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล	56
3.15 วิธี BI ภายในเงื่อนไขที่สี่สำหรับค่า $B$	56
4.1 ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า $\mu/p$ ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง	63
4.1 ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า $\mu/p$ ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง (ต่อ)	64
4.2 ผลการคำนวณ $\mu/p$ ภายในเงื่อนไขที่สอง	64
4.3 ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า $B$ ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง	65
4.4 ผลการคำนวณค่า $B$ ภายในเงื่อนไขที่สอง	65
4.5 ผลการคำนวณค่า $B$ ภายในเงื่อนไขที่สาม	66
4.6 ผลการคำนวณค่า $B$ ภายในเงื่อนไขที่สี่	66
4.7 ผลการคำนวณความเข้มข้นรังสี ( $I_2$ ) ที่เข้าใกล้ 0.1 ฟังลบ ที่ $g_I(x_1, x_2) = 30$ cm สำหรับภาชนะทรงกระบอกที่ $r_{air} = 7$ cm เมื่อ $x_1$ คือตะกั่ว และ $x_2$ คือเหล็ก	67
4.8 ค่า $\mu/p$ และ $B$ สำหรับงานวิจัยนี้จากแมทแลป	67

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.9 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะทรงลูกบาศก์และทรงกระบอก เมื่อ $x_1$ คือตะกั่ว และ $x_2$ คือเหล็ก	68
4.10 น้ำหนักและราคาภาชนะจากความหนาที่เหมาะสมบนช่วงของฟังก์ชัน $f(x_1, x_2)$ เมื่อ $x_1$ (ตะกั่ว) และ $x_2$ (เหล็ก)	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
2.1	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของโซเดียมไอออไดซ์จากอันตรกิริยารังสีแกมมา	7
2.2	อันตรกิริยาการกระเจิงของรังสีแกมมา	8
2.3	มุมการกระเจิงของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่างๆ	8
2.4	ความสัมพันธ์ทางระดับพลังงานของอันตรกิริยารังสีแกมมาทั้ง 3 แบบ	10
2.5	กราฟการส่งผ่านรังสีแกมมาภายใต้เงื่อนไขลำรังสีแคบ	10
2.6	รูปแบบการลดทอนรังสีในเงื่อนไขลำรังสีกว้าง	14
2.7	วิธีการประมาณค่าระหว่างข้อมูลสำหรับฟังก์ชันตัวแปรเดียว	15
2.8	วิธีการประมาณค่าระหว่างข้อมูลสำหรับฟังก์ชันสองตัวแปร	16
2.9	การประมาณค่าฟังก์ชันแบบลอการิทึม	18
2.10	ส่วนประกอบที่สำคัญบน Matlab Desktop	20
2.11	แผนภาพการทำงานคำสั่งแบบมีเงื่อนไขเดียว (ซ้าย) แผนภาพการทำงานคำสั่งแบบมีหลายเงื่อนไข (ขวา)	26
2.12	รูปแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับเงื่อนไขเดียว	27
2.13	รูปแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับหลายเงื่อนไข	27
2.14	แผนภาพขั้นตอนการทำงานของคำสั่งวนลูป	29
2.15	กล่องข้อความการเขียนโปรแกรมสำหรับคำสั่งวนลูป	29
2.16	หน้าต่างการนำเข้าข้อมูล	31
2.17	ลักษณะการนำเข้าข้อมูล	32
2.18	คำสั่งการนำเข้าข้อมูล	32
2.19	คำตอบจากการออปติไมเซชันด้วยการแสดงภาพกราฟฟิก	35
2.20	คู่อันดับเมทริกซ์จากการใช้คำสั่ง meshgrid	36
2.21	การเขียนไฟล์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x_1, x_2)$	36
2.22	การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด $h_1(x_1, x_2)$	36
2.23	การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด $h_2(x_1, x_2)$	37
2.24	การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด $g_1(x_1, x_2)$	37
2.25	การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด $g_2(x_1, x_2)$	37
2.26	การพล็อตกราฟของ $g_1(x_1, x_2)$ ที่ค่า 7	38
2.27	การพล็อตกราฟของ $g_2(x_1, x_2)$ ที่ค่า 0	38
2.28	การพล็อตกราฟของ $h_1(x_1, x_2)$ ที่ค่า 8	38
2.29	การพล็อตกราฟของ $h_2(x_1, x_2)$ ที่ค่า 4	38
2.30	การพล็อตกราฟของ $f(x_1, x_2)$ ที่ค่า 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	38
2.31	ส่วนเติมเต็มของภาคแสดง	39
3.1	การลดทอนรังสีแกมมาในเงื่อนไขลำรังสีกว้างของภาชนะ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 ภาพสามมิติของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสี	43
3.3 ภาพสองมิติของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสี	43
3.4 องค์ประกอบการคิดปริมาตรของภาชนะ	44
3.5 แผนภาพการพล็อตกราฟคอนทัวร์	46
3.6 การคำนวณ $\mu/p$ โดยแมทแลป	48
3.7 การคำนวณ $B$ โดยแมทแลป	53
4.1 ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน	69
4.2 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_1(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	70
4.3 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_1(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	70
4.4 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_2(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	71
4.5 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_2(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	71
4.6 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_3(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	72
4.7 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน $g_3(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	72
4.8 การวิเคราะห์พื้นที่ซ้อนทับของฟังก์ชัน $g_1(x_1, x_2)$ , $g_2(x_1, x_2)$ , $g_3(x_1, x_2)$ จากขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันบนกราฟคอนทัวร์	73
4.9 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน $f(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	73
4.10 ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน $f(x_1, x_2)$ บนกราฟคอนทัวร์	74
4.11 การวิเคราะห์พื้นที่ซ้อนทับของฟังก์ชัน $f(x_1, x_2)$ และฟังก์ชัน $g_1(x_1, x_2)$ , $g_2(x_1, x_2)$ , $g_3(x_1, x_2)$ จากขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันบนกราฟคอนทัวร์	74
4.12 ความหนาที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์พื้นที่ทับซ้อนของฟังก์ชัน	75
4.13 ความหนาที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์พื้นที่ทับซ้อนของฟังก์ชันกับเส้นกริด	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทยเป็นเทคโนโลยีนิวเคลียร์ที่มีประโยชน์อย่างมากสำหรับงานวิจัยและด้านอุตสาหกรรม เมื่อถึงเวลาซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์ นี้อัตที่ยึดอุปกรณ์ต้องถูกถอดเพื่อถอดชิ้นส่วนของเครื่องปฏิกรณ์ออกมา นี้อัตนี้มีความเข้มรังสี 100 mSv/hr และมีการปล่อยโพตอนที่มีระดับพลังงานเดียวกับ Co-60 ดังนั้นนี้อัตนี้จึงถูกพิจารณาเป็นกากกัมมันตรังสี สำหรับคนทำงานด้านรังสีซึ่งสิ่งที่จะต้องคำนึงถึงมากที่สุดคือความปลอดภัยและการป้องกันอันตรายจากรังสี ซึ่งข้อจำกัดของปริมาณรังสีที่คนทำงานได้รับและไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ คือ 20 mSv/yr [1] การประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี หนึ่งในวิธีที่ดีที่สุดสำหรับการประเมินความปลอดภัยคือการใช้แบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โล [2-4] สร้างแบบจำลองและมีการประมวลผลทางด้านนิวเคลียร์ในเชิงสถิติ [5] จึงทำให้การกำหนดความหนาของแบบจำลองใน 1 ครั้งเพื่อทราบความเข้มรังสีจะใช้เวลาการประมวลผลประมาณ 13 ชั่วโมง นอกจากนี้การกำหนดรูปทรงเรขาคณิตของแบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โล [6] ถ้ารูปทรงมีความซับซ้อนเวลาที่ใช้ประมวลผลยิ่งยาวนานมากขึ้น ดังนั้นซอฟต์แวร์แมทแลปจึงถูกใช้เพื่อคำนวณหาความหนาของแบบจำลองเพื่อเป็นข้อมูลอินพุต และเพื่อการประมวลผลแบบมอนติคาร์โล เพียงครั้งเดียวและคาดว่าให้ผลการคำนวณได้ถูกต้องแม่นยำและมีความสะดวกรวดเร็วซึ่งประหยัดเวลาอย่างมาก

ข้อดีของซอฟต์แวร์แมทแลปประการที่หนึ่งคือมีความสามารถพล็อตกราฟคอนทัวร์เพื่อวิเคราะห์หาคำตอบที่เหมาะสม ด้วยเทคนิคนี้สามารถวิเคราะห์หาคำตอบได้ง่ายกว่าการพล็อตกราฟพื้นผิว 3 มิติ [7] ประการที่สองคือซอฟต์แวร์นี้มีคำสั่งการวนลูป (for-loop) และการมีเงื่อนไข (if-clause) [8] ซึ่งคำสั่งนี้จะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการออปติไมเซชัน ประการที่สามมีการจัดเก็บผลลัพธ์ในรูปแบบเมทริกซ์ทำให้ง่ายต่อการดึงผลลัพธ์ไปใช้ประมวลผลในกระบวนการต่อไป ประการที่สี่คือลักษณะการเขียนคำสั่งเพื่อประมวลผลมีความง่ายไม่ซับซ้อน

ในงานวิจัยนี้โมเดลการหาความหนาที่เหมาะสมรูปแบบใหม่ที่ใช้ซอฟต์แวร์แมทแลปซึ่งประกอบด้วยสมการลดทอนรังสีถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และการกำหนดฟังก์ชันข้อจำกัดจะขึ้นกับข้อมูลของ พื้นที่ น้ำหนัก และงบประมาณ โมเดลใหม่ที่ใช้คำนวณมี 3 วิธีคือ วิธี Logarithmic interpolation (LI) สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ( $\mu/p$ ) วิธี Bi-logarithmic interpolation (BI) สำหรับเอ็กซ์โพเซอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์ ( $B$ ) ซึ่งทั้งสองวิธีมีการปรับเทียบกับฐานข้อมูล NIST [9] และ ANS-6.4.3 [10] ตามลำดับ วิธีการหาค่าความหนาที่เหมาะสมของวัสดุตะกั่วและเหล็กให้ลดทอนความเข้มรังสีเท่ากับ 0.1 mSv/hr จากเทคนิควิเคราะห์เส้นกราฟคอนทัวร์ ในอนาคตค่าความหนาวัสดุนี้จะเป็นข้อมูลอินพุตของแบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โลสำหรับการประเมินความปลอดภัยด้านรังสี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1) การใช้ซอฟต์แวร์แมทแลปเพื่อการคำนวณพารามิเตอร์ทางด้านรังสีโดยใช้อินพุตฐานข้อมูลนิวเคลียร์น้อยที่สุด พารามิเตอร์นี้คือ  $\mu/p$  และ  $B$  แล้วเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน NIST และ ANS-6.4.3 ตามลำดับ

2) การหาค่าความหนาที่เหมาะสมของตะกั่วและเหล็กสำหรับการลดทอนรังสีแกมมาจากกากกัมมันตรังสีที่มีพลังงานรังสีและความเข้มรังสีคือ 1.3325 MeV และ 100 mSv/hr ภายใต้เงื่อนไขลำรังสีกว้าง

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) การศึกษาและการเปรียบเทียบการจัดเก็บกัมมันตรังสีระหว่างภาชนะทรงลูกบาศก์กับภาชนะทรงกระบอกที่มีชั้นความหนาวัสดุ 2 ชั้นซึ่งเป็นตะกั่วและเหล็ก

2) การศึกษาและออกแบบคำสั่งเบื้องต้นและเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์จากคู่มือซอฟต์แวร์แมทแลป

3) การศึกษาปัญหาการหาค่าความหนาที่เหมาะสมในระบบนี้มีลักษณะเป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของฟังก์ชัน 2 ตัวแปร ( $x_1, x_2$ ) แบบมีฟังก์ชันข้อจำกัด

4) การศึกษาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของปัญหาการหาค่าความหนาที่เหมาะสมนี้คือสมการการลดทอนรังสีในเงื่อนไขลำรังสีกว้าง

5) การศึกษาต้นกำเนิดรังสี Co-60 ที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความหนาที่เหมาะสมด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัวแปร ได้แก่สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและเอ็กซ์โพเนนเชียลของสมการการลดทอนรังสี

6) การศึกษาจำนวนตัวแปรฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการหาค่าความหนาที่เหมาะสมที่ความหนาวัสดุ 2 ชั้น ด้านใน ( $x_1$ ) และด้านนอก ( $x_2$ ) ของภาชนะคือตะกั่วและเหล็ก ตามลำดับ สำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์

7) ออกแบบการคำนวณหาค่าความหนาที่เหมาะสมที่สุดของภาชนะรูปทรงกระบอกเพื่อใช้สำหรับเก็บกากกัมมันตรังสี

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1) ศึกษาการใช้งานและเรียนรู้คำสั่งเบื้องต้นจากหนังสือคู่มือซอฟต์แวร์แมทแลปสำหรับการเขียนไฟล์สคริป (script-file) และการเขียนไฟล์ฟังก์ชัน (m-file)

2) เริ่มต้นการพิมพ์คำสั่งเบื้องต้นผ่านซอฟต์แวร์แมทแลปสำหรับการเขียนไฟล์สคริปและการเขียนไฟล์ฟังก์ชัน

3) ค้นคว้าตารางฐานข้อมูลของค่าพารามิเตอร์ทางด้านรังสี ได้แก่  $\mu/p$  และ  $B$  สำหรับการคำนวณภายในซอฟต์แวร์แมทแลป

4) พิมพ์ตารางฐานข้อมูลของ  $\mu/p$  และ  $B$  ลงในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์และถ่ายโอนข้อมูลเข้าไปยังซอฟต์แวร์แมทแลป

5) เขียนไฟล์ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณ  $\mu/p$  ซึ่งมีเงื่อนไขการคำนวณ 2 เงื่อนไขด้วยวิธี LI การคำนวณ  $B$  ซึ่งมีเงื่อนไขการคำนวณ 4 เงื่อนไขด้วยวิธี BI ภายในซอฟต์แวร์แมทแลป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) เขียนไฟล์ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณ  $B$  ซึ่งมีเงื่อนไขการคำนวณ 4 เงื่อนไขด้วยวิธี BI ภายในซอฟต์แวร์แมทแลป

7) ตรวจสอบค่า  $\mu/p$  และ  $B$  ที่ได้จากการคำนวณผ่านซอฟต์แวร์แมทแลปโดยการเปรียบเทียบตารางฐานข้อมูล NIST และ ANS-6.4.3 ตามลำดับ

8) ศึกษาการใช้งานและเรียนรู้เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชันจากหนังสือคู่มือแมทแลปโดยการเขียนไฟล์สคริปและการเขียนไฟล์ฟังก์ชัน

9) กำหนดฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัดสำหรับการพล็อตกราฟคอนทัวร์และการออปติไมเซชัน

10) เขียนไฟล์ฟังก์ชันสำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์ในซอฟต์แวร์แมทแลปเพื่อวิเคราะห์หาที่เหมาะสมที่สุดของวัสดุสำหรับการกำบังรังสีแล้วทำการประมวลผล

11) บันทึกผลการทดลอง

12) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

13) รวบรวมและจัดทำรูปเล่มฉบับสมบูรณ์

### ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2558											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 1												
ขั้นตอนที่ 2												
ขั้นตอนที่ 3												

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2559											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 4												
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												
ขั้นตอนที่ 7												
ขั้นตอนที่ 8												

การดำเนินงาน	ปีการศึกษา 2560											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
ขั้นตอนที่ 9												
ขั้นตอนที่ 10												
ขั้นตอนที่ 11												
ขั้นตอนที่ 12												
ขั้นตอนที่ 13												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้รับความรู้และความเข้าใจการใช้งานซอฟต์แวร์แม่เหล็กในเบื้องต้นรวมทั้งการใช้งานซอฟต์แวร์แม่เหล็กด้านการออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์
- 2) สามารถนำวิธีการคำนวณ LI และวิธีการคำนวณ BI ทางด้านคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ของวัสดุจากตารางฐานข้อมูลทางด้านนิวเคลียร์
- 3) สามารถนำรูปแบบการออปติไมเซชันทางคณิตศาสตร์ของปัญหาที่กำลังศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับปัญหาทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมอื่นๆได้
- 4) สามารถนำแนวคิดการคำนวณหาความหนาของวัสดุชั้นเดียว สำหรับการป้องกันรังสีไปต่อยอดเพื่อหาความหนาที่เหมาะสมของวัสดุแบบหลายชั้น (Multi-layer material) ของการออปติไมเซชันได้ในอนาคต



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้เป็นงานที่ต่อยอดจากการใช้งานซอฟต์แวร์แบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โล (MCNPX) เพื่อจำลองการกักเก็บกากกัมมันตรังสีไว้ในภาชนะที่ออกแบบไว้สำหรับความปลอดภัยต่อคนทำงานทางด้านรังสีจากสำนักงานเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ กากกัมมันตรังสีนี้คือนิวตริโนที่ถูกถอดออกจากเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อมีการซ่อมบำรุงเครื่อง นิวตริโนปลดปล่อยรังสีแกมมาที่มีความเข้ม 100 mSv/hr ที่ 0.662 MeV นอกจากนี้ภาชนะถูกออกแบบเป็นรูปทรงกระบอกมีลักษณะเป็นความหนา 2 ชั้น (พื้นผิวด้านในคือตะกั่ว, พื้นผิวด้านนอกเป็นเหล็ก) การเลือกวัสดุเป็นดับเบิลเยอร์มาจาก 3 สาเหตุคือ 1. ความสะดวกสำหรับการขนย้าย 2.งบประมาณจำกัด 3.พื้นที่จำกัด ถัดมาพบว่าซอฟต์แวร์มีการประมวลผลที่นานมาก เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลทาง MCNPX ถูกส่งมาจากการแจกแจงความน่าจะเป็นการเกิดอันตรกิริยาของโฟตอนในแต่ละเหตุการณ์ที่มีโอกาสเกิดขึ้นมากที่สุด ดังนั้นความหนาที่ต้องใส่ใน MCNPX เพื่อจำลองสถานการณ์ต้องไม่ใช่ความหนาจากการคาดเดา นั่นคือต้องเป็นความหนาที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการป้องกันรังสี กระบวนการหาความหนาที่เหมาะสมที่สุดนี้เรียกว่าการออปติไมเซชัน ซอฟต์แวร์แมทแลปถูกใช้สำหรับแก้ปัญหาค่าตอบของปัญหาการออปติไมเซชันนี้เป็นปัญหาการออปติไมเซชันแบบฟังก์ชันมากกว่าหนึ่งตัวแปรแบบมีข้อจำกัดซึ่งซับซ้อนจนเกินไปที่จะคำนวณด้วยมือ มากไปกว่านั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นและบิวต์ออฟแฟกเตอร์ซึ่งอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องถูกคำนวณจากฐานข้อมูล NIST และ ANS- 6.4.3 โดยวิธี LI และ BI ซึ่งเป็นวิธีการประมาณข้อมูลจากตาราง หลังจากนั้นการหาค่าตอบของปัญหาการออปติไมเซชันถูกดำเนินการโดยการพล็อตเส้นกราฟของฟังก์ชัน จุดตัดของฟังก์ชันคือคำตอบจากการออปติไมเซชัน

จากการบรรยายข้างต้น งานวิจัยนี้ถูกจัดเป็นงานประเภทการป้องกันอันตรายจากรังสีแกมมาผสมผสานกับการคำนวณและการแก้ปัญหาฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์รวมถึงการประมาณค่าจากตารางฐานข้อมูลและการใช้ซอฟต์แวร์แมทแลป ดังนั้นทฤษฎีที่ถูกกล่าวถึงในหัวข้อนี้มี 5 หัวข้อ 1.อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร 2.การลดทอนรังสีแกมมา 3.วิธีการประมาณค่าในช่วงระหว่างข้อมูลตัวเลข 4.การใช้งานซอฟต์แวร์แมทแลปเบื้องต้น 5.การออปติไมเซชันโดยแมทแลป 6.งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

เมื่อรังสีแกมมาถูกปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดรังสีและผ่านเข้าสู่ของตัวกลาง สิ่งที่เกิดขึ้นภายในตัวกลางคือการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับตัวกลางซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ 3 รูปแบบ 1.อันตรกิริยาการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกซ์ 2. อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน 3.อันตรกิริยาการผลิตคู่

### 2.1.1 การดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกซ์

ในกระบวนการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกซ์ โฟตอนทำอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลาง ซึ่งโฟตอนหายไปอย่างสมบูรณ์ อิเล็กตรอนที่ดูดกลืนโฟตอนซึ่งถูกเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอนได้ถูกปลดปล่อยออกมาจากอะตอมของตัวกลางจากระดับพลังงานที่อาศัยอยู่ พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนแสดงดังสมการที่ (2.1)

$$E_e = h\nu - E_b \quad (2.1)$$

ซึ่ง  $E_b$  คือ พลังงานที่ยึดเหนี่ยวโฟโตอิเล็กตรอนในระดับพลังงานที่มันอาศัยอยู่  $h\nu$  คือพลังงานของโฟตอน  $E_e$  คือพลังงานของโฟโตอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนอิสระ จากสมการอิเล็กตรอนที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ในอะตอมของตัวกลางสามารถกลายเป็นโฟโตอิเล็กตรอนได้ก็ต่อเมื่อพลังงานโฟตอนต้องมีค่ามากกว่าพลังงานที่ยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนของอะตอม อันตรกิริยานี้สามารถเกิดขึ้นในช่วงระดับพลังงาน (KeV) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่ต่ำที่สุดถ้าเปรียบเทียบกับที่เกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาอื่นๆ

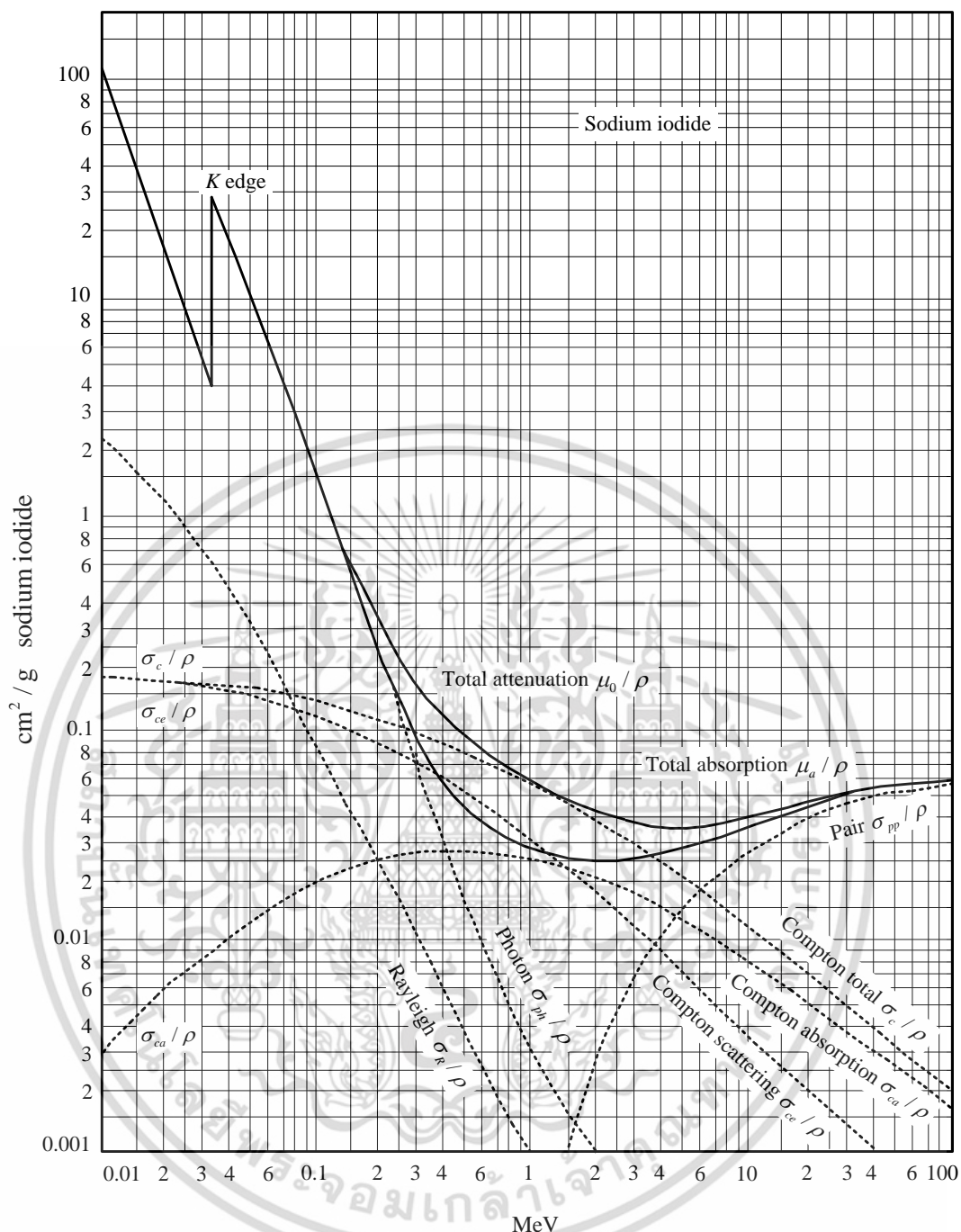
อันตรกิริยาการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกซ์สามารถทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์โดยอิเล็กตรอนอิสระหรืออิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานอื่นๆของอะตอมเข้าแทนที่ช่องว่าง (ซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนกลายเป็นโฟโตอิเล็กตรอน) รังสีเอ็กซ์ถูกปลดปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนในอะตอมจากระดับพลังงานที่สูงไปยังระดับพลังงานที่ต่ำกว่า กระบวนการโฟโตอิเล็กทริกซ์เป็นกระบวนการเกิดอันตรกิริยารังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดในกลไกการเกิดอันตรกิริยารังสีแกมมา กลไกการเกิดอันตรกิริยานี้ขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางการดูดกลืน ( $\tau$ ) ซึ่งคือความน่าจะเป็นในการเกิดกลไกนี้ แสดงดังสมการที่ (2.2)

$$\tau \cong \text{constant} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (2.2)$$

ซึ่ง  $n$  คือเลขยกกำลังซึ่งถูกกำหนดขึ้นตามระดับพลังงานรังสีแกมมาที่สนใจซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 4 และ 5 นอกจากนี้ความน่าจะเป็นการดูดกลืนไม่เพียงแต่จะขึ้นอยู่กับพลังงานของโฟตอนแต่ยังขึ้นกับเลขอะตอมของตัวกลางอีกด้วย จากสมการที่ (2) ถูกสังเกตว่าค่า  $\tau$  มากขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลางที่เพิ่มขึ้น และน้อยลงถ้าหากโฟตอนมีพลังงานสูง นั่นบ่งบอกว่าโอกาสที่จะเกิดกระบวนการดูดกลืนนั้นมีมากตามจำนวนเลขอะตอมของตัวกลางและน้อยลงตามพลังงานโฟตอนที่สูงขึ้น

การพล็อตค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนสำหรับการวัดรังสีแกมมาเมื่อมีโซเดียมไอออไดซ์เป็นตัวกลางถูกแสดงดังรูปที่ 2.1 ความไม่ต่อเนื่องของเส้นกราฟหรือขอบการดูดกลืน คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่างๆ จากรูปแสดงพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงาน K shell ซึ่งเป็นระดับพลังงานแรกในอะตอมของโซเดียมไอออไดซ์สำหรับพลังงานโฟตอนที่มากกว่า K edge โฟตอนพลังงานเพียงพอเพื่อทำอันตรกิริยาการดูดกลืนกับอิเล็กตรอนซึ่งกลายเป็นโฟโตอิเล็กตรอนและหลุดออกจากระดับพลังงาน K ของอะตอม สำหรับพลังงานโฟตอนที่น้อยกว่า K edge ไม่มีความเป็นไปได้ที่โฟตอนจะทำอันตรกิริยาการดูดกลืนที่ระดับพลังงาน K shell สิ่งนี้เกิดขึ้นอย่างคล้ายคลึงที่ระดับพลังงาน L, M, ... shell ของอิเล็กตรอนในอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

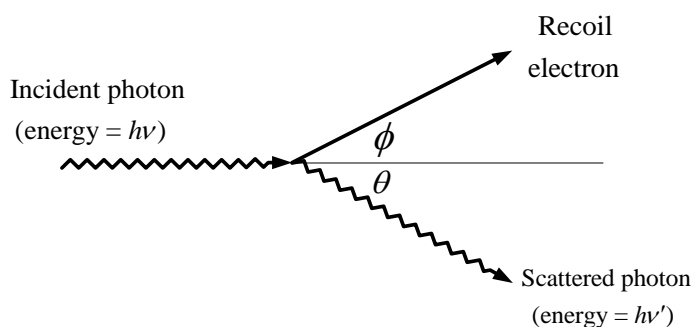


รูปที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของโซเดียมไอออดีได้จากอันตรกิริยารังสีแกมมา

### 2.1.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

อันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตันเกิดขึ้นระหว่างรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนของตัวกลางโดยรังสีแกมมาที่เคลื่อนที่เข้ามาภายในตัวกลางชนกับอิเล็กตรอนแล้วเกิดการถ่ายโอนพลังงานบางส่วนไปยังอิเล็กตรอนซึ่งถูกเรียกว่า Recoil electron หลังจากนั้นรังสีแกมมาหักเหออกเป็นมุม ( $\theta$ ) กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิม แสดงดังรูปที่ 2.2 ปรากฏการณ์นี้ซึ่งสัมพันธ์กับการถ่ายโอนพลังงานและมุมการกระเจิงถูกเขียนออกมาเป็นสมการสำหรับการอนุรักษ์พลังงานและโมเมนตัมดังสมการที่ (2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



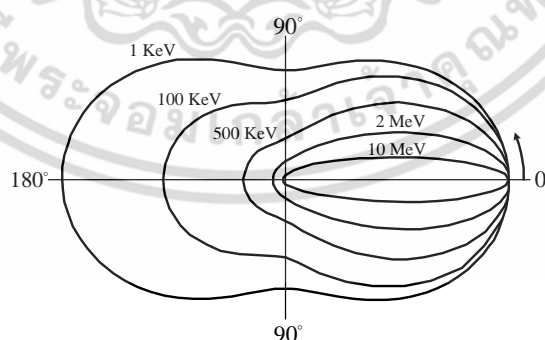
รูปที่ 2.2 อันตรกิริยาการกระเจิงของรังสีแกมมา

$$hv' = \frac{hv}{1 + \frac{hv}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.3)$$

ซึ่ง  $m_0c^2$  คือพลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอน (0.511 MeV) มุมการกระเจิงของโฟตอนแปรผันตรงกับค่าการถ่ายโอนพลังงานซึ่งมีความหมายว่ามุมการกระเจิงจะมีค่ามากถ้าหากการถ่ายโอนพลังงานมากขึ้นตามไปด้วย ในกรณีที่  $\theta = \pi$  โฟตอนจะไม่มีค่าการถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนของตัวกลาง พฤติกรรมของโฟตอนในกรณีนี้คือชนแล้วมีการกระเจิงกลับ

ความน่าจะเป็นหรือภาคตัดขวางการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงต่ออะตอมของตัวกลางขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนของวัสดุ ดังนั้นความน่าจะเป็นการเกิดการกระเจิงมีมากขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลางและน้อยลงตามระดับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นซึ่งสังเกตได้จากเส้นกราฟ  $\sigma_c / \rho$  ของรูปที่ 2.1 ซึ่งมีแนวโน้มเส้นกราฟต่ำลงเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้น

การแจกแจงมุมการกระเจิง ( $\theta$ ) ระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนแสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งแสดงว่ามุมการกระเจิงของโฟตอนจะมีค่าน้อยเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูง นั่นหมายถึงโฟตอนพลังงานสูงสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหรือวัสดุปราศจากการกระเจิงกับอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.3 มุมการกระเจิงของรังสีแกมมาที่ระดับพลังงานต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแจกแจงมุมการกระเจิงของรังสีแกมมาถูกทำนายโดยวิธีการอนุพันธ์ของค่าภาคตัดขวางการกระเจิง ( the differential scattering cross section ,  $d\sigma / d\Omega$  ) ของ Klein-Nishina ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \left( \frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad (2.4)$$

### 2.1.3 การผลิตคู่

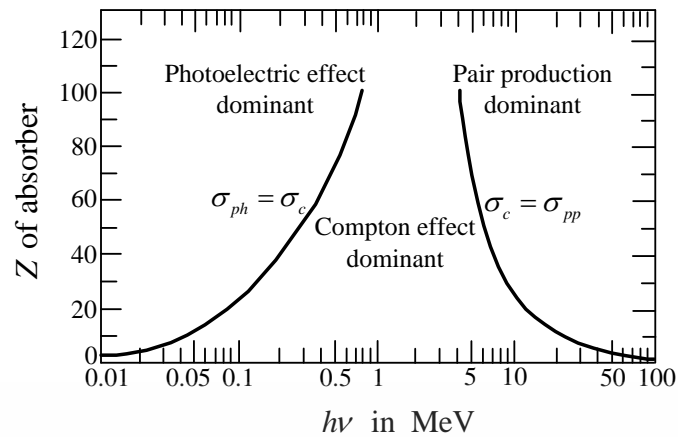
ถ้าหากพลังงานโฟตอนรังสีแกมมามีค่าสูงกว่าพลังงานมวลนิ่ง 2 เท่า (the rest-mass energy,  $m_e c^2$ ) ของอิเล็กตรอน กระบวนการเกิดการผลิตคู่มีความเป็นไปได้ แต่ถ้าที่โฟตอนมีพลังงานน้อยกว่า 2 เท่าของพลังงานมวลนิ่ง ความเป็นไปได้สำหรับอันตรกิริยาการผลิตคู่น้อยมากดังสมการที่ (2.5)

$$h\nu_{\min} = 2m_e c^2 = 1.022 \text{ MeV} \quad (2.5)$$

เริ่มต้นโฟตอนทำปฏิกิริยากับสนามคูลอมบ์ของนิวเคลียสภายในอะตอม หลังจากนั้นโฟตอนจะหายไปและถูกแทนที่โดยอิเล็กตรอนและโพสิตรอนดังสมการที่ (2.6) ซึ่ง  $T_+ + T_-$  คือพลังงานจลน์ของโพสิตรอนและอิเล็กตรอนตามลำดับจากนั้นโพสิตรอนจะรวมกับอิเล็กตรอนอื่นๆภายในตัวกลางทำให้เกิดโฟตอน 2 ตัว แต่ละตัวมีพลังงาน 0.511 MeV ซึ่งถูกเรียกว่า รังสีแกมมาอันดับที่สองของอันตรกิริยา แนวโน้มกราฟของความน่าจะเป็นการเกิดการผลิตคู่มีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมากกับพลังงานโฟตอนที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.1

$$T_+ + T_- = E - 2m_e c^2 \quad (2.6)$$

ความสำคัญของอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ ถูกแสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเลขอะตอมการดูดกลืนของวัสดุบนแนวแกนตั้งและพลังงานโฟตอนบนแนวแกนนอน เส้นโค้งที่อยู่ทางซ้ายคือเส้นพลังงานซึ่งภาคตัดขวางการดูดกลืน ( $\sigma_{ph}$ ) และภาคตัดขวางการกระเจิง ( $\sigma_c$ ) มีความเท่ากัน เส้นโค้งที่อยู่ทางขวาคือพลังงานที่ซึ่งภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตัน และภาคตัดขวางการผลิตคู่ ( $\sigma_{pp}$ ) มีความเท่ากัน ดังนั้นพื้นที่บนกราฟรูปที่ 3 ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ได้แก่ บริเวณการดูดกลืน บริเวณการกระเจิงคอมป์ตันบริเวณการผลิตคู่ ดังนั้นอันตรกิริยาการดูดกลืนเกิดในช่วงระดับพลังงานต่ำ และการผลิตคู่เกิดในช่วงระดับพลังงานสูง ส่วนอันตรกิริยาการกระเจิงเกิดในช่วงระดับพลังงานที่อยู่ระหว่างบริเวณการดูดกลืนและการผลิตคู่



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ทางระดับพลังงานของอันตรกิริยารังสีแกมมาทั้ง 3 แบบ

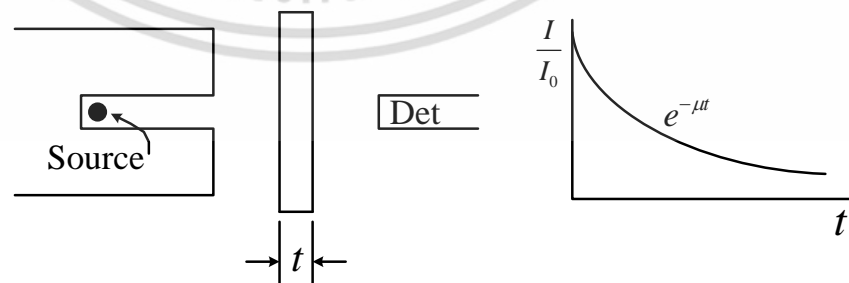
#### 2.1.4 การกระเจิงแบบโคฮีเรนต์

การกระเจิงของรังสีแกมมากับตัวกลางสามารถเกิดขึ้นได้อีกแบบอื่น ๆ แบบหนึ่งซึ่งถูกเรียกว่าการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์เป็นการกระเจิงแบบไม่มีการสูญเสียพลังงาน ซึ่งก็คืออิเล็กตรอนของอะตอมไม่ถูกไอออไนซ์หรือกระตุ้นจากโฟตอน นั่นหมายถึงโฟตอนไม่ถ่ายโอนพลังงานหลังจากอันตรกิริยาการกระเจิงแต่ทิศทางของโฟตอนมีการเปลี่ยนแปลงไปจากทิศทางเดิม นอกจากนี้การเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงแบบยืดหยุ่นของโฟตอนมีภาคตัดขวางการกระเจิงแบบโคฮีเรนต์ ( $\sigma_r$ ) การเกิดขึ้นน้อยมากที่ระดับพลังงานต่ำ (< 100 KeV) ดังนั้นในความเป็นจริงการกระเจิงนี้ถูกเพิกเฉยสำหรับการคำนวณค่าภาคตัดขวางรวมของรังสีแกมมาเพราะความน่าจะเป็นการเกิดน้อยมากๆ แนวโน้มเส้น  $\sigma_r$  แสดงดังรูปที่ 2.1

#### 2.2 การลดทอนรังสีแกมมา

การลดทอนรังสีแกมมาขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลัก ได้แก่ 1. สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี 2. ความหนาการดูดกลืนเชิงมวล 3. บิวต์อัฟแฟกเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 2.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอน



รูปที่ 2.5 กราฟการส่งผ่านรังสีแกมมาภายใต้เงื่อนไขลำรังสีแคบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองการการส่งผ่านรังสีแสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งรังสีแกมมาระดับพลังงานเดี่ยวถูกจำกัดเป็นลำรังสีแคบ ทะลุผ่านตัวกลางความหนา ( $t$ ) เข้าสู่หัววัดรังสี (Det) ผลลัพธ์จากการวัดรังสีมีแนวโน้มเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียลแสดงในรูปที่ 2.5 ด้านขวามือ แต่ละกระบวนการเกิดอันตรกิริยา การดูดกลืน การกระเจิงและการผลิตคู่ถูกอธิบายในรูปแบบความน่าจะเป็นของการเกิดอันตรกิริยาต่อหน่วยความยาวระยะทางที่รังสีเดินทาง (Path length) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีคือผลรวมภาคตัดขวางการเกิดอันตรกิริยารวมดังสมการที่ (2.7) ซึ่ง  $N = \rho N_a / A$  คือเทอมของความหนาแน่นอะตอม  $N_a$  คือเลขอาโวกาโดรของอะตอม  $A$  คือเลขมวลอะตอม

$$\mu(E) = N[\sigma_{ph}(E) + \sigma_c(E) + \sigma_{pp}(E)] \quad (2.7)$$

ซึ่ง  $\mu$  เรียกว่า สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น ปริมาณโฟตอนที่ส่งผ่านตัวกลาง ( $I$ ) ถูกกำหนดในเทอมของปริมาณที่ปราศจากการดูดกลืนดังสมการที่ (2.8)

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu t} \quad (2.8)$$

โฟตอนรังสีแกมมาถูกอธิบายคุณสมบัติโดย mean free path ( $\lambda$ ) ซึ่งคือระยะทางเฉลี่ยที่โฟตอนเดินทางได้ในตัวกลางก่อนการเกิดอันตรกิริยา ค่า  $\lambda$  ถูกคำนวณออกมาดังสมการ (2.9) จากส่วนกลับของ  $\mu$  ค่าโดยปกติทั่วไปของ  $\lambda$  อยู่ในช่วงจากมิลลิเมตรถึงเซนติเมตรของตัวกลางที่เป็นของแข็ง

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (2.9)$$

$\mu$  มาจากผลคูณระหว่างความหนาแน่นของตัวกลางกับสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ( $\mu / \rho$ ) ซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางมากถูกกำหนดดังสมการที่ (2.10)

$$\mu = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) (\rho) \quad (2.10)$$

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลประกอบด้วยค่าภาคตัดขวางการเกิดอันตรกิริयरังสีแกมมา 3 ส่วน ค่าภาคตัดขวาง  $\sigma_{ph}$   $\sigma_c$   $\sigma_{pp}$  ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_a}{A} [\sigma_{ph}(E) + \sigma_c(E) + \sigma_{pp}(E)] = \frac{\mu_{ph}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่ง  $\rho$  คือความหนาแน่นของตัวกลาง ( $\text{g/cm}^3$ ) สัมประสิทธิ์การลดทอนสามารถถูกคำนวณจากตัวกลางในสถานะอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น สำหรับสารประกอบต่างๆที่อยู่ในสถานะของเหลวหรือไอระเหย สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลถูกคิดขึ้นจากผลรวมสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุแต่ละตัวในสารประกอบดังสมการที่ (2.12) ซึ่ง  $w_i$  คือแฟกเตอร์ที่บอกเศษส่วนน้ำหนักของธาตุในสารประกอบ

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_c = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_i \quad (2.12)$$

### 2.2.1.1 ภาคตัดขวางการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก

ภาคตัดขวางการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก ( $\sigma_{pha}$ ) คือผลคูณของ  $\sigma_{ph}$  และเลขเศษส่วนเฉลี่ย ( $f_{ph}$ ) ของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบซึ่งเป็นพลังงานจลน์เริ่มต้นของโฟโตอิเล็กตรอน แสดงดังสมการที่ (2.13), (2.14) ตามลำดับ

$$\sigma_{pha} = f_{ph} \sigma_{ph} \quad (2.13)$$

$$f_{ph} = \frac{1}{E} [(E - E_b) + (1 - \omega) E_b] = 1 - \frac{\omega E_b}{E} \quad (2.14)$$

ซึ่ง  $E_b$  คือพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน  $\omega$  คือผลการเรืองแสง (fluorescent yield)  $E - E_b$  คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน  $(1 - \omega) E_b$  คือพลังงานเฉลี่ยซึ่งถ่ายโอนไปยัง Auger electron  $f_{ph}$  ปรับปรุงความสำคัญที่สัมพันธ์ของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกในระดับพลังงาน K, L, M Shell ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นและเชิงมวลแสดงดังสมการที่ (2.15), (2.16) ตามลำดับ

$$\mu_{pha} = N \sigma_{pha} \quad (2.15)$$

$$\frac{\mu_{pha}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{pha} \quad (2.16)$$

### 2.2.1.2 ภาคตัดขวางการกระเจิงพลังงาน

ภาคตัดขวางการกระเจิงพลังงานคือผลคูณของค่าภาคตัดขวางการกระเจิงรวม (the total scattering cross section) และเลขเศษส่วนเฉลี่ยของพลังงานโฟตอนที่ยังคงอยู่จากการกระเจิงโฟตอนถูกแสดงดังสมการที่ (2.17) และเทอมของ  $1 - f_c$  แสดงดังสมการที่ (2.18)

$$\sigma_{cc}(\alpha) = (1 - f_c) \sigma_c(\alpha) \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 - f_c = \frac{1}{\sigma_c(\alpha)} \int_{\alpha}^{\alpha+2} \frac{\alpha}{\alpha'} \sigma_c(\alpha, \alpha') d\alpha' \quad (2.18)$$

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานเชิงมวลและการกระเจิงพลังงานเชิงมวลแบบคอมป์ตันซึ่งสัมพันธ์กับค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนและการกระเจิงแบบคอมป์ตันถูกแสดงดังสมการที่ (2.19)

$$\frac{\mu_{ce}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{ce}(E) \quad (2.19)$$

### 2.2.1.3 ภาคตัดขวางการผลิตคู่

เลขเศษส่วนเฉลี่ยของพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบซึ่งเป็นพลังงานจลน์เริ่มต้นของโพซิตรอนและอิเล็กตรอนในอันตรกิริยาการผลิตคู่ถูกกำหนดดังสมการที่ (2.20)

$$f_{pp} = 1 - \frac{2m_e c^2}{E} \quad (2.20)$$

ภาคตัดขวางการดูดกลืนการผลิตคู่และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนการผลิตคู่เชิงเส้นและเชิงมวลถูกกำหนดดังสมการที่ (2.21), (2.22), (2.23) ตามลำดับ

$$\sigma_{ppa} = f_{pp} \sigma_{pp} \quad (2.21)$$

$$\mu_{ppa} = N \sigma_{ppa} \quad (2.22)$$

$$\frac{\mu_{ppa}}{\rho} = \frac{N_a}{A} \sigma_{ppa} \quad (2.23)$$

### 2.2.2 ความหนาของการดูดกลืนเชิงมวล

สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล ( $\mu / \rho$ ) เป็นพารามิเตอร์ที่อยู่ในกฎการลดทอนรังสีแกมมาดังสมการที่ (2.24)

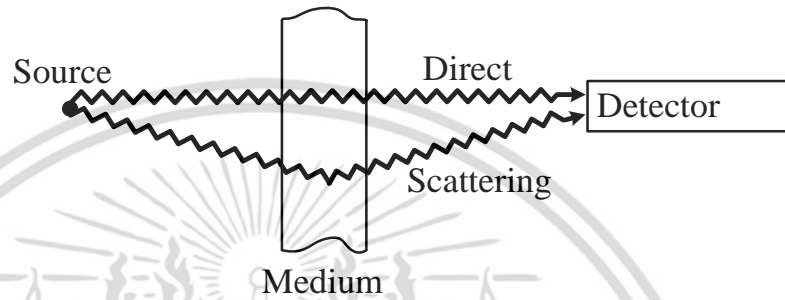
$$\frac{I}{I_0} = e^{-(\mu / \rho) \rho t} \quad (2.24)$$

ซึ่ง  $\rho t$  คือความหนาเชิงมวลของตัวกลาง มันเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญซึ่งใช้กำหนดระดับการลดทอนรังสี มีหน่วยเป็น  $\text{mg}/\text{cm}^2$  ความหนาของตัวกลางที่ถูกใช้ในการวัดรังสีถูกวัดในเทอมของความหนาเชิงมวลแทนที่จะเป็นความหนาเชิงกายภาพเพราะมันเป็นปริมาณพื้นฐานทางฟิสิกส์ ความหนาเชิงมวลเป็นแนวคิดที่มีประโยชน์เมื่อมีการพิจารณาการสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่มีประจุและอิเล็กตรอนพลังงานสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 บิวต์อัพแฟกเตอร์

การลดทอนรังสีแกมมาในอุดมคติจากรูปที่ 2.5 รังสีแกมมาถูกบีบให้ขนานกัน มีลักษณะเป็นแบบการวัดลำรังสีแคบซึ่งมีคอลลิเมเตอร์ในการทดลอง แต่สำหรับการปฏิบัติจริงจะเกิดการลดทอนดังรูปที่ 2.6 รังสีแกมมาที่ผ่านออกมาจากตัวกลางถูกวัดโดยหัววัดรังสีโดยไม่มีคอลลิเมเตอร์ควบคุมรังสีแกมมา ดังนั้นการวัดรังสีแกมมาในรูปแบบนี้ถูกดำเนินการภายใต้สถานการณ์ที่แตกต่างจากเดิม



รูปที่ 2.6 รูปแบบการลดทอนรังสีในเงื่อนไขลำรังสีกว้าง

หัววัดรังสีสามารถตอบสนองรังสีแกมมาซึ่งมีการกระเจิงภายในตัวกลางหรือรังสีแกมมาอันดับที่สอง ซึ่งมาจากการรวมตัวอิเล็กตรอนและโพซิตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาการผลิตคู่ เนื่องจากหัววัดรังสีหลายประเภทไม่สามารถแยกแยะประเภทรังสีที่ผ่านออกมาจากตัวกลางหลังจากการกระเจิง แต่มันสามารถรับรู้ได้จากขนาดของสัญญาณที่มากกว่าปกติเมื่อมีการเปรียบเทียบกับเงื่อนไขลำรังสีแคบ ดังนั้นสมการ (2.24) จึงไม่เป็นไปตามกฎภายใต้เงื่อนไขการวัดลำรังสีกว้างจากการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับตัวกลางแบบการกระเจิง การวัดลำรังสีกว้างถูกแสดงตามสมการ (2.25) โดยการแทนแฟกเตอร์ 1 ตัวลงในสมการที่ (2.24) ซึ่ง  $B(t, E_\gamma)$  ถูกเรียกว่า แฟกเตอร์บิวต์อัพซึ่งเป็นแฟกเตอร์ที่บ่งชี้ว่าการเดินทางของโฟตอนเบี่ยงเบนจากแนวการเดินทางเดิมอย่างไร ทิศทางการเบี่ยงเบนเป็นผลจากอันตรกิริยาการกระเจิงของโฟตอนกับตัวกลาง ถ้าหากแฟกเตอร์นี้มีค่ามาก ทิศทางการเบี่ยงเบนโฟตอนมีมากขึ้นตามด้วย

$$\frac{I}{I_0} = B(t, E_\gamma) e^{-\mu t} \quad (2.25)$$

วิธีการประมาณค่า Buildup factor จากสภาพแวดล้อมที่มีต้นกำเนิดรังสีเป็นแบบจุดและปลดปล่อยโฟตอนรังสีแกมมาออกมาที่ระดับพลังงานเดียวโดยการคำนวณฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้มาหลายปีแล้วมี 2 วิธีการประมาณ วิธีการแรกคือกระประมาณแบบเทเลอร์ (Taylor approximation) วิธีการที่สองคือการประมาณแบบเบอร์เกอร์ (Berger approximation) ซึ่งทั้งสองวิธีการนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในรหัสคอมพิวเตอร์สำหรับการฝึกทางด้านวิศวกรรม นอกจากนี้ยังมีวิธีการประมาณที่ทันสมัยและแม่นยำกว่ามากและมีความซับซ้อนกว่ามากเช่นกัน วิธีการนี้คือการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมาณแบบจีโอเมทริกโพรเกรสชัน (Geometric progression approximation, GP) ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (2.26), (2.27) ตามลำดับ

$$B(E, x) = \begin{cases} 1 + (b-1)(K^x - 1) / (K - 1), & K \neq 1 \\ 1 + (b-1)x, & K = 1 \end{cases} \quad (2.26)$$

$$K(x) = c(x)^a + d \frac{\tanh(x / X_K - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (2.27)$$

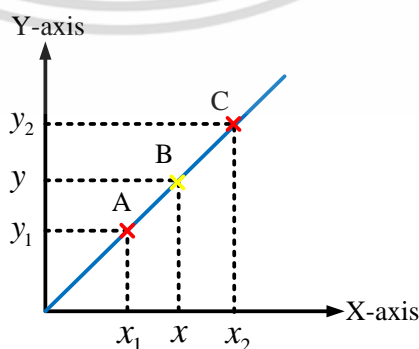
ซึ่ง  $x$  คือระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีจนถึงหัววัดรังสีในหน่วย mean free path (mfp)  $b$  คือค่าบิวต์-อ็อปแฟกเตอร์ที่ 1 mfp  $K$  คือแฟกเตอร์มัลติพลิเคชันต่อ mfp  $a, c, d, X_K$  คือพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในวิธี GP ซึ่งขึ้นอยู่กับ 3 ปัจจัยหลักได้แก่ พลังงานรังสีแกมมา ตัวกลางการลดทอนธรรมชาติของการตอบสนอง มากไปกว่านั้นค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกยึดเป็นหลักการคำนวณรหัส PALLAS (PALLAS code calculation)

### 2.3 วิธีการประมาณค่าของฟังก์ชันระหว่างข้อมูลตัวเลข

การประมาณค่าในช่วงของจุด 2 จุดที่ใช้คำนวณสำหรับงานวิจัยนี้เพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีและบิวต์อ็อปแฟกเตอร์มี 2 วิธีซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรของฟังก์ชัน 1.วิธีการประมาณค่าแบบ linear interpolation (LI) สำหรับฟังก์ชันตัวแปรเดียว 2.วิธีการประมาณค่าแบบ Bilinear interpolation (BI) สำหรับฟังก์ชันสองตัว

#### 2.3.1 การประมาณค่าของฟังก์ชันตัวแปรเดียว

วิธีการประมาณค่าฟังก์ชันที่อยู่ระหว่างจุด 2 จุด ข้อมูลของฟังก์ชันตัวแปรเดียวแสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งถูกเรียกว่าวิธี LI จากรูป ค่าของฟังก์ชันซึ่งคือ  $Y$  ถูกคำนวณออกมาโดยวิธีการเปรียบเทียบความชันของเส้นกราฟที่จุด A, C และจุด A, B ซึ่งทั้งสองจุดนี้มีความชันเท่ากัน การเปรียบเทียบความชันที่จุดสองจุดนี้ถูกแสดงดังสมการที่ (2.28)



รูปที่ 2.7 วิธีการประมาณค่าระหว่างข้อมูลสำหรับฟังก์ชันตัวแปรเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (2.28)$$

จัดรูปแบบสมการเป็นสมการที่ (2.29)

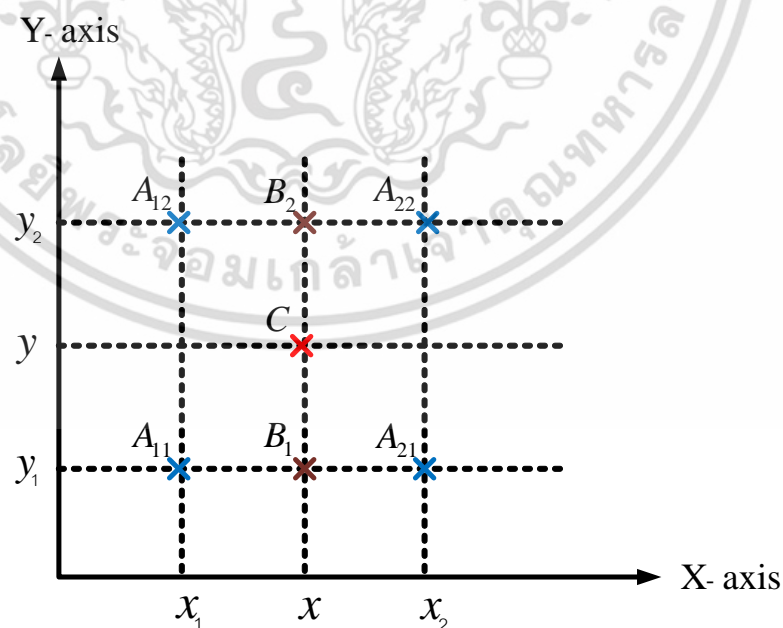
$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.29)$$

จัดสมการทางฝั่งขวามืออยู่ในรูปเศษส่วนจากสมการที่ (2.29) เป็นสมการ (2.30)

$$y = \frac{(y_1)(x_2 - x) + (y_2)(x - x_1)}{x_2 - x_1} \quad (2.30)$$

### 2.3.2 การประมาณค่าของฟังก์ชันสองตัวแปร

วิธีการประมาณค่าฟังก์ชันในช่วงระหว่างจุด 2 จุด ของฟังก์ชันสองตัวแปรถูกแสดงดังรูปที่ 2.8 จุด C คือค่าฟังก์ชันที่ได้จากการประมาณโดยวิธีการ LI แนวแกน  $x$  และ แนวแกน  $y$  ค่า  $B_1$  คือข้อมูลที่ถูกราคำนวณโดยวิธี LI แนวแกน  $x$  ซึ่งอยู่ระหว่าง ค่า  $A_{11}$  และ  $A_{21}$  เทียบกับค่า  $x_1$  และ  $x_2$  ค่า  $B_2$  คือข้อมูลที่ถูกราคำนวณโดยวิธี LI แนวแกน  $x$  ซึ่งอยู่ระหว่างค่า  $A_{12}$  และ  $A_{22}$  เทียบกับค่า  $x_1$  และ  $x_2$  เมื่อ  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{22}$  คือข้อมูลตัวเลข ( $A_{11}$  คือ ค่าตัวเลขตำแหน่งแถวที่หนึ่ง คอลัมน์ที่หนึ่ง  $A_{12}$  คือ ค่าตัวเลขในตำแหน่งแถวที่หนึ่งคอลัมน์ที่สอง  $A_{21}$  คือค่าตัวเลขตำแหน่งแถวที่สอง คอลัมน์ที่หนึ่ง  $A_{22}$  คือ ค่าตัวเลขในตำแหน่งแถวที่สองคอลัมน์ที่สอง) ค่า  $x$  และ  $y$  คือ ข้อมูลที่ต้องการประมาณค่าเพื่อแสดงค่าของฟังก์ชันซึ่งอยู่ระหว่าง  $x_1$ ,  $x_2$  และ  $y_1$ ,  $y_2$



รูปที่ 2.8 วิธีการประมาณค่าระหว่างข้อมูลสำหรับฟังก์ชันสองตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นการคำนวณที่  $B_1$  มีความสัมพันธ์กับ  $A_{11}$  ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากการตัดกันของ  $x_1, y_1$  และ  $A_{21}$  ซึ่งเป็นข้อมูลที่เกิดจากการตัดกัน  $x_2, y_1$  จากความสัมพันธ์ที่กล่าวนี้ การคำนวณ  $B_1$  เหมือนการคำนวณ LI ในสมการที่ (2.30) ซึ่งก็คือการเทียบอัตราส่วนความชันระหว่าง  $A_{11}, A_{21}$  และ  $A_{11}, B_1$  ที่  $x_1, x_2$  และ  $x_1, x$  ถูกแสดงดังสมการที่ (2.31)

$$\frac{A_{21} - A_{11}}{x_2 - x_1} = \frac{B_1 - A_{11}}{x - x_1} \quad (2.31)$$

จากสมการค่า  $B_1$  มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$B_1 = A_{11} + (A_{21} - A_{11}) \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.32)$$

จัดรูปสมการที่ (2.32) เป็นสมการที่ (2.33)

$$B_1 = \frac{(A_{11})(x_2 - x) + (A_{21})(x - x_1)}{x_2 - x_1} \quad (2.33)$$

จากนั้นที่ค่า  $B_2$  มีความสัมพันธ์กับ  $A_{12}$  ซึ่งเกิดจากการตัดกันของ  $x_1, y_2$  และ  $A_{22}$  ซึ่งเกิดจากการตัดกันของ  $x_2, y_2$  จากความสัมพันธ์นี้ การคำนวณ  $B_2$  ซึ่งก็คือการเทียบความชันระหว่างช่วง  $A_{12}, A_{22}$  และ  $A_{12}, B_2$  ถูกแสดงดังสมการที่ (2.34)

$$\frac{A_{22} - A_{12}}{x_2 - x_1} = \frac{B_2 - A_{12}}{x - x_1} \quad (2.34)$$

จากสมการค่า  $B_2$  มีค่าดังสมการต่อไปนี้

$$B_2 = A_{12} + (A_{22} - A_{12}) \left( \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.35)$$

จัดรูปสมการที่ (2.35) เป็นสมการที่ (2.36)

$$B_2 = \frac{(A_{12})(x_2 - x) + (A_{22})(x - x_1)}{x_2 - x_1} \quad (2.36)$$

ขั้นตอนสุดท้ายของวิธีการ BI คือว่าค่า  $C$  มีความสัมพันธ์กับ  $B_1$  ซึ่งเกิดจากการตัดกันของ  $x, y_1$  และ  $B_2$  ซึ่งเกิดจากการตัดกันของ  $x, y_2$  จากความสัมพันธ์นี้ การคำนวณ  $C$  ซึ่งก็คือการเทียบความชันระหว่างช่วง  $y_1, y_2$  และ  $B_1, B_2$  ถูกแสดงดังสมการที่ (2.37)

$$\frac{B_2 - B_1}{y_2 - y_1} = \frac{C - B_1}{y - y_1} \quad (2.37)$$

จากสมการค่า  $B_2$  มีค่าดังสมการต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

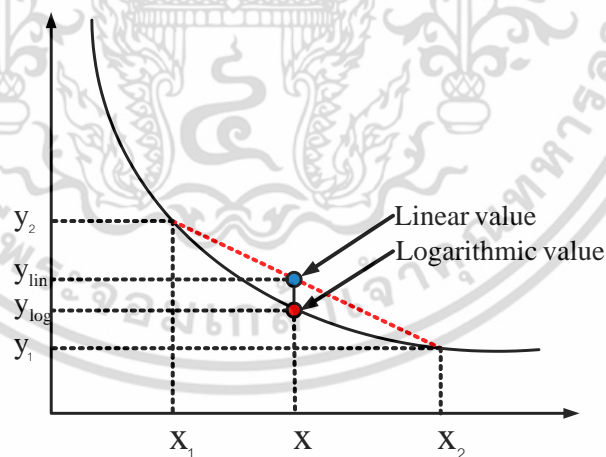
$$C = B_1 + (B_2 - B_1) \left( \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \right) \quad (2.38)$$

จัดรูปสมการที่ (2.38) เป็นสมการที่ (2.39)

$$C = \frac{(B_1)(y_2 - y) + (B_2)(y - y_1)}{y_2 - y_1} \quad (2.39)$$

### 2.3.3 การประมาณค่าของฟังก์ชันแบบลอการิทึม

วิธีการประมาณค่าของฟังก์ชันแบบเชิงเส้นเป็นวิธีการที่ไม่เหมาะสมในกรณีที่ฟังก์ชันมีลักษณะเส้นกราฟแบบลอการิทึม ดังนั้นวิธีที่เหมาะสมคือวิธีการประมาณค่าแบบลอการิทึมซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 2.9 linear value คือจุดที่ได้จากการประมาณค่าฟังก์ชันแบบเชิงเส้นอยู่บนเส้นประซึ่งอยู่ห่างจากฟังก์ชันเส้นโค้งตามรูป การใช้วิธีการประมาณค่าฟังก์ชันเส้นโค้งแบบลอการิทึม เป็นวิธีการประมาณค่าที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธีการประมาณฟังก์ชันแบบเชิงเส้น สืบเนื่องจาก log value มีแนวโน้มเข้าใกล้เส้นกราฟของฟังก์ชันมากกว่าจุด linear value ที่อยู่บนเส้นประตามรูป ดังนั้นค่าที่ได้จากการประมาณค่าแบบลอการิทึม ( $y_{\log}$ ) จะมีความผิดพลาดน้อยกว่าค่าที่ได้จากการประมาณแบบเชิงเส้น ( $y_{\text{lin}}$ ) สูตรการประมาณค่าฟังก์ชันตัวแปรเดียวแบบลอการิทึมถูกแสดงดังสมการที่ (2.40) โดยการเพิ่มเทอม log ไปยังสมการที่ (2.30) นอกจากนี้การประมาณค่าของฟังก์ชันสองตัวแปรแบบลอการิทึมถูกแสดงดังสมการที่ (2.41), (2.42), (2.43) โดยการเพิ่มเทอมของ log ไปยังสมการที่ (2.33), (2.36), (2.39)



รูปที่ 2.9 การประมาณค่าฟังก์ชันแบบลอการิทึม

$$y_{\log} = \frac{(y_1)(\log x_2 - \log x) + (y_2)(\log x - \log x_1)}{x_2 - x_1} \quad (2.40)$$

$$B_{1(\log)} = \frac{(A_{11})(\log x_2 - \log x) + (A_{21})(\log x - \log x_1)}{\log x_2 - \log x_1} \quad (2.41)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$B_{2(\log)} = \frac{(A_{12})(\log x_2 - \log x) + (A_{22})(\log x - \log x_1)}{\log x_2 - \log x_1} \quad (2.42)$$

$$C_{\log} = \frac{(B_1)(\log y_2 - \log y) + (B_2)(\log y - \log y_1)}{\log y_2 - \log y_1} \quad (2.43)$$

## 2.4 การใช้งานซอฟต์แวร์แมทแลปเบื้องต้น

โปรแกรมแมทแลป คือ โปรแกรมสมรรถนะสูงที่ถูกนำมาใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์ มีการใช้งานที่ง่ายไม่ซับซ้อนและมีความสามารถที่หลากหลายได้แก่ การประมวลผลภาพและสัญญาณ การออกแบบการควบคุมและการทำงานของกลไกพร้อมภาพเคลื่อนไหว เป็นโปรแกรมที่ได้รับความนิยมในหมู่วิศวกรและนักวิทยาศาสตร์ ชื่อโปรแกรมซอฟต์แวร์ นั้นย่อมาจาก Matrix Laboratory ตัวโปรแกรมได้ถูกสร้างขึ้นและพัฒนาอย่างตัวเนื่องจากการการใช้โปรแกรมภาษา C หรือ FORTRAN โดยศาสตราจารย์ Cleve Moler และทีมงานจนได้รับความนิยมอย่างมาก จึงได้จัดตั้งเป็นบริษัท MathWork เริ่มต้นโปรแกรมนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อแก้ไขปัญหาตัวแปรของระบบสมการที่มีลักษณะเป็นเมทริกซ์ ในภายหลังวัตถุประสงค์จริงๆของการสร้างโปรแกรมก็คือ การให้เด็กนักเรียนใช้ชุดคำสั่งสำหรับการแก้ไขปัญหาทางพีชคณิต LINPACK และและการแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ ELSPACK โดยไม่จำเป็นต้องมีความรู้การเขียนโปรแกรมภาษา C หรือ FORTRAN ซึ่งเป็นภาษาขั้นต่ำที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน

ลักษณะการทำงานของโปรแกรมแมทแลปคือโปรแกรมจะประมวลผลจากการป้อนคำสั่งเข้าไป เป็นบรรทัดต่อบรรทัดอย่างต่อเนื่อง และผลที่ได้จากการประมวลจะถูกจัดเก็บในรูปแบบ Array หรือแบบ Matrix ซึ่งสามารถแก้ไขปัญหาคณิตศาสตร์ได้ง่าย ถ้าเปรียบเทียบกับ การจัดเก็บข้อมูลของโปรแกรมภาษา C หรือ FORTRAN ที่มีการสร้างมิติเพื่อจัดเก็บข้อมูลแล้ว โปรแกรมภาษา C มีความยุ่งยากซับซ้อน และเสียเวลาการทำงานมากกว่า

นอกจากนี้โปรแกรมแมทแลปได้จัดเตรียมกล่องเครื่องมือที่เรียกว่า Toolbox เพื่อนำไปใช้แก้ปัญหาทางด้านเฉพาะทางได้แก่ ( signal processing, control systems, neural networks, fuzzy logic, wavelets, simulation, optimization ) Toolbox คือ โปรแกรมหรือเครื่องมือที่ถูกสร้างขึ้นจากการเขียน m-file เนื่องจากผู้ผลิตได้จัดเตรียม Toolbox ไว้แล้ว ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมสร้าง m-file ใหม่ให้ยุ่งยาก ผู้ใช้สามารถพัฒนา Toolbox ที่จัดเตรียมไว้ เพื่อความสะดวกสำหรับการใช้งานและด้านการประหยัดเวลา

ดังนั้นความสามารถที่เป็นประโยชน์สำหรับการใช้งานทางด้านวิศวกรรมและทางด้านวิทยาศาสตร์สามารถสรุปได้ดังนี้

\*โปรแกรมแมทแลปมีฟังก์ชันสำหรับการคำนวณทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และทางด้านวิทยาศาสตร์ที่มีประสิทธิภาพ

\*โปรแกรมแมทแลปสามารถควบคุมการทำงานด้วยชุดคำสั่ง และสามารถรวบรวมชุดคำสั่งเป็นโปรแกรมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

\*โปรแกรมแมทแลปมีลักษณะการเขียนโปรแกรมคล้ายกับการเขียนสมการทางคณิตศาสตร์ซึ่งง่ายกว่าการเขียนโปรแกรมภาษา C หรือ FORTRAN

\*โปรแกรมแมทแลปสามารถคำนวณฟังก์ชันคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนและแสดงผลในรูปแบบข้อมูลเชิงตัวเลขและแสดงผลเป็นรูปภาพกราฟฟิก ใน 2 มิติ และ 3 มิติ

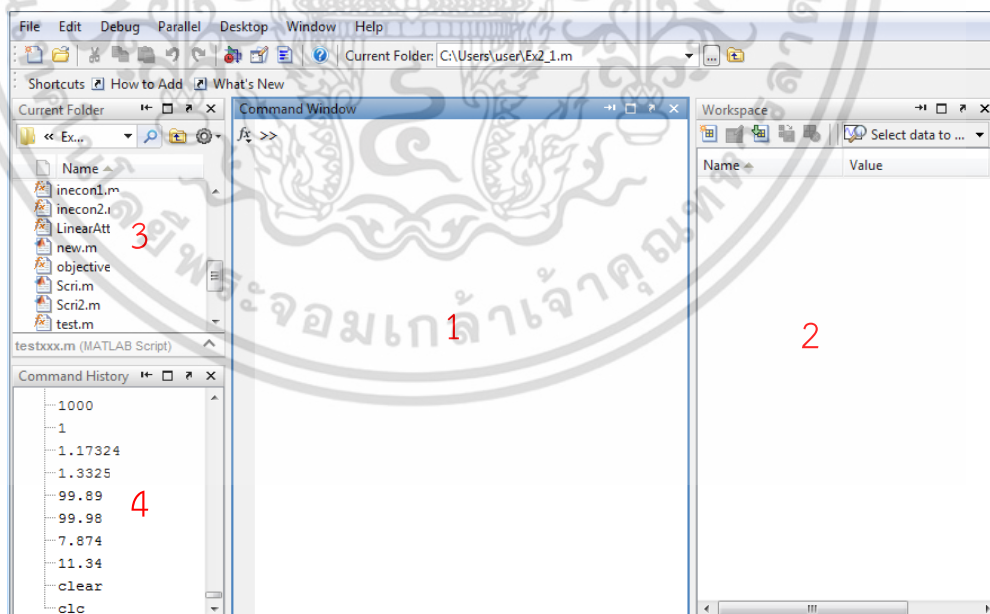
\*โปรแกรมแมทแลปมีการจัดการเครื่องมือที่ใช้คำนวณงานด้านเฉพาะทาง เรียกว่า Toolbox เพื่อความสะดวกต่อผู้ใช้โปรแกรมมากไปกว่านั้นโปรแกรม Matlab ยังสามารถทำการ Dynamic link กับโปรแกรมอื่นได้เช่น Microsoft Word และ Microsoft Excel

#### 2.4.1 หน้าต่างการทำงานของซอฟต์แวร์

หลังจากเปิดโปรแกรม MATLAB ส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญของโปรแกรมถูกแสดงดังรูป 2.10 ข้างล่างตามหมายเลขนี้ 1.หน้าต่างคำสั่ง 2.หน้าต่างพื้นที่จัดเก็บข้อมูล 3.หน้าต่างประวัติการใช้คำสั่ง 4. หน้าต่างไฟล์เดอร์

##### 2.4.1.1 หน้าต่างคำสั่ง

หน้าต่างคำสั่งทำหน้าที่ประมวลผลฟังก์ชันหรือโปรแกรมที่ได้เขียนขึ้น โดยทำการพิมพ์คำสั่งหรือฟังก์ชันใดๆหลังเครื่องหมาย >> ในหน้าต่างคำสั่ง แล้วทำการกด ENTER โปรแกรมจะทำการประมวลคำสั่งแล้วแสดงผลออกมาในรูปแบบของข้อมูลตัวเลขหรือรูปภาพกราฟิก 2 มิติ หรือ 3 มิติ ข้อมูลตัวเลขที่ป้อนเข้าไปและข้อมูลที่โปรแกรมได้ประมวลผลแล้วนั้นสามารถที่จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของตัวแปรได้ เครื่องหมายเฉพาะ ตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์และทางตรรกศาสตร์ที่ถูกใช้ในโปรแกรม MATLAB มีความสำคัญอย่างมากสำหรับการเขียนโปรแกรมและการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ซึ่งได้แสดงดังตารางที่ 2.1, 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.10 ส่วนประกอบที่สำคัญบน Matlab Desktop

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 เครื่องหมายและคุณสมบัติพิเศษ

เครื่องหมาย	คุณสมบัติ
>>	Command prompt ทำหน้าประมวลผลฟังก์ชันหรือโปรแกรมที่พิมพ์เข้าไปอยู่ในหน้าต่างคำสั่ง(Command window)
%	ทำหน้าที่สร้าง comment นั่นคือ ข้อมูลที่เป็นตัวเลขและตัวอักษรอยู่หลังสัญลักษณ์นี้จะกลายเป็น comment ทั้งหมด
;	Semicolon โปรแกรมแมทแลปไม่แสดงผลจากคำสั่งที่มีเครื่องหมาย Semicolon ตามหลัง ในหน้าต่างคำสั่ง แต่ข้อมูลยังคงปรากฏใน Work space window
,	Comma คำสั่งต่างๆ หรือ ฟังก์ชัน สามารถถูกเขียนอยู่ในบรรทัดเดียวกันได้ โดยการใช้เครื่องหมาย Comma ขึ้นอยู่ตรงกลาง
...	ทำหน้าที่สร้างความต่อเนื่องของคำสั่งในบรรทัดนั้นกับบรรทัดถัดไป

ตารางที่ 2.2 สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางคณิตศาสตร์

ตัวดำเนินการ	ความหมายของตัวดำเนินการ
+	การบวก
-	การลบ
*	การคูณ
/	การหาร
^	การยกกำลัง

#### 2.4.1.2 หน้าต่างแสดงพื้นที่ทำงาน (Workspace window)

หน้าต่างแสดงพื้นที่ทำงานทำหน้าที่บันทึกข้อมูลที่ได้หลักจากการประมวลผลในลักษณะตัวแปร ซึ่งข้อมูลทุกตัวนั้นจะถูกบันทึกอยู่ในหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ สามารถทำการตรวจสอบค่าข้อมูลได้โดยการคลิกไปที่ตัวแปรนั้นในหน้าต่างนี้หลังจากนั้นโปรแกรมจะแสดงค่าออกมาให้ทราบ

#### 2.4.1.3 หน้าต่างโฟลเดอร์ (Current folder window)

หน้าต่างโฟลเดอร์ทำหน้าที่ระบุตำแหน่งโฟลเดอร์ย่อยที่โปรแกรมแมทแลปได้ทำการประมวลผลฟังก์ชันหรือโปรแกรมที่ถูกเขียนขึ้นในโฟลเดอร์นั้นๆ ดังนั้นหากต้องการจะประมวลผลฟังก์ชันที่ถูกบันทึกอยู่ในโฟลเดอร์ย่อย ควรคลิกเลือกโฟลเดอร์ซึ่งเป็นที่อยู่ของฟังก์ชันที่ต้องการประมวลผลนั้นก่อน

#### 2.4.1.4 หน้าต่างประวัติการใช้คำสั่ง (Command history window)

หน้าต่างประวัติการใช้คำสั่งทำหน้าที่แสดงคำสั่งทั้งหมดที่ถูกประมวลผลในหน้าต่างคำสั่งตั้งแต่เริ่มใช้งานโปรแกรมจนกระทั่งปัจจุบัน สามารถย้อนดูคำสั่งต่างๆที่ผ่านมาในอดีต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ และหากต้องการใช้คำสั่งใดคำสั่งหนึ่งในหน้าต่างนี้ แค่ดับเบิ้ลคลิกที่คำสั่งนั้น โปรแกรมจะเริ่มดำเนินการทันที

## 2.4.2 การเขียนโปรแกรมของซอฟต์แวร์แมทแลป

ซอฟต์แวร์แมทแลปมีลักษณะการทำงานแบบการประมวลผลคำสั่งเป็นบรรทัดต่อบรรทัด ถ้าหากคำสั่งที่ต้องการป้อนเข้าไปเพื่อให้โปรแกรมประมวลผลมีมากกว่าหนึ่งบรรทัดหรือมากกว่านั้น สามารถเขียนคำสั่งต่างๆให้อยู่ในรูปไฟล์เพื่อความสะดวกสำหรับการแก้ไขข้อมูลและการตรวจสอบ ไฟล์ดังกล่าวสามารถถูกเรียกว่า m-file ซึ่งสร้างได้โดยการเข้าไปที่เมนู file แล้วเลือก new ก็จะสามารถเห็นหน้าต่างเขียนคำสั่งขึ้นมาใหม่นั้นคือ หน้าต่าง editor การเขียน m-file มีลักษณะการเขียน 2 แบบ คือ การเขียนไฟล์สคริป (Script-file) และ การเขียนไฟล์ฟังก์ชัน (Function-file)

### 2.4.2.1 การเขียนไฟล์สคริป

ไฟล์สคริปคือไฟล์ที่รวบรวมคำสั่งและฟังก์ชันทั้งหมดที่เขียนขึ้นไว้ด้วยกัน ผู้ใช้สามารถเรียกใช้ไฟล์สคริปโดยการพิมพ์ชื่อของไฟล์สคริปนั้นๆลงในหน้าต่างคำสั่ง หลังจากนั้น โปรแกรมจะเริ่มดำเนินการประมวลผล เช่น หากต้องการคำนวณหาความเข้มรังสีฟลักซ์ของวัสดุตะกั่ว โดยกำหนดความเข้มรังสีเริ่มต้นเท่ากับ  $20 \text{ mR/h}$  สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเท่ากับ  $0.6 \text{ cm}^{-1}$  ความหนาของวัสดุตะกั่วเท่ากับ  $4 \text{ cm}$  ไฟล์สคริปที่ถูกใช้คำนวณหาความเข้มรังสีสามารถเขียนลงในโปรแกรมแมทแลปได้ดังนี้

```
Io = 20 ; , u = 0.6 ; x = 4 ; % variables
I = Io*exp(-u*x) % The radiation function
```

หลังจากที่เขียนรายละเอียดของไฟล์สคริปเสร็จแล้ว บันทึกไฟล์ชื่อ radiation.m จากนั้นเรียกใช้ชุดคำสั่งนี้โดยการพิมพ์ชื่อไฟล์ลงในหน้าต่างคำสั่งแล้วโปรแกรมจะประมวลผลแล้วให้คำตอบดังนี้

```
>> radiation
I =
    1.8144
ans =
    1.8144
```

### 2.4.2.2 การเขียนไฟล์ฟังก์ชัน

ข้อแตกต่างระหว่างการเขียนไฟล์สคริปกับไฟล์ฟังก์ชันคือไฟล์ฟังก์ชันจะเริ่มต้นโดยการเขียน function กำกับไว้ที่บรรทัดบนสุดและ คำว่า end กำกับไว้ท้ายสุด สำหรับการเรียกใช้ฟังก์ชันนั้นจะคล้ายกับการเรียกใช้ไฟล์สคริปแต่ มีความแตกต่างที่มีการป้อนค่าให้กับตัวแปรในวงเล็บที่อยู่ถัดจากชื่อของฟังก์ชัน หากต้องการเขียนสมการการลดทอนรังสีในรูปไฟล์ฟังก์ชันภายในโปรแกรม สามารถเขียนได้ดังนี้

```
function I = radiation(x)
Io = 20 ; , u = 0.6 ;           % variables
I = Io*exp(-u*x);             % The radiation function
End
```

หลังจากเขียนไฟล์เสร็จแล้ว บันทึกไฟล์ในชื่อ radiation.m เมื่อต้องการเรียกใช้ไฟล์ฟังก์ชันให้พิมพ์ radiation แล้วพิมพ์ตามด้วยค่าตัวเลขที่อยู่ในวงเล็บลงบนหน้าต่างคำสั่งดังนี้ โปรแกรมจะประมวลผล และแสดงผลตามมา

```
>>radiation(4)
I =
    1.8144
ans =
    1.8144
```

สำหรับการเขียนไฟล์ฟังก์ชันที่มีตัวแปรอินพุตหลายตัวแปร (Multi-variable) และตัวแปรเอาต์พุตหลายตัวแปร (Multi-output) มีรูปแบบการเขียนฟังก์ชันดังนี้

```
function [I,mfp] = radiation(x,Io,u)
mfp = u*x ;           % Mean Free Path(MFP)
I = Io*exp(-u*x);    % The radiation attenuation function
End
```

ทำการเรียกใช้ฟังก์ชัน โดยการบันทึกไฟล์และพิมพ์ชื่อไฟล์ตามด้วยตัวเลข 3 ค่า ภายในวงเล็บบนหน้าต่างคำสั่ง ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลจะแสดงออกมา 2 ค่า ดังนี้

```
>> radiation(4,20,0.6)
mfp =
    2.4000
I =
    1.8144
```

### 2.4.3 คำสั่งพื้นฐานที่ใช้สำหรับการเขียนโปรแกรม

ส่วนนี้คือการแนะนำคำสั่งพื้นฐานที่สำคัญและจำเป็นสำหรับการเขียนโปรแกรม และมีการใช้งานคำสั่งดังกล่าวนี้บ่อยมากที่สุดสำหรับการสร้างไฟล์สคริปต์และไฟล์ฟังก์ชัน ได้แก่ คำสั่งการรับข้อมูลจากแป้นพิมพ์ คำสั่งการแสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล คำสั่งที่แก้ปัญหาการทำงานซับซ้อน คำสั่งแสดงข้อมูลจากเมตริกซ์ และคำสั่งนำเข้าข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel

#### 2.4.3.1 คำสั่งการรับข้อมูลจากแป้นพิมพ์

การใช้วิธีเปลี่ยนค่าตัวเลขในตัวแปรต่างๆบนไฟล์สคริปต์หรือไฟล์ฟังก์ชัน

เอกสารนี้หลายๆครั้งสำหรับการคำนวณ อาจจะส่งผลเสียด้านเวลา มีบางคำสั่งที่มีความสามารถกำหนดตัวแปรไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้จากการพิมพ์เมื่อทำการประมวลผลไฟล์ เพื่อให้ความสะดวกและลดปัญหาการแก้ไขข้อมูลในไฟล์ และยังช่วยให้ผู้ใช้กับตัวโปรแกรมมีปฏิสัมพันธ์กัน คำสั่งการรับข้อมูลจากแป้นพิมพ์ถูกจำแนกเป็น 2 ประเภท 1.คำสั่งการรับข้อมูลตัวเลขซึ่งจะใช้คำสั่งที่มีรูปแบบดังนี้ input ('.....') 2.คำสั่งการรับข้อมูลตัวหนังสือซึ่งคำสั่งมีรูปแบบดังนี้ input ('.....', 's') ภายในวงเล็บสามารถระบุเป็นข้อความบ่งบอกรายละเอียดของตัวแปรนั้นๆได้ ไฟล์สคริปการรับข้อมูลจากแป้นพิมพ์แสดงดังนี้

```
x = input('enter thickness of material(x): ');
Io = input('enter the initial intensity(Io):');
u = input('enter the attenuation coefficient(u):');
mfp = u*x ; % Mean Free Path (MFP)
I = Io*exp(-u*x); % The function of attenuation
```

ดำเนินการการประมวลผลหลังจากทำการบันทึกไฟล์แล้ว ผลลัพธ์แสดงดังนี้

```
>>radiation
enter thickness of material(x): 4
x =
    4
enter the initial intensity(Io):20
Io =
    20
enter the attenuation coefficient(u):0.6
u =
    0.6000
mfp =
    2.4000
I =
    1.8144
```

#### 2.4.3.2 คำสั่งแสดงผลจากการประมวลผล

คำสั่งที่ใช้แสดงผลมี 2 คำสั่ง 1.คำสั่ง disp ('.....') 2.คำสั่ง fprintf ('.....', ...) ทั้ง 2 คำสั่ง ใช้แสดงค่าอธิบายและค่าตัวเลข ความแตกต่างระหว่าง 2 คำสั่งนี้คือ คำสั่ง fprintf มีการแสดงข้อมูลที่มีความละเอียดสูงกว่า ตารางที่ 2.3 แสดงสัญลักษณ์ที่บ่งบอกความละเอียดของข้อมูลในรูปแบบทศนิยม

#### ตารางที่ 2.3 สัญลักษณ์ที่แสดงความละเอียดของตัวเลข

สัญลักษณ์	ความหมาย
%d	แสดงตัวแปรในรูปแบบเลขจำนวนเต็ม
%e	แสดงตัวแปรในรูปแบบ exponential notation
%f	แสดงตัวแปรในรูปแบบทศนิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำสั่ง `disp('...')` และ คำสั่ง `fprintf('.....', ....)` สามารถเขียนลงไฟล์สคริปต์ได้ดังนี้

```
x = input('enter thickness of material(x): ');
Io = input('enter the initial intensity(Io): ');
u = input('enter the attenuation coefficient(u): ');

mfp = u*x ;           % Mean Free Path(MFP)
I = Io*exp(-u*x);    % The attenuation radiation function

disp('')
disp('Mean Free Path :')
disp(mfp)
disp('')
disp('The shield dose rate(mR) :')
disp(I)
fprintf('\n')
fprintf('Mean Free Path is %.6f \n',mfp)
fprintf('The shield dose rate is %.6f (mR)\n',I)
```

หลังจากทำการบันทึกไฟล์แล้วผลจากการประมวลผลถูกแสดงคำตอบดังนี้







```
>>radiation
enter thickness of material(x): 4
x =
    4
enter the initial intensity(Io):20
Io =
    20
enter the attenuation coefficient(u):0.6
u =
    0.6000
Mean Free Path :
    2.4000
The shield dose rate(mR) :
    1.8144
Mean Free Path is 2.400000
The shield dose rate is 1.814359 (mR)
```

#### 2.4.3.3 คำสั่งที่ใช้แก้ปัญหาการทำงานที่ซับซ้อน

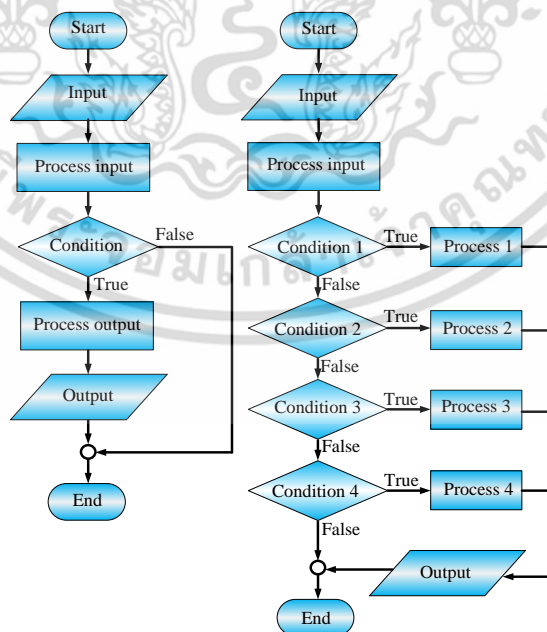
โปรแกรมเมทแลปลูกสร้างและพัฒนาขึ้นมาโดยวิธีการเขียนโปรแกรมภาษา C และ FORTRAN ลักษณะการทำงานของโปรแกรมมีการประมวลผลข้อมูลที่ละบรรทัด รูปแบบการประมวลผลนี้จึงไม่สามารถแก้ไขปัญหาการทำงานที่มีความซับซ้อนได้ ดังนั้นโปรแกรมจึงมีคำสั่งแก้ปัญหาการทำงานซับซ้อน 2 คำสั่ง ได้แก่ คำสั่งแบบมีเงื่อนไข และ คำสั่งแบบการทำซ้ำ ขั้นตอนการทำงานของคำสั่ง 2 คำสั่งนี้ จะถูกแสดงด้วยแผนภาพ flow chart ซึ่งสัญลักษณ์ต่างๆที่ถูกใช้เขียนแสดงดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 สัญลักษณ์ในการเขียนแผนผังโปรแกรม หรือ flowchart

สัญลักษณ์	ชื่อ	คำอธิบาย
	เทอร์มินัล	แสดงจุดเริ่มต้นและจุดจบของการทำงาน
	การนำเข้า/แสดงผล	แสดงการอ่านข้อมูลหรือแสดงผลลัพธ์จากการประมวลผล
	กระบวนการ	แสดงคำสั่งสำหรับการประมวลผล หรือ การกำหนดข้อมูลให้กับตัวแปร
	การตัดสินใจ	การตรวจสอบเงื่อนไขเพื่อตัดสินใจว่าเป็นจริงหรือเท็จ
	จุดเชื่อมต่อ	แสดงจุดเชื่อมต่อที่เกิดจากทิศทางการทำงานของโปรแกรมหลายทิศทางมาบรรจบกัน
	ลูกศร	แสดงทิศทางการทำงานของโปรแกรม

ลักษณะการทำงานของคำสั่งแบบมีเงื่อนไขนี้ มีการทำงานโดยการตัดสินใจภายใต้เงื่อนไขที่ถูกกำหนด หากข้อมูลเป็นจริงตามเงื่อนไข โปรแกรมจะเริ่มดำเนินการคำสั่งที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขต่อไป หากข้อมูลเป็นเท็จโปรแกรมจะหยุดประมวลผล แสดงขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2.10 ทางด้านซ้าย แต่ถ้าหากเงื่อนไขการคำนวณมีมากกว่า 1 เงื่อนไข การทำงานของคำสั่งจะมีความซับซ้อนขึ้นไปอีก แสดงการทำงานดังรูปที่ 2.11 ทางด้านขวา



รูปที่ 2.11 แผนภาพการทำงานคำสั่งแบบมีเงื่อนไขเดียว (ซ้าย)

แผนภาพการทำงานคำสั่งแบบมีหลายเงื่อนไข (ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับคำสั่งแบบมีเงื่อนไขเดียวและหลายเงื่อนไขแสดงดังรูปที่ 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ สัญลักษณ์ที่ใช้กำหนดเงื่อนไขคือตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์ซึ่งถูกเขียนอยู่ในบรรทัดเดียวกับกับ if ถัดจากนั้นคือคำสั่งที่ถูกเขียนภายใต้เงื่อนไข สัญลักษณ์ทางตรรกศาสตร์แสดงดังตาราง 2.5

if	เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินใจ
	คำสั่งที่จะดำเนินการเมื่อเงื่อนไขที่พิจารณา
	เป็นจริง

รูปที่ 2.12 รูปแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับเงื่อนไขเดียว

if	เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินใจ 1
	คำสั่งที่จะดำเนินการเมื่อเงื่อนไข 1 ที่พิจารณาเป็นจริง
elseif	เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินใจ 2
	คำสั่งที่จะดำเนินการเมื่อเงื่อนไข 2 ที่พิจารณาเป็นจริง
elseif	เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินใจ 3
	คำสั่งที่จะดำเนินการเมื่อเงื่อนไข 3 ที่พิจารณาเป็นจริง
	....
Else	เงื่อนไขที่ใช้ตัดสินใจ
	คำสั่งที่จะดำเนินการเมื่อเงื่อนไขที่พิจารณาเป็นจริง
end	

รูปที่ 2.13 รูปแบบการเขียนโปรแกรมสำหรับหลายเงื่อนไข

ตารางที่ 2.5 สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์

ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์	ความหมายของตัวดำเนินการ
<	น้อยกว่า
>	มากกว่า
<=	น้อยกว่าหรือเท่ากับ
>=	มากกว่าหรือเท่ากับ
==	เท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.5 (ต่อ) สัญลักษณ์ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์

ตัวดำเนินการทางตรรกศาสตร์	ความหมายของตัวดำเนินการ
&	และ
	หรือ
~=	ไม่เท่ากับ

สำหรับตัวอย่างการใช้คำสั่งแบบมีเงื่อนไข ต้องการคำนวณเกรดของเด็กนักเรียน 5 คน ที่ได้ 84, 76, 68, 61, 48 คะแนน ตามลำดับ มีเกณฑ์การให้เกรดดังนี้

Grade A	: $80 \leq \text{score} \leq 100$	Grade C	: $60 \leq \text{score} \leq 65$
Grade B+	: $75 \leq \text{score} \leq 80$	Grade D+	: $55 \leq \text{score} \leq 60$
Grade B	: $70 \leq \text{score} \leq 75$	Grade D	: $50 \leq \text{score} \leq 55$
Grade C+	: $65 \leq \text{score} \leq 70$	Grade F	: $\text{score} < 50$

ไฟล์ฟังก์ชันชื่อ Grade.m สามารถเขียนได้ดังนี้

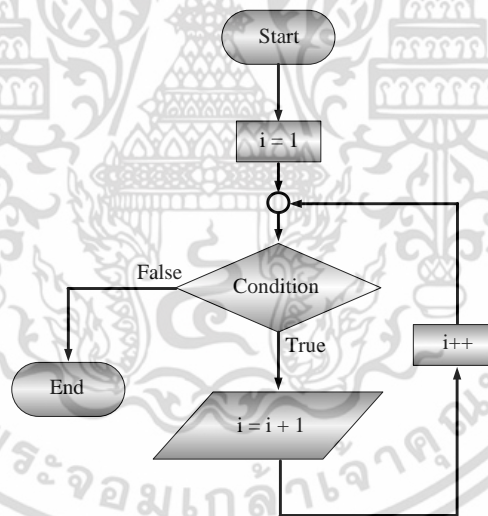
```
function y = Grade(x)
    if x >= 80 & x <= 100
        disp('grad A')
    elseif x >= 75 & x <= 80
        disp('grad B+')
    elseif x >= 70 & x <= 75
        disp('grad B')
    elseif x >= 65 & x <= 70
        disp('grad C+')
    elseif x >= 60 & x <= 65
        disp('grad C')
    elseif x >= 55 & x <= 60
        disp('grad D+')
    elseif x >= 50 & x <= 55
        disp('grad D')
    else x < 50
        disp('grad F')
    end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มคำนวณเกรดโดยพิมพ์ชื่อไฟล์ตามด้วยคะแนนลงในวงเล็บบนหน้าต่างคำสั่ง ได้ผลลัพธ์ดังนี้

```
>>Grade (84)
grad A
>> Grade (76)
grad B+
>> Grade (68)
grad C+
>> Grade (61)
grad C
>> Grade (48)
grad F
```

ถัดมาคำสั่งแบบการทำซ้ำจะมีการกำหนดค่าตัวเลขเริ่มต้น ค่าตัวเลขการเปลี่ยนแปลง และค่าตัวเลขสิ้นสุดลักษณะการทำงานของคำสั่งนี้คือ โปรแกรมจะมีการประมวลผลแบบวนลูป ตั้งแต่ค่าเริ่มต้น และค่าตัวเลขที่มีการเปลี่ยนแปลงเรื่อยๆจนกระทั่งถึงค่าสิ้นสุด นั่นก็คือส่งผลให้เงื่อนไขยังคงเป็นจริง โปรแกรมจะหยุดการทำงานแบบวนลูปก็ต่อเมื่อค่าตัวเลขที่กำลังรันอยู่เกินค่าตัวเลขสิ้นสุด ส่งผลให้เงื่อนไขเป็นเท็จ ขั้นตอนการทำงานแสดงดังรูป 2.14 รูปแบบการเขียนโปรแกรมแสดงรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.14 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของคำสั่งวนลูป

```
for   ดรชนี = ค่าเริ่มต้น : ค่าเปลี่ยนแปลง : ค่าสิ้นสุด
      คำสั่งที่จะดำเนินการให้ดำเนินการซ้ำ
end
```

รูปที่ 2.15 กล่องข้อความการเขียนโปรแกรมสำหรับคำสั่งวนลูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวอย่างหากต้องการหาคำตอบจากสมการดังข้างล่าง

$$y = \sum_{n=1}^4 [(n) * (n + 1) * (n + 2) * (n + 3) * (n + 4)]$$

เขียนไฟล์สคริปเพื่อคำนวณหาคำตอบดังนี้ บันทึกไฟล์ชื่อ untitled.m

```
y = 0 ;
for n = 1:4
    y = n*(n+1)*(n+2)*(n+3)*(n+4) + y ;
    ans = y
end
```

คำตอบสุทธิที่ได้จากการประมวลผลบนหน้าต่างคำสั่ง คือ 10080 ส่วน 3 ค่าแรกไม่ใช่คำตอบซึ่งเป็นข้อมูลตัวเลขที่ได้จากการวนลูปที่ยังไม่ใช่ค่าสุทธิถูกแสดงดังต่อไปนี้

```
>> Untitled
ans =
    120
ans =
    840
ans =
   3360
ans =
  10080
```

#### 2.4.3.4 คำสั่งการแสดงผลข้อมูลในเมตริกซ์

คำสั่งที่ใช้แสดงค่าสมาชิกบางตัวภายในเมตริกซ์ คือ คำสั่ง A(m, n) ซึ่ง m คือ ตำแหน่งแถว และ n คือ ตำแหน่งหลัก และ A คือ เมตริกซ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรม ทำการกำหนดเมตริกซ์ A ลงบนหน้าต่างคำสั่ง

```
>>A = [1 2 3; 4 5 6; 7 8 9]
A =
     1     2     3
     4     5     6
     7     8     9
```

สามารถหาสมาชิกของเมตริกซ์ A ที่อยู่ในแถวที่ 3 หลักที่ 2 โดยการพิมพ์คำสั่ง A(3, 2) บนหน้าต่างคำสั่ง ผลลัพธ์จากการประมวลผลแสดงดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

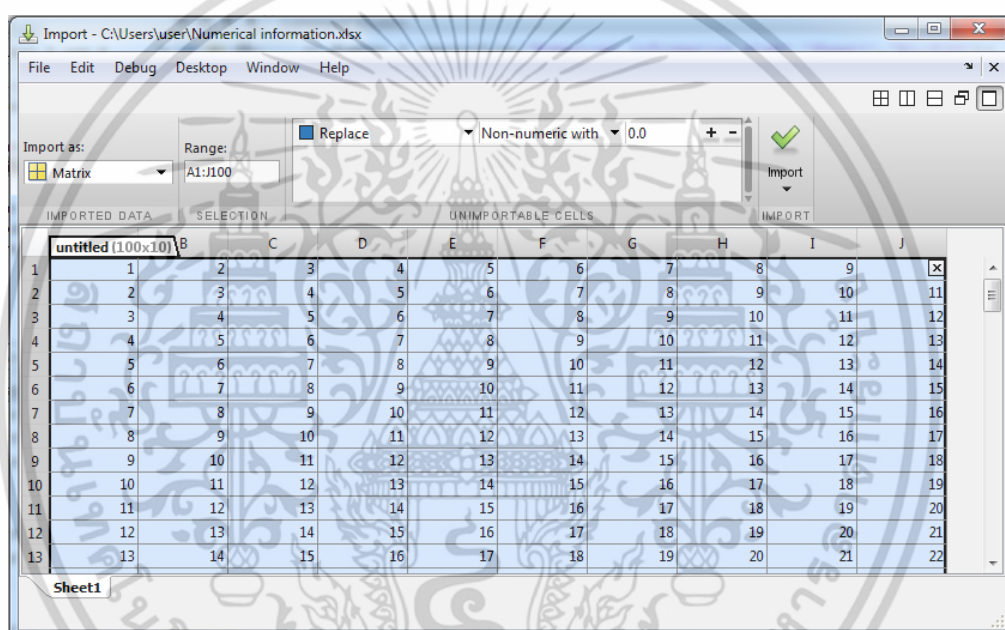
```
>> A(3,2)
ans =
```

8

### 2.4.3.5 คำสั่งนำเข้าข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft Excel

โปรแกรมแมทแลปมีความสามารถลิงค์เข้ากับโปรแกรมอื่นๆ ได้แก่ โปรแกรม Microsoft word และ Microsoft excel สำหรับกรณีที่ต้องการนำข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft excel เข้ามาในโปรแกรมแมทแลปเพื่อวัตถุประสงค์สำหรับการคำนวณ หรือ การเก็บข้อมูลนั้น มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1.เปิดโปรแกรมแมทแลปและเลือกเมนูไฟล์ที่อยู่แถบด้านบน จากนั้นเลือกหัวข้อ Import Data... หน้าต่างดังรูป 2.16 ข้างล่าง ก็จะปรากฏ และเลือกไฟล์ที่จะนำเข้าโปรแกรมแมทแลป



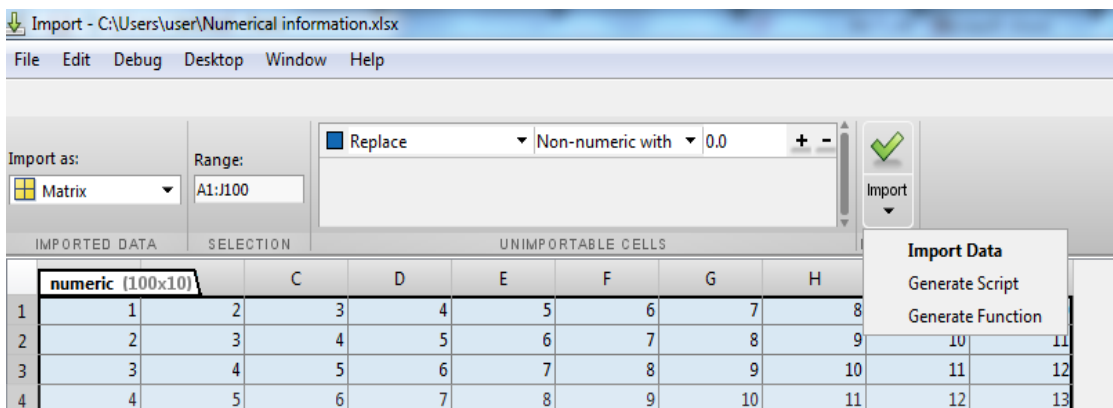
รูปที่ 2.16 หน้าต่างการนำเข้าข้อมูล

2.เลือกรูปแบบข้อมูลที่จําหน่ายในช่อง Import as: และ ขอบเขตของข้อมูลในช่อง Range: จากรูปด้านบน ช่อง Import as: เลือกแบบ Matrix และช่อง Range: เลือกช่วง A1:J100 ตั้งชื่อเป็น numeric

3.นำเข้าข้อมูลจากโปรแกรม Microsoft excel เข้ามาโปรแกรมแมทแลปโดยการคลิกคำว่า Import ที่มีเครื่องหมายสีเขียวอยู่ด้านบนดังรูปที่ 2.17 จากนั้นจะมีตัวเลือกการแสดงผลข้อมูล 3 ลักษณะขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้

- Import Data คือ การนำข้อมูลจากโปรแกรมอื่นเข้ามาและแสดงผลโดยตรง
- General Script คือ การนำข้อมูลเข้าและสร้างเป็นไฟล์สคริปเพื่อเรียกใช้งาน
- General Function คือ การนำข้อมูลเข้าและสร้างเป็นไฟล์ฟังก์ชันเพื่อเรียกใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ลักษณะการนำเข้าข้อมูล

สำหรับการนำเข้าข้อมูลและสร้างเป็นไฟล์ฟังก์ชันเพื่อใช้งานนั้น หลังจากที่เราเลือกลักษณะ General Function หน้าต่าง m-file แบบไฟล์ฟังก์ชันจะปรากฏขึ้น ไฟล์ฟังก์ชันต้องถูกบันทึกอยู่ในโฟลเดอร์เดียวกันกับไฟล์จากโปรแกรม Microsoft excel ที่ต้องการนำเข้าข้อมูล มิฉะนั้นการเรียกใช้ไฟล์นี้ในโปรแกรมแมทแลบจะเกิดความผิดพลาดซึ่งไม่สามารถแสดงผลลัพธ์ได้

4. เรียกใช้ฟังก์ชันดังรูปโดยการคัดลอกคำสั่งเรียกใช้ฟังก์ชันใต้บรรทัดที่เขียนว่า example ที่ถูกรอด้วยกรอบสีน้ำเงินอยู่ในไฟล์ฟังก์ชันดังรูปที่ 2.18 ลงในหน้าต่างคำสั่ง โปรแกรมจะทำการประมวลผลและผลลัพธ์จัดเก็บอยู่ในหน้าต่างพื้นที่การใช้งาน

```
function data = importfile(workbookFile, sheetName, range)
%IMPORTFILE Import numeric data from a spreadsheet
% DATA = IMPORTFILE(FILE) reads all numeric data from the first worksheet
% in the Microsoft Excel spreadsheet file named FILE and returns the
% numeric data.
% DATA = IMPORTFILE(FILE,SHEET) reads from the specified worksheet.
% DATA = IMPORTFILE(FILE,SHEET,RANGE) reads from the specified worksheet
% and from the specified RANGE. Specify RANGE using the syntax
% 'C1:C2', where C1 and C2 are opposing corners of the region.
% Non-numeric cells are replaced with: 0.0
%
% Example:
% numeric = importfile('Numerical information.xlsx','Sheet1','A1:J100');
```

รูปที่ 2.18 คำสั่งการนำเข้าข้อมูล

## 2.5 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยแมทแลบ

การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือการหาค่าคอบที่เหมาะสมจากปัญหาที่ถูกกำหนดในรูปฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ซึ่งในอดีตวิธีการหาค่าที่เหมาะสมนั้นมีความซับซ้อนอย่างมากและมีการใช้งานอยู่เพียงไม่กี่วิธีได้แก่ วิธีการ Least square เป็นวิธีที่ถูกนำมาใช้แก้ปัญหาทางฟิสิกส์และวิธีการ Newton method เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากและถูกนำมาใช้แก้ปัญหาทางด้านเคมี ดังนั้นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมจึงถูกปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้สอดคล้องกับปัญหาทางคณิตศาสตร์โดยนักวิทยาศาสตร์ไม่เว้นแต่ทุกวันนี้ อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แก่ วิธีกำหนดการเชิงเส้น (Linear programming) และวิธีกำหนดการแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear programming) และวิธีการอื่นๆอีกมากมาย

นอกจากงานทางด้านวิทยาศาสตร์แล้ว การออปติไมเซชันยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในศาสตร์อื่นๆ อีกมากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ด้านสาขาวิชาเศรษฐศาสตร์มีการนำการออปติไมเซชันมาประยุกต์ใช้ในเรื่องการเงินการลงทุนและผลกำไร เช่น การผลิตสินค้าให้ได้ผลกำไรสูงสุดโดยการใช้ต้นทุนต่ำที่สุด เป็นต้น และสาขาทางด้านการบินและยานอวกาศ ยังนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้งานอีกด้วย เช่น การออกแบบยานอวกาศให้มีมวลน้อยที่สุดใช้ต้นทุนการสร้างต่ำที่สุด การคำนวณหาเส้นทางการบินของยานอวกาศระหว่างดาวเคราะห์ให้เชื้อเพลิงน้อยที่สุด เป็นต้น

### 2.5.1 การจัดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน

การจัดรูปแบบทางคณิตศาสตร์ซึ่งถูกแสดงดังสมการที่ (2.44) – (2.47) ถูกดำเนินการก่อนการแก้ปัญหาออปติไมเซชัน องค์ประกอบของการจัดรูปแบบประกอบด้วย 5 ส่วน ตัวแปรของฟังก์ชัน (Variable) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function) ฟังก์ชันข้อจำกัด (Constraint function) ข้อจำกัดของตัวแปร (Constraint variable)

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.44)$$

$$\text{Subject to: } h_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, l \quad (2.45)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, l \quad (2.46)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.47)$$

ตัวแปรของฟังก์ชัน

ตัวแปรคือตัวแปรที่เป็นคำตอบของปัญหาการออปติไมเซชัน ซึ่งตัวแปรนี้ปรากฏในรูปแบบ  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  ภายในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และจะถูกกำหนดเพื่ออธิบายระบบของปัญหาทางด้านวิศวกรรมได้อย่างชัดเจน เช่น ความหนา ความยาว น้ำหนัก จำนวนพืนเฟืองของเกียร์ เป็นต้น

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือฟังก์ชันปัญหาของระบบที่ต้องการหาจุดสูงสุดและจุดต่ำสุดและมีตัวแปรเป็นส่วนประกอบของฟังก์ชัน แสดงดังสมการที่ (2.47) ในการจัดรูปแบบทางคณิตศาสตร์ ตัวแปร  $x$  ที่อยู่ในสมการคือตัวแปรออกแบบซึ่งสามารถมีได้มากกว่า 1 ตัวแปร จนถึง  $n$  ตัวแปร โดยปกติปัญหาส่วนใหญ่ที่ถูกกำหนดขึ้นในชีวิตประจำวันจะเป็นปัญหาค่าต่ำที่สุดมากกว่าปัญหาค่าสูงสุด

ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัดคือฟังก์ชันกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของปัญหาการออปติไมเซชัน ฟังก์ชันนี้จะมีความสัมพันธ์กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยตรง ดังนั้นการหาคำตอบจากการออปติไมเซชันขึ้นอยู่กับขอบเขตเงื่อนไขของฟังก์ชันข้อจำกัด หากเงื่อนไขมีการเปลี่ยนแปลงคำตอบจะมีการเปลี่ยนแปลงตามด้วย ฟังก์ชันข้อจำกัดสามารถจำแนกเป็น 2 ประเภท ฟังก์ชันข้อจำกัดมีขอบเขตแบบเท่าเทียม (Equality constraint function) ซึ่งมีตัวดำเนินการหรือเครื่องหมายเท่ากับ (=) ในฟังก์ชันดังสมการที่ (2.48) และฟังก์ชันข้อจำกัดมีขอบเขตแบบไม่เท่าเทียม (Inequality constraint function) ซึ่งมีตัวดำเนินการหรือเครื่องหมายน้อยกว่าเท่ากับ ( $\leq$ ) อยู่ในฟังก์ชันดังสมการที่ (2.49)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดของตัวแปร

ข้อจำกัดตัวแปรแสดงดังสมการ (2.50) อยู่ในรูปแบบมาตรฐานทางด้านบนซึ่งเป็นการกำหนดเงื่อนไขของตัวแปรรูปแบบหนึ่งเพื่อให้คำตอบของการออปติไมเซชันอยู่ในช่วงขอบเขตที่กำหนด เช่น ความหนาของวัสดุเริ่มต้นที่บางที่สุดและหนาที่สุดซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมสามารถผลิตขึ้นได้

### 2.5.2 ธรรมชาติของคำตอบจากการออปติไมเซชัน

โดยตามปกติวิธีการหาคำตอบจากการออปติไมเซชันแบบมีข้อจำกัดของฟังก์ชัน 2 ตัวแปรอย่างง่ายที่สุดคือการหาจุดที่ตัดกันของฟังก์ชันข้อจำกัดหลายๆฟังก์ชันกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยการพล็อตกราฟคอนทัวร์ซึ่งเป็นกราฟลोटกราฟแบบ 2 มิติแปลงมาจากกราฟลोटกราฟพื้นผิว 3 มิติ ยกตัวอย่างเช่น การหาค่าที่น้อยที่สุดของปัญหาการออปติไมเซชันแบบมีข้อจำกัดถูกกำหนดขึ้นดังสมการที่ (2.48) – (2.53) และรูปที่ 2.18

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ต้องการหาค่าน้อยที่สุดเมื่อทำการแทนตัวแปรลงในฟังก์ชันนี้ ดังสมการที่ (2.48) ฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่าเทียม  $h_1(x_1, x_2)$  และ  $h_2(x_1, x_2)$  ถูกแสดงดังสมการที่ (2.49) – (2.50) ตามลำดับ ฟังก์ชันข้อจำกัดแบบไม่เท่าเทียม  $g_1(x_1, x_2)$  และ  $g_2(x_1, x_2)$  แสดงดังสมการที่ (2.51) – (2.52) ตามลำดับ และสุดท้ายข้อจำกัดของตัวแปร  $x_1, x_2$  แสดงดังสมการที่ (2.53)

$$\text{Minimize } f(x_1, x_2) = (x_1 - 3)^2 + (x_2 - 2)^2 \quad (2.48)$$

$$\text{Subject to: } h_1(x_1, x_2) : 2x_1 + x_2 = 8 \quad (2.49)$$

$$h_2(x_1, x_2) : (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 4)^2 = 4 \quad (2.50)$$

$$g_1(x_1, x_2) : x_1 + x_2 \leq 7 \quad (2.51)$$

$$g_2(x_1, x_2) : x_1 - 0.25x_2^2 \leq 0 \quad (2.52)$$

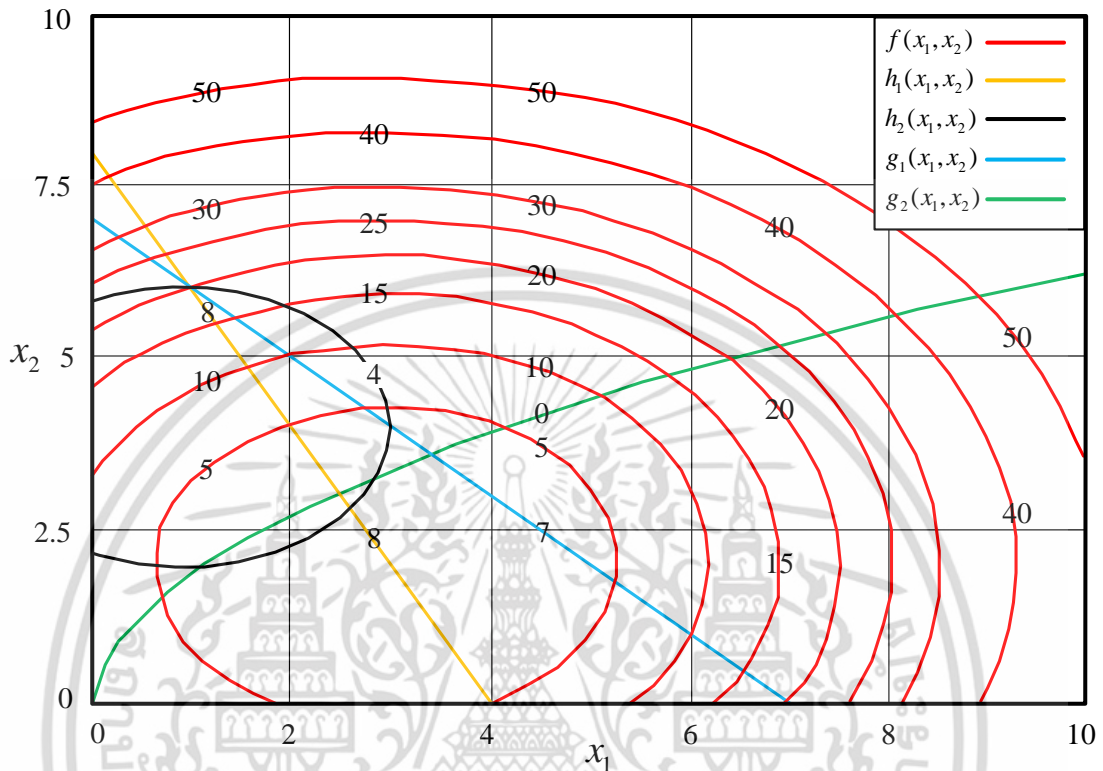
$$0 \leq x_1 \leq 15; \quad 0 \leq x_2 \leq 15; \quad (2.53)$$

สมการที่ (2.48) – (2.53) ถูกพล็อตกราฟคอนทัวร์เพื่อทราบจุดตัดกันของเส้นกราฟหรือคำตอบของปัญหาการออปติไมเซชัน ดังรูปที่ 2.19 ซึ่งประกอบด้วยเส้นกราฟของฟังก์ชันทั้ง 5 ฟังก์ชัน 1.  $f(x_1, x_2) = 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์เส้นสีแดง 2.  $h_1(x_1, x_2) = 8$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่าเทียมเส้นสีเหลือง 3.  $h_2(x_1, x_2) = 4$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่าเทียมเส้นสีดำ 4.  $g_1(x_1, x_2) \leq 7$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันข้อจำกัดแบบไม่เท่าเทียมเส้นสีฟ้า 5.  $g_2(x_1, x_2) \leq 0$  ซึ่งเป็นข้อจำกัดแบบไม่เท่าเทียมเส้นสีเขียว สังเกตเห็นว่าจุดที่เกิดจากการตัดกันของเส้นกราฟมีมากมายหลายจุด ตามความเป็นจริงคำตอบของการออปติไมเซชันหรือจุดตัดมีได้เพียงแค่จุดเดียว ดังนั้นตัวดำเนินการ ( $=, \leq$ ) ที่อยู่ในฟังก์ชันข้อจำกัดเป็นตัวกำหนดขอบเขตภาคพื้นบนพื้นที่กราฟ ดังนั้นคำตอบจะต้องอยู่บนเส้น  $h_1(x_1, x_2), h_2(x_1, x_2)$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันข้อจำกัดแบบเท่าเทียมและอยู่ในภาคพื้นเหนือหรือตรงเส้น  $g_2(x_1, x_2)$  ซึ่งเมื่อนำพิกัดที่อยู่บริเวณภาคพื้นเหนือเส้น  $g_2(x_1, x_2)$  นี้แทนในสมการที่ (2.55) แล้วต้องมีค่าน้อยกว่าศูนย์ตามเงื่อนไข สุดท้ายเมื่อพิจารณาเส้น  $g_1(x_1, x_2)$  คำตอบต้องอยู่ใต้หรือตรงเส้น  $g_1(x_1, x_2)$  ซึ่งเมื่อนำพิกัดที่อยู่บริเวณภาคพื้นใต้เส้น  $g_1(x_1, x_2)$  นี้แทนในสมการที่ (2.54) แล้วต้องมีค่าน้อยกว่าเจ็ดตามเงื่อนไข จากการพิจารณาดังกล่าวนี้ทราบว่าภาคพื้นทีที่คำตอบอยู่บนกราฟก็คือภาคพื้นที่เกิดจากการตัดกันระหว่างพื้นที่ใต้เส้น  $g_1(x_1, x_2)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และพื้นที่เหนือเส้น  $g_2(x_1, x_2)$  ดังนั้นคำตอบอยู่ที่จุด  $x_1 = 1, x_2 = 6$  ซึ่งเป็นจุดที่ตรงตามขอบเขตเงื่อนไขของฟังก์ชันข้อจำกัดทุกฟังก์ชัน ค่าที่น้อยที่สุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากปัญหาการออปติไมเซชันคือ 20 ซึ่งเป็นค่าที่ติดกับจุดพิกัด (1,6)



รูปที่ 2.19 คำตอบจากการออปติไมเซชันด้วยการแสดงภาพกราฟฟิก

### 2.5.3 เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด

การพล็อตกราฟหาคำตอบจากการออปติไมเซชันด้วยการพล็อตกราฟคอนทัวร์จากรูปแบบทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.51) – (2.56) มี 3 ขั้นตอน ดังนี้ 1.การสร้างข้อมูลเมทริกซ์สำหรับการพล็อตกราฟ 2.การสร้างฟังก์ชันสำหรับการพล็อตกราฟ 3.การสร้างเส้นกราฟแบบคอนทัวร์

#### 2.5.3.1 การสร้างข้อมูลเมทริกซ์สำหรับการพล็อตกราฟ

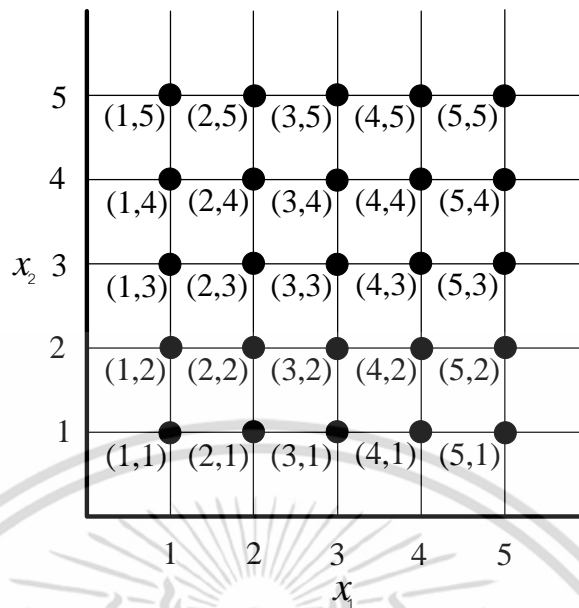
คำสั่งที่ใช้สำหรับขั้นตอนนี้คือ meshgrid ซึ่งมีรูปแบบการเขียนคำสั่งลงในโปรแกรมแมทแลปดังสมการที่ (2.54) เป็นคำสั่งที่ใช้สร้างข้อมูลคู่อันดับเรียงกันแบบเมทริกซ์ด้วยการกำหนดข้อมูล  $x_1, x_2$  ซึ่งเป็นเวกเตอร์ถูกกำหนดค่าเริ่มต้นที่ 0 ไปจนถึง 10 ซึ่งค่าเพิ่มขึ้นทีละ 0.1 ดังสมการที่ (2.55), (2.56) ข้อมูลแต่ละตัวของค่า  $x_1, x_2$  จะตัดกันกลายเป็นคู่อันดับเมทริกซ์ [X1, X2] ซึ่งคือจุดกลมสีดำดังรูปที่ 2.20

$$[X1, X2] = \text{meshgrid}(x_1, x_2); \quad (2.54)$$

$$x_1 = 0 : 0.1 : 10 \quad (2.55)$$

$$x_2 = 0 : 0.1 : 10 \quad (2.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 คู่อันดับเมทริกซ์จากการใช้คำสั่ง meshgrid

### 2.5.3.2 การสร้างฟังก์ชันสำหรับการพล็อตกราฟ

ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2.48) – (2.52) ถูกสร้างขึ้นโดยการเขียนไฟล์ฟังก์ชันภายในโปรแกรมแมทแล็บ มีลักษณะการเขียนดังรูปที่ (2.21) – (2.25) ตามลำดับ ไฟล์ฟังก์ชันแต่ละไฟล์สามารถถูกเรียกใช้โดยมีรูปแบบการเขียนดังสมการที่ (2.57) – (2.61) ซึ่งตัวแปรที่อยู่ในวงเล็บคือข้อมูลคู่อันดับเมทริกซ์

```
function f1 = obj_function(X1, X2)
    f1 = (X1 - 3)^2 + (X2 - 2)^2;
end
```

รูปที่ 2.21 การเขียนไฟล์ฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$

$$f1 = \text{obj\_function}(X1, X2); \quad (2.57)$$

```
function eq1 = eqcon1_function(X1, X2)
    eq1 = 2*X1 + X2;
end
```

รูปที่ 2.22 การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด  $h_1(x_1, x_2)$

$$eq1 = \text{eqcon1\_function}(X1, X2); \quad (2.58)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
function eq2 = eqcon2_function(X1, X2)
    eq2 = ( X1 - 1 )^2 + ( X2 - 4 )^2 ;
end
```

รูปที่ 2.23 การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด  $h_2(x_1, x_2)$ 

$$\text{eq2} = \text{eqcon2\_function}(\text{X1}, \text{X2}); \quad (2.59)$$

```
function ineq1 = ineqcon1_function(X1, X2)
    ineq1 = X1 + X2 ;
end
```

รูปที่ 2.24 การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด  $g_1(x_1, x_2)$ 

$$\text{ineq1} = \text{ineqcon1\_function}(\text{X1}, \text{X2}); \quad (2.60)$$

```
function ineq2 = ineqcon2_function(X1, X2)
    ineq2 = X1 - 0.25*X2^2 ;
end
```

รูปที่ 2.25 การเขียนไฟล์ฟังก์ชันข้อจำกัด  $g_2(x_1, x_2)$ 

$$\text{ineq2} = \text{ineqcon2\_function}(\text{X1}, \text{X2}); \quad (2.61)$$

### 2.5.3.3 การสร้างเส้นกราฟโดยการพล็อตแบบคอนทัวร์

การสร้างเส้นกราฟเป็นส่วนสุดท้ายหลังจากการกำหนดคู่อันดับเมทริกซ์และการสร้างไฟล์ฟังก์ชัน เส้นกราฟของสมการที่ (2.51) – (2.55) ซึ่งถูกสร้างด้วยคำสั่งจากโปรแกรมแมทแลบถูกแสดงดังรูป 2.26 ถึงรูปที่ 2.31 ซึ่งที่บรรทัดแรกของแต่ละรูปคือคำสั่งวาดเส้นกราฟ บรรทัดที่สองคำสั่งแสดงค่าฟังก์ชันบนเส้นกราฟ บรรทัดที่สามคือคำสั่งปรับความหนาของเส้นกราฟ ส่วนเติมเต็มของภาคแสดงถูกแสดงดังรูปที่ 2.31 ซึ่งบรรทัดแรกและบรรทัดที่สองคือคำสั่งกำหนดขอบบนแนวแกนนอนและแกนตั้ง บรรทัดที่สามและบรรทัดที่สี่คือคำสั่งระบุช่วงข้อมูลบนแนวแกนนอนและแกนตั้งตามลำดับ บรรทัดที่ห้าคือคำสั่งกำหนดเส้นกริดบนภาพกราฟฟิก

```
[c1, h1] = contour(x1, x2, ineq1, [7, 7], 'b') ;
Clabel(c1, h1) ;
set(h1, 'LineWidth', 2) ;
```

รูปที่ 2.26 การพล็อตกราฟของ  $g_1(x_1, x_2)$  ที่ค่า 7

```
[c2, h2] = contour(x1, x2, ineq2, [0, 0], 'g') ;
Clabel(c2, h2) ;
set(h2, 'LineWidth', 2) ;
```

รูปที่ 2.27 การพล็อตกราฟของ  $g_2(x_1, x_2)$  ที่ค่า 0

```
[c3, h3] = contour(x1, x2, eq1, [8, 8], 'y') ;
Clabel(c3, h3) ;
set(h3, 'LineWidth', 2) ;
```

รูปที่ 2.28 การพล็อตกราฟของ  $h_1(x_1, x_2)$  ที่ค่า 8

```
[c4, h4] = contour(x1, x2, eq2, [4, 4], 'k') ;
Clabel(c4, h4) ;
set(h4, 'LineWidth', 2) ;
```

รูปที่ 2.29 การพล็อตกราฟของ  $h_2(x_1, x_2)$  ที่ค่า 4

```
[c, h] = contour(x1, x2, f1, [5 10 15 20 25 30 40 50], 'r') ;
Clabel(c, h) ;
set(h1, 'LineWidth', 1) ;
```

รูปที่ 2.30 การพล็อตกราฟของ  $f(x_1, x_2)$  ที่ค่า 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50

```
xlabel('x1 values', 'FontName', 'times', 'FontSize', '12', 'FontWeight', 'bold') ;
ylabel('x2 values', 'FontName', 'times', 'FontSize', '12', 'FontWeight', 'bold') ;
set(gca, 'xtick', [0 2 4 6 8 10])
set(gca, 'ytick', [0 2.5 5.0 7.5 10])
grid
```

รูปที่ 2.31 ส่วนเติมเต็มของภาคแสดง

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและศึกษาซึ่งเกี่ยวข้องกับการหาความหนาตะกั่วและเหล็กที่เหมาะสมของภาชนะเพื่อเก็บกากกัมมันตรังสีด้วยซอฟต์แวร์แมทแลปเพื่อนำไปสนับสนุนการประมวลผลของแบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โล ยกตัวอย่างเช่น

Hai *et al.* [2] ใช้แบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โลเพื่อสร้างห้องฉายรังสีแกมมาเป็นสามมิติและคำนวณความเข้มรังสีแกมมาที่ออกจากห้องฉายรังสีที่ตำแหน่งต่างๆของห้องฉายรังสีและตามทางเดินที่อยู่ติดกับห้องฉายรังสีสำหรับการประเมินความปลอดภัยด้านรังสีของคนไข้และผู้ปฏิบัติงานภายในโรงพยาบาล อย่างไรก็ตามแบบจำลองอนุภาคนี้มีข้อเสียอย่างเดียว เวลาสำหรับการประมวลผลของซอฟต์แวร์นานมาก

Al-arif *et al.* [11] นำเสนอการลดทอนความเข้มรังสีแกมมาผ่านตัวกลางหลายชั้นในเงื่อนไขลำรังสีกว้างในรูปแบบสมการการลดทอนความเข้มรังสีสำหรับโฟตอนพลังงานเดียว ภายใต้งานวิจัยสมการนี้ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชันเนื่องจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการสร้างภาชนะลดทอนความเข้มรังสีอย่างปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานทางด้านรังสีของกากกัมมันตรังสีซึ่งปลดปล่อยโฟตอนพลังงานเดียวที่ 1.3325 MeV

Singh *et al.* [3] วิเคราะห์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ( $\mu/p$ ) และเอ็กซ์โพเชอร์บิวต์อัมแพกเตอร์ ( $B$ ) ของวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำเพื่อเลือกเป็นวัสดุป้องกันรังสีโดยการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ที่พลังงานโฟตอน 0.015 – 15 MeV ค่า  $B$  ถูกคำนวณโดยวิธี fitting parameter ซึ่งสูตรที่ใช้คำนวณคือ logarithmic interpolation (LI) ในงานวิจัยวิธี LI ถูกใช้คำนวณ  $\mu/p$  และถูกประยุกต์ใช้คำนวณ  $B$  จากฐานข้อมูล NIST และ ANS – 6.4.3 ตามลำดับ

Salehi *et al.* [15] ศึกษาการเปรียบเทียบค่า  $B$  ของวัสดุเหล็กหลังจากการคำนวณด้วยวิธีการที่แตกต่างกันเพื่อประเมินว่าวิธีการแบบไหนเหมาะสมสำหรับการคำนวณมากที่สุด วิธีการเหล่านี้คือวิธีการใช้แบบจำลองอนุภาคมอนติคาร์โล MCNP5 วิธีการคำนวณแบบ Invariant embedding วิธีการคำนวณ Geometrix progression (GP) fitting parameters ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลพบว่าวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณค่า  $B$  คือวิธี GP fitting parameters จากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ ANS - 6.4.3 ในงานวิจัยสคริปต์ไฟล์การคำนวณ  $B$  ถูกสร้างขึ้น ฐานข้อมูล ANS – 6.4.3 ซึ่งถูกป้อนลงในไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ถูกนำเข้ามาข้อมูลมายังแมทแลปขณะที่มีการประมวลผล จากนั้นผลลัพธ์จากการคำนวณถูกนำไปเปรียบเทียบกับ ANS – 6.4.3 สำหรับความถูกต้องในการคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gupta *et al.* [19] ได้ศึกษาสารประกอบที่อยู่ในพื้นของมนุษย์สำหรับการเลือกวัสดุป้องกันรังสี ค่า  $B$  ของสารประกอบเหล่านี้ถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อเลือกเป็นวัสดุป้องกันรังสีซึ่งค่า  $B$  ของสารประกอบต้องมีค่าน้อยหรือเข้าใกล้หนึ่ง ในงานวิจัยได้นำแนวคิดการวิเคราะห์  $B$  เพื่อเลือกค่า  $B$  ที่ได้จากการประมาณด้วยวิธีการคำนวณ BI จากค่าหลายค่าเหลือเพียงแค่ค่าเดียวเท่านั้น สำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ซอฟต์แวร์แมทแลปถูกใช้เพื่อคำนวณค่าความหนาตะกั่วและเหล็กด้วยเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์โดยการวิเคราะห์พื้นที่ซ้อนทับจากเงื่อนไขของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัดในรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน [7] องค์ประกอบเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์คือการคำนวณค่า  $\mu/p$  และค่า  $B$  จากฐานข้อมูลนิวเคลียร์ NIST [9] และ ANS - 6.4.3 [10] ซึ่งมีลักษณะเป็นตารางฐานข้อมูล ตามลำดับ ค่า  $\mu/p$  และ  $B$  นี้ถูกคำนวณจากตารางฐานข้อมูลดังกล่าวโดยวิธีการคำนวณ LI [3] และ Bi-logarithmic interpolation (BI) ตามลำดับด้วยซอฟต์แวร์แมทแลปโดยการใช้ฐานข้อมูลอินพุตน้อยที่สุดก่อนการตรวจสอบความถูกต้องของสคริปไฟล์แมทแลปโดยเทียบกับฐานข้อมูล NIST และ ANS-6.4.3 [10] เพื่อยืนยันว่าสคริปไฟล์มีความถูกต้อง ค่า  $B$  ของวัสดุตะกั่วและเหล็กซึ่งถูกประมาณที่ค่าความหนาต่างๆด้วยวิธี BI ถูกเลือกเพียงค่าเดียวจากแนวคิดการวิเคราะห์ค่า  $B$  [19] สำหรับการพล็อตกราฟคอนทัวร์

### บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

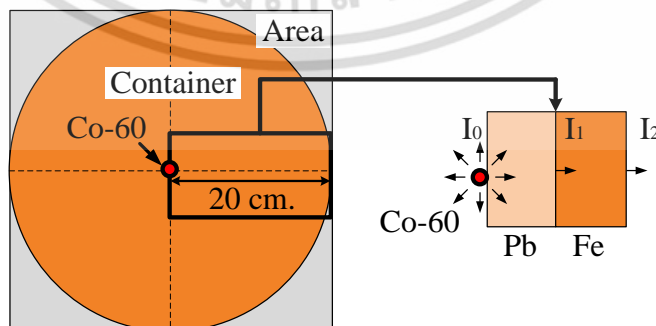
การหาความหนาที่เหมาะสมของวัสดุสองชั้นความหนาซึ่งคือตะกั่วชั้นแรกและเหล็กชั้นสองมี 2 ขั้นตอนหลัก ขั้นตอนแรกคือการกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน ขั้นตอนที่สองคือเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชันด้วยซอฟต์แวร์แมทแลบ

### 3.1 การกำหนดรูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชัน

รูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับการออปติไมเซชันต้องถูกกำหนดขึ้นก่อนการออปติไมเซชันซึ่งประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน ได้แก่ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัด

#### 3.1.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์งานนี้คือการหาความหนาที่เหมาะสมเพื่อลดทอนรังสีสำหรับความปลอดภัยทางด้านรังสี ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบนี้ถูกกำหนดเป็นสมการการลดทอนรังสีแกมมาภายใต้เงื่อนไขลำรังสีกว้าง การลดทอนรังสีแกมมาในเงื่อนไขนี้ถูกแสดงดังรูปที่ 3.1 สำหรับการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ นี้อัตถุถูกถอดหลังจากการซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์วิจัยเป็นกากกัมมันตรังสีเนื่องจากนิวเคลียสของวัสดุนี้คือดิวเทอเรียมซึ่งเป็นผลผลิตจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ อะตอมของวัสดุนี้คือดิวเทอเรียม ดังนั้นดิวเทอเรียมจะปล่อยรังสีแกมมาจากนิวเคลียสเพื่อให้อะตอมมีความเสถียร นี้อัตถุกัมมันตรังสีนี้ซึ่งมีความยาวประมาณ 10 ซม. และมีเนื้อวัสดุเป็นสแตนเลสปลดปล่อยโฟตอนที่ 1.3325 MeV ซึ่งมีค่าพลังงานเดียวกับ Co-60 รังสีสามารถเดินทางผ่านอากาศด้วยอันตรกิริยาการกระเจิงและการผลิตคู่ มันทะลุผ่านวัสดุกำบังรังสี 2 ชั้น ชั้นในเป็นตะกั่วและชั้นนอกเป็นเหล็ก ความเข้มรังสีสุทธิ ( $I_2$ ) เกิดจากความเข้มรังสีเริ่มต้น ( $I_0$ ) เคลื่อนที่ผ่านเหล็กซึ่งเป็นวัสดุแรก ความเข้มรังสีที่ผ่านวัสดุทั้งสองชั้นสามารถถูกคำนวณได้ดังนี้ ความเข้มรังสีที่ ( $I_1$ ) คำนวณจากสมการที่ (3.1) ความเข้มรังสี ( $I_2$ ) คำนวณดังสมการที่ (3.2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือการลดทอนความเข้มรังสีสุทธิซึ่งเกิดจากการแทนสมการที่ (3.1) ในสมการที่ (3.2) แสดงดังสมการที่ (3.3) [11]



รูปที่ 3.1 การลดทอนรังสีแกมมาในเงื่อนไขลำรังสีกว้างของภาชนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_1 = I_0 B_1 e^{-\mu_1 x_1} \quad (3.1)$$

$$I_2 = I_1 B_2 e^{-\mu_2 x_2} \quad (3.2)$$

$$f(x_1, x_2) = I_2 = I_0 B_1 B_2 e^{-\mu_1 x_1 - \mu_2 x_2} \quad (3.3)$$

ซึ่งที่  $x_1$  คือความหนาของวัสดุตะกั่ว (ซม.)  $x_2$  คือความหนาของวัสดุเหล็ก (ซม.)  $I_0$  คือ ความเข้มรังสีเริ่มต้น (mSv/hr)  $I_1$  และ  $I_2$  คือ ความเข้มรังสีที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุที่หนึ่งและสอง (mSv/hr)  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาเชิงเส้นของตะกั่วและเหล็ก ( $\text{cm}^{-1}$ )  $B_1$  และ  $B_2$  คือ เอ็กซ์โพเชอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์ของตะกั่วและเหล็กตามลำดับ

จากการกล่าวอ้างของ ICRP ว่าผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีมีข้อจำกัดการได้รับปริมาณรังสีต่อปีได้เพียงแค่ 20 mSv/year ดังนั้นเวลาการดำเนินงานของผู้ปฏิบัติงานรังสีต้องถูกคำนวณเพื่อให้มีความเพียงพอตามกฎความปลอดภัยของ ICRP การคำนวณเวลาของผู้ปฏิบัติงานถูกแสดงดังตารางที่ 3.1 รังสีถูกลดทอนที่ 100, 1000, 10000 เท่า เมื่อความเข้มรังสีเริ่มต้นมีค่า 100 mSv/hr จากตารางพบว่าการลดทอนความเข้มรังสีที่ 1000 เท่า ซึ่งให้ความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านภาชนะที่ 0.1 mSv/hr มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานสามารถดำเนินงานได้อย่างเพียงพอด้วยเวลา 200 ชมต่อปีหรือมากกว่านั้น ดังนั้นค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 mSv/hr แสดงดังสมการที่ (3.4)

$$f(x_1, x_2) \leq 0.1 \quad (3.4)$$

ตารางที่ 3.1 การคำนวณเวลาดำเนินงานของผู้ปฏิบัติงานรังสี

$I_0$ (mSv/hr)	การลดทอน (จำนวนเท่า)	$I_2$ (mSv/hr)	เวลาสำหรับคนทำงานรังสี (hrs/year)
100	100 x	$100/100 = 1$	$20/1 = 20$
100	1,000 x	$100/1000 = 0.1$	$20/0.1 = 200$
100	10,000 x	$100/10,000 = 0.01$	$20/0.01 = 2,000$

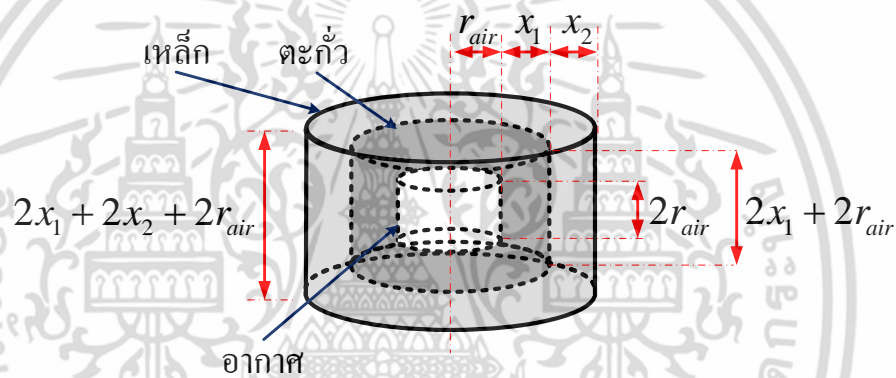
### 3.1.2 ฟังก์ชันข้อจำกัด

ฟังก์ชันข้อจำกัดของภาชนะนี้มี 3 ฟังก์ชันคือฟังก์ชันข้อจำกัดแรกคือผลรวมความหนาของวัสดุซึ่งถูกนิยามเป็นข้อจำกัดทางด้านความหนาของวัสดุ ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันนี้มาจากพื้นที่สำหรับวางภาชนะซึ่งมีขนาดเพียงแค่ว่า 3,600 ตร.ซม. หรือ (60 ซม. x 60 ซม.) เมื่อวางจุดศูนย์กลางของภาชนะตรงกลางพื้นที่ขนาด 3,600 ตร.ซม. ความหนาของวัสดุคือรัศมีของภาชนะทรงกระบอกมีขนาด 30 ซม. ดังรูปที่ 3.1 ดังนั้นขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันนี้สามารถมีค่าได้ไม่เกิน 30 ซม. ดังสมการที่ (3.5) ซึ่งมีเครื่องหมายน้อยกว่าหรือเท่ากับ

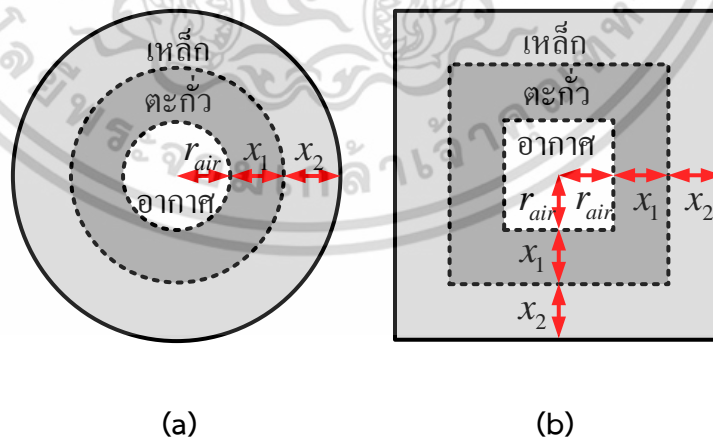
$$g_1(x_1, x_2) : r_{air} + x_1 + x_2 \leq 30 \quad (3.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันข้อจำกัดที่สองถูกกำหนดเป็นน้ำหนักภาชนะเพราะว่าอาคารจัดเก็บภาชนะบรรจุกากกัมมันตรังสีอยู่ห่างจากอาคารเครื่องปฏิกรณ์ (สทน.) ดังนั้นน้ำหนักภาชนะต้องไม่หนักมากจนเกินไปที่ 1000 kg ซึ่งรถฟอร์คลิฟสามารถยกได้ รูปร่างภาชนะทรงกระบอกถูกดัดแปลงจากภาชนะทรงลูกบาศก์โดยการตัดส่วนที่เป็นมุมของทรงลูกบาศก์เพื่อลดน้ำหนักและราคาภาชนะ ดังนั้นเส้นผ่านศูนย์กลางภาชนะมีค่าเท่ากับส่วนสูงของภาชนะ นอกจากนี้มีความต้องการให้ภาชนะสามารถลดทอนรังสีได้ทุกด้านเท่ากับที่ 0.1 mSv/hr ดังนั้นชั้นโพรงอากาศจึงถูกห่อหุ้มด้วยชั้นตะกั่วและชั้นเหล็กตามลำดับ รูปร่างภาชนะถูกแสดงดังรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 ตามลำดับ ตะกั่วและเหล็กถูกเลือกเป็นวัสดุสำหรับภาชนะนี้เนื่องจากวัสดุที่ถูกเลือกเพื่อลดทอนรังสีต้องมีเลขอะตอมสูง วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงมีจำนวนอิเล็กตรอนโคจรรอบนิวเคลียสอยู่มาก รังสีแกมมาถูกลดทอนความเข้มรังสีโดยการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของวัสดุ ดังนั้นวัสดุที่มีเลขอะตอมสูงสามารถลดทอนรังสีได้ดี นอกจากนี้ ตะกั่ว ( $z = 82$ ) มีเลขอะตอมที่สูงกว่าวัสดุเหล็ก ( $z = 26$ ) อยู่มาก ชั้นความหนาตะกั่วจึงถูกจัดอยู่ด้านในภาชนะเพื่อลดทอนความเข้มรังสีจากความเข้มมากให้มีความเข้มน้อยลง



รูปที่ 3.2 ภาพสามมิติของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสี



รูปที่ 3.3 ภาพสองมิติของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสี

(a) : ภาพด้านบนของภาชนะ (b) : ภาพด้านข้างของภาชนะ

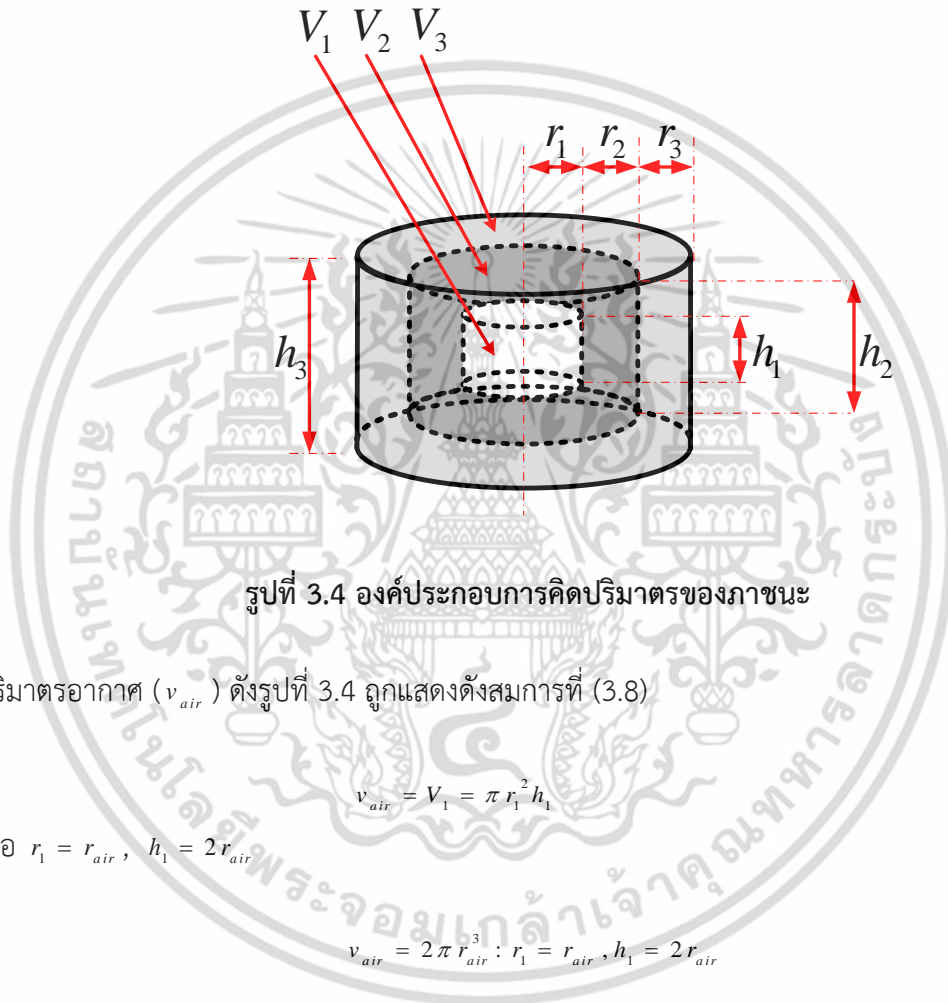
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามเหตุผลที่ได้กล่าวข้างต้น น้ำหนักภาชนะซึ่งคิดจากมวลรวมของอากาศวัสดุเหล็กและตะกั่วตั้งสมการที่ (3.6)

$$m_{total} = m_{air} + m_{lead} + m_{iron} \quad (3.6)$$

นำ  $m = \rho v$  แทนลงในสมการที่ (3.6) ได้สมการที่ (3.7)

$$m_{total} = \rho_{air} v_{air} + \rho_{lead} v_{lead} + \rho_{iron} v_{iron} \quad (3.7)$$



รูปที่ 3.4 องค์ประกอบการคิดปริมาตรของภาชนะ

ปริมาตรอากาศ ( $v_{air}$ ) ดังรูปที่ 3.4 ถูกแสดงดังสมการที่ (3.8)

$$v_{air} = V_1 = \pi r_1^2 h_1 \quad (3.8)$$

เมื่อ  $r_1 = r_{air}$ ,  $h_1 = 2r_{air}$

$$v_{air} = 2\pi r_{air}^3 : r_1 = r_{air}, h_1 = 2r_{air} \quad (3.9)$$

ปริมาตรอากาศ ( $v_{lead}$ ) ดังรูปที่ 3.4 ถูกแสดงดังสมการที่ (3.10)

$$\begin{aligned} v_{lead} &= V_2 - V_1 \\ &= \pi (r_1 + r_2)^2 h_2 - \pi r_1^2 h_1 \end{aligned} \quad (3.10)$$

เมื่อนำ  $r_1 = r_{air}$ ,  $h_1 = 2r_{air}$ ,  $r_2 = x_1$ ,  $h_2 = 2x_1 + 2r_{air}$  แทนในสมการที่ 3.10 และถูกเขียนใหม่เป็นสมการที่ (3.11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 v_{lead} &= \left( \pi (x_1 + r_{air})^2 (2x_1 + 2r_{air}) \right) - \left( \pi r_{air}^2 (2r_{air}) \right) \\
 &= 2\pi \left( (x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3 \right)
 \end{aligned} \tag{3.11}$$

ปริมาตรอากาศ ( $v_{iron}$ ) ดังรูปที่ (3.4) ถูกแสดงดังสมการที่ (3.12)

$$\begin{aligned}
 v_{iron} &= V_3 - V_2 \\
 &= \pi (r_1 + r_2 + r_3)^2 h_3 - \pi (r_1 + r_2)^2 h_2
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

เมื่อนำ  $r_1 = r_{air}$ ,  $h_1 = 2r_{air}$ ,  $r_2 = x_1$ ,  $h_2 = 2x_1 + 2r_{air}$ ,  $r_3 = x_2$ ,  $h_3 = 2x_1 + 2x_2 + 2r_{air}$  แทนลงในสมการที่ (3.12) และถูกเขียนใหม่เป็นสมการที่ (3.13)

$$\begin{aligned}
 v_{iron} &= \left( \pi (x_1 + x_2 + r_{air})^2 (2x_1 + 2x_2 + 2r_{air}) \right) - \left( \pi (x_1 + r_{air})^2 (2x_1 + 2r_{air}) \right) \\
 &= 2\pi \left( (x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3 \right)
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

แทนสมการที่ (3.9), (3.11), (3.13) ลงในสมการที่ (3.7) ได้สมการที่ (3.14) ดังนี้

$$m_{total} = \frac{2\pi}{1000} \left\{ \rho_{air} r_{air}^3 + \rho_{lead} [(x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3] + \rho_{iron} [(x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3] \right\} \tag{3.14}$$

สมการน้ำหนักภาชนะถูกแสดงดังสมการที่ (3.15) มาจากสมการที่ (3.14)

$$g_2(x_1, x_2) = \frac{2\pi}{1000} \left\{ \rho_{air} r_{air}^3 + \rho_{lead} [(x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3] + \rho_{iron} [(x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3] \right\} \tag{3.15}$$

สมการที่ (3.15) ถูกกำหนดเป็นฟังก์ชันข้อจำกัดน้ำหนักโดยการระบุค่าข้อจำกัดซึ่งน้ำหนักภาชนะต้องไม่เกิน 1000 kg ดังสมการที่ (3.16)

$$g_2(x_1, x_2) : \frac{2\pi}{1000} \left\{ \rho_{air} r_{air}^3 + \rho_{lead} [(x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3] + \rho_{iron} [(x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3] \right\} \leq 1000 \tag{3.16}$$

ซึ่ง  $\rho_{air} = 0.001225 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{lead} = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho_{iron} = 7.874 \text{ g/cm}^3$

ฟังก์ชันข้อจำกัดที่สามคือราคาภาชนะซึ่งเป็นงบประมาณที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่เกิน 600 USD สมการราคาภาชนะถูกแสดงดังสมการที่ (3.17) โดยการตัดเทอมที่เป็นอากาศออกจากสมการที่ (3.16) และเพิ่มค่าคงที่ราคาต่อน้ำหนักของวัสดุตะกั่วและเหล็กลงในเทอมที่สองและสามตามลำดับจากสมการที่ (3.17)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$g_3(x_1, x_2) = \frac{4.4\pi}{1000} \{A^* \rho_{lead} [(x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3] + B^* \rho_{iron} [(x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3]\} \quad (3.17)$$

ซึ่ง  $A^*$  และ  $B^*$  คือ ราคาของตะกั่วและเหล็กมีค่าเท่ากับ 0.97 USD/lb ในวันที่ 21/04/2017 [12] และ 0.028 USD/lb ในวันที่ 31/01/2017 [13] ดังนั้นฟังก์ชันข้อจำกัดราคาภาชนะที่ได้กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้นี้แสดงดังสมการที่ (3.18)

$$g_3(x_1, x_2) : \frac{4.4\pi}{1000} \{A^* \rho_{lead} [(x_1 + r_{air})^3 - r_{air}^3] + B^* \rho_{iron} [(x_1 + x_2 + r_{air})^3 - (x_1 + r_{air})^3]\} \leq 600 \quad (3.18)$$

### 3.1.3 ข้อจำกัดของตัวแปร

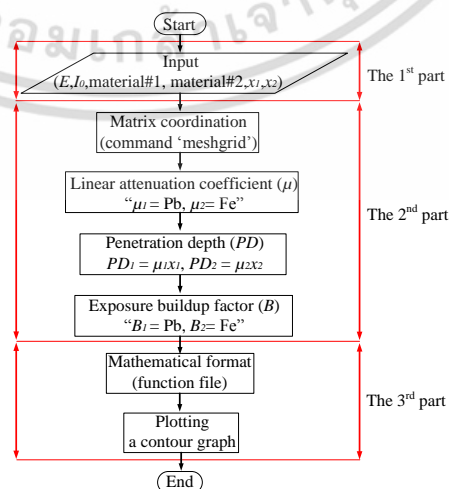
ตัวแปรที่ประกอบอยู่ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัดคือ  $x_1, x_2$  ซึ่งก็คือความหนาวัสดุตะกั่วและเหล็กในหน่วย (ซม.) ตามลำดับ ผลรวมความหนาทั้งสองค่านี้ต้องมีค่าไม่เกิน 20 cm ทั้งคู่เนื่องจากพื้นที่สำหรับการจัดวางภาชนะถูกกำหนดที่ 3600 ตร.ซม. (60 cm x 60 cm) ซึ่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามรูป 3.1 ดังนั้นรัศมีภาชนะมีค่าเท่ากับ 30 cm ( $r_{air} + x_1 + x_2$ ) ข้อจำกัดของตัวแปร ( $x_1, x_2$ ) ถูกกำหนดให้มีค่ามากที่สุดที่ 30 cm ในแต่ละค่าเมื่อ  $r_{air} = 0$  cm. ซึ่งแสดงดังสมการที่ (3.19) และ (3.20) ตามลำดับ

$$1 \leq x_1 \leq 30 \quad (3.19)$$

$$1 \leq x_2 \leq 30 \quad (3.20)$$

## 3.2 เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน

แผนภาพการพล็อตกราฟคอนทัวร์ถูกแสดงดังรูปที่ 3.5 องค์ประกอบที่สำคัญภายในแผนภาพมี 3 ส่วน การป้อนข้อมูลอินพุต การเขียนฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์สำหรับกราฟคอนทัวร์ การพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน



รูปที่ 3.5 แผนภาพการพล็อตกราฟคอนทัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการป้อนข้อมูลอินพุต สิ่งที่จะต้องถูกระบุภายในโปรแกรมก่อนซอฟต์แวร์ทำการประมวลผลคือ พลังงานโฟตอน ( $E$ ), ความเข้มรังสีเริ่มต้น ( $I_0$ ), วัสดุชั้นที่หนึ่ง (material#1), วัสดุชั้นที่สอง (material#2) ขนาดความหนา ( $x_1, x_2$ ) ในงานวิจัยนี้กากัมมันตรังสีปล่อยโฟตอนที่ 1.3325 MeV และความเข้มรังสีที่ 100 mSv/hr  $x_1, x_2$  คือ ความหนาตะกั่วและเหล็กตามลำดับ ดังนั้นการระบุข้อมูลอินพุตภายในซอฟต์แวร์มีดังนี้  $E = 1.3325$  MeV,  $I_0 = 100$  mSv/hr, material#1 = Pb, material#2 = Fe,  $x_1 = 21$  cm,  $x_2 = 2$  cm.

การคำนวณค่า  $\mu/\rho$  และ  $B$  เป็นส่วนที่สองจากแผนภาพการพล็อตกราฟคอนทัวร์ เนื่องจากทั้งสองค่านี้ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องถูกระบุเป็นข้อมูลตัวเลขก่อนการพล็อตกราฟคอนทัวร์ มิฉะนั้นซอฟต์แวร์จะไม่สามารถพล็อตกราฟคอนทัวร์ได้ อันดับแรกของส่วนที่สองนี้ถูกเริ่มต้นจากการสร้างคู่อันดับสำหรับการพล็อตกราฟคอนทัวร์แสดงดังรูปที่ 2.20 (บทที่ 2) โดยการใช้คำสั่ง meshgrid ถัดมา  $\mu$  ถูกคำนวณจากค่า  $\mu/\rho$  ซึ่งเป็นข้อมูลจากตารางฐานข้อมูล NIST จากนั้นค่า Penetration depth ( $PD$ ) ซึ่งเป็นข้อมูลอินพุตสำหรับค่า  $B$  จากตารางฐานข้อมูล ANS-6.4.3 ถูกคำนวณโดยผลคูณระหว่าง  $\mu$  กับ  $x$


การพล็อตกราฟคอนทัวร์ซึ่งถูกใช้สำหรับการวิเคราะห์หาความหนาที่เหมาะสมเป็นส่วนสุดท้ายวิธีการวิเคราะห์นี้เป็นวิธีเดียวกับการวิเคราะห์คำตอบที่เหมาะสมดังรูปที่ 2.19 โดยการหาภาคพื้นพื้นที่ที่เกิดจากการซ้อนทับกันจากการคิดขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์และฟังก์ชันข้อจำกัด

### 3.2.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น

ข้อมูล  $\mu/\rho$  ของสถาบันแห่งชาติเทคโนโลยีและความมาตรฐาน National Institute of Standard and Technology (NIST) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานข้อมูลมาจากการทดลองถูกพิจารณาเพื่อคำนวณ  $\mu$  ของตะกั่วและเหล็กถูกแสดงดังตารางที่ 3.2 ลักษณะตารางฐานข้อมูลประกอบด้วย 2 คอลัมน์ 1.คอลัมน์พลังงานโฟตอน 2.คอลัมน์  $\mu/\rho$  36 แถวของวัสดุเหล็ก

ตารางที่ 3.2 ตารางฐานข้อมูล NIST ของธาตุตะกั่ว

$E$	$\mu/\rho$
⋮	⋮
1.00000	0.07102
1.25000	0.05876
1.50000	0.05222
⋮	⋮



36  
rows

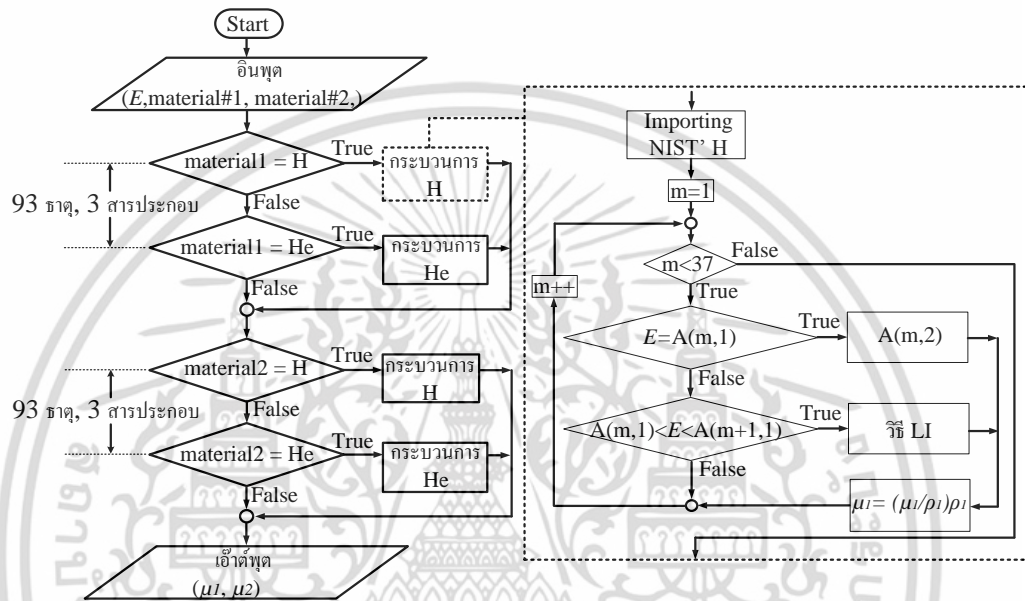
$E$  = Photon energy (MeV)

$\mu/\rho$  = mass attenuation coefficient (cm<sup>2</sup>/g)

ไฟล์ฟังก์ชันแมทแลปสำหรับการคำนวณ  $\mu$  ของวัสดุซึ่งมี 2 เลเยอร์และประกอบด้วย  $\mu/\rho$  ของธาตุทั้งหมด 28 ธาตุ กับข้อมูลต้นกำเนิดรังสี (Cs-137, Co-60, Eu-152) ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อความสะดวกและการประหยัดเวลาสำหรับการคำนวณ กระบวนการคำนวณถูกแสดงดังรูปที่ 3.1 ซึ่งถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก ส่วนแรกคือการรับข้อมูลอินพุตจากแป้นพิมพ์ อินพุตที่กำลังถูกกล่าวคือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

material#1, material#2,  $E$  ส่วนที่สองคือการใช้คำสั่งเงื่อนไข (switch-case) สำหรับการเลือกชนิดวัสดุเลเยอร์ที่หนึ่งและสองเพื่อคำนวณ  $\mu_1, \mu_2$  ตามลำดับ ส่วนที่สามคือการแสดงค่าเอาต์พุต  $\mu_1, \mu_2$  ของวัสดุเลเยอร์ที่หนึ่งและสองตามลำดับ

กระบวนการเลือกชนิดของวัสดุเพื่อคำนวณ  $\mu/p$  ของแต่ละธาตุในส่วนที่สองและส่วนที่สามมีการใช้คำสั่งเหมือนกัน แต่ข้อมูลคุณสมบัติทางวัสดุมีความแตกต่างกัน ดังนั้นแผนภาพกระบวนการคำนวณ  $\mu$  ถูกแสดงดังรูปที่ 3.6 มี 3 คำสั่งหลัก 1. คำสั่งการนำเข้าข้อมูลจากไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ 2. คำสั่งการวนลูปข้อมูล (for-loop) 3. คำสั่งเงื่อนไขการคำนวณ 2 แบบ (if-condition)

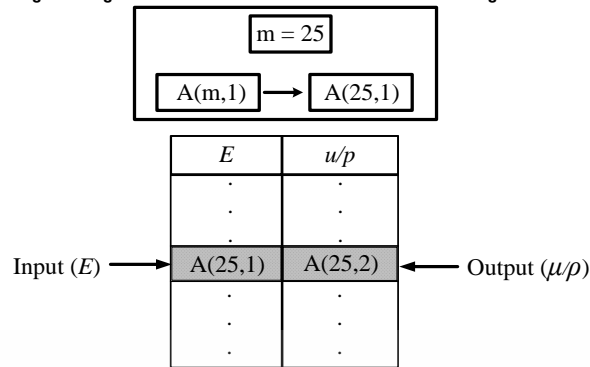


รูปที่ 3.6 การคำนวณ  $\mu/p$  โดยแมทแลป

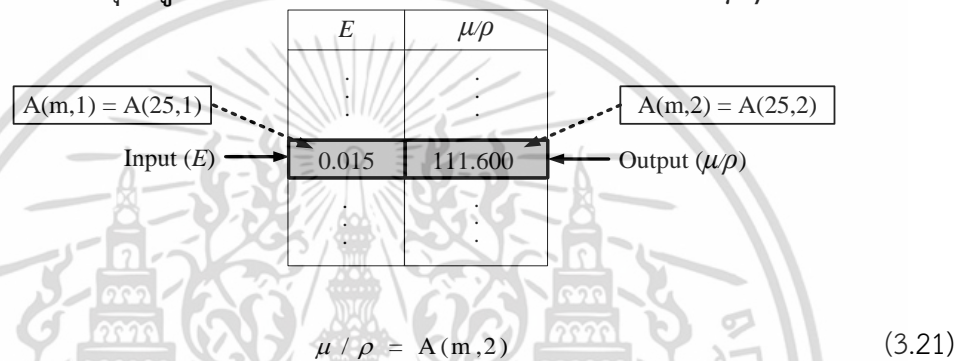
ลักษณะการประมวลผลค่า  $u/p$  คือแมทแลปจะประมวลผลสคริปไฟล์พลังงจากที่มีการนำเข้าฐานข้อมูลสู่ซอฟต์แวร์จากไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์ตามชนิดธาตุที่ผู้ใช้ได้ระบุ กระบวนการวนลูปทำงานโดยวนข้อมูลจำนวนแถวในคอลัมน์  $E$  ดังตารางที่ 3.2 ตั้งแต่แถวที่หนึ่งหลักที่หนึ่ง  $m = 1, n = 1$  ไปยังแถวสุดท้ายหลักที่หนึ่ง  $m = 36, n = 1$  ตามรูปที่ 3.6 ขณะที่ซอฟต์แวร์กำลังวนลูปเซลล์ในคอลัมน์  $E$  ถ้าหากตำแหน่งเซลล์  $A(m, 1)$  ที่แมทแลปใช้เพื่อแสดงค่าในตำแหน่งเซลล์นั้นมีค่าเท่ากับอินพุต  $E$  ที่ผู้วิจัยป้อนข้อมูล แมทแลปจะแสดงค่าเอาต์พุต  $u/p$  ซึ่งอยู่ในคอลัมน์ที่สอง  $u/p$  ตามรูปที่ 3.2 การคำนวณรูปแบบนี้ถูกเรียกว่าเป็นการคำนวณข้อมูลที่อยู่บนตารางฐานข้อมูลซึ่งอยู่ในเงื่อนไขที่หนึ่ง แต่ถ้าหากอินพุต  $E$  มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล  $A(m, 1)$  และ  $A(m+1, 1)$  ภายในตาราง ซอฟต์แวร์จะคำนวณค่าเอาต์พุต  $u/p$  โดยวิธี Logarithmic interpolation (LI) ซึ่งเป็นการคำนวณในเงื่อนไขที่สอง ยกตัวอย่างเช่น ซอฟต์แวร์เริ่มการวนลูปตำแหน่งเซลล์ที่  $m = 1$  ในตารางที่ 3.2 เพื่อคำนวณค่าเอาต์พุต  $u/p$  จากนั้นถ้าการวนลูปถูกวนมาที่  $m = 25$  ซอฟต์แวร์จะแสดงค่าตำแหน่งเซลล์ที่  $m = 25$  โดยการใช้คำสั่ง  $A(25, 1)$  ซึ่งปรากฏว่าค่าข้อมูลที่ตำแหน่งเซลล์  $A(25, 1)$  มีค่าเท่ากับอินพุตที่ผู้วิจัยได้ป้อนดังตารางที่ 3.3 ดังนั้นซอฟต์แวร์จึงแสดงค่าเอาต์พุต  $u/p$  โดยการใช้คำสั่ง  $A(25, 2)$  ตามสมการที่ 3.21 ซึ่งเป็นค่าที่อยู่ในคอลัมน์ที่สองในแถวเดียวกันดังตารางที่ 3.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 กระบวนการวนลูปข้อมูลเมื่อ Input ( $E$ ) มีค่าตรงกับข้อมูล

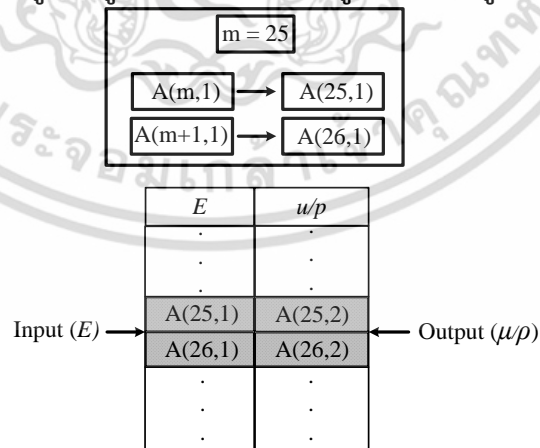


ตารางที่ 3.4 วิธีการระบุข้อมูลด้วยตำแหน่งเซลล์ภายในเงื่อนไขหนึ่งสำหรับ  $\mu/p$



ในทางตรงกันข้ามถ้าหากถ้าหากอินพุต  $E$  ที่ถูกป้อนมีค่าอยู่ระหว่างข้อมูลที่แมทแลปใช้คำสั่ง  $A(m, 1)$  และ  $A(m+1, 1)$  ถูกแสดงดังรูปที่ 3.5 และ 3.6 เพื่อแสดงข้อมูลในตำแหน่งเซลล์อื่นๆ ที่การวนลูปข้อมูล  $m = 25$  ค่าเอาต์พุต  $u/p$  จะถูกคำนวณโดยวิธี LI [14 - 15] ดังสมการที่ 3.21

ตารางที่ 3.5 กระบวนการวนลูปข้อมูลเมื่อ Input ( $E$ ) อยู่ระหว่างข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สองสำหรับ  $\mu/\rho$ 

	$E$	$u/p$	
	.	.	
	.	.	
$A(m,1) = A(25,1)$	0.0150	111.600	$A(m,2) = A(25,2)$
Input ( $E$ )	0.0152	107.800	Output ( $\mu\rho$ )
$A(m+1,1) = A(26,1)$	.	.	$A(m+1,2) = A(26,2)$
	.	.	
	.	.	

$$\mu / \rho = \frac{[ A(m,2) ][ \log(A(m+1,1)) - \log(E) ] + [ A(m+1,2) ][ \log(E) - \log(A(m,1)) ]}{\log(A(m+1,1)) - \log(A(m,1))} \quad (3.21)$$

ไฟล์ฟังก์ชันสำหรับการคำนวณค่า  $\mu$  โดยแมทแลปถูกแสดงด้านล่างซึ่งตัวหนังสือที่อยู่หลังเครื่องหมาย (%) อธิบายความหมายของคำสั่งบรรทัดนั้นตามนี้

```

%%%%%%%%%% Calculation of mass and linear attenuation coefficient %%%%%%%%%%%
function [mac1,mac2,u1L1,u1L2] = linearAttenCoef1E2L(material1,material2,E)

switch material1 % Condition command for the 1st layer
case 'H' % In case of Hydrogen
p1 = 8.38E-05 ; % density of Hydrogen (g/cm^3)
p = p1 ;
i = 1 ; % the initial value for (for-loop) in Energy column
f = 35 ; % the final value for (for-loop) in Energy column
% importing file energy and u/p of Hydrogen from Microsoft Excel
H = importfile('92 elements.xlsx','1-21','A3:B38');
A = H ;

% Function file for calculation
% mass and linear attenuation coefficient (mac1,u1L12)
% for the 1st layer
[mac1,u1L1] = material1E1L(E,p,i,f,A);
case 'He'
p1 = 1.66E-04 ;
p = p1 ;
i = 1 ;
f = 35 ;
He = importfile1('92 elements.xlsx','1-21','D3:E38');
A = He ;
[mac1,u1L1] = material1E1L(E,p,i,f,A);
.
.
.
94 elements
.
End

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นว่าไม่เหมาะสมในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

case 'H'          % In case of Hydrogen
    p2 = 8.38E-05 ; % density of Hydrogen (g/cm^3)
    p = p2 ;
    i = 1 ;      % the initial value for (for-loop) in Energy column
    f = 35 ;    % the final value for (for-loop) in Energy column
% importing file energy and u/p of Hydrogen from Microsoft Excel
    H = importfile('92 elements.xlsx','1-21','A3:B38');
    A = H ;
% Function file for calculation
% mass and linear attenuation coefficient (mac1,u1L12)
% for the 2nd layer
    [mac2,u1L2] = material1E2L(E,p,i,f,A);
case 'He'
    p2 = 1.66E-04 ;
    p = p2 ;
    i = 1 ;
    f = 35 ;
    He = importfile1('92 elements.xlsx','1-21','D3:E38');
    A = He ;
    [mac2,u1L2] = material1E2L(E,p,i,f,A);
.
.
.
94 elements
.
.
.
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function [mac1,u1L1] = material1E1L(E,p,i,f,A)
    y = E ;
    % for-loop command for running in energy column
    for m = i : f
        % If-condition for logarithmic interpolation
        Energy = A(n,1);
        if y == Energy % process 1
            mac1 = A(n,2) ;
            lacl = mac1*p ;
            u1L1 = lacl ;
        elseif E > A(m,1) && E < A(m+1,1)
            mac1 = ((A(m,2))*(log10(A(m+1,1))-log10(E)) +...
                (A(m+1,2))*(log10(E)-log10(A(m,1)))) /...
                (log10(A(m+1,1)) - log10(A(m,1))) ;
            lacl = mac1*p ; % mass attenuation become linear attenuation
            u1L1 = lacl ; % linear attenuation coefficient (cm^-1)
        end
    end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [mac2,u1L2] = material1E2L(E,p,i,f,A)
    y = E ;
    % for-loop command for running in energy column
    for m = i : f
        % If-condition for logarithmic interpolation

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Energy = A(n,1);
if y == Energy % process 1
    mac2 = A(n,2) ;
    lac2 = mac2*p ;
    ulL2 = lac2 ;
elseif E > A(m,1) && E < A(m+1,1)
    mac2 = ((A(m,2))*(log10(A(m+1,1))-log10(E)) +...
            (A(m+1,2))*(log10(E)-log10(A(m,1))) ) /...
            ( log10(A(m+1,1)) - log10(A(m,1))) ) ;
    Lac2 = mac2*p ; % mass attenuation become linear attenuation
    ulL2 = lac2 ; % linear attenuation coefficient (cm^-1)
end
end
end
end

```

%%%

### 3.2.2 การคำนวณเอ็กซ์โพเชอร์บิวต์ออฟแฟกเตอร์

ตารางฐานข้อมูล  $B$  ของ American National Standard (ANS) ถูกคำนวณมาจากการประมาณค่าแบบ Geometrix progression approximation (GP) ซึ่งเป็นวิธีที่ขึ้นอยู่กับกรคำนวณพารามิเตอร์ทั้ง 5 ค่า ( $a, b, c, d, \xi$ ) อยู่ในบทที่สอง สมการที่ (2.29) – (2.30) ตารางฐานข้อมูลนี้ยังจัดหาค่า  $B$  ของธาตุทั้งหมด 28 ธาตุเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ทางด้านคุณสมบัติของวัสดุสำหรับการป้องกันรังสี ตารางมีลักษณะเป็นแบบเมทริกซ์ซึ่งข้อมูลที่อยู่คอลัมน์แรกคือ Penetration depth ( $PD$ ) จำนวน 16 แถว และข้อมูลที่อยู่แถวแรกคือพลังงานโฟตอน ( $E$ ) จำนวน 25 คอลัมน์ ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ตารางฐานข้อมูล ANS-6.4.3 ของธาตุตะกั่ว

$PD \backslash E$	0.015	0.02	0.03	...	8	10	15
0.5				...			
1.0				...			
3.0				...			
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...
30.0				...			
35.0				...			
40.0				...			

25 columns

16 rows

$E$  = Photon energy (MeV)

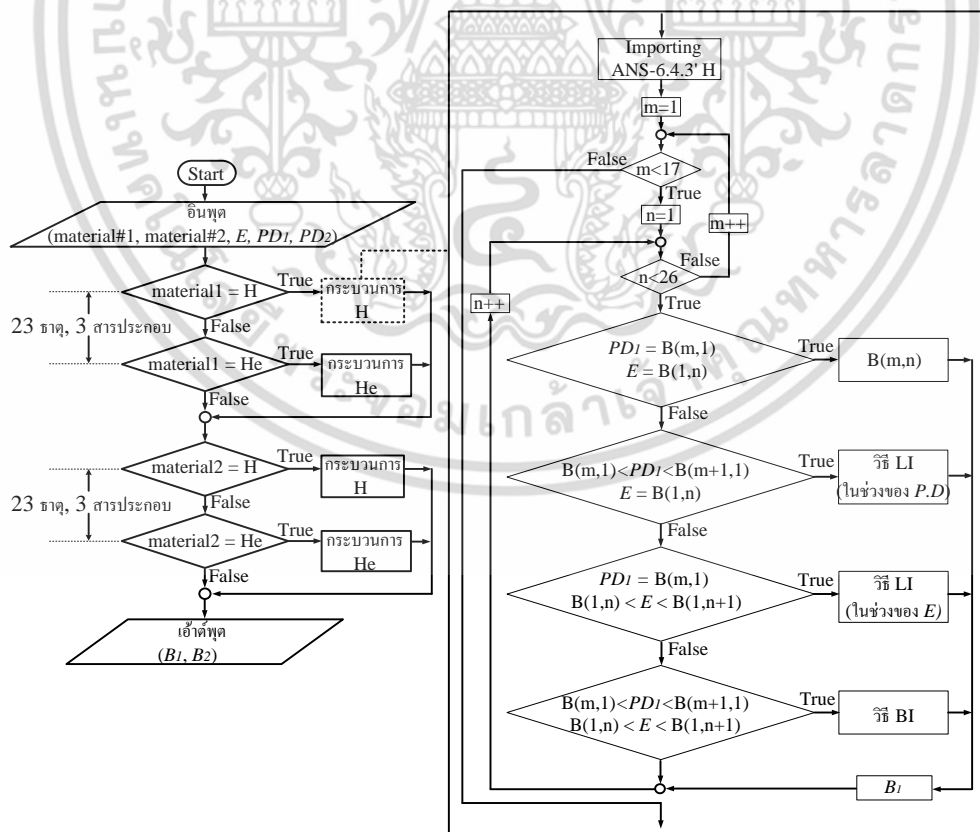
MFP = Mean Free Path (-)

ไฟล์ฟังก์ชันการคำนวณ  $B$  ถูกสร้างสำหรับการแก้ปัญหาการคำนวณที่ซับซ้อนและการคำนวณที่มีระยะเวลาที่นาน ภายในไฟล์ประกอบด้วยฐานข้อมูล  $B$  ที่อ้างอิงจาก ANS 6.4.3 จำนวน 28 ธาตุ และข้อมูลต้นกำเนิดรังสี 3 ชนิด (Cs-137, Co-60, Eu-152) ซึ่งเหมือนกับไฟล์การคำนวณ  $\mu/\rho$  กระบวนการคำนวณของไฟล์นี้ถูกแสดงดังรูปที่ 3.7 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก 1.การรับข้อมูลเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อินพุตจากแป้นพิมพ์ ได้แก่ material#1  $PD_1$  สำหรับชั้นความหนาที่หนึ่ง material#2  $PD_2$  สำหรับชั้นความหนาที่สองและ  $E$  2.การคำนวณค่า  $B_1, B_2$  ของวัสดุที่หนึ่งและสองโดยใช้คำสั่งแบบมีเงื่อนไข (switch-case) ตามลำดับ 3.การแสดงผลค่าเอาต์พุต  $B_1, B_2$

กระบวนการคำนวณ  $B$  ของวัสดุจะถูกระบุแสดงดังรูปที่ 3.7 เพียงวัสดุเดียวเนื่องจากคำสั่งที่ใช้ภายในกระบวนการคำนวณ  $B$  ของวัสดุต่างๆมีความคล้ายกัน ตามรูปที่ 3.6 มีคำสั่ง 3 คำสั่ง 1.การนำเข้าข้อมูล จากไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์มายังแมทแลป 2.การใช้คำสั่งวงรูป 3.การใช้คำสั่งแบบมีเงื่อนไข

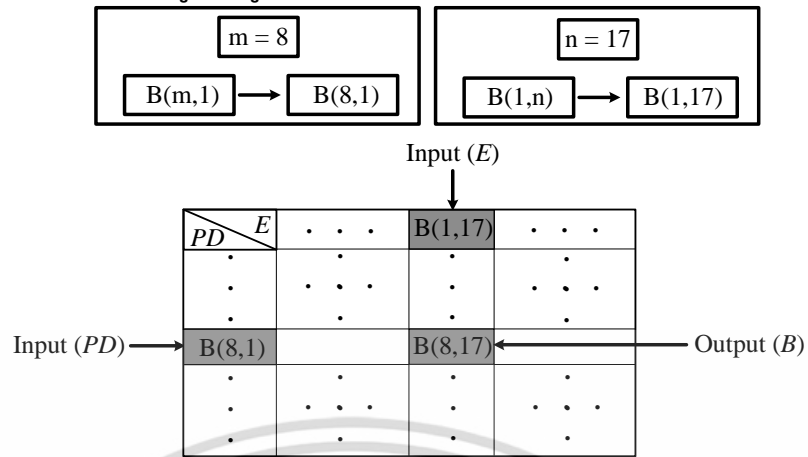
ลักษณะการทำงานของรูปที่ 3.7 เริ่มต้นจากการแสดงตาราง  $B$  ที่มาจากการนำเข้าข้อมูลจากไมโครซอฟท์เอ็กเซลล์มายังแมทแลป จากนั้นคำสั่งการวนลูปถูกดำเนินการที่  $m = 1, n = 1$  ค่า  $n$  ถูกวนลูปไปเรื่อยๆ จนถึงค่า  $n$  สุดท้าย จากนั้นการวนลูปจะเริ่มต้นใหม่ที่  $m = 2, n = 1$  การวนลูปลักษณะนี้ยังคงถูกวนลูปไปเรื่อยจนถึงที่ค่า  $m$  สุดท้าย ขณะที่ซอฟต์แวร์ประมวลผลการวนลูปนี้ ค่าเอาต์พุต  $B$  ถูกคำนวณออกมาตามเงื่อนไขการคำนวณ 4 เงื่อนไข ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอินพุต  $PD$  และ  $E$  การคำนวณในเงื่อนไขที่หนึ่งซึ่งซอฟต์แวร์วนลูปที่  $m = 8, n = 17$  ดังตารางที่ 3.8 ค่า  $B$  ถูกคำนวณตามตารางที่ 3.9 และดังสมการที่ (3.22) การคำนวณในเงื่อนไขที่สองซึ่งซอฟต์แวร์วนลูปที่  $m = 8, n = 3$  ดังตารางที่ 3.10 ค่า  $B$  ถูกคำนวณตามตารางที่ 3.11 และดังสมการที่ (3.23) การคำนวณในเงื่อนไขที่สามซึ่งซอฟต์แวร์วนลูปที่  $m = 3, n = 8$  ดังตารางที่ 3.12 ค่า  $B$  ถูกคำนวณตามตารางที่ 3.13 และดังสมการที่ (3.24) การคำนวณในเงื่อนไขที่สี่ซึ่งซอฟต์แวร์วนลูปที่  $m = 7, n = 14$  ดังตารางที่ 3.14 ค่า  $B$  ถูกคำนวณตามตารางที่ 3.15 และดังสมการที่ (3.25) - (3.27) ซึ่งเป็นวิธีการ BI [16 - 18]



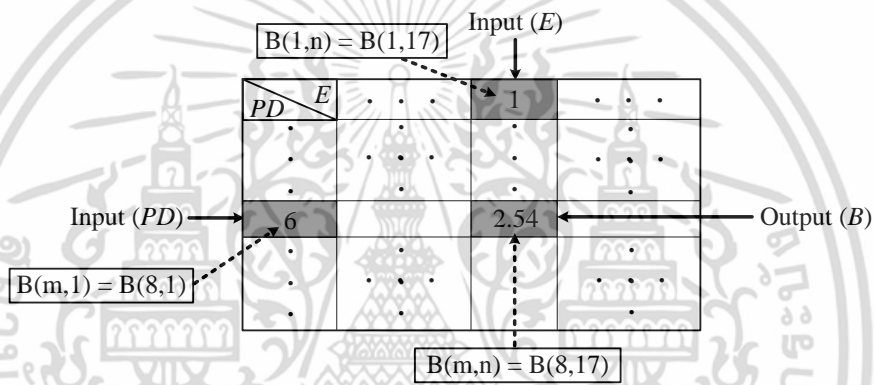
รูปที่ 3.7 การคำนวณ  $B$  โดยซอฟต์แวร์แมทแลป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 กระบวนการวนรูปข้อมูลเมื่อ Input (PD) และ Input (E) มีค่าตรงกับข้อมูล



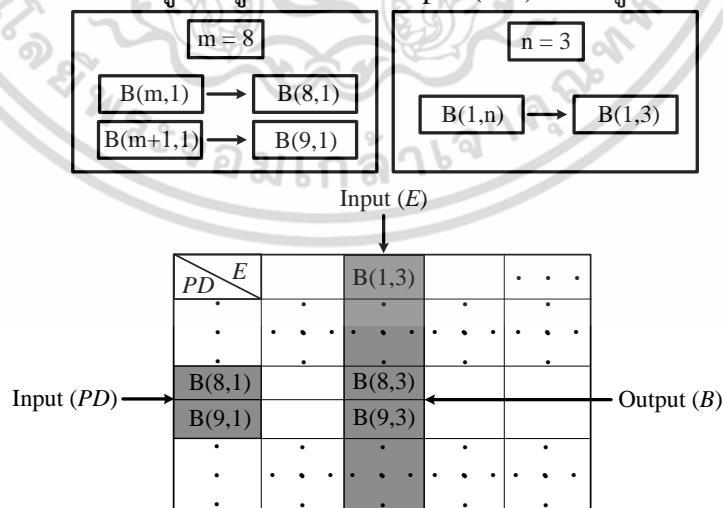
ตารางที่ 3.9 วิธีการระบุข้อมูลด้วยตำแหน่งเซลล์ภายในเงื่อนไขที่หนึ่งสำหรับค่า B



$$B = B(m, n)$$

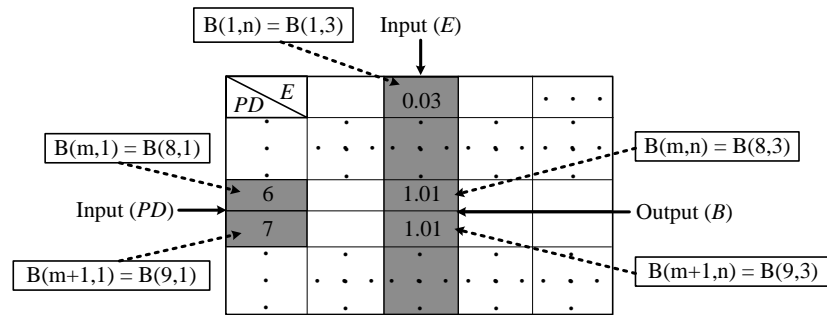
(3.22)

ตารางที่ 3.10 กระบวนการวนรูปข้อมูลเมื่อมีเพียง Input (PD) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล



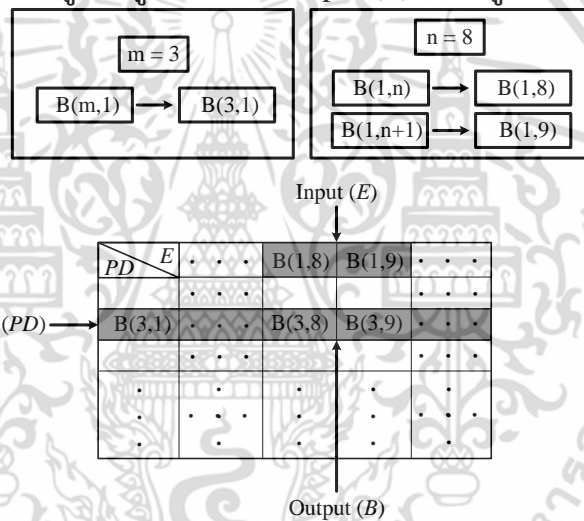
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สองสำหรับค่า B

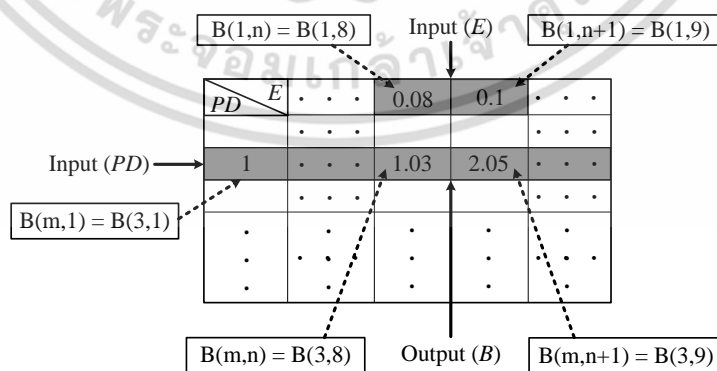


$$B = \frac{[ B(m,n) ][ \log(B(m+1,1)) - \log(PD) ] + [ B(m+1,n) ][ \log(PD) - \log(B(m,1)) ]}{\log(B(m+1,1)) - \log(B(m,1))} \tag{3.23}$$

ตารางที่ 3.12 กระบวนการวนลูปข้อมูลเมื่อมีเพียง Input (E) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล



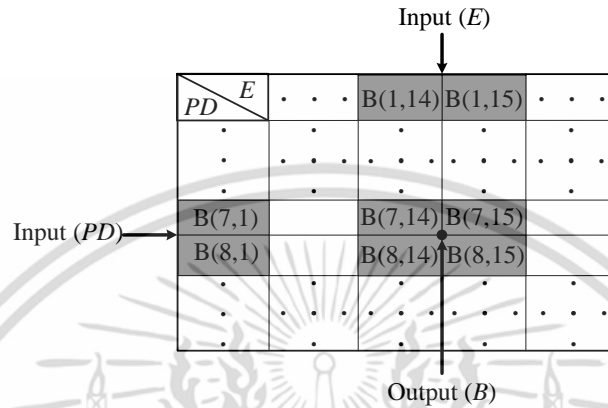
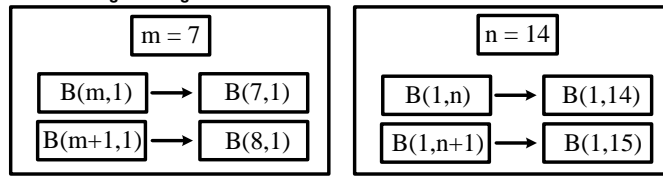
ตารางที่ 3.13 วิธี LI ภายในเงื่อนไขที่สามสำหรับค่า B



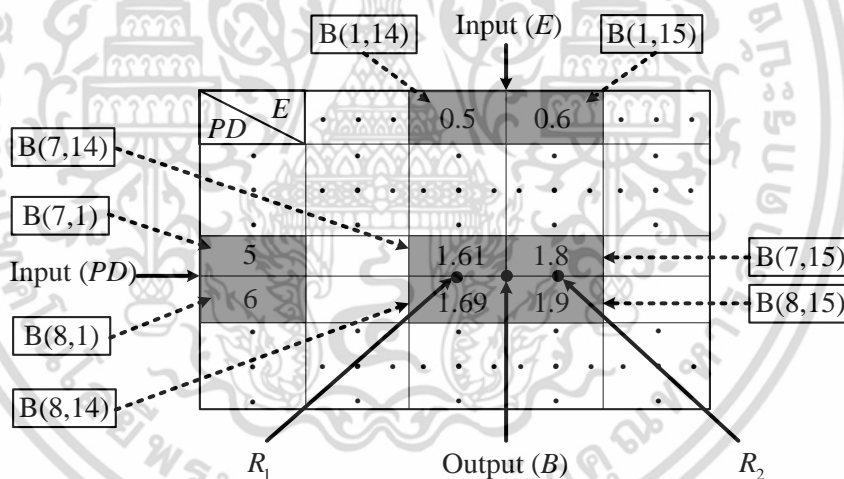
$$B = \frac{[ B(m,n) ][ \log(B(1,n+1)) - \log(E) ] + [ B(m,n+1) ][ \log(E) - \log(B(1,n)) ]}{\log(B(1,n+1)) - \log(B(1,n))} \tag{3.24}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.14 กระบวนการวนลูปข้อมูลเมื่อ Input (PD) และ Input (E) มีค่าอยู่ระหว่างข้อมูล



ตารางที่ 3.15 วิธี BI ภายในเงื่อนไขที่สี่สำหรับค่า B



$$R_1 = \frac{[ B(m,n) ][ \log(B(m+1,1)) - \log(PD) ] + [ B(m+1,n) ][ \log(PD) - \log(B(m,1)) ]}{\log(B(m+1,1)) - \log(B(m,1))} \tag{3.25}$$

$$R_2 = \frac{[ B(m,n+1) ][ \log(B(m+1,1)) - \log(PD) ] + [ B(m+1,n+1) ][ \log(PD) - \log(B(m,1)) ]}{\log(B(m+1,1)) - \log(B(m,1))} \tag{3.26}$$

$$B = \frac{[ R_1 ][ \log(B(1,n+1)) - \log(E) ] + [ R_2 ][ \log(E) - \log(B(1,n)) ]}{\log(B(1,n+1)) - \log(B(1,n))} \tag{3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



```

mfp = A(m,1);
energy = A(1,n);
if PD1==mfp&&E==energy % the 1st condition
    z = A(m,n) ;
    B1L1 = z ; % Exposure buildup factor in the 1st layer
elseif PD1>A(m,1)&& PD1<A(m+1,1)&&E==energy % the 2nd condition
    deltaz = (A(m+1,n)-A(m,n)) / (A(m+1,1)-A(m,1)) * ( PD1 - A(m,1));
    z = A(m,n)+deltaz ;
    B1L1 = z ; % Exposure buildup factor in the 1st layer
elseif E>A(1,n)&&E<A(1,n+1)&& PD1==mfp % the 3rd condition
    deltaz = (A(m,n+1)-A(m,n)) / (A(1,n+1)-A(1,n)) * ( E - A(1,n));
    z = A(m,n)+deltaz ;
    B1L1 = z ; % Exposure buildup factor in the 1st layer
% the 4th condition
elseif PD1>B(m,1)&& PD1<B(m+1,1)&&E>A(1,n)&&E<A(1,n+1)
    R1 = ((B(m,n)) * (log10(B(m+1,1))-log10(PD1)) +...
          (B(m+1,n)) * (log10(PD1)-log10(B(m,1))) ) /...
          ( log10(B(m+1,1)) - log10(B(m,1))) ;
    R2 = ((B(m,n+1)) * (log10(B(m+1,1))-log10(PD1)) +...
          (B(m+1,n+1)) * (log10(PD1)-log10(B(m,1))) ) /...
          ( log10(B(m+1,1)) - log10(B(m,1))) ;
    Bfactor = ((R1) * (log10(B(1,n+1))-log10(E)) +...
              (R2) * (log10(E)-log10(B(1,n))) ) /...
              ( log10(B(1,n+1)) - log10(B(1,n))) ;
    B1L1 = Bfactor ; % Exposure buildup factor in the 1st layer
end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function B1L2 = materialforB1E2L(E,PD2,B)
% (for-loop) command for running the data
% in the first column(0.5-40 mean free path [17 rows])
% by the initial value at 1 and the final value 17
for m = 1 : 17
    % (for-loop) command for running the data
    % in the first row( 0.015-15 MeV [26 columns])
    % by the initial value at 1 and the final value 26
    for n = 1 : 26
        % if-condition for calculation
        % logarithmic-bilinear interpolation
        mfp = A(m,1);
        energy = A(1,n);
        if PD2==mfp&&E==energy % the 1st condition
            z = A(m,n) ;
            B1L2 = z ; % exposure buildup factor in the 2nd layer
        elseif PD2>A(m,1)&& PD2<A(m+1,1)&&E==energy % the 2nd condition
            deltaz = (A(m+1,n)-A(m,n)) / (A(m+1,1)-A(m,1)) * ( PD2 - A(m,1));
            z = A(m,n)+deltaz ;
            B1L2 = z ; % exposure buildup factor in the 2nd layer
        elseif E>A(1,n)&&E<A(1,n+1)&& PD2==mfp % the 3rd condition
            deltaz = (A(m,n+1)-A(m,n)) / (A(1,n+1)-A(1,n)) * ( E - A(1,n));
            z = A(m,n)+deltaz ;
            B1L2 = z ; % exposure buildup factor in the 2nd layer
        elseif PD2>B(m,1) && PD2<B(m+1,1) && E>A(1,n) && E<A(1,n+1)
            R1 = ((B(m,n)) * (log10(B(m+1,1))-log10(PD2)) +...
                  (B(m+1,n)) * (log10(PD2)-log10(B(m,1))) ) /...
                  ( log10(B(m+1,1)) - log10(B(m,1))) ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

R2 = ((B(m,n+1))*(log10(B(m+1,1))-log10(PD2)) +...
      (B(m+1,n+1))*(log10(PD2)-log10(B(m,1))) ) /...
      ( log10(B(m+1,1)) - log10(B(m,1))) );
Bfactor = ((R1)*(log10(B(1,n+1))-log10(E)) +...
           (R2)*(log10(E)-log10(B(1,n))) ) /...
           ( log10(B(1,n+1)) - log10(B(1,n))) );
B1L2 = Bfactor ; % exposure buildup factor in the 2nd layer
end
end
end
end

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

### 3.2.3 การพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออกแบบเซชัน

ลำดับการพล็อตกราฟคอนทัวร์ภายในแมทแลปซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวถึงไว้ในบทที่ 2 หัวข้อย่อยที่ 2.5.3 นอกจากนี้ลักษณะการวิเคราะห์กราฟคอนทัวร์เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมถูกกล่าวไว้ในหัวข้อย่อยที่ 2.5.2 ดังนั้นสคริปไฟล์แมทแลปสำหรับการหาภาชนะที่เหมาะสมด้วยเทคนิคกราฟคอนทัวร์ถูกแสดงอยู่ด้านล่าง

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Solution of optimization by contour graphic %%%%%%%%%
% create array as x1 at initial value 0.1, final value 15,increment at 1
x1=0:1:20;
% create array as x2 at initial value 0.1, final value 15,increment at 1
x2=0:1:20;
% make coordinate point for the contour graph by intersection between x1,x2
[X1,X2]=meshgrid(x1,x2);

E = 0.662 ; % Photon energy of Cs-137 (MeV)
material1 = 'Pb'; % the first material as iron
material2 = 'Fe'; % the second material as lead
Io = 100; % the initial intensity of radiation (mSv/hr)
l1 = 10; % the thickness (cm) for the 1st layer
l2 = 10; % the thickness (cm) for the 2nd layer

% function file for calculation of mass and linear attenuation coefficient
[mac1,mac2,u1L1,u1L2] = linearAttenCoef1E2L(material1,material2,E);

PD1 = u1L1*l1; % a number of mean free path in the 1st layer
PD2 = u1L2*l2; % a number of mean free path in the 2nd layer

% function file for calculation of buildup factor
[B1L1,B1L2] = EABuildupfactor1E2L(material1,material2,E,PD1,PD2);

% function file for radiation intensity (I)
% as the objective function
f1 = objectivefunc(X1,X2,B1L1,B1L2,u1L1,u1L2,Io);

% function file for the thickness sum as
% the 1st constrained function
ineq1 = ineqconstraint1(X1,X2);

% function file for weight of cylindrical container as
% the 2nd constrained function
ineq2 = ineqconstraint2(X1,X2);

% function file for the price of cylindrical container as
% the 3rd constrained function
ineq3 = ineqconstraint3(X1,X2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% command for plotting contour graph of the objective function
[C,h] = contour(x1,x2,f1,[0.1,0.1],'k-');
set(h,'LineWidth',1.5)
hold on

% command for plotting contour graph of the 1st constrained function
[C1,h1] = contour(x1,x2,ineq1,[20,20],'k');
set(h1,'LineWidth',1.5)

% command for plotting contour graph of the 2nd constrained function
[C2,h2] = contour(x1,x2,ineq2,[1000,1000],'k-.');
set(h2,'LineWidth',1.5)
% command for plotting contour graph of the 3rd constrained function
[C3,h3] = contour(x1,x2,ineq3,[600,600],'k--');
set(h3,'LineWidth',1.5)

% command for complement of graph
% identify name of axis , size and weight of word on x-axis
xlabel('x1: lead(cm)', 'FontName','times',...
      'FontSize',18,'FontWeight','b');
% identify name of axis , size and weight of word on y-axis
ylabel('x2: Iron(cm)', 'FontName','times',...
      'FontSize',18,'FontWeight','b');
% identify name of axis , size and weight of word on title of graph
% set the step of number on x-axis
set(gca,'xtick',[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19,...
20], 'FontSize',18)
% set the step of number on y-axis
set(gca,'ytick',[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19,...
20], 'FontSize',18)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function f1 = objectivefunc(X1,X2,B1L1,B1L2,u1L1,u1L2,Io)
f1 = Io*(B1L1./exp(u1L1.*X1)).*( B1L2./exp(u1L2.*X2)) ;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function ineq1 = ineqconstraint1(X1,X2)
cair = 7 ;
ineq1 = cair X1 + X2 ;
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function ineq2 = ineqconstraint2(X1,X2)
cair = 7 ;
pIr = 7.874 ; % g/cm^3
pPb = 11.35 ; % g/cm^3
pAir = 0.001225 ; % g/cm^3

ineq2 = ( 2*pi*(1/1000) ) .* ( (pAir*(cair^3)) +,...
( pIr.*( ((X1+cair).^3) - (cair^3) ) ) ) +,...
( pPb.*( ((X1+X2+cair).^3) - (X1+cair).^3 ) ) ;

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function ineq3 = ineqconstraint3(X1,X2)
cair = 7 ;
pIr = 7.874 ;
pPb = 11.35 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Ircost = 0.028 ; % Iron price in unit USD/lb
Lecost = 0.97 ; % Lead price in unit USD/lb

Ineq3 = ( 4.4*pi*(1/1000) ) .* ( ( Lecost.*pIr.*( ((X1+cair).^3) -, ...
    (cair^3) ) ) ) + ( Ircost.*pPb.*( ((X1+X2+cair).^3) -, ...
    (X1+cair).^3 ) ) );

end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

ผลการวิจัยประกอบด้วย 4 ส่วนหลักดังนี้ ผลการตรวจสอบความถูกต้อง  $\mu/\rho$  และ  $B$  จากแมทแลป ผลการคำนวณค่า  $\mu/\rho$  และ  $B$  สำหรับการพล็อตกราฟคอนทิวร์ ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ ผลการพล็อตกราฟคอนทิวร์สำหรับการออปติไมเซชัน

#### 4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของค่า $\mu/\rho$ และ $B$ จากแมทแลป

ค่า  $\mu/\rho$  และ  $B$  ถูกตรวจสอบเพื่อยืนยันว่าสคริปต์ที่สร้างขึ้นในซอฟต์แวร์แมทแลปมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้จริงโดยการทดลองป้อนค่าอินพุต  $E$ , material สำหรับการคำนวณค่า  $\mu/\rho$  และ  $E$ , material,  $PD$  ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่เกิดจากผลคูณระหว่าง  $\mu$  และ  $x$  สำหรับการคำนวณค่า  $B$

##### 4.1.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

การคำนวณ  $\mu/\rho$  มีทั้งหมด 2 เงื่อนไขซึ่งขึ้นอยู่กับค่าอินพุตพลังงาน ผลการคำนวณค่า  $\mu/\rho$  ในเงื่อนไขที่หนึ่งด้วยแมทแลปถูกแสดงดังตารางที่ 4.1 เมื่ออินพุต  $E$  และ material ถูกป้อนเป็น 0.10, 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.80, 1.00, 1.25, 1.50, 2.00, 3.00, 4.00 MeV และคอนกรีตทั่วไป (Ordinary concrete) ข้อมูลตามตารางสามารถสังเกตได้ว่า ค่า  $\mu/\rho$  ที่ถูกคำนวณจากแมทแลปมีค่าเท่ากับฐานข้อมูล NIST เมื่ออินพุต  $E = 0.662$  MeV

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า  $\mu/\rho$  ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง

Input ( $E$ ) (MeV)	$\mu/\rho$ ของคอนกรีตทั่วไป	
	MATLAB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	NIST [4] ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
0.10	0.17380	0.17380
0.15	0.14360	0.14360
0.20	0.12820	0.12820
0.30	0.10970	0.10970
0.40	0.09783	0.09783
0.50	0.08915	0.08915
0.60	0.08236	0.08236
0.80	0.07227	0.07227
1.00	0.06495	0.06495
1.25	0.05807	0.05807

ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า  $\mu/\rho$  ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง

Input ( $E$ ) (MeV)	$\mu/\rho$ ของคอนกรีตทั่วไป	
	MATLAB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	MATLAB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
1.50	0.05288	0.05288
2.00	0.04557	0.04557
3.00	0.03701	0.03701
4.00	0.03217	0.03217

ผลการคำนวณ  $\mu/\rho$  ในเงื่อนไขที่สองถูกแสดงดังตารางที่ 4.2 เมื่ออินพุต  $E$  และ material ถูกป้อนเป็น 0.662 MeV และ คอนกรีตทั่วไปซึ่งเป็นวัสดุเดียวกับเงื่อนไขแรก ข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ถูกสังเกตเห็นว่าค่าเอาต์พุต  $\mu/\rho$  มีค่าเท่ากับ 0.07923  $\text{cm}^2/\text{g}$  ซึ่งอยู่ในช่วงของข้อมูลในคอลัมน์ที่สอง ดังนั้นผลการตรวจสอบการคำนวณค่า  $\mu/\rho$  จึงมีความถูกต้องและแม่นยำทั้งสองเงื่อนไข

ตารางที่ 4.2 ผลการคำนวณ  $\mu/\rho$  ภายในเงื่อนไขที่สอง

$E$	$\mu/\rho$
0.600	0.08236
0.662	0.07923
0.800	0.07227
...	...

Input ( $E$ ) → [0.662] ← Output ( $\mu/\rho$ )

#### 4.1.2 เอ็กซ์โพเชอร์บิวต์อัพแฟกเตอร์

ผลการคำนวณ  $B$  มีทั้งหมดสี่เงื่อนไข ผลการคำนวณในเงื่อนไขแรกถูกแสดงดังตารางที่ 4.3 เมื่ออินพุต  $PD$  คือ 0.50, 5.00 อินพุต  $E$  คือ 0.10, 2.00, 4.00, 6.00, 8.00, 10.00 MeV และอินพุต material คือ Fe ตามลำดับ ค่า  $B$  ที่ได้จากการคำนวณด้วยเมทแลปถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล ANS-6.4.3 นอกจากนี้ค่า  $B$  นี้ยังถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีการ Invariant embedding (IE) และ Chilton ซึ่งอยู่ในวารสารทางวิชาการที่ [15] วารสารนี้ได้กล่าวถึงค่า  $B$  จากฐานข้อมูล ANS-6.4.3 ซึ่งใช้วิธี Geometric progression fitting parameter สำหรับการคำนวณมีความถูกต้องและคลาดเคลื่อนเพียงแค่ 3 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับวิธีการคำนวณแบบ IE และ Chilton ดังนั้นฐานข้อมูล ANS-6.4.3 มีความแม่นยำที่สุดจากตารางที่ 4.3 เมื่อสังเกตจากตารางนี้ค่า  $B$  จากเมทแลปมีค่าตรงกับฐานข้อมูล ANS-6.4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณและการเปรียบเทียบค่า  $B$  ภายในเงื่อนไขที่หนึ่ง

Input ( $PD, E$ )	$B$ ของเหล็ก			
	MATLAB	ANS-6.4.3 [5]	IE [6]	Chilton [6]
0.50, 0.10	1.26	1.26	1.24	1.26
0.50, 2.00	1.35	1.35	1.36	1.35
0.50, 4.00	1.30	1.30	1.32	-
0.50, 6.00	1.25	1.25	1.30	-
0.50, 8.00	1.22	1.22	1.29	-
0.50, 10.00	1.19	1.19	1.28	1.19
5.00, 0.10	2.07	2.07	2.06	2.07
5.00, 2.00	5.22	5.22	5.29	5.22
5.00, 4.00	3.93	3.93	4.08	-
5.00, 6.00	3.25	3.25	3.57	-
5.00, 8.00	2.81	2.81	3.32	-
5.00, 10.00	2.50	2.50	3.23	2.50

ผลการคำนวณค่า  $B$  ในเงื่อนไขที่สองถูกแสดงดังตารางที่ 4.4 เมื่ออินพุต  $PD, E, material$  คือ 3.75, 2 MeV, Fe ค่าเอาต์พุต  $B$  มีค่าเท่ากับ 4.02 ซึ่งอยู่ในช่วงข้อมูลระหว่าง 3.34 และ 4.25 เครื่องหมายจุด (...) แสดงการลดระยะข้อมูลในตาราง เนื่องจากฐานข้อมูลนี้มีลักษณะเป็นตารางซึ่งประกอบด้วยจำนวนคอลัมน์และแถวที่ค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4.4 ผลการคำนวณค่า  $B$  ภายในเงื่อนไขที่สอง

		Input ( $E$ )		
$P.D$	$E$	...	2.00	...
	...	...	...	...
3.00	...	3.34	...	...
3.75	...	4.02	...	...
4.00	...	4.25	...	...
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...

Input ( $PD$ ) → [3.75] ← Output ( $B$ )

ผลการคำนวณในเงื่อนไขที่สามถูกแสดงดังตารางที่ 4.5 เมื่ออินพุต  $PD, E, material$  คือ 3, 3.25 MeV และ Fe ตามลำดับ วัสดุยังคงเป็นวัสดุเดิม ค่าเอาต์พุต  $B$  มีค่าเท่ากับ 2.89 ซึ่งอยู่ในช่วงข้อมูลระหว่าง 2.68 และ 2.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณค่า  $B$  ภายในเงื่อนไขที่สาม

			Input ( $E$ )		
$P.D \backslash E$	...	3.00	3.25	4.00	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Input ( $PD$ )	3.00	...	2.96	2.89	2.68
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
			Output ( $B$ )		

ผลการคำนวณในเงื่อนไขที่สี่ถูกแสดงดังตารางที่ 4.6 เมื่ออินพุต  $PD$ ,  $E$ , material คือ 4.75, 3.75 และ Fe ตามลำดับ ค่าเอาต์พุต  $B$  มีค่าเท่ากับ 3.89 ซึ่งอยู่ในช่วงข้อมูล 4 ค่า (3.29, 3.68, 3.93, 4.45) ที่มีค่าน้อยที่สุดที่ 3.29 และค่ามากที่สุดที่ 4.45 ดังนั้นผลการตรวจสอบการคำนวณค่า  $B$  ด้วยแมทแลปนั้นจากตารางที่ 4.3 ถึง ตารางที่ 4.6 มีความถูกต้องและแม่นยำทั้งสิ้นเงื่อนไข

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่า  $B$  ภายในเงื่อนไขที่สี่

			Input ( $E$ )		
$P.D \backslash E$	...	3.00	3.75	4.00	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Input ( $PD$ )	4.00	...	3.68	3.29	...
⋮	4.75	...	3.89	...	Output ( $B$ )
⋮	5.00	...	4.45	3.93	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

## 4.2 ผลการคำนวณ $\mu/\rho$ และ $B$ สำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์

### 4.2.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลสำหรับกราฟคอนทัวร์

ในงานวิจัยนี้กากกัมมันตรังสีปลดปล่อยพลังงาน 1.3325 MeV และวัสดุคอนทัวร์ความหนาสองชั้นคือตะกั่วและเหล็กตามลำดับจากด้านในของภาชนะมาด้านนอก ดังนั้นค่าอินพุต  $E = 1.3325$  MeV, material#1 = Pb และ material#2 = Fe สำหรับการคำนวณ  $\mu/\rho$  ผลการคำนวณค่า  $\mu_1/\rho_1$  สำหรับตะกั่วและ  $\mu_2/\rho_2$  สำหรับเหล็กถูกแสดงดังตารางที่ 4.8

### 4.2.2 เอ็กซ์โพเซอร์บิวต์อัพแพกเตอร์สำหรับกราฟคอนทัวร์

ผลการคำนวณ  $B$  ที่ผลรวมความหนารวม  $g_1(x_1, x_2) = 30$  ซม. และ  $r_{air} = 7$  cm ซึ่งที่ขนาดรัศมีนี้มีความเหมาะสมเพื่อจัดเก็บน็อตกัมมันตรังสียาว 10 ซม. ถูกแสดงดังตารางที่ 4.7 งานวิจัย [19] ในเอกสารอ้างอิงกล่าวว่ววัสดุที่มีคุณสมบัติการลดทอนรังสีที่ดีที่สุดต้องมีค่า  $B$  น้อยหรือเข้าใกล้ค่าหนึ่งซึ่งหมายถึงรังสีแกมมาเมื่ออัตราการเกิดอันตรกิริยาการกระเจิงและการผลิตคู่ย่อย นอกจากนี้ชั้นความหนาภาชนะมีลักษณะแบบความหนาสองชั้น ดังนั้นความเข้มรังสีที่ทะลุผ่านภาชนะขึ้นอยู่กับผลคูณของ  $B_1 B_2$  ด้วยเหตุนี้  $x_1, x_2$  ที่ถูกเลือกเพื่อคำนวณค่า  $B_1$  และ  $B_2$  สำหรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพล็อตกราฟคอนทัวร์คือ  $x_1 = 21$  cm และ  $x_2 = 2$  cm เพราะว่าที่ค่าความหนาแน่นให้ผลคูณของ  $B_1B_2$  น้อยที่สุด

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณ  $I_2$  ที่เข้าใกล้ 0.1 ฟังลบ ที่  $g_1(x_1, x_2) = 30$  cm

สำหรับภาชนะทรงกระบอกที่  $r_{air} = 7$  cm เมื่อ  $x_1$  คือตะกั่ว และ  $x_2$  คือเหล็ก

$r_{air}$ (cm)	$g_1(x_1, x_2)$ (cm)	$x_1$ (cm)	$x_2$ (cm)	$B_1$	$B_2$	$B_1B_2$	$I_2$ (mSv/hr)
7	30	1	22	1.2431	11.9342	14.8354	0.0978
		2	21	1.4763	11.2700	16.6379	0.0868
		3	20	1.6766	10.5734	17.72736	0.0732
		4	19	1.8819	9.9385	18.70326	0.0611
		5	18	2.0621	9.3386	19.25713	0.0498
		6	17	2.2348	8.7208	19.48924	0.0398
		7	16	2.4113	8.1675	19.69429	0.0318
		8	15	2.5801	7.5786	19.55355	0.0250
		9	14	2.7542	7.0394	19.38792	0.0196
		10	13	2.9272	6.5020	19.03265	0.0152
		11	12	3.0946	5.9567	18.4336	0.0117
		12	11	3.2683	5.4780	17.90375	0.0089
		13	10	3.4404	4.9537	17.04271	0.0067
		14	9	3.6095	4.5072	16.26874	0.0051
		15	8	3.7669	4.0445	15.23523	0.0037
		16	7	3.9322	3.5879	14.10834	0.0027
		17	6	4.1104	3.1991	13.14958	0.0020
		18	5	4.2785	2.7393	11.7201	0.0014
		19	4	4.4374	2.4240	10.75626	0.0010
		20	3	4.5882	2.0501	9.406269	0.0007
		21	2	4.7316	1.6681	7.892782	0.0004
		22	1	4.8684	-	-	-

ค่า  $B_1, B_2$  ซึ่งถูกเลือกสำหรับการพล็อตกราฟคอนทัวร์ที่  $x_1 = 21$  cm,  $x_2 = 2$  cm ถูกแสดงดังตารางที่ 4.8 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์  $B$  และ  $PD$  ที่  $E = 1.3325$  MeV

ตารางที่ 4.8 ค่า  $\mu/p$  และ  $B$  สำหรับงานวิจัยนี้จากแมทแลป

ชั้น ความหนา	ความหนาแน่นวัสดุ (gm/cm <sup>3</sup> )	$\mu/p$ (cm <sup>2</sup> /gm)	$\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	$x$ (cm)	$PD$ (-)	$B$
ตะกั่ว	11.35	0.0566	0.6424	21	13.4904	4.7316
เหล็ก	7.874	0.0519	0.4083	2	0.8166	1.6681

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังบุคคลอื่นใด  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะทรงกระบอกกับทรงลูกบาศก์

ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะเมื่อ  $x_1$  และ  $x_2$  ของภาชนะเป็นตะกั่วและเหล็กดังตารางที่ 4.9 น้ำหนักและราคาของภาชนะทรงกระบอกจะน้อยกว่าทรงลูกบาศก์ ดังนั้นภาชนะที่ถูกเลือกใช้จัดเก็บกากกัมมันตรังสีนี้จึงควรจะเป็นภาชนะทรงกระบอกเพราะน้ำหนักน้อยและราคาถูกกว่าแบบทรงลูกบาศก์อย่างชัดเจน น้ำหนักและราคาสำหรับภาชนะทรงกระบอกและทรงลูกบาศก์ถูกคำนวณดังสมการที่ 3.15, 3.17 และ 4.1, 4.2 ตามลำดับ

$$g_{\circ}(x_1, x_2) = \frac{1}{1000} \{ \rho_{air} (2r_{air})^3 + \rho_{lead} [(2x_1 + 2r_{air})^3 - (2r_{air})^3] + \rho_{iron} [(2x_1 + 2x_2 + 2r_{air})^3 - (2x_1 + 2r_{air})^3] \} \quad (4.1)$$

$$g_{\circ}(x_1, x_2) = \frac{1}{1000} \{ A \rho_{lead} [(2x_1 + 2r_{air})^3 - (2r_{air})^3] + B \rho_{iron} [(2x_1 + 2x_2 + 2r_{air})^3 - (2x_1 + 2r_{air})^3] \} \quad (4.2)$$

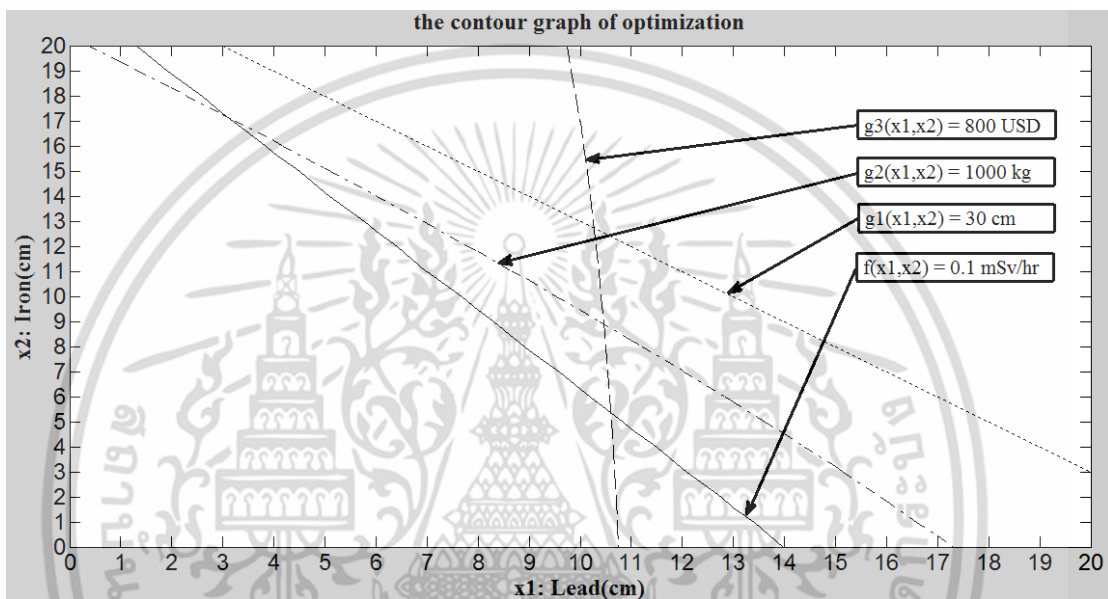
ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบน้ำหนักและราคาของภาชนะทรงลูกบาศก์และทรงกระบอกเมื่อ  $x_1$  คือตะกั่ว และ  $x_2$  คือเหล็ก

รัศมีภาชนะที่ $r_{air} = 7$ cm			ภาชนะทรงลูกบาศก์		ภาชนะทรงกระบอก		$I_2$ (mSv/hr)
$g_1(x_1, x_2)$ (cm)	$x_1$ (cm)	$x_2$ (cm)	น้ำหนัก (kg)	ราคา (USD)	น้ำหนัก (kg)	ราคา (USD)	
30	1	22	1683	135	1322	106	0.0978
	2	21	1689	176	1327	138	0.0868
	3	20	1697	228	1333	179	0.0732
	4	19	1706	291	1340	228	0.0611
	5	18	1717	366	1349	287	0.0498
	6	17	1730	455	1359	357	0.0398
	7	16	1745	559	1371	439	0.0318
	8	15	1763	679	1385	533	0.0250
	9	14	1783	816	1400	640	0.0196
	10	13	1806	971	1418	762	0.0152
	11	12	1831	1145	1438	899	0.0117
	12	11	1860	1340	1461	1053	0.0089
	13	10	1892	1557	1486	1223	0.0067
	14	9	1927	1796	1513	1411	0.0051
	15	8	1965	2060	1543	1618	0.0037
	16	7	2007	2348	1577	1844	0.0027
	17	6	2054	2663	1613	2091	0.0020
	18	5	2104	3005	1652	2360	0.0014
	19	4	2158	3375	1695	2651	0.0010
	20	3	2216	3775	1741	2965	0.0007
	21	2	2280	4206	1790	3303	0.0004
	22	1	2347	4669	1843	3667	

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานโดยไม่ได้รับอนุญาตจากสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

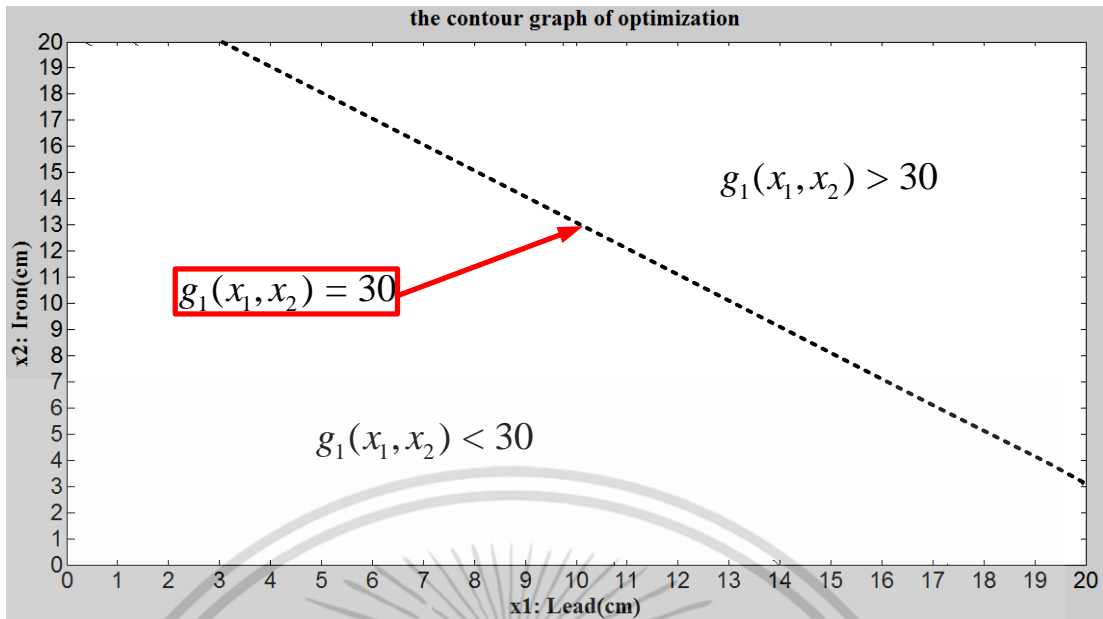
#### 4.4 ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน

ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับความหนาที่เหมาะสมของภาชนะถูกแสดงดังรูปที่ 4.1 ภายในกราฟเส้นทึบแสดงค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$  ที่ 0.1 mSv/hr เส้นประไขปลาแสดงค่าฟังก์ชันข้อจำกัดความหนา  $g_1(x_1, x_2)$  ที่ 30 cm เส้นที่เป็นจุดไขปลาแสดงค่าฟังก์ชันข้อจำกัดน้ำหนัก  $g_2(x_1, x_2)$  ที่ 1000 kg เส้นสุดท้ายคือเส้นขีดซึ่งแสดงค่าฟังก์ชันข้อจำกัดราคา  $g_3(x_1, x_2)$  ที่ 800 USD ความหนา  $(x_1, x_2)$  ที่เหมาะสมสำหรับภาชนะกักเก็บกากัมมันตรังสีจะถูกทราบจากการวิเคราะห์พื้นที่ที่ซ้อนทับจากค่าข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$  และฟังก์ชันข้อจำกัด  $g_1(x_1, x_2), g_2(x_1, x_2), g_3(x_1, x_2)$

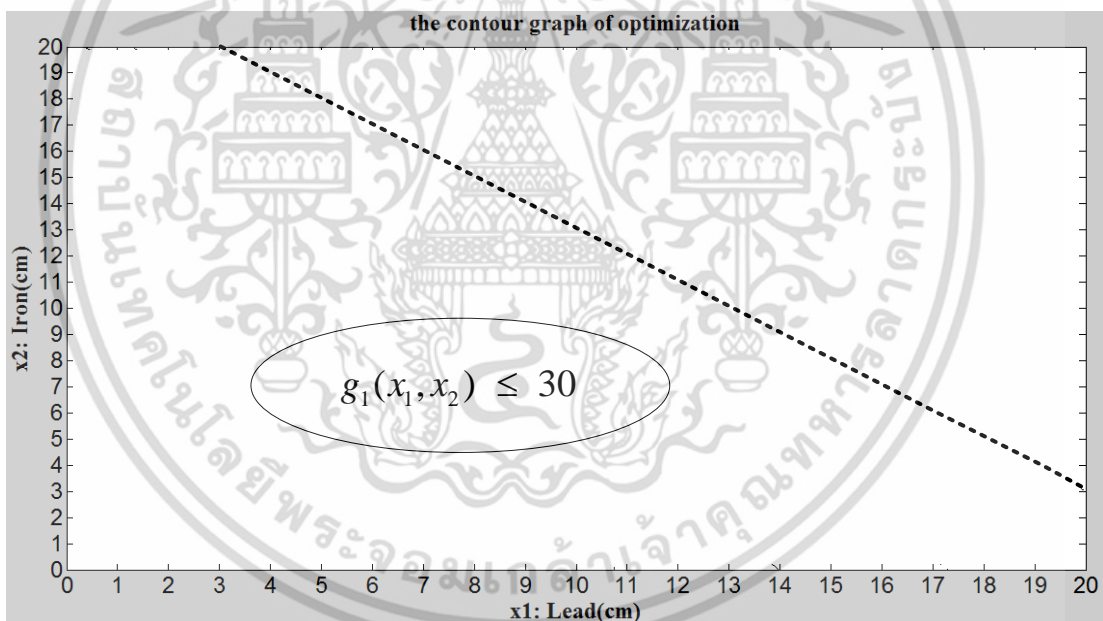


รูปที่ 4.1 ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน

การวิเคราะห์ขอบเขตพื้นที่ของฟังก์ชันข้อจำกัดน้ำหนัก  $g_1(x_1, x_2)$  ถูกแสดงดังรูปที่ 4.2 ค่าฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$  ที่ 30 cm ซึ่งมาจากการแทนค่า  $x_1, x_2$  อยู่ที่เส้นประ (dot line) พื้นที่ซึ่งอยู่ใต้เส้นประนี้ บ่งชี้ว่าค่าของ  $g_1(x_1, x_2)$  นั้นมีค่าน้อยกว่า 30 cm นอกจากนี้พื้นที่ซึ่งอยู่เหนือเส้นประบ่งบอกว่าฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$  มีค่ามากกว่า 30 cm เนื่องจากความหนาวัสดุต้องไม่เกิน 30 cm นั้นหมายความว่าน้อยกว่า หรือเท่ากับ 30 cm ดังนั้นขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$  คือพื้นที่ใต้เส้นประและอยู่บนเส้นประดังรูปที่ 4.3



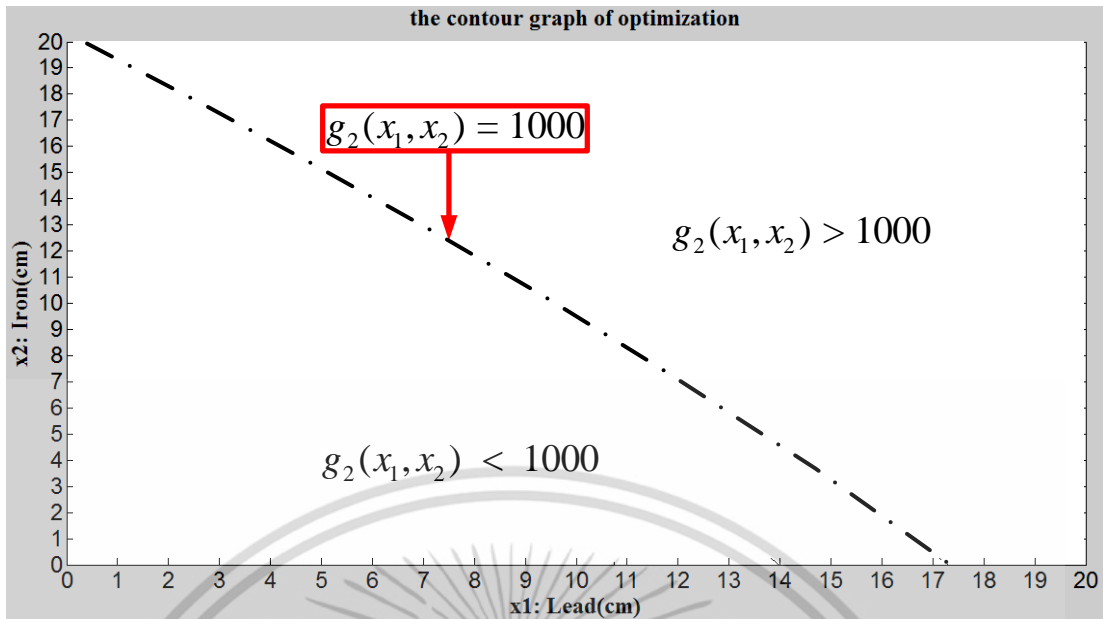
รูปที่ 4.2 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์



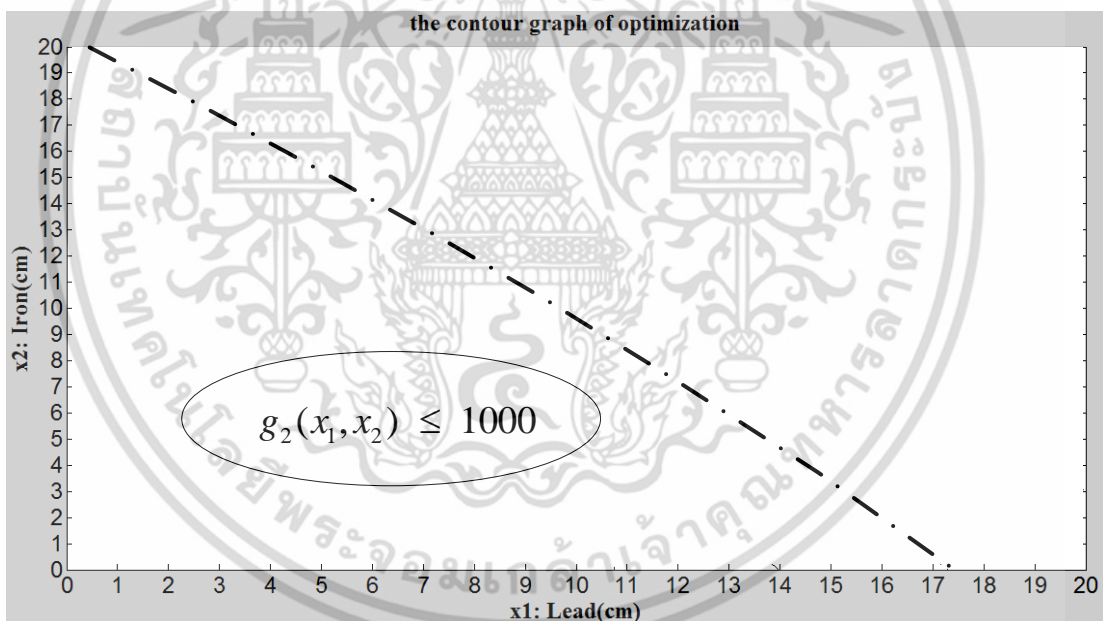
รูปที่ 4.3 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

การวิเคราะห์ขอบเขตฟังก์ชันข้อจำกัดน้ำหนัก  $g_2(x_1, x_2)$  ถูกแสดงดังรูปที่ 4.4 ค่าฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  ที่ 1000 kg อยู่ที่เส้นจุดขีด (dash-dot line) พื้นที่ซึ่งอยู่ใต้เส้นนี้เป็นบริเวณที่ค่าของฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  มีค่าน้อยกว่า 1000 kg ส่วนพื้นที่ซึ่งอยู่เหนือเส้นจุดขีดนี้เป็นพื้นที่ซึ่งค่าของฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  มากกว่า 1000 kg แต่น้ำหนักของภาชนะถูกกำหนดให้ไม่เกิน 1000 kg สำหรับรถโฟล์คคลิฟ ดังนั้นขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  คือบนเส้นจุดขีดและพื้นที่ซึ่งอยู่ใต้เส้นดังรูปที่ 4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

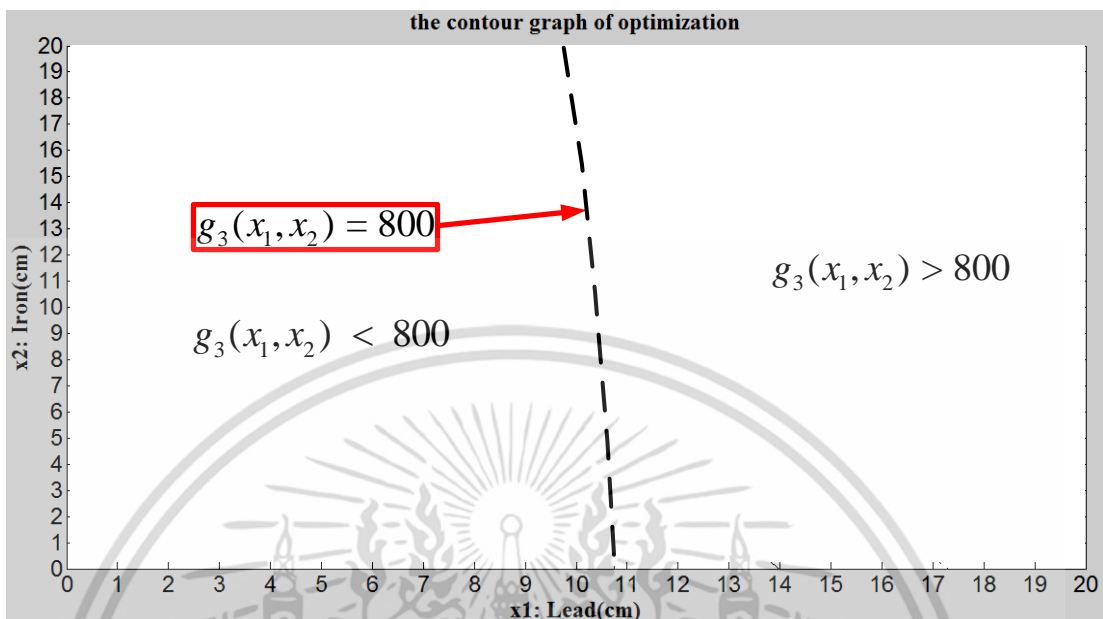


รูปที่ 4.5 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_2(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

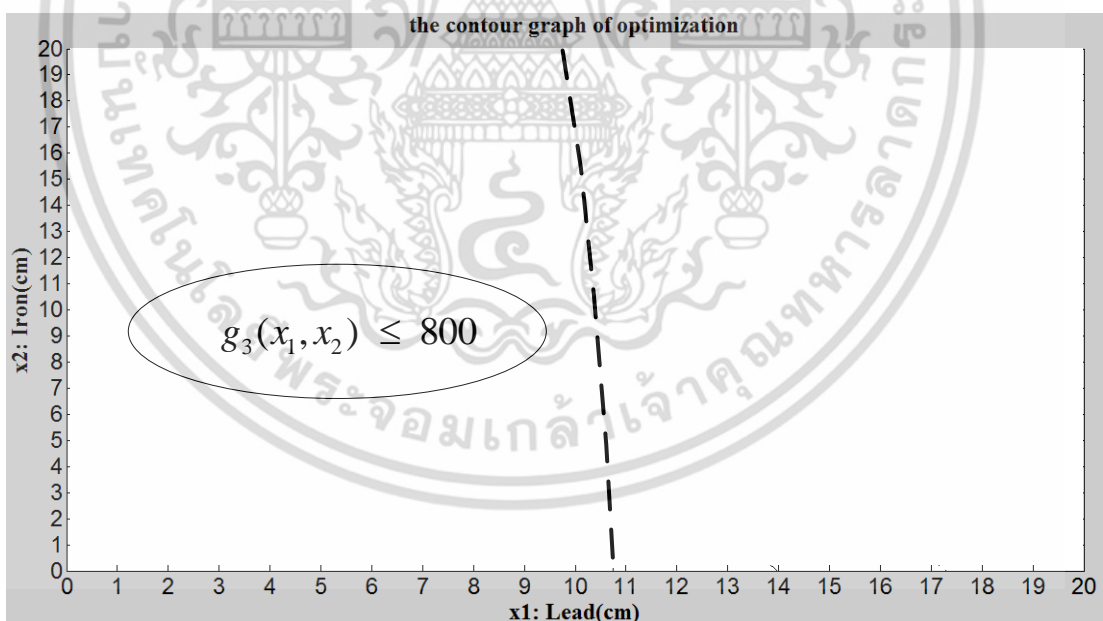
การวิเคราะห์ขอบเขตฟังก์ชันข้อจำกัดราคาถูกแสดงดังรูปที่ 4.6 เส้นประ (dash line) แสดงค่าฟังก์ชัน  $g_3(x_1, x_2)$  ที่ 800 USD พื้นที่ซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายและขวาของเส้นประคือพื้นที่ซึ่งแสดงค่าฟังก์ชัน  $g_3(x_1, x_2)$  ที่น้อยกว่า 800 USD และที่มากกว่า 800 USD ตามลำดับ งบประมาณที่ผู้วิจัยสามารถจ่ายเพื่อสร้างphasenมีไม่เกิน 800 USD ดังนั้นขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_3(x_1, x_2)$  ควรอยู่บนเส้นและอยู่บนพื้นที่ทางด้านซ้ายของเส้นประแสดงดังรูปที่ 4.7 ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$g_1(x_1, x_2)$ ,  $g_2(x_1, x_2)$  และ  $g_3(x_1, x_2)$  จากรูปที่ 4.3, รูปที่ 4.5 และ รูปที่ 4.7 ตามลำดับถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อหาขอบเขตข้อจำกัดรวมของฟังก์ชันซึ่งถูกแสดงดังรูปที่ 4.8 สำหรับการออกแบบไมเซชัน

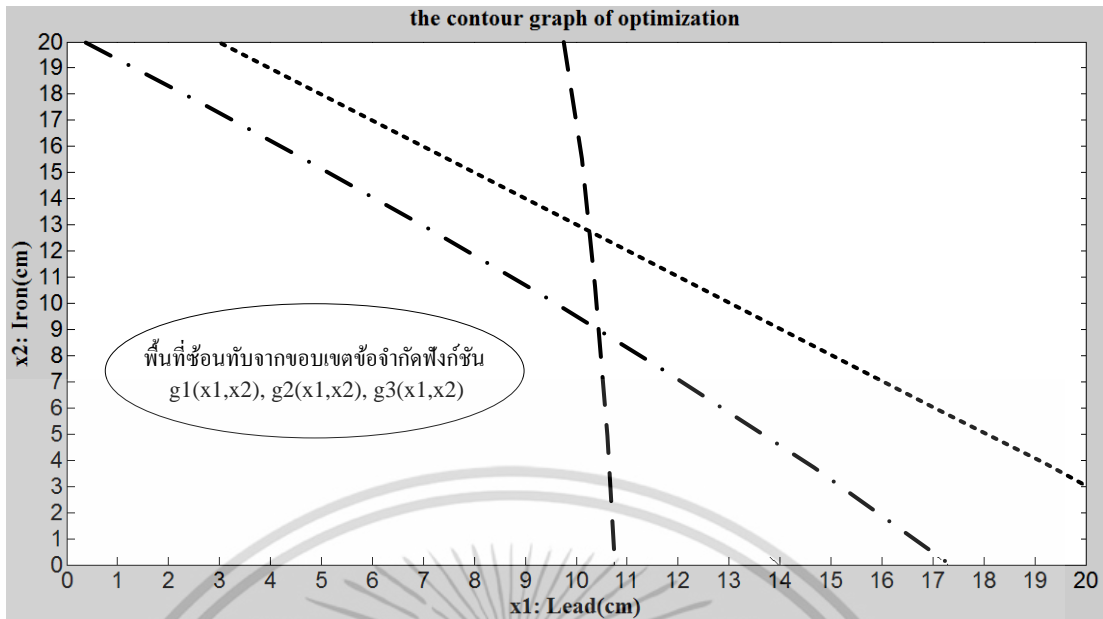


รูปที่ 4.6 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_3(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์



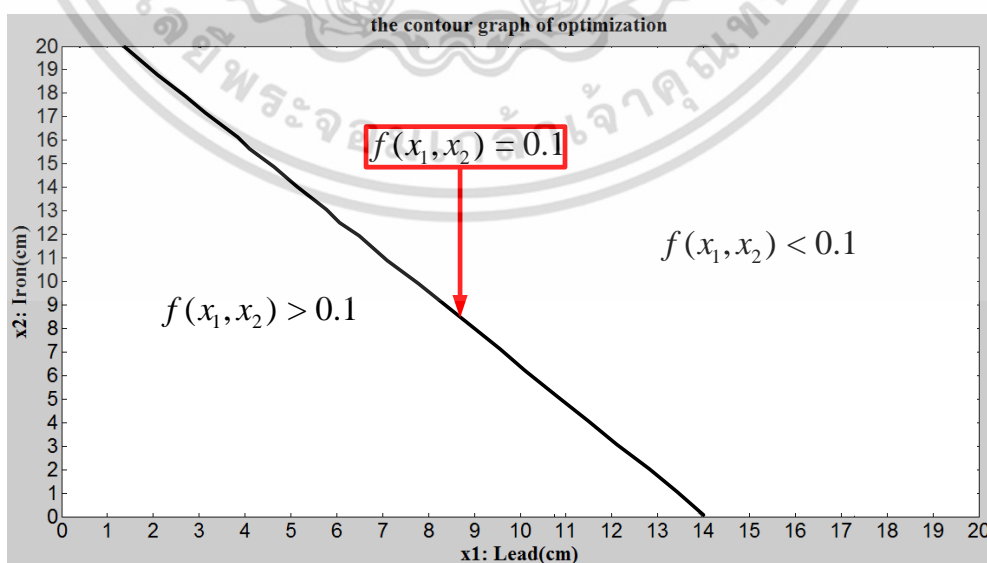
รูปที่ 4.7 ขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $g_3(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



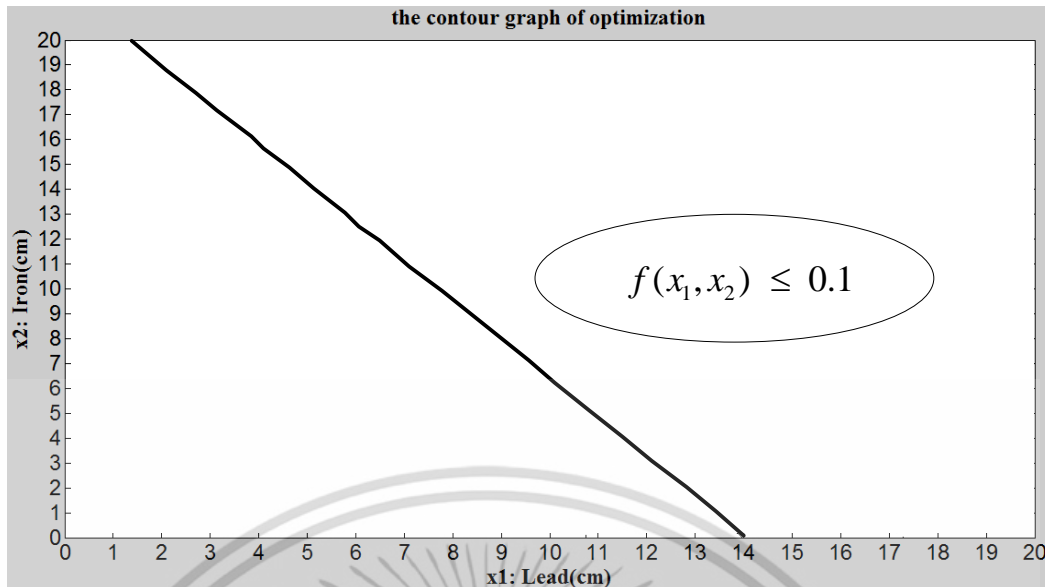
รูปที่ 4.8 การวิเคราะห์พื้นที่ซ้อนทับของฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$ ,  $g_2(x_1, x_2)$ ,  $g_3(x_1, x_2)$  จากขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันบนกราฟคอนทัวร์

จากนั้นสิ่งถัดไปที่กำลังถูกดำเนินการคือการวิเคราะห์ขอบเขตของฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$  ถูกแสดงดังรูปที่ 4.9 วิธีการวิเคราะห์  $f(x_1, x_2)$  มีลักษณะคล้ายคลึงกับ  $g_1(x_1, x_2)$ ,  $g_2(x_1, x_2)$ ,  $g_3(x_1, x_2)$  เริ่มต้นที่เส้นทึบซึ่งเป็นเส้นที่ฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  มีค่าเท่ากับ 0.1 mSv/hr พื้นที่ซึ่งอยู่ใต้และอยู่เหนือเส้นทึบคือค่าฟังก์ชันที่มากกว่า 0.1 mSv/hr และมีค่าน้อยกว่า 0.1 mSv/hr เหตุผลสำหรับผู้ปฏิบัติงานรังสีสามารถทำงานอยู่กับรังสีได้อย่างปลอดภัยและมีเวลาปฏิบัติงานเพียงพอมากกว่าหรือเท่ากับ 200 ชม. ดังนั้นความเข้มรังสีซึ่งผู้วิจัยต้องการลดทอนหลังจากผ่านภาชนะควรน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.1 mSv/hr สิ่งนี้ระบุขอบเขตข้อจำกัดฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.10



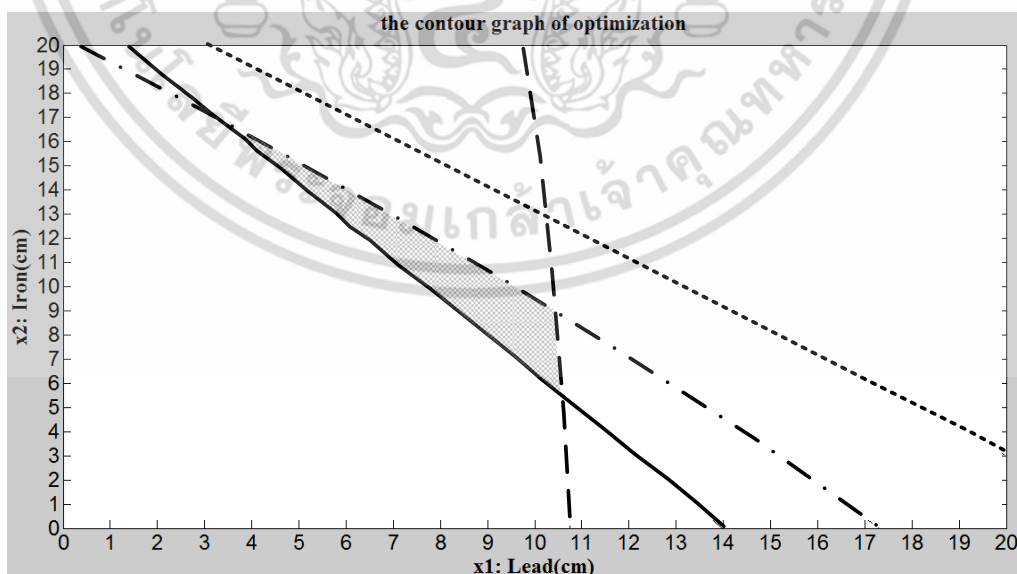
รูปที่ 4.9 การวิเคราะห์ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ ซึ่งการที่จะนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารนั้นเป็นการกระทำที่ไม่ถูกต้องใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 ขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  บนกราฟคอนทัวร์

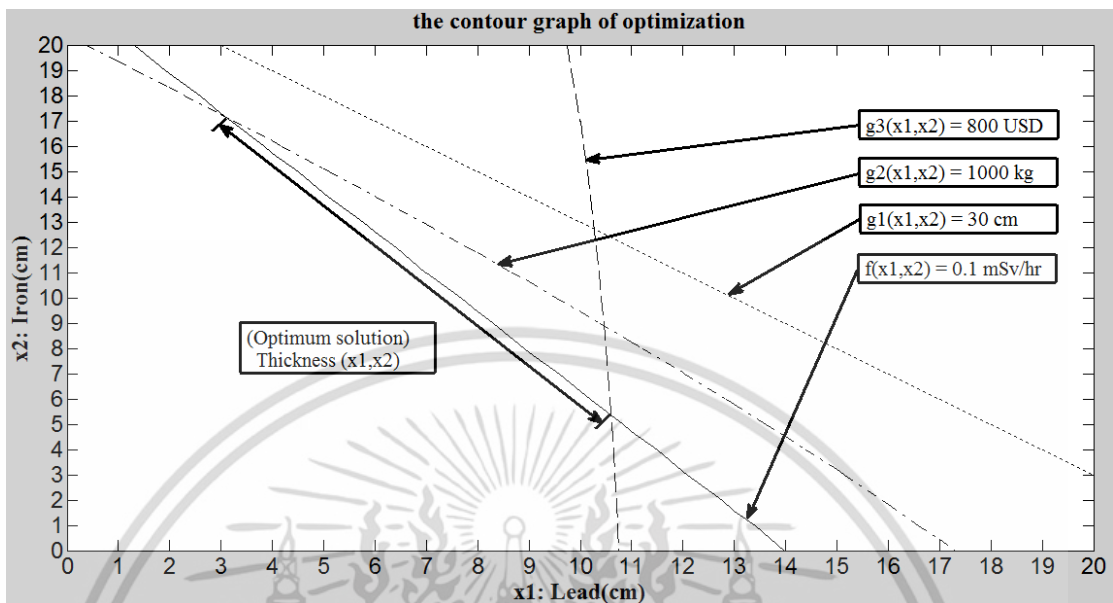
ความหนาที่เหมาะสมของภาชนะเก็บกากกัมมันตรังสีถูกแสดงบนกราฟคอนทัวร์ดังรูปที่ 4.11 โดยการคิดขอบเขตพื้นที่ซ้อนทับระหว่างฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  ดังรูป 4.10 กับฟังก์ชันข้อจำกัด  $g_1(x_1, x_2)$ ,  $g_2(x_1, x_2)$ ,  $g_3(x_1, x_2)$  ดังรูปที่ 4.8 พื้นที่แรเงาบนกราฟคือจุดพิคัดความหนาที่เหมาะสมของวัสดุซึ่งคือคำตอบที่ได้จากการออปติไมเซชัน ดังนั้นคำตอบที่ผู้วิจัยสนใจเมื่อพิจารณาจะอยู่บนเส้นฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  ตามรูปที่ 4.12 นอกจากนี้คำตอบ  $(x_1, x_2)$  ที่อยู่บนเส้นฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  ถูกนำมาคำนวณน้ำหนักและราคาของภาชนะเพื่อเลือกคำตอบที่ดีที่สุดเพียงค่าเดียวแสดงดังตารางที่ 4.10 ค่าพิคัดความหนา  $(x_1, x_2)$  ในตารางที่ 4.10 สืบได้จากจุดพิคัดบนกราฟคอนทัวร์กับเส้นกริดดังรูปที่ 4.13



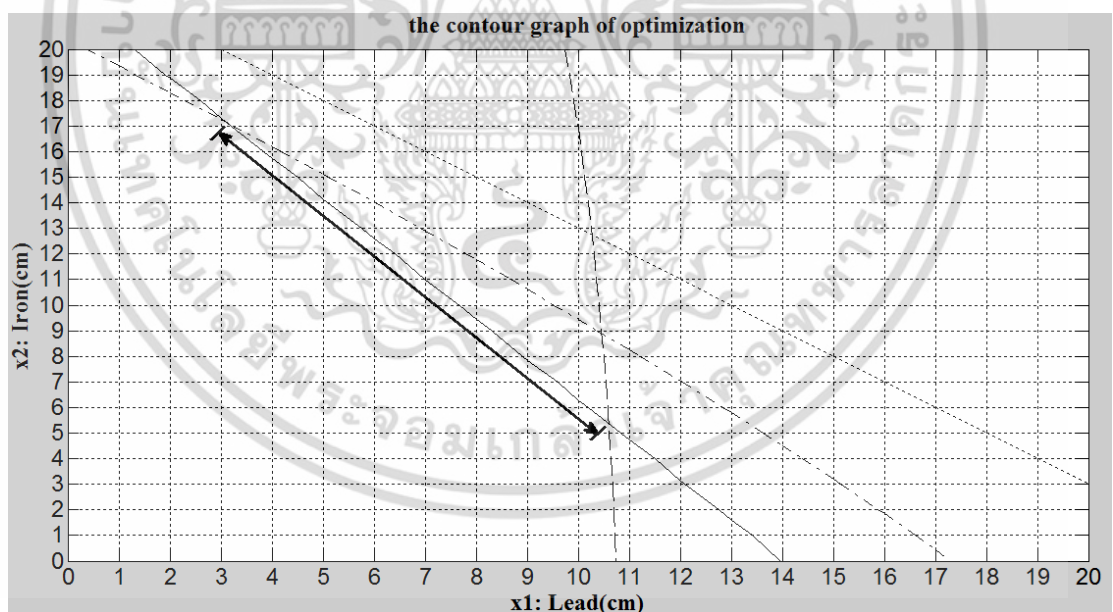
รูปที่ 4.11 การวิเคราะห์พื้นที่ซ้อนทับของฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  และฟังก์ชัน  $g_1(x_1, x_2)$ ,  $g_2(x_1, x_2)$ ,

$g_3(x_1, x_2)$  จากขอบเขตข้อจำกัดของฟังก์ชันบนกราฟคอนทัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ความหนาที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์พื้นที่ทับซ้อนของฟังก์ชัน



รูปที่ 4.13 ความหนาที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์พื้นที่ทับซ้อนของฟังก์ชันกับเส้นกริด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 น้ำหนักและราคาภาชนะจากความหนาที่เหมาะสมบนช่วงของฟังก์ชัน  $f(x_1, x_2)$  เมื่อ  $x_1$  (ตะกั่ว) และ  $x_2$  (เหล็ก)

$r_{air}$ (cm)	$x_1$ (cm)	$x_2$ (cm)	น้ำหนัก (kg)	ราคา (USD)
7	4	15.7	946.3	204.3
7	5	14.1	892.9	259.6
7	6	12.6	853.5	326.5
7	7	11	808.4	404.6
7	8	9.5	776.8	495.9
7	9	7.8	731.9	599.7
7	10	6.3	708.6	719.0
7	10.2	6	704.4	744.7
7	9.5	7	715.7	657.2
7	8.8	8	728.6	577.1
7	8.3	9	763.6	525.6
7	7.6	10	780.0	457.3
7	7	11	808.4	404.6
7	6.4	12	838.8	356.5
7	5.7	13	860.0	305.0
7	5.1	14	893.8	266.1
7	4.5	15	929.4	231.3
7	3.7	16	943.9	188.5
7	3.2	17	994.3	167.3

จากข้อมูลในตารางที่ 4.10 พบว่าความหนา ( $x_1, x_2$ ) ที่เหมาะสมที่ผู้วิจัยเลือกเป็นคำตอบสำหรับภาชนะคือที่  $x_1 = 3.7$  cm สำหรับตะกั่ว และที่  $x_2 = 16$  cm สำหรับเหล็ก เพราะว่าราคาภาชนะต่ำที่สุด และรรถโพลีคลิฟยังคงสามารถยกภาชนะที่ความหนาดังกล่าวได้

## บทที่ 5

# สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

#### 5.1.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องค่า $\mu/\rho$ และ $B$ จากแมทแลป

ผลการคำนวณค่า  $\mu/\rho$  ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณ 2 เงื่อนไขและ  $B$  ซึ่งมีรูปแบบการคำนวณ 4 เงื่อนไขที่ได้จากการคำนวณด้วยซอฟต์แวร์แมทแลปถูกตรวจสอบพบว่ามีค่าความถูกต้องและแม่นยำโดยการสังเกตค่าที่ได้จากแมทแลปเทียบกับฐานข้อมูล NIST และ ANS-6.4.3 ตามลำดับ

#### 5.1.2 ผลการคำนวณค่า $\mu/\rho$ และ $B$ สำหรับการพล็อตกราฟคอนทัวร์

สำหรับงานวิจัยนี้ กากกัมมันตรังสีปลดปล่อยพลังงานที่  $E = 1.3325$  MeV ความหนาแน่นของชั้นด้านในและด้านนอกคือตะกั่วและเหล็ก ตามลำดับ หัวข้อ 5.1.1 ยืนยันว่าซอฟต์แวร์แมทแลปสามารถคำนวณค่าพารามิเตอร์และแฟกเตอร์ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นซอฟต์แวร์แมทแลปสามารถประมวลผลค่า  $\mu_1/\rho_1$  สำหรับตะกั่วและ  $\mu_2/\rho_2$  สำหรับเหล็กมีค่าเท่ากับ  $0.6424 \text{ cm}^2/\text{g}$  และ  $0.0519 \text{ cm}^2/\text{g}$ , ตามลำดับ ค่า  $\mu_1$  และ  $\mu_2$  มีค่าเท่ากับ  $0.6424 \text{ cm}^{-1}$ ,  $0.4083 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ เมื่อ  $\rho_1 = 11.35 \text{ g/cm}^3$  (ตะกั่ว)  $\rho_2 = 7.874 \text{ g/cm}^3$  (เหล็ก) ค่า  $PD_1 = \mu_1 x_1$  ของตะกั่วและ  $PD_2 = \mu_2 x_2$  ของเหล็กซึ่งเป็นค่าอินพุตสำหรับการคำนวณ  $B_1$  และ  $B_2$  มีค่าเท่ากับ 13.4904 และ 0.8166 ตามลำดับ เมื่อ  $x_1 = 21 \text{ cm}$  (ตะกั่ว),  $x_2 = 2 \text{ cm}$  (เหล็ก) ซึ่งเป็นค่าที่ถูกพิจารณาว่าเหมาะสมที่สุดสำหรับ  $B$  และข้อจำกัดการได้รับรังสีของผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี ดังนั้น  $B_1$  และ  $B_2$  มีค่าเท่ากับ 4.7316, 1.6681 ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์และแฟกเตอร์นี้เป็นองค์ประกอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการออปติไมเซชัน

#### 5.1.3 ผลการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการออปติไมเซชัน

ความหนาแน่นของชั้น ( $x_1, x_2$ ) ที่ได้จากการวิเคราะห์ขอบเขตฟังก์ชันวัตถุประสงค์  $f(x_1, x_2)$  และฟังก์ชันข้อจำกัด  $g_1(x_1, x_2), g_2(x_1, x_2), g_3(x_1, x_2)$  ที่ค่า  $r_{air} = 7 \text{ cm}$  โดยการพิจารณาพื้นที่ซ้อนทับจากข้อจำกัดฟังก์ชันทั้งหมดคือ  $x_1 = 3.7 \text{ cm}$  สำหรับตะกั่วและ  $x_2 = 16 \text{ cm}$  สำหรับเหล็ก น้ำหนักและราคาภาชนะที่ความหนานี้คือ 943.9 kg. และ 188.5 USD นอกจากนี้ภาชนะที่ความหนานี้สามารถลดทอนรังสีจาก  $I_0 = 100 \text{ mSv/hr}$ ,  $I_2 = 0.1 \text{ mSv/hr}$  ซึ่งคิดเป็น 1000 เท่า การลดทอนที่ความเข้มรังสีนี้ทำให้ผู้ปฏิบัติงานด้านรังสีสามารถทำงานอยู่กับรังสีได้เพียงพอที่ 200 ซม. โดยที่ไม่เป็นอันตรายตามกฎหมายการได้รับปริมาณรังสีของ ICRP สำหรับผู้ปฏิบัติงานรังสี

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยสามารถนำสคริปต์ไฟล์ซอฟต์แวร์แมทแลปไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณความหนาแน่นของภาชนะเพื่อนำไปเก็บกากกัมมันตรังสีอื่นๆสำหรับการจัดการกากกัมมันตรังสีและเพื่อคำนวณความหนาแน่นของห้องปฏิบัติการควบคุมรังสีสำหรับการประเมินความปลอดภัยด้านรังสีโดยผู้ใช้สามารถระบุตัวแปรอินพุต  $E, I_0, \text{material}$  และโดยการแก้ไขค่าข้อจำกัดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ฟังก์ชันข้อจำกัดความหนาแน่น น้ำหนักและราคา ตามลำดับสำหรับเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์ เวลาที่ผู้วิจัยได้ทำการป้อนตัวแปรอินพุตและแก้ไขค่าข้อจำกัดของฟังก์ชันซึ่งเป็นตัวเลขคือประมาณ 8 วินาที มากกว่านั้นเวลาเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ซอฟต์แวร์ใช้เวลาเพื่อประมวลผลคือประมาณ 2 วินาที ดังนั้นเวลาทั้งหมดที่ใช้คือประมาณ 10 วินาที ซึ่งเป็นเพียงเวลาอันน้อยนิด

นอกจากนี้รูปแบบการคำนวณตารางฐานข้อมูล NIST สำหรับ  $\mu/p$  ซึ่งมีการคำนวณ 2 เงื่อนไข ด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงข้อมูลแบบลอการิทึมและการคำนวณตารางฐานข้อมูล ANS-6.4.3 สำหรับ  $B$  ซึ่งมีการคำนวณ 4 เงื่อนไขด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงข้อมูลแบบลอการิทึมใน 2 แนวแกน สามารถถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณข้อมูลทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมอื่นๆที่มีลักษณะเป็นตารางซึ่งเหมือนกับตารางฐานข้อมูล NIST และ ANS-6.4.3

สุดท้ายเทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์สำหรับการหาความหนาที่เหมาะสมของภาชนะเพื่อจัดเก็บกากกัมมันตรังสีภายในงานวิจัยนี้มีเงื่อนไขจำนวนตัวแปรเพียงแค่ 2 ตัวแปร ( $x_1, x_2$ ) ซึ่งเป็นชั้นความหนา 2 ชั้นได้แก่ ตะกั่วและเหล็ก ในกรณีที่มีความหนาภาชนะถูกพิจารณาเพื่อมีมากกว่า 2 ชั้นความหนา เทคนิคการพล็อตกราฟคอนทัวร์จะไม่สามารถนำมาใช้ได้ สิ่งที่ผู้วิจัยแนะนำสำหรับการหาความหนาที่เหมาะสมซึ่งมีชั้นความหนามากกว่า 2 ชั้นขึ้นไปคือการเลือกใช้คำสั่งที่อยู่ในกล่องเครื่องมือการออปติไมเซชันที่ซอฟต์แวร์แมทแลบได้จัดหามาให้เพื่อคำนวณหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Available: <https://hps.org/publicinformation/ate/q8900.html>
- [2] Hai, N. V. and Hung, N. V. 2014. "Using Weight Window in MCNPX to Calculate and Simulate Dose Distribution at Outside of Treatment Room in Dong Nai General Hospital to Radiation Safety Assessment for This Area." *International Journal of Science and Research*. 3(12): 445-448.
- [3] Singh, V. P. Ali, A. M. Badiger, N. M. and El-Khayatt, A. M. 2013. "Monte Carlo Simulation of Gamma Ray Shielding Parameter." *Nuclear Engineering and Design*. 265: 1071-1077.
- [4] Merk, R. Kroger, H. Edelhauser-Hornung, L. and Hoffmann, B. 2013. "PENelope-2008 Monte Carlo Simulation of Gamma Exposure Induced by Co-60 and NORM-Radionuclides in Closed Geometries." *Applied Radiation and Isotope*. 82: 20-27.
- [5] X-5 Monte Carlo Team. 2003. **MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code (Version 5) Volume 1 : overview and theory**, Los Alamos Laboratory. April 24 (Revised 2/1/2008).
- [6] X-5 Monte Carlo Team. 2003. **MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code (Version 5) Volume 2 : user's guide**, Los Alamos Laboratory. April 24 (Revised 10/3/05, 2/1/2008).
- [7] Venkataraman, P. 2009. **Applied Optimization with MATLAB Programming**. New Jersey: Wiley.
- [8] Chapman and Stephen, J. 2012. **MATLAB Programming with Applications for Engineers**. New York: Clifton Park.
- [9] Hubbell, J.H. and Seltzer, S. M. 1996. "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements  $Z = 1$  to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest." Radiation Physics Division PML and NIST.
- [10] ANSI. 1991. American National Standard Gamma-Ray Attenuation Coefficient Buildup factors for Engineering materials. ANSI/ANS-6.4.3 .
- [11] Al-Arif, M. S. and Kakil, D. O. 2015. "Calculated-Experimental Model for Multilayer Shield." *The Scientific Journal of Koya University*. 3(1): 5 pages.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] Available: <http://www.infomine.com/investment/metal-prices/lead/>
- [13] Available: <http://www.infomine.com/investment/iron-ore/>
- [14] Singh, B. Kumar, V. Singh, S. and Sidhu, G. S. 2013. "Investigations of Mass Attenuation Coefficient and Energy Absorption Buildup Factors of Some Low-Z Gamma Ray Shielding Materials." *International Journal of Latest Research in Science and Technology*. 2(5): 73-77.
- [15] Salehi, D. Sardari, D. and Jozani, M. S. 2014. "Estimation of Exposure Buildup Factor in Iron Using Different Method : A Comparative Study." *Journal of Nuclear Energy Science & Power Generation Technology*. 3(2): 6 pages.
- [16] Chang and Tsung, K. 2014. **Computation for Bilinear interpolation: Introduction to Geographic Information Systems**. 7<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- [17] Available : [https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear\\_interpolation](https://en.wikipedia.org/wiki/Bilinear_interpolation)
- [18] Available : [http://www.ajdesigner.com/phpinterpolation/bilinear\\_interpolation\\_equation.php](http://www.ajdesigner.com/phpinterpolation/bilinear_interpolation_equation.php)
- [19] Gupta, S. and Sidhu, G. S. 2014. "Computation of Mass Attenuation Coefficient, Energy Absorption Buildup Factor and Exposure Buildup Factor for Teeth in the Energy Range 0.015-15 MeV up to 40 mfp." *International Journal of Engineering and Technical Research*. 2(7): 8 pages.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นายกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์
วัน เดือน ปีเกิด	23 สิงหาคม 2534
ที่อยู่ปัจจุบัน	310/137 หมู่บ้านปิติวรรณ ถ.สวรรค่วิถี ต.ปากน้ำโพ อ.เมือง จ.นครสวรรค์
ประวัติการศึกษา	(2557) วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 2.99 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2559) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.38 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-
ผลงานทางวิชาการ	1. การประมวลผลสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและเอ็กซ์โพเซอรับิวต์ อัมพลกเตอร์โดยรูปแบบการคำนวณใหม่ในซอฟต์แวร์แมทแลปสำหรับการป้องกันรังสี 2. .... 3. ....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้