



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

### การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการยืดและหดตัวของกล้ามเนื้อจำลอง Design and Fabrication of Instrument for Extension and Contraction of Muscle Model

นาย กฤษกร โล่เจริญรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์  
นาง สาหรัย เล็กชะอุ่ม ภาควิชาฟิสิกส์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ การออกแบบและสร้างเครื่องมือวัดการยืดและหดตัวของกล้ามเนื้อจำลอง

แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี

ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2560 ถึง 30 กันยายน 2561

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ

นาย กฤษกร โล้เจริญรัตน์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

ชื่อ-สกุล ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางสาวร่าย เล็กชะอุ่ม ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

### บทคัดย่อ

ผู้วิจัยศึกษาหลักการเคลื่อนที่ของโฟตอนผ่านเนื้อเยื่อเชื่อมมนุษย์จำนวนสามชิ้น คือ ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย โดยการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จากหลักการของมอนติคาร์โลร่วมกับทฤษฎีการเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อ ตัวแปรที่สำคัญในแบบจำลองนี้ ได้แก่ ดัชนีหักเห สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และการกระเจิง แอนไอโซโทปิกแฟลคเตอร์ เป็นต้น ต่อมาการประมวลผลของแบบจำลองนี้จะกำหนดโฟตอนผ่านเนื้อเยื่อเชื่อมมนุษย์จำนวน 100 - 100000 ตัว เพื่อหาบริเวณความกว้างและความลึกของโฟตอนที่กระจายตัวผ่านเนื้อเยื่อเชื่อมมนุษย์ โดยพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสำหรับความกว้างและความลึกของโฟตอนที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.0697 และ 0.0103 ตามลำดับ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การแปรผันสำหรับความกว้างและความลึกของโฟตอนที่ได้มีค่าเท่ากับ 7.1347 และ 1.6220 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนผ่านเนื้อเยื่อเชื่อมมนุษย์นี้มีความถูกต้องและแม่นยำ

คำสำคัญ : แบบจำลองกล้ามเนื้อ, การเคลื่อนที่ของแสง, แหล่งกำเนิดแสง, เครื่องตรวจจับ, มนุษย์

**Research Title:** Design and Fabrication of Instrument for Extension and Contraction of Muscle Model

**Main-Researcher:**

Mr. Kitsakorn Locharoenrat

**Faculty:** Science

**Department:** Physics

**Co-Researcher:**

Mrs. Sarai Lekchaum

**Faculty:** Science

**Department:** Physics

## ABSTRACT

We study the principle of photon propagation in human tissue consisted of three layers; skin, fat and skeletal muscle via a mathematical model. The algorithm of this model is programmed according to Monte Carlo approach and photon propagation theory in human tissue. The key parameters for this simulation are reflection index absorption coefficient, scattering coefficient and anisotropy factor. The number of photon is defined from 100 to 100000 photons to detect the width and depth values of photon distributions in human tissue. The simulation results show that the standard deviation of the width and depth of photon distributions in human tissue are 0.0697 and 0.0103 respectively, whilst the coefficient of variation of the width and depth of photon distributions in human tissue are 7.1347 and 1.6220 %, respectively. Therefore, we conclude that the simulation of photon propagation in human tissue model is correct and precise.

**Keywords:** Muscle model, Light propagation, Point source, Detector, Human

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

นาย กฤษกร โส้เจริญรัตน์

นาง สาหรัย เล็กชะอุ่ม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญภาพ	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	<b>4</b>
2.1 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ	4
2.2 การเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อ	7
2.3 การตรวจวัดทางแสงในด้านการแพทย์	10
2.4 โปรแกรมเมทแลป	11
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	13
2.6 เอกสารอ้างอิง	14
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินการวิจัย</b>	<b>15</b>
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	<b>24</b>
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย</b>	<b>32</b>
<b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย</b>	<b>33</b>

**ภาคผนวก****ภาคผนวก ก** สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินโครงการวิจัย**ประวัติผู้วิจัย**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย	2
3.1 พารามิเตอร์ความหนา ดัชนีการหักเห และแอนนิโซโทรปีกเฟกเตอร์ของแต่ละชั้นเนื้อเยื่อ	15
3.2 พารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแต่ละชั้นเนื้อเยื่อ	15



## สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ 3 ชั้น (ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อ)	4
2.2 กล้ามเนื้อลาย	6
2.3 กล้ามเนื้อหัวใจ	6
2.4 กล้ามเนื้อเรียบ	7
2.5 ตำแหน่งเริ่มต้นของโฟตอนเนื้อเยื่อ	7
2.6 ตัวอย่างการดูดกลืนและกระกระเจิงของแสง	9
3.1 แสดงโครงสร้างของชั้นเนื้อเยื่อ (ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย)	15
3.2 ตำแหน่งการวางตัวตรวจจับสัญญาณและแหล่งให้กำเนิดแสง	16
3.3 การทำงานของโปรแกรมเมทแลป	17
3.4 การสุ่มตัวอย่างตัวแปรสุ่ม $\chi$ บนพื้นฐานของตัวแปรสุ่มแบบกระจาย $\xi$	20
3.5 การจัดวางตำแหน่งของเครื่องมือ (ซ้าย) และการดำเนินการของ โปรแกรมเมทแลป (ขวา)	21
4.1 การเคลื่อนที่ของโฟตอนเดี่ยว	24
4.2 โฟตอนกระจายตัวลึกลงในเนื้อเยื่อสามชั้น โดยที่ชั้นสุดท้ายเป็นกล้ามเนื้อลาย(ซ้าย)และทองคำ(ขวา)	25
4.3 ตัวอย่างการกระจายตัวของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำนวน (ก) 100 (ข) 200 (ค) 500 (ง) 1000 (จ) 2000 (ฉ) 5000 (ช) 10000 ตัว	26
4.4 สดัดการเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำนวน (ก) 100 (ข) 200 (ค) 500 (ง) 1000 (จ) 2000 (ฉ) 5000 (ช) 10000 (ซ) 20000 (ฅ) 50000 (ณ) 100000 ตัว	28
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของเนื้อเยื่อกับจำนวน โฟตอน	28
4.6 ตัวอย่างการกระจายตัวของโฟตอนบนเนื้อเยื่อมนุษย์ที่โฟตอน (ก) 100 (ข) 1000 (ค) 2000 (ง) 5000 (จ) 10000 (ฉ) 20000 (ช) 100000 ตัว	30
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างบนชั้นผิวหนังกับจำนวนโฟตอน	31

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

กล้ามเนื้อลายหรือกล้ามเนื้อยึดกระดูกคือกล้ามเนื้อที่พบมากที่สุดในร่างกายโดยจะยึดเกาะอยู่กับกระดูกทั่วทุกส่วนของร่างกาย เช่น ลำตัว แขน ขา ใบหน้า เป็นต้น การหดหรือการคลายตัวของกล้ามเนื้อที่เกิดจากการเคลื่อนที่เข้าหากันส่งผลทำให้เกิดการเคลื่อนไหวในส่วนต่างๆของร่างกาย ในปัจจุบัน โรคหรือกลุ่มอาการปวดเมื่อยกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อพังศีมักพบในผู้ชายมากกว่าผู้หญิงซึ่งจะอยู่ในช่วงอายุ 31-50 ปี โดยเกิดจากอาการที่ผู้ทำงานนั่งอยู่ในท่าใดท่าหนึ่งเป็นเวลานานๆหรืออาจเกิดจากการใช้กล้ามเนื้อในการทำงานอย่างหนักหน่วงต่อเนื่องซ้ำๆกัน โดยไม่มีการพักร่วมกับความเครียดหรือการพักผ่อนไม่เพียงพอและยังฝืนทำงานต่อ จึงส่งผลให้มีการหดตัวอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการสะสมค้างส่งผลทำให้มีอาการปวดกล้ามเนื้อมากขึ้น การตรวจสอบสภาพของกล้ามเนื้อก่อนและหลังการบำบัดด้วยหลักการทางแสงจึงจำเป็นวิธีการที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพและเป็นที่น่าสนใจกันอย่างมาก โดยในปัจจุบันวิธีการตรวจวัดความเข้มแสงที่สะท้อนกลับออกมาจากเนื้อเยื่อในร่างกายอาศัยหลักการตรวจวัดทางแสง และอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันส่วนมากคือหัวตรวจวัดความเข้มการสะท้อนกลับของแสงเป็นวิธีที่ไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ และตรวจวัดที่ตำแหน่งใด ๆของร่างกายได้ อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดในด้านการคำนวณหาค่าที่ต้องการปรับเทียบก่อนข้างยุ่งยากอันเนื่องมาจากความเข้มของแสงสะท้อนกลับจากชั้นเนื้อเยื่อไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่าการดูดกลืนเท่านั้น แต่ยังขึ้นกับตัวแปรที่มีผลต่อความเข้มการสะท้อนกลับ ได้แก่ องค์ประกอบภายใน โครงสร้าง ระดับความลึกของเนื้อเยื่อ อุณหภูมิของร่างกาย และข้อจำกัดด้านความแม่นยำจากการรบกวนของแสงภายนอก เป็นต้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของโฟตอนและหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแหล่งกำเนิดกับหัวตรวจวัดที่ใช้สำหรับหาค่าการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของจำนวนโฟตอนที่เกิดอันตรกิริยาการดูดกลืนและการสะท้อนกลับภายในโครงสร้างของกล้ามเนื้อด้วยวิธีการ Monte Carlo โดยใช้โปรแกรม Matlab โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะนำสมการทางแสงมาใช้ในการวิเคราะห์ ได้แก่ ระบบคาร์ทีเซียนโคออร์ดิเนตสำหรับการเคลื่อนที่ของโฟตอน กฎการกระจายตัวของโฟตอน การปลดปล่อยโฟตอน ขนาดการเคลื่อนที่ของโฟตอน ทิศการเคลื่อนที่ของโฟตอน การดูดกลืนโฟตอน และการกระเจิงโฟตอน เป็นต้น คาดว่าการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของโฟตอนนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดความเข้มแสงสะท้อนกลับจากกล้ามเนื้อต่อไปได้ในอนาคต

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกล้ามเนื้อจำลองด้วยหลักการกระจายตัวของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำลอง

1.2.2 เพื่อหาระยะการกระจายตัวของโฟตอนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของแบบจำลองการกระจายตัวของโฟตอนในชั้นของกล้ามเนื้อจำลองคือ ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย

1.2.3 เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ของความกว้างและลึกจากการกระจายตัวของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำลอง

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอันตรกิริยาทางแสงในชั้นเนื้อเยื่อจำลองส่วนที่เป็น ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย จากนั้นศึกษาการทำงานและวิธีการใช้โปรแกรมเมทแลปด้วยวิธีการมัลติคาร์โลผ่านโปรแกรมเมทแลป ต่อมาวัดการกระจายตัวของแสงสะท้อนกลับจากเนื้อเยื่อ สุดท้ายสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาการกระจายตัวของโฟตอนบนและในชั้นเนื้อเยื่อจำลอง

## 1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

งานวิจัยมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 12 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2560 ถึง เดือน กันยายน 2561 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ผลงาน/กิจกรรม	เดือน 1-2	เดือน 3-4	เดือน 5-6	เดือน 7-8	เดือน 9-10	เดือน 11-12
1) ออกแบบซอฟต์แวร์ในการจำลองการกระจายตัวของโฟตอน	←→					
2) สร้างแบบจำลองการกระจายตัวของโฟตอน	←→					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) ทดสอบการทำงาน ของโปรแกรมเมทแลป		←		→		
4) เก็บผลการทดลองและ ประมวลข้อมูล				←		→
5) สรุปรงานวิจัยพร้อมเขียน รายงาน						↔

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 เข้าใจทฤษฎีและอันตรกิริยาของโฟตอนที่เกิดในเนื้อเยื่อ
- 1.5.2 เข้าใจการประยุกต์ใช้โปรแกรมเมทแลปเข้ากับอันตรกิริยาของโฟตอนที่เกิดในเนื้อเยื่อ
- 1.5.3 สามารถสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของโฟตอนที่เกิดในเนื้อเยื่อ

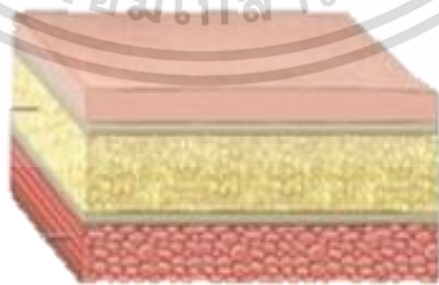
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันพบว่ายังไม่มีแบบจำลองที่แน่นอนสำหรับเนื้อเยื่อหลายชั้นและเนื้อเยื่อผสม โดยทั่วไปเนื้อเยื่อดังกล่าวมักถูกแสดงว่าเป็นวัสดุที่มีการดูดซับที่มีอนุภาคกระจายแบบทั่วทั้งก้อน นอกจากนี้ยังใช้ข้อสันนิษฐานที่ว่าเนื้อเยื่อดังกล่าวมีความเป็นเนื้อเดียวกันหรือมีความหนาแน่นคงที่นั่นเองซึ่งถือได้ไม่ได้เป็นแบบจำลองที่ดี โดยตัวแปรสำคัญในระบบจำลอง ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน สัมประสิทธิ์การกระเจิง สัมประสิทธิ์ปฏิสัมพันธ์หรือ ผลบวกของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน ในการประมาณค่าการกระเจิงแบบอิสระจะกล่าวถึงค่าเฉลี่ยโคไซน์ของมุมกระเจิงหรือ anisotropy parameter ( $g$ ) ซึ่งบ่งชี้ถึงทิศทางการแพร่กระจายเฉลี่ยของโฟตอนหลังจากเหตุการณ์การกระเจิง โดยที่  $g$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 เมื่อ  $g = 0$  จะสอดคล้องกับการกระเจิงตัวแบบไอโซโทรปิก (เช่น ทุกทิศทางกระเจิงมีความน่าจะเป็นเท่ากัน) และเมื่อ  $g = +1$  จะสอดคล้องกับการกระเจิงตัวแบบไปข้างหน้าในทางอุดมคติ (เช่น มีการแพร่กระจายแบบตรงไปตรงมา) และเมื่อ  $g = -1$  จะสอดคล้องกับการกระเจิงตัวแบบย้อนกลับในอุดมคติหรือลำแสงสะท้อนกลับ นอกจากนี้เหตุการณ์การกระเจิงเพิ่มเติมก็อาจมีแนวโน้มที่จะลู่ทิศทางโฟตอนตามค่าของ  $g$  ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงและค่าเฉลี่ยโคไซน์ของมุมกระเจิงดังกล่าวจะถูกนำมาใช้อธิบายว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและการสะท้อนจะเท่ากับค่าเฉลี่ยของการดูดซึมและการกระเจิงต่อความยาวเส้นทางของโฟตอนในเนื้อเยื่อตามลำดับ

#### 2.1 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ

เนื้อเยื่อประกอบด้วยผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อ ดังแสดงในภาพที่ 2.1 [1-3]



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของเนื้อเยื่อ 3 ชั้น (ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อ)

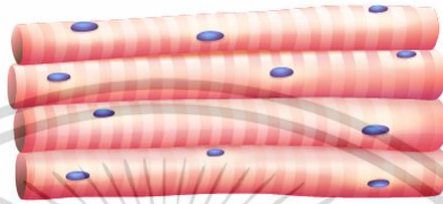
เริ่มจากผิวหนังประกอบด้วยสามชั้นหลัก ชั้นที่มองเห็นได้จากพื้นผิวเรียกว่า corneum (หนาประมาณ 20 ไมโครเมตร) ชั้นหนังกำพร้า (หนาประมาณ 100 ไมโครเมตร) และ ชั้นหนังแท้ (หนา 1-4 มิลลิเมตร) หนังกำพร้าคลุมอยู่บนหนังแท้ หนังกำพร้าที่ฝ่ามือและฝ่าเท้าหนาที่สุด และที่หนังตาจะบางที่สุด ชั้นหนังกำพร้านี้ไม่มีหลอดเลือดและประกอบด้วยเซลล์รูปร่างต่างๆกันหลายชั้น ผิวชั้นดุนที่สุดจะเป็นเซลล์แบนๆและเมื่อตายแล้วจะลอกหลุดออกไปเป็นขี้ไคล ส่วนหนังแท้ประกอบด้วยเส้นใยพังคืดเป็นส่วนใหญ่ประสานไขว้กันไปมา ส่วนดุนของชั้นนี้ยื่นเป็นปุ่มนูนขึ้นมาสวมกับช่องทางด้านลึกของหนังกำพร้า ในปุ่มนูนจะมีหลอดเลือดและปลายประสาทรับความรู้สึก ส่วนลึกลงไปของหนังแท้จะมีแต่เส้นใยพังคืดประสานกันก่อนข้างแน่นและความยืดหยุ่นของผิวหนังจะอยู่ที่อยู่เส้นใยพังคืดและเนื้อเยื่อใต้หนัง ดังนั้นในคนชรากล้ามเนื้อเส้นใยพังคืดยืดหยุ่นน้อยลงจึงเกิดเป็นรอยย่น ส่วนสีของผิวหนังเกิดจากจำนวนเม็ดสีเมลานินซึ่งอยู่ในเซลล์ชั้นลึกของหนังกำพร้า ถ้าเม็ดสีเมลานินมีมากก็มีผิวดำ ถ้าเม็ดสีเมลานินมีน้อยก็มีผิวขาว ในที่บางแห่งผิวหนังมีสีจัดขึ้นสีของผิวหนังจึงอาจใช้แบ่งแยกเชื้อชาติได้ เช่น พวกนิโกรมีเม็ดสีเมลานินมากตลอดความหนาของหนังกำพร้าผิวจึงดำมาก ในขณะที่ยุโรปมีเม็ดสีเมลานินน้อยผิวจึงขาว และพวกเอเชียมีเม็ดสีเมลานินปานกลางผิวจึงเหลือง โดยเฉพาะพวกสืบเชื้อสายชาวมองโกเลีย

เนื้อเยื่อไขมันใต้ผิวหนัง (หนา 1-6 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับบริเวณร่างกาย) เกิดจากการรวมตัวของเซลล์ไขมันในรูปแบบของหยดขนาดเล็กสำหรับคนปกติที่ไม่เป็นโรคอ้วน ในช่องว่างระหว่างเซลล์จะมีเส้นเลือดฝอย (เส้นเลือดและเส้นเอ็น) เส้นประสาทและเส้นใยเชื่อมต่อระหว่างเซลล์ และกระบวนการเผาผลาญอาหารของเนื้อเยื่อไขมัน การดูดซึมในชั้นเนื้อเยื่อไขมันของมนุษย์จะถูกกำหนดโดยการดูดซึมของฮีโมโกลบิน และน้ำ (ประมาณ 11 %)

กล้ามเนื้อเป็นหนึ่งในเนื้อเยื่อที่อุดมสมบูรณ์ที่สุดในร่างกาย เป็นที่เข้าใจว่ากล้ามเนื้อถูกสร้างขึ้นจากส่วนประกอบต่างๆที่เรียกว่า เส้นใยกล้ามเนื้อซึ่งประกอบด้วยเยื่อไมโอไฟบริลมีลักษณะเป็นกระบอกยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในระดับไมโครเมตร การดูดซึมของเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อถูกกำหนดโดยการดูดซึมฮีโมโกลบิน และน้ำ (52 - 73 %) ขึ้นกับชนิดของกล้ามเนื้อ โดยที่ร่างกายแบ่งกล้ามเนื้อออกเป็น 3 ชนิด คือ กล้ามเนื้อยึดกระดูกหรือกล้ามเนื้อลาย กล้ามเนื้อเรียบ และกล้ามเนื้อหัวใจ โดยที่กล้ามเนื้อลายนั้นถูกควบคุมอยู่ภายใต้อำนาจจิตใจหรือรีเฟล็กซ์ ส่วนกล้ามเนื้อเรียบและกล้ามเนื้อหัวใจทำงานนอกอำนาจจิตใจ [4]

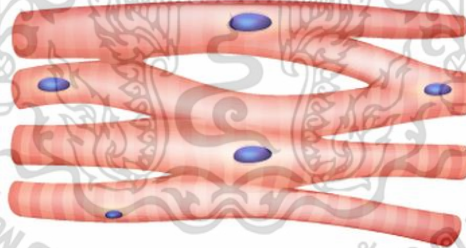
- กล้ามเนื้อลายดังแสดงในภาพที่ 2.2 เป็นกล้ามเนื้อที่เกาะติดกับโครงกระดูกหรือกล้ามเนื้อลาย เช่น กล้ามเนื้อแขน กล้ามเนื้อขา จึงทำหน้าที่เกี่ยวกับการเคลื่อนไหวของร่างกายโดยตรง เมื่อนำเซลล์กล้ามเนื้อเหล่านี้มาศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์จะมองเห็นเป็นแถบลาย เซลล์กล้ามเนื้อนี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกยาว แต่ละเซลล์มีหลายนิวเคลียสอยู่ที่ขอบของเซลล์มีลายตามขวาง สีเข้มและสีจางสลับกันซึ่งเห็นได้ชัดเจนเมื่อย้อมด้วยสี คนที่ออกกำลังกายสม่ำเสมอจะมีเส้นใยกล้ามเนื้อโตและหนาขึ้น

แต่จำนวนไม่เพิ่มขึ้น การทำงานของกล้ามเนื้อยึดกระดูกถูกควบคุมโดยระบบประสาทโซมาติก การทำงานของกล้ามเนื้อชนิดนี้ร่างกายสามารถบังคับได้ซึ่งถือว่าอยู่ในอำนาจจิตใจโดยกล้ามเนื้อลายมีหน้าที่เคลื่อนไหวร่างกายที่ข้อต่อต่าง ๆ การเคลื่อนไหวลูกตา ช่วยในการเคี้ยวและการกลืน การเคลื่อนไหวลิ้น การเคลื่อนไหวบนใบหน้าแสดงอารมณ์ต่างๆและยังประกอบเป็นผนังอกและผนังท้องตลอดจนการควบคุมการขับถ่ายปัสสาวะและอุจจาระ



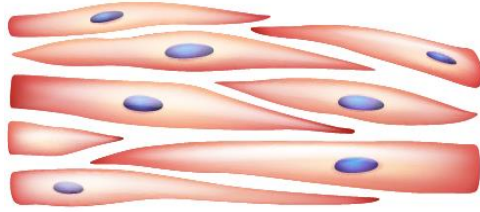
ภาพที่ 2.2 กล้ามเนื้อลาย

- กล้ามเนื้อหัวใจดังแสดงในภาพที่ 2.3 ประกอบเป็นกล้ามเนื้อหัวใจเพียงแห่งเดียวโยการควบคุมอยู่นอกอำนาจจิตใจและควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนมัติที่มีลักษณะเป็นเซลล์รูปทรงกระบอกมีลายตามขวางเป็นแถบสีที่บสลับกับสีจาง เซลล์กล้ามเนื้อตอนปลายของเซลล์มีการแตกแขนงไปประสานกับแขนงของเซลล์ใกล้เคียงเซลล์ทั้งหมดจึงหดตัวพร้อมกันและหดตัวเป็นจังหวะตลอดชีวิต



ภาพที่ 2.3 กล้ามเนื้อหัวใจ

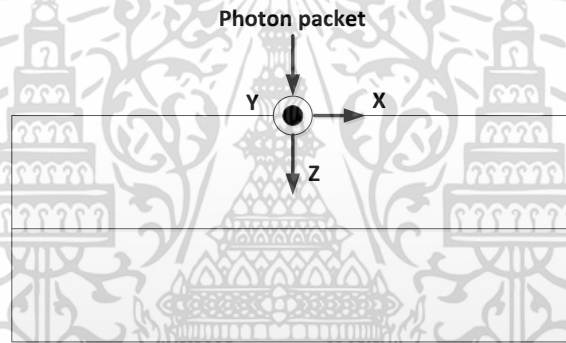
- กล้ามเนื้อเรียบดังแสดงในภาพที่ 2.4 เป็นกล้ามเนื้อที่พบอยู่ตามอวัยวะภายในทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของอวัยวะย่อยอาหารและอวัยวะภายในต่างๆ เช่น ผนังกระเพาะอาหาร ผนังลำไส้ ผนังหลอดเลือด และม่านตา เป็นต้น กล้ามเนื้อเหล่านี้ประกอบด้วยเซลล์ที่มีลักษณะยาว หัวท้ายแหลม แต่ละเซลล์มี 1 นิวเคลียส ไม่มีลายพาดขวาง การทำงานของกล้ามเนื้อเรียบถูกควบคุมโดยระบบประสาทอิสระมีลักษณะเป็นเซลล์รูปกระสวย มีนิวเคลียสรูปไข่อยู่ตรงกลาง



ภาพที่ 2.4 กล้ามเนื้อเรียบ

## 2.2 การเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อ

การเดินทางของโฟตอนในเนื้อเยื่อแสดงในภาพที่ 2.5 แสดงตำแหน่งเริ่มต้นของโฟตอน จากนั้นจะเกิดกระบวนการต่างๆ ประกอบด้วย การปลดปล่อยโฟตอน การเคลื่อนที่โฟตอน การดูดกลืนโฟตอน การกระเจิงของโฟตอน การสะท้อนภายใน และการสิ้นสุดของโฟตอน



ภาพที่ 2.5 ตำแหน่งเริ่มต้นของโฟตอนเนื้อเยื่อ

- การปลดปล่อยโฟตอน

เมื่อกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของโฟตอนเท่ากับ  $(x = 0, y = 0, z = 0)$  โดยมีทิศทางเริ่มต้นที่  $(\mu_x = 0, \mu_y = 0, \mu_z = 1)$  หลังจากโฟตอนเดินทางเข้าไปสู่นเนื้อเยื่อจะเกิดการสะท้อนบางส่วนหรือ Specular Reflectance ที่สามารถอธิบายจาก

$$R_{sp} = \frac{(n_i - n_t)^2}{(n_i + n_t)^2} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $i$  และ  $t$  คือ มุมตกกระทบ และมุมส่งผ่าน ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสะท้อนบางส่วนทำให้น้ำหนักโฟตอนลดลง (Photon Weight) โดยสามารถอธิบายจาก

$$W = 1 - R_{sp} \quad (2.2)$$

- การเคลื่อนที่ของโฟตอน

หลังจากปล่อยโฟตอนจากตำแหน่งเริ่มต้นของโฟตอนบนเนื้อเยื่อ การแจกแจงความน่าจะเป็นของเส้นทางของโฟตอนแบบอิสระหรือ step size จะถูกคำนวณจาก

$$s = -\frac{\ln \sigma}{\mu_t} \quad (2.3)$$

เมื่อ

$$\mu_t = \mu_a + \mu_s$$

$\sigma$  ค่าที่ได้จากการแจกแจงความน่าจะเป็นมีค่าในช่วง (0,1) เมื่อพิจารณา step size ว่าอยู่ในเงื่อนไขว่าพอที่จะถึงขอบเขตของชั้น(db) หรือไม่ ถ้าไม่ถึงขอบเขตของชั้นถัดไป ตำแหน่งโฟตอนจะเคลื่อนที่ไปยังพิกัดใหม่โดยจะถูกคำนวณจาก

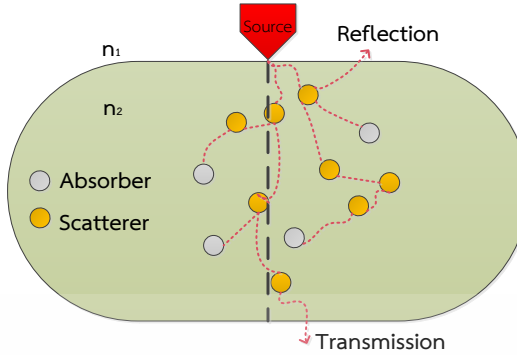
$$\begin{aligned} x &\rightarrow x + \mu_x \cdot s \\ y &\rightarrow y + \mu_y \cdot s \\ z &\rightarrow z + \mu_z \cdot s \end{aligned} \quad (2.4)$$

- การดูดกลืนโฟตอน

ในทางกลับกันน้ำหนักโฟตอนจะลดลงโดยการดูดกลืนของตัวกลางดังแสดงในภาพที่ 2.6 น้ำหนักโฟตอนจะถูกคำนวณใหม่โดยจะคำนวณจาก

$$\Delta W = (\mu_a / \mu_t)W \quad (2.5)$$

$$W \rightarrow W - \Delta W \quad (2.6)$$



ภาพที่ 2.6 ตัวอย่างการดูดกลืนและกระกระเจิงของแสง

- การกระเจิงของโฟตอน

เมื่อโฟตอนเคลื่อนที่และน้ำหนักโฟตอนถูกลดลง โฟตอนก็พร้อมที่จะกระเจิงดังแสดงในภาพที่ 2.6 โคขมุมเบี่ยงเบน หรือ Deflection Angle ( $0 \leq \theta < \pi$ ) และมุมอะซิมูท หรือ Azimuthal Angle ( $0 < \delta < 2\pi$ ) จะถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวคู่ทางสถิติในการกระจายความน่าจะเป็นของมุมการเคลื่อนที่โฟตอนซึ่งจะถูกอธิบายโดยฟังก์ชันของฮันเซนและกรีนสไตน์คือ

$$\cos \theta = \frac{1}{2\gamma} \left[ 1 + \gamma^2 - \left( \frac{1 - \gamma^2}{1 - \gamma + 2\gamma\sigma} \right)^2 \right] \quad (2.7)$$

$$\delta = 2\pi\sigma \quad (2.8)$$

ทิศทางของโฟตอนเนื่องจากการกระเจิงคำนวณจาก

$$\begin{aligned} \mu'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \delta - \mu_y \sin \delta) + \mu_x \cos \theta \\ \mu'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_y \mu_z \cos \delta - \mu_x \sin \delta) + \mu_y \cos \theta \\ \mu'_z &= \left( -\sin \theta \cos \delta \sqrt{1 - \mu_z^2} \right) + \mu_z \cos \theta \end{aligned} \quad (2.9)$$

สำหรับกรณีเกิดมุมเข้าใกล้เนื้อเยื่อมนุษย์มากมายสมการ 2.9 จะถูกลดทอนเป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
 \mu'_x &= \sin \theta \cos \delta \\
 \mu'_y &= \sin \theta \sin \delta \\
 \mu'_z &= (\mu_z / |\mu_z|) \cos \theta
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

- การสะท้อนภายในของโฟตอน

ถ้าขนาดของระยะการเคลื่อนที่ (s) ยาวพอที่จะชนขอบของชั้นแรก โฟตอนจะข้ามไปยังขอบเขตของชั้นถัดไป ความเป็นไปได้ที่จะเกิดการสะท้อนภายในจะเกิดขึ้นเมื่อโฟตอนข้ามไปยังชั้นถัดไป เนื่องจากค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน ความน่าจะเป็นที่โฟตอนจะสะท้อนภายในถูกกำหนดโดยสมการเฟรสเนล

$$R_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\lambda_i - \lambda_t)}{\sin^2(\lambda_i + \lambda_t)} + \frac{\tan^2(\lambda_i - \lambda_t)}{\tan^2(\lambda_i + \lambda_t)} \right] \tag{2.11}$$

$\lambda_i$  คือ มุมตกกระทบ โดย  $\lambda_i = \cos^{-1} \mu_z$

$\lambda_t$  คือ มุมส่งผ่าน โดย  $n_i \sin(\lambda_i) = n_t \sin(\lambda_t)$

- การสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของโฟตอน

การสิ้นสุดของโฟตอนหลังจากการปล่อยโฟตอนสามารถสิ้นสุดได้โดยธรรมชาติโดยการสะท้อนหรือการส่งผ่านจากเนื้อเยื่อ กล่าวคือน้ำหนักของโฟตอนลดลงจะถูกพิจารณาโดยเทคนิคครุเลต เมื่อโฟตอนแพ็คเก็ตมีโอกาส  $m$  (เช่น  $m = 100$ ) ที่ยังสามารถอยู่และยังมีน้ำหนักโฟตอน  $mW$  แต่ถ้าโฟตอนแพ็คเก็ตมีน้ำหนักโฟตอนลดลงเป็นศูนย์การเคลื่อนที่ของโฟตอนจะถูกสิ้นสุดลงจากเงื่อนไขต่อไปนี้

$$W = \begin{cases} mW & \text{if } \sigma \leq 1/m \\ 0 & \text{if } \sigma > 1/m \end{cases} \tag{2.12}$$

### 2.3 การตรวจวัดทางแสงในด้านการแพทย์

หัววัดที่นิยมใช้ในการหาค่าองค์ประกอบต่างๆบริเวณร่างกาย มี 2 ชนิด คือ หัวตรวจแบบตรวจรับค่าการส่งผ่าน (Transmittance Probes) และ หัวตรวจแบบตรวจจับค่าการสะท้อนกลับ (Reflectance Probes) สำหรับหัวตรวจวัดแบบรับค่าการส่งผ่านจะมีรูปแบบคือตัวให้กำเนิดแสงและตัวตรวจจับสัญญาณจะอยู่คนละด้านตรงข้ามกันของวัตถุที่ต้องการวัด ส่วนหัวตรวจวัดแบบการสะท้อนกลับจะมีรูปแบบคือตัวให้กำเนิดแสงและ

ตัวตรวจจับสัญญาณจะอยู่ฝั่งเดียวกันของวัตถุที่ต้องการวัด ในการออกแบบหัวตรวจวัดต้องคำนึงถึง สิ่งรบกวนจากแสงภายนอกที่อาจผ่านหรือเล็ดลอดไปยังตัวตรวจจับ ออณหภูมิ และอื่นๆ [5] สำหรับหัวตรวจ แบบตรวจจับค่าการสะท้อนกลับจะเหมาะกับการตรวจวัดตำแหน่งต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น บริเวณขมับ หรือ บริเวณอื่นๆของร่างกายที่ไม่สามารถใช้หัวตรวจแบบรับค่าการส่งผ่านได้ สำหรับหัวตรวจวัดแบบวัดค่าการ สะท้อนกลับจะตรวจวัดปริมาณความเข้มของแสงจากการสะท้อนกลับของตัวให้กำเนิดแสงที่ส่งไปยังเนื้อเยื่อ ของร่างกาย ข้อดีของหัวตรวจแบบนี้คือสามารถตรวจวัดได้ทุกตำแหน่งบนร่างกาย แต่มีข้อเสียคือยากต่อการ คำนวณค่าที่ต้องการ การเปรียบเทียบและข้อจำกัดด้านความแม่นยำซึ่งเป็นปัญหาหลักของหัวตรวจวัดค่า การสะท้อนกลับจากผิวหนัง และยังมีปัจจัยที่เกิดจากองค์ประกอบภายในเลือด โครงสร้างของเนื้อเยื่อ สีของ ผิวหนัง ตำแหน่งการวางแหล่งกำเนิดกับตัวรับสัญญาณ การรบกวนของแสงภายนอก ออณหภูมิเนื้อเยื่อ เป็นต้น

## 2.4 โปรแกรมแมทแลป

แมทแลปเป็นซอฟต์แวร์ในการคำนวณและการเขียนโปรแกรม หรือเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ระดับสูง ที่สามารถคิดคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้อย่างถูกต้องและรวดเร็วทำให้เหมาะกับการ นำไปใช้ในการคำนวณเชิงตัวเลข การแสดงผลแบบรูปภาพ หรือกราฟฟิกแบบต่างๆ และเขียนแอปพลิเคชัน เราสามารถหาผลลัพธ์ พัฒนาหรือปรับปรุงอัลกอริทึม การสร้างแบบจำลอง และสร้างแอปพลิเคชันขึ้นมาได้ อย่างง่ายสะดวกและรวดเร็ว เนื่องจากภายในตัวแมทแลปประกอบด้วยภาษาคอมพิวเตอร์กลุ่มฟังก์ชัน สำเร็จรูปในหลากหลายสาขาวิชาที่พร้อมใช้ได้ทันทีและฟังก์ชันพื้นฐานจำนวนมาก เราสามารถประยุกต์ใช้ แมตแล็บได้กับสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ ด้านการวิเคราะห์และประมวลผลสัญญาณ ด้านการคำนวณทางด้าน เศรษฐศาสตร์ ด้านการสื่อสาร ด้านระบบควบคุม ด้านการประมวลผลจากภาพและวิดีโอ ด้านการวัดและ ควบคุม ด้านการคำนวณทางชีวภาพ เป็นต้น

การจำลองสถานการณ์คือการรวบรวมวิธีการต่างๆที่ใช้จำลองสถานการณ์จริงหรือพฤติกรรมของ ระบบต่างๆมาไว้บนคอมพิวเตอร์โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยเพื่อที่จะศึกษาการเคลื่อนไหลของ กิจกรรมในรูปแบบต่างๆ โดยมีการเก็บข้อมูลและทำการวิเคราะห์หารูปแบบที่ถูกต้องจาก โปรแกรม คอมพิวเตอร์เพื่อปรับปรุงงานในอนาคตต่อไป ทั้งนี้เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงนั้นเราไม่สามารถที่จะทำ การทดลองหรือปรับเปลี่ยนกระบวนการทำงานได้จนกว่าจะมองเห็นถึงประโยชน์ที่จะได้รับ อาทิเช่น การ ขจัดปัญหาที่อยู่นอกเหนือความคาดหมายที่เกิดขึ้นทำให้กระบวนการผลิตช้าลง ดังนั้นการจำลองสถานการณ์ จะช่วยให้สามารถวิเคราะห์สภาพที่เป็นอยู่ในปัจจุบันของระบบและช่วยหาแนวทางหรือทางเลือกที่เหมาะสม ก่อนนำไปใช้กับสถานการณ์หรือการปฏิบัติงานจริง ซึ่งจะช่วยให้ลดความเสี่ยงในการเกิดความผิดพลาดหรือ ความล้มเหลวได้ นอกจากนี้ยังช่วยให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาได้อีกทางด้วย ในปัจจุบันนี้การจำลอง

สถานการณ์เป็นที่นิยมน้อยมากเนื่องจากระบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้การจำลองสถานการณ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้กับหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมในโรงงาน การขนส่ง การกระจายสินค้า การบริการทางธุรกิจต่างๆ เช่น ธนาคาร โรงพยาบาล เป็นต้น ข้อดีของการจำลองสถานการณ์คือมีความสมเหตุสมผลและสามารถพิสูจน์ได้ภายใต้ปัจจัยการนำเข้าและนำมาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ระบบประมวลออกมา โดยที่ประเภทของแบบจำลองมี 5 ประเภทคือ แบบจำลองทางกายภาพ คือ แบบจำลองที่มีลักษณะเหมือนกับระบบงานจริงอาจมีขนาดเท่ากับของจริงหรือมีขนาดที่เล็กกว่าหรือใหญ่กว่าหรืออาจเป็นแบบจำลองในมิติใดมิติหนึ่งหรือ 3 มิติ ส่วนแบบจำลองแบบอนาล็อก คือ แบบจำลองที่มีพฤติกรรมเหมือนระบบงานจริงแต่อาจมีรูปลักษณะไม่เหมือนกับระบบงานจริง สำหรับแบบจำลองการบริหาร คือ แบบจำลองการตัดสินใจในกิจการต่างๆ เช่น ธุรกิจ การลงทุน สงคราม ฯลฯ เป็นแบบจำลองที่ใช้แสดงผลเปรียบเทียบเมื่อมีการตัดสินใจในแบบต่างๆเพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับการตัดสินใจ ส่วนแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ คือ แบบจำลองที่อยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ และสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ คือ แบบจำลองที่ใช้สัญลักษณ์และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์แทนองค์ประกอบในระบบจริง เช่น X แทนค่าใช้จ่ายในการผลิต Y แทนจำนวนสินค้าที่ผลิต และแทนค่าลงในสูตรการคำนวณต่าง ๆ ในขณะที่สถานการณ์จำลองมี 3 ประเภทคือ 1) Static คือ การเกิดของเหตุการณ์ในระบบการทำงานที่คงที่กับเวลา Dynamic คือ การเปลี่ยนแปลงของเวลาที่จะมีความสำคัญและมีผลกระทบต่อเหตุการณ์ต่างๆหรือตัวแปรที่กำลังสนใจ 2) Continuous คือ สภาพการณ์ของระบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา Discrete คือ สภาพการณ์ของระบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ ณ จุดหนึ่งจุดใดของเวลาโดยมีความน่าจะเป็นเข้ามาเกี่ยวข้อง Deterministic คือ เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอนและได้มีการกำหนดเวลาที่แน่นอนคือเวลาจะมีผลกระทบมาจากความน่าจะเป็นหรือความแปรปรวนจากการมาของเวลาที่ไมคงที่

การประยุกต์ใช้ Simulation Model มีขั้นตอนดังนี้ คือ ศึกษาปัญหา สร้างโมเดล เก็บรวบรวมข้อมูล สร้างตัวแปร พิสูจน์โมเดล พิสูจน์ผลว่าสามารถใช้ได้หรือไม่ ออกแบบการทดลอง ทำการประมวลผล วิเคราะห์ผล แปลงและแสดงผลรายงาน และดำเนินการ สิ่งที่สำคัญในการทำ Simulation คือ ข้อมูลในอดีต โมเดลทางคณิตศาสตร์หรือแบบจำลองที่ใช้สัญลักษณ์และฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์แทนองค์ประกอบในระบบจริง เช่น X แทนค่าใช้จ่ายในการผลิต Y แทนจำนวนสินค้าที่ผลิต และแทนค่าลงในสูตรการคำนวณต่าง ๆ ส่วนการจำลองแบบมอนติคาร์โลเป็นการจำลองสถานการณ์เพื่อใช้กับระบบที่ค่าของตัวแปรเกิดขึ้นด้วยความน่าจะเป็นต่างๆกัน โดยใช้เลขสุ่มเป็นเครื่องมือมีวิธีการดังนี้คือ กำหนดตัวแปรสำคัญของระบบ ระบบการแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสำคัญแต่ละตัว สร้างตารางการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของตัว

แปรสำคัญแต่ละตัว กำหนดช่วงของเลขคู่สำหรับตัวแปรแต่ละตัว สร้างเลขคู่ ดำเนินการจำลอง สถานการณ์

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Reference [6] เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านของแสง การโคจรของโฟตอน และการเกิดรังสีในเนื้อเยื่อแบบจำลองโดยโปรแกรมเมทแลปเพื่อพิจารณาปฏิสัมพันธ์ของโฟตอนกับเนื้อเยื่อ วัตถุประสงค์เพื่อวัดค่าความอึดตัวของออกซิเจนในครรภ์ของทารกของมารดา ซึ่งมีวัตถุประสงค์คือความชัดเจนว่ามีการเจาะลึกเพียงพอที่จะครอบคลุมเนื้อเยื่อของมารดาและทารกในครรภ์ บทความนี้จะสำรวจเส้นทางการโคจรของโฟตอน วิเคราะห์จำนวนโฟตอนอยู่ในเนื้อเยื่อ และการกระจายรังสี และสิ่งที่จำเป็นต่อแบบจำลองคือหลักการพื้นฐานและกฎการเดินทางของแสง

Reference [3] เกี่ยวข้องกับการหาค่าสัมประสิทธิ์แสงในเนื้อเยื่อด้วยการวัดการสะท้อนแสงโดยใช้ชั้นแบบเนื้อเยื่อจำลอง การแก้ปัญหาสมการการแพร่กระจายระหว่าง 2 ชั้น โดยวิธีการมัลติคาร์โลผ่านชั้นผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อ ข้อมูลผลการสะท้อนที่สัมพันธ์กันในระยะห่างสองชั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์แสงของแต่ละชั้นเนื้อเยื่อ และพบความหนาของชั้นเนื้อเยื่อทั้ง 3 ชั้น ซึ่งความหนาของเนื้อเยื่อที่เกี่ยวข้องถูกกำหนดโดยอัลตราซาวด์ ค่าสัมประสิทธิ์แสงได้มาจากการใช้แบบจำลองการกระจายตัวแบบ 2 ชั้น

Reference [7] เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ของเลเซอร์กับสสาร โดยกล่าวถึงความเป็นไปได้ในงานด้านอุตสาหกรรมและการรักษา บทความวิจัยนี้ได้ใช้ทฤษฎีเกี่ยวกับปฏิสัมพันธ์ของแสงเลเซอร์กับเนื้อเยื่อชีวภาพ นำเสนอการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายและการขนส่งโฟตอนในเนื้อเยื่อ และผลกระทบทางความร้อนจากเนื้อเยื่อชีวภาพ วิธีการมอนติคาร์โลถูกนำมาใช้เพื่อจำลองการกระจายของโฟตอนและความว่องไวของโฟตอนด้วยระยะทางและตำแหน่งของปฏิสัมพันธ์รวมทั้งกำลังของเลเซอร์และความหนาของเนื้อเยื่อสำหรับความยาวคลื่นที่เฉพาะเจาะจง

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้ทำให้ผู้วิจัยได้แนวคิดที่จะทำการศึกษาการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของโฟตอนและหาระยะห่างที่เหมาะสมระหว่างแหล่งกำเนิดกับหัวตรวจวัดที่ใช้สำหรับหาค่าการสะท้อนกลับและการส่งผ่านของจำนวนโฟตอนที่เกิดอันตรกิริยาการดูดกลืนและการสะท้อนกลับภายในโครงสร้างของกล้ามเนื้อ

## 2.6 เอกสารอ้างอิง

- [1] W.-F. Cheong, S.A. Prael, A.J. Welch, A review of the optical properties of biological tissues, *IEEE J. Quantum Electronics* 26(12) (1990) 2166-2185.
- [2] G.Romano, A. Conti, A. Gnerucci, P. Imperiale, F.Fusi, *Laser tissues interaction principles: tissue optical properties in the light therapeutic window*, Energy for Health of the University of Florence, Italy, 2010.
- [3] A. Kienle, T. Glanzmann, In vivo determination of the optical properties of muscle with time-resolved reflectance using a layered model, *Phys. Med. Biol.* 44(11) (1999) 2689-2702.
- [4] Muscle tissue 2018 [Online] Available: <https://www.scientistcindy.com/muscle-tissue.html>
- [5] ไดโอดเปล่งแสง โฟโตไดโอด วงจรขยายสัญญาณและรูปแบบของหัวตรวจ 2018 [Online] Available: [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:YQPYbR-hPfoJ:doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/202661/f3bee6c731b850520ce5d727f70be5a5%3FResolve\\_Doi%3D10.14457/KMITL.res.2012.90+&cd=8&hl=en&ct=clnk&gl=th](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:YQPYbR-hPfoJ:doi.nrct.go.th/ListDoi/Download/202661/f3bee6c731b850520ce5d727f70be5a5%3FResolve_Doi%3D10.14457/KMITL.res.2012.90+&cd=8&hl=en&ct=clnk&gl=th)
- [6] D. Jurovata, J. Kurnatova, S. Ley, D. Laqua, P. Vazan, P. Husar, *Research Papers of Slovak University of Technology in Bratislava*, Slovak, 2013.
- [7] M.M.A. Fadhali, Analysis of photon transport in biological tissue and the subsequent heating effects, *International Journal of Thermal Sciences* 98 (2015) 60-67.

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

##### 3.1 แบบจำลองโครงสร้างเนื้อเยื่อ

จากการศึกษาโครงสร้างเนื้อเยื่อของมนุษย์ (ชั้นผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย) มีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ความหนาของชั้นเนื้อเยื่อ (Thickness) ดัชนีหักเห (Refractive index) Anisotropy factor สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง จะถูกใช้ในการกำหนดค่าตัวแปรในจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนโดยวิธีมอนติคาร์โลของโปรแกรมแมทแลปดังแสดงในภาพที่ 3.1 และตารางที่ 3.1-3.2

$n = 1.39$	Skin	0.12 cm
$n = 1.44$	Fat	0.38 cm
$n = 1.37$	Skeletal muscle	

ภาพที่ 3.1 แสดงโครงสร้างของชั้นเนื้อเยื่อ (ผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย)

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ความหนา ดัชนีการหักเห และแอนนิโซโทปิกเฟคเตอร์ของแต่ละชั้นเนื้อเยื่อ

Layer#	Thickness ( $d$ )	Refractive index ( $n$ )	Anisotropy factor ( $\gamma$ )
1: Skin	0.12 cm	$n_1 = 1.39$	0.81
2: Fat	0.38 cm	$n_2 = 1.44$	0.85
3: Skeletal muscle	$\infty$	$n_3 = 1.37$	0.90

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การดูดกลืน และสัมประสิทธิ์การสะท้อนของแต่ละชั้นเนื้อเยื่อ

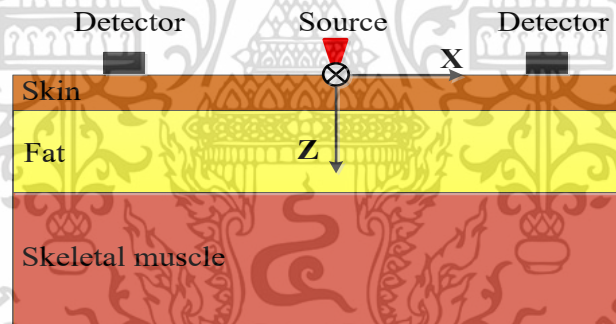
Layer#	Absorption coefficient ( $\mu_a$ )	Scattering coefficient ( $\mu_s$ )
1: Skin	$2.70 \text{ cm}^{-1}$	$187.00 \text{ cm}^{-1}$
2: Fat	$3.60 \text{ cm}^{-1}$	$171.00 \text{ cm}^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

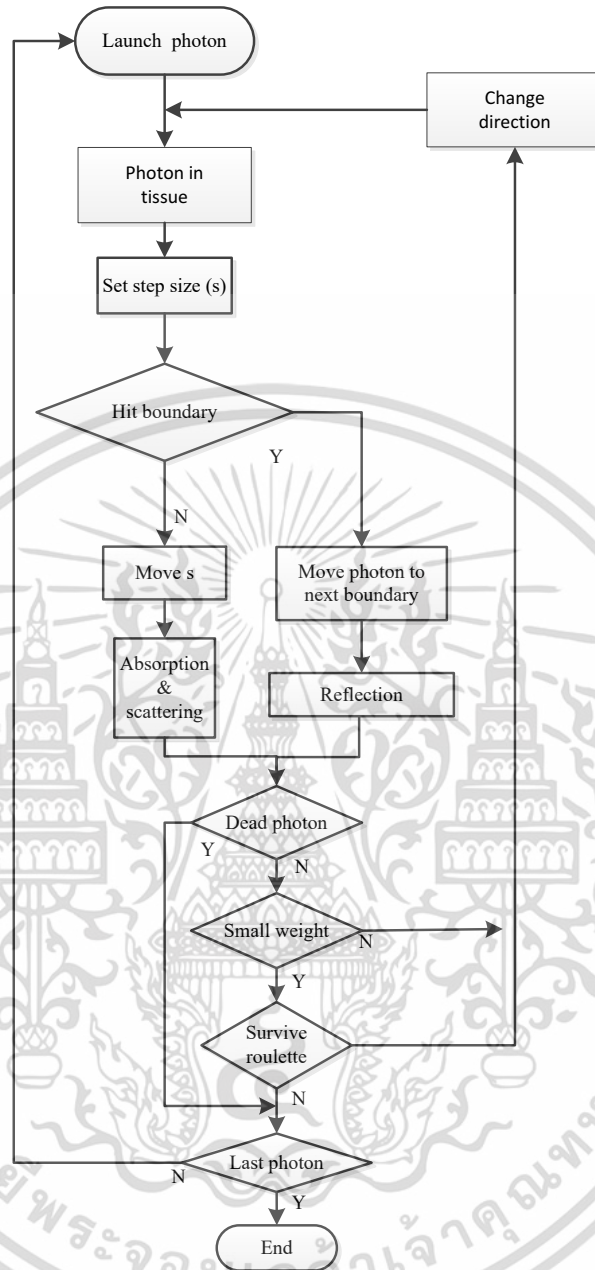
3: Skeletal Muscle	11.20 $\text{cm}^{-1}$	530.00 $\text{cm}^{-1}$
--------------------	------------------------	-------------------------

### 3.2 การเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อ

การเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อเริ่มจากระบบพิกัดการเคลื่อนที่เพื่อตั้งค่าจุดของแหล่งกำเนิดแสงเป็นจุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง  $x = 0, y = 0, z = 0$  ดังแสดงในภาพที่ 3.2 จากนั้นสร้างแผนภาพจำลองการทำงานของโปรแกรมแมทแลปโดยกำหนดจำนวนโฟตอนที่มีน้ำหนัก เมื่อโฟตอนมีปฏิสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อจะทำให้น้ำหนักโฟตอนถูกคูณกลับไปบางส่วนและน้ำหนักโฟตอนส่วนที่เหลือจะกระจายไปยังส่วนอื่นๆของเนื้อเยื่อ โฟตอนแต่ละตัวจะเกิดกระบวนการนี้ซ้ำจนกว่าจะสิ้นสุด เกิดการสะท้อนหรือส่งผ่านและจะวนกระบวนการซ้ำจนกระทั่งโฟตอนเท่ากับจำนวนโฟตอนที่กำหนดเริ่มต้นซึ่งจะบันทึกเส้นทางการเดินทางของโฟตอนสำหรับโฟตอนหนึ่งตัวก็มีสตีปการเคลื่อนที่หลายสตีปขึ้นกับน้ำหนักของโฟตอนนั้นๆดังแสดงในภาพที่ 3.3



ภาพที่ 3.2 ตำแหน่งการวางตัวตรวจจับสัญญาณและแหล่งให้กำเนิดแสง



ภาพที่ 3.3 การทำงานของ โปรแกรมเมทแลป

### 3.2.1 มัลติคาร์โลซิโมนูเลชั่น

มัลติคาร์โลใช้อธิบายสำหรับกระบวนการเคลื่อนที่ของแสงในเนื้อเยื่อ โดยแต่ละชั้นมีความกว้างเป็นอนันต์และมีพารามิเตอร์หลายตัวซึ่งกำหนดให้ดัชนีหักเหของสิ่งแวดล้อมคืออากาศถึงแม้ว่าเนื้อเยื่อที่แท้จริงจะไม่สามารถกว้างได้อย่างมากมายแต่ก็สามารถอธิบายได้ถ้ามีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่เชิงเส้นของการกระจาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวโฟตอน ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\mu_a$ ) หมายถึงความน่าจะเป็นของการดูดซับโฟตอนต่อหน่วยความยาวที่สั้นที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง ( $\mu_s$ ) หมายถึงความน่าจะเป็นของการกระจายตัวของโฟตอนต่อหน่วยความยาวของเส้นทางที่กว้างใหญ่ไพศาล การจำลองนี้จะเลือกบันทึกโฟตอนแบบอาร์เรย์ 2 มิติ ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนถูกใช้เพื่อติดตามโฟตอนแพ็คเก็ตโดยจุดกำเนิดของระบบพิกัดคือจุดโฟตอนที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวเนื้อเยื่อ แกน  $z$  เป็นแกนชี้ไปด้านในของเนื้อเยื่อ เมื่อ  $A$  คือมุมระหว่างทิศทางโฟตอนออกและแกนปกติ ( $-z$  สำหรับการสะท้อน และ  $+z$  สำหรับการส่งผ่าน) ไปยังพื้นผิวของเนื้อเยื่อ ซึ่งแกน  $z$  สอดคล้องกับทิศทางโฟตอนแบบไดนามิกใช้สำหรับการสุ่มตัวอย่างการเปลี่ยนทิศทางเคลื่อนที่ของโฟตอนแพ็คเก็ตมุม Deflection & Azimute เนื่องจากการกระเจิงครั้งแรก จากนั้นทิศทางของโฟตอนจะเปลี่ยนตามทิศทางโคไซน์ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน หน่วยที่เหมาะสมในการใช้คือ cm เป็นหน่วยพื้นฐานตลอดเพื่อความสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ความหนาของแต่ละชั้นมีหน่วยเป็นเซนติเมตร และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การกระเจิงในหน่วยเปอร์เซ็นต์เมตร

ตัวแปรสุ่มเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการมัลติคาร์โลซิซึมเลขชี้ของโฟตอนในเนื้อเยื่อ วิธีมัลติคาร์โลก็หมายถึงการโยนลูกเต๋ายู่กับการสุ่มตัวอย่างของตัวแปรจากการแจกแจงความน่าจะเป็นอย่างดี เมื่อพิจารณาตัวแปรสุ่มซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการจำลองแบบมัลติคาร์โลของการเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อตัวแปรนี้จะเป็นตัวขนาดการเดินทางของโฟตอนแต่ละชั้นที่โฟตอนจะใช้ระหว่างปฏิสัมพันธ์ของโฟตอนกับเนื้อเยื่อหรือมุมของการกระเจิง มีฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นที่กำหนดการกระจายของ  $\chi$  ในช่วง  $(a,b)$  ซึ่งมีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังนี้

$$\int_a^b p(\chi) d\chi = 1 \quad (3.1)$$

ในการจำลองการเคลื่อนที่ที่ต้องการที่จะสามารถเลือกค่าสำหรับ  $(\chi)$  ซ้ำ ๆ และสุ่มขึ้นอยู่กัตัวสร้างเลขสุ่มโดยคอมพิวเตอร์มีตัวแปรสุ่ม  $(\xi)$  ซึ่งมีการกระจายสม่ำเสมอในช่วง  $(0,1)$  ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของตัวแปรสุ่มแบบกระจายตัวสม่ำเสมอจะเป็นดังนี้

$$F_\xi(\xi) = \begin{cases} 0 & \text{if } \xi \leq 0 \\ \xi & \text{if } 0 < \xi \leq 1 \\ 1 & \text{if } \xi > 1 \end{cases} \quad (3.2)$$

การสุ่มตัวอย่างฟังก์ชันกระจายทั่วไป  $p(x)$  ให้สมมติว่ามีฟังก์ชันไม่ลดลำดับ  $\chi = F(\xi)$  โดยที่  $\xi \in (0,1)$  ถึง  $\chi \in (a,b)$  (ภาพที่ 3.4) ตัวแปร  $\chi$  และ  $\xi$  มีความสัมพันธ์แบบตัวต่อตัวซึ่งจะทำให้เกิดความเสมอภาคของความน่าจะเป็นดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} P \{ f(0) < \chi \leq f(\xi) \} &= P \{ 0 < \xi \leq \xi_1 \} \\ P \{ a < \chi \leq \chi_1 \} &= P \{ 0 < \xi \leq \xi_1 \} \end{aligned} \quad (3.3)$$

จากฟังก์ชันการแจกแจงแบบสะสมในสมการที่ (3.3) สามารถเขียนเป็นสมการของฟังก์ชันการกระจายสะสมได้ดังต่อไปนี้

$$F_x(\chi_1) = F_\xi(\xi_1) \quad (3.4)$$

จากฟังก์ชันการแจกแจงการสะสมที่เกี่ยวข้องฟังก์ชันความหนาแน่นจากสมการที่ 3.4 และ 3.2 ทำให้สมการที่ 3.4 เขียนใหม่ได้เป็นดังต่อไปนี้

$$\int_a^{\chi_1} p(x) dx = \xi_1 \Rightarrow \xi_1 \in (0,1) \quad (3.5)$$

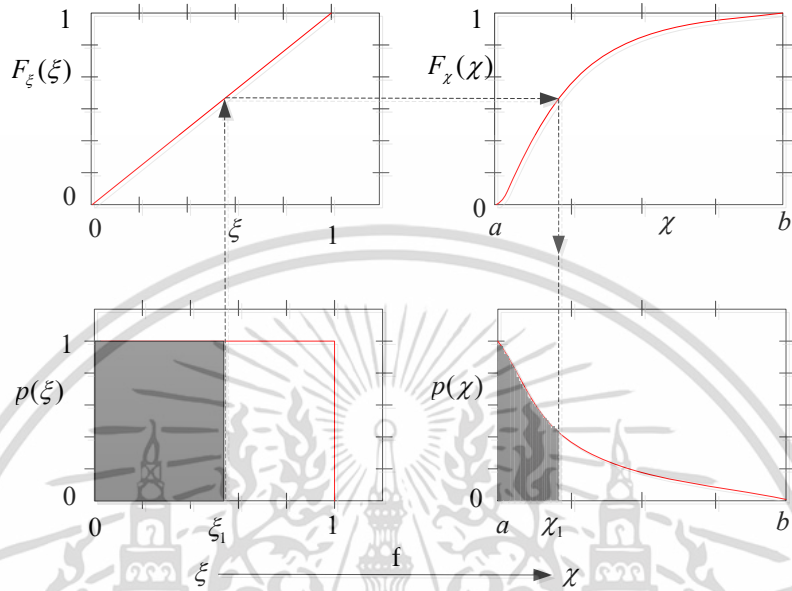
เมื่อ  $\chi = f(\xi)$  จะได้ว่า

$$\int_a^{\chi_1} p(x) dx = 1 - \xi_1 \Rightarrow \xi_1 \in (0,1) \quad (3.6)$$

เนื่องจาก  $1 - \xi_1$  และ  $\xi_1$  มีการกระจายตัวแบบเดียวกันจึงทำให้สามารถสลับกันได้ ดังนั้นสมการที่ 3.5 และ 3.6 มีค่าเท่ากันโดยสมการที่ 3.5 จะเป็นการเรียกซ้ำสำหรับการสุ่มตัวอย่างตัวแปรการเคลื่อนที่ของโฟตอน กระบวนการสุ่มทั้งหมดสามารถเข้าใจได้จากภาพที่ 3.4 ตัวสำคัญของวิธีมัลติคาร์โลในการเลือก  $\chi$  โดยใช้  $\xi$  คือความน่าจะเป็นที่  $\xi$  ในช่วง  $[0, \xi_1]$  ในความเป็นไปได้ที่  $\chi$  อยู่ในช่วง  $[a, \chi_1]$  ในภาพที่ 3.4 จะได้พื้นที่ที่แรงเงาคืออินทิเกรตของ  $p(x)$  บนช่วง  $[0, \chi_1]$  กับพื้นที่ที่แรงเงาคืออินทิเกรต  $p(\xi)$  บนช่วง  $[0, \xi_1]$  และพื้นที่ทั้งหมดภายใต้เส้นโค้ง  $p(x)$  และ  $p(\xi)$  แต่ละตัวมีความเหมือนเท่าเทียมกันตามความเหมาะสมสำหรับฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นผลที่ตามมาคือการทำแผนที่แบบหนึ่งต่อระหว่างขอบเขตบน  $x_1$  และ  $c_1$  ตามความเท่าเทียมกันของพื้นที่ที่ที่แรงเงา ในคำอื่น ๆ เราได้เท่ากับ  $F_c(c_1)$  กับ  $F_x(x_1)$  (สมการ 3.4) ซึ่งเทียบเท่ากับสมการ 3.5 ขั้นตอนการแปลง  $c_1 = f(x_1)$  จะแสดงโดยลูกศร สำหรับแต่ละ  $x_1$  กับ  $c_1$  จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกเลือกเพื่อให้ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมสำหรับ  $x_1$  และ  $c_1$  มีค่าเท่ากัน ตามลำดับ นอกจากนี้ฟังก์ชัน  $f(x)$  มีอยู่เสมอเนื่องจากฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของ  $x$  และ  $c$  เป็นแบบ monotonic



ภาพที่ 3.4 การสุ่มตัวอย่างตัวแปรสุ่ม  $\chi$  บนพื้นฐานของตัวแปรสุ่มแบบกระจาย  $\xi$

ยกตัวอย่าง เช่น พิจารณาการสุ่มตัวอย่างของขนาดชั้นตอนสำหรับการเคลื่อนที่ของโฟตอน ความหนาแน่นของฟังก์ชันคือ

$$P(s) = \mu_t \exp(-\mu_t s) \tag{3.7}$$

สัมประสิทธิ์การปฏิสัมพันธ์ ( $\mu_t$ ) เท่ากับผลรวมระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับสัมประสิทธิ์การกระเจิง ( $\mu_a + \mu_s$ ) ใช้ฟังก์ชันนี้ในสมการ 3.5 นิพจน์สำหรับค่าที่สุ่มตัวอย่าง  $s_1$  ขึ้นอยู่กับจำนวนสุ่ม  $\xi$  จะได้ว่า

$$\xi = \int_0^{s_1} P(s) ds = \int_0^{s_1} \mu_t \exp(-\mu_t s) ds = 1 - \exp(-\mu_t s_1) \tag{3.8}$$

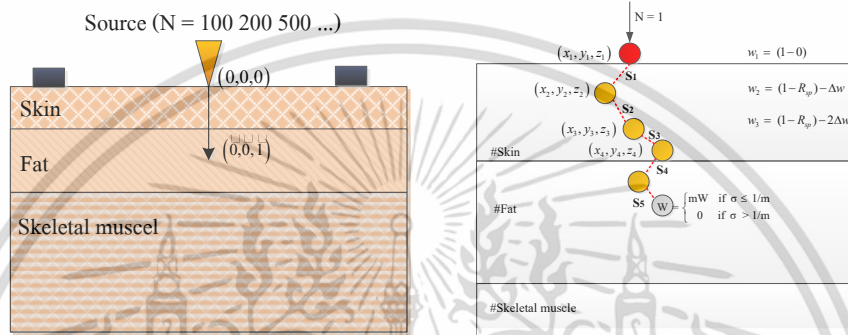
$$s_1 = \frac{-\ln(1-\xi)}{\mu_t} \tag{3.9}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 กฎการเคลื่อนที่ของโฟตอน

● การปลดปล่อยโฟตอน

ภายหลังกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นของแหล่งกำเนิดแสงที่พิกัด  $(0,0,1)$  และ  $(0,0,1)$  ดังภาพที่ 3.5 เป็นทิศทางเริ่มต้น โดยทำมุมตั้งฉากกับเนื้อเยื่อ โฟตอนจะเดินทางพุ่งเข้าสู่ชั้นเนื้อเยื่อที่มีเงื่อนไขต่างกันรวมถึงค่าดัชนีหักเหที่ต่างกัน



ภาพที่ 3.5 การจัดวางตำแหน่งของเครื่องมือ (ซ้าย) และการดำเนินการของโปรแกรมเมทัลเป (ขวา)

ทำให้เกิดค่า specular reflectance ( $R_{sp}$ ) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$R_{sp} = \frac{(n_i - n_t)^2}{(n_i + n_t)^2} \tag{3.10}$$

และน้ำหนักของโฟตอนลดลงโดย  $R_{sp}$  จากสมการ

$$W = 1 - R_{sp} \tag{3.11}$$

● การเคลื่อนที่ของโฟตอน

ภายหลังจากปล่อยโฟตอนเข้าสู่เนื้อเยื่อ แต่ละระยะทางเฉลี่ยของโฟตอนหรือ step size ( $s$ ) หรือ mean free path แต่ละระยะของโฟตอนจะขึ้นกับการสุ่มตัวอย่างของการกระจายความน่าจะเป็นของเส้นทางอิสระ ซึ่ง  $s$  คำนวณจากสมการ

$$s = -\ln \sigma / \mu_t \tag{3.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่  $\mu_t$  คือ  $\mu_t = \mu_a + \mu_s$  ผลรวมระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน  $\mu_a$  กับสัมประสิทธิ์การกระเจิง  $\mu_s$  และมี  $\sigma$  เป็นพารามิเตอร์ที่ได้จากการสุ่มซึ่งมีการกระจายตัวในช่วง (0,1) พิจารณานาฬิกาของ  $s$  ยาวพอที่จะถึงขอบเขตหรือไม่ ถ้าโฟตอนไม่ถึงขอบเขตโฟตอนจะย้ายตำแหน่งดังสมการ

$$x \rightarrow x + \mu_x \cdot s \quad y \rightarrow y + \mu_y \cdot s \quad z \rightarrow z + \mu_z \cdot s \quad (3.13)$$

ในทางกลับกันเมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ภายในเนื้อเยื่อน้ำหนักโฟตอนจะลดลงเนื่องจากการดูดกลืนตัวแปรค่าน้ำหนักโฟตอนที่เปลี่ยนแปลง ( $\Delta W$ ) จาก  $\Delta W = (\mu_a / \mu_t)W$  สามารถหาน้ำหนักที่เปลี่ยนไปดังสมการ

$$W \rightarrow W - \Delta W \quad (3.14)$$

สำหรับการกระเจิงของโฟตอน จะเกิดมุมหักเห ( $0 \leq \theta < \pi$ ) และมุมแฉิมิต ( $0 < \delta < 2\pi$ ) ดังสมการ

$$\cos \theta = \frac{1}{2\gamma} \left[ 1 + \gamma^2 - \left( \frac{1 - \gamma^2}{1 - \gamma + 2\gamma\sigma} \right)^2 \right] \quad (3.15)$$

$$\delta = 2\pi\sigma \quad (3.16)$$

ซึ่งใช้ในการหาทิศทางในการเคลื่อนที่ใหม่ดังสมการ

$$\begin{aligned} \mu'_x &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_x \mu_z \cos \delta - \mu_y \sin \delta) + \mu_x \cos \theta \\ \mu'_y &= \frac{\sin \theta}{\sqrt{1 - \mu_z^2}} (\mu_y \mu_z \cos \delta - \mu_x \sin \delta) + \mu_y \cos \theta \\ \mu'_z &= \left( -\sin \theta \cos \delta \sqrt{1 - \mu_z^2} \right) + \mu_z \cos \theta \end{aligned} \quad (3.17)$$

กรณีโฟตอนเกิดมุมเล็กมากจะหาทิศทางเคลื่อนที่ดังสมการ

$$\mu'_x = \sin \theta \cos \delta \quad \mu'_y = \sin \theta \sin \delta \quad \mu'_z = (\mu_z / |\mu_z|) \cos \theta \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรณีที่มี s ยาวพอชนขอบเขต โฟตอนจะข้ามไปยังขอบเขตของชั้นที่ถัดไป ความน่าจะเป็นของการสะท้อนภายในเกิดจากสมการของสเนลล์ดังสมการ

$$R_i = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sin^2(\lambda_i - \lambda_t)}{\sin^2(\lambda_i + \lambda_t)} + \frac{\tan^2(\lambda_i - \lambda_t)}{\tan^2(\lambda_i + \lambda_t)} \right] \quad (3.19)$$

$\lambda_i$  คือ มุมตกกระทบ ( $\lambda_i = \cos^{-1} \mu_z$ ) และ  $\lambda_t$  คือ มุมส่งผ่านพิจารณาจาก  $n_i \sin(\lambda_i) = n_t \sin(\lambda_t)$

### ● การสิ้นสุดของโฟตอน

การสิ้นสุดของโฟตอนเกิดขึ้นเนื่องจากการสะท้อนหรือการส่งผ่านของเนื้อเยื่อผ่านเทคนิคของรูเลต โดยให้โฟตอนมีโอกาส(m) มากขึ้น (กำหนดให้  $m = 100$ ) ในการอยู่รอดที่มีน้ำหนักโฟตอนเท่ากับ  $mW$  ถ้าโฟตอนไม่ผ่านเทคนิครูเลตน้ำหนักของโฟตอนจะลดลงเป็นศูนย์และสิ้นสุดโฟตอนนั่นเองดังสมการ

$$W = \begin{cases} mW & \text{if } \sigma \leq 1/m \\ 0 & \text{if } \sigma > 1/m \end{cases} \quad (3.20)$$

## 3.3 การเคลื่อนที่ของโฟตอนจากโปรแกรมแมทแลป

3.3.1 ทดสอบแบบจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนเดี่ยว

3.3.2 เปรียบเทียบผลการจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนในชั้นของเนื้อเยื่อ 3 ชั้น กับเนื้อเยื่อแบบเดียวกันแต่ชั้นที่ 3 เป็นชั้นของทองคำ

3.3.3 สร้างแบบจำลองของเนื้อเยื่อสามชั้นประกอบด้วยชั้นผิวหนัง ไขมัน และกล้ามเนื้อลาย โดยบันทึกการเคลื่อนที่ของโฟตอน 100 ถึง 100000 ตัว และวิเคราะห์ค่าที่ได้ดังนี้คือ ระยะความกว้างการกระจายตัวของโฟตอนที่ชั้นผิวหนัง ชั้นไขมัน ชั้นกล้ามเนื้อ และความลึกของโฟตอนที่สามารถทะลุเข้าไปในชั้นเนื้อเยื่อ

3.3.4 วิเคราะห์จำนวนสเปคตรัมของโฟตอนในเนื้อเยื่อตามแนวความลึกที่โฟตอนเคลื่อนที่เข้าสู่เนื้อเยื่อ ความกว้างในเนื้อเยื่อและตามแนวพื้นผิวที่ชั้นผิวหนัง

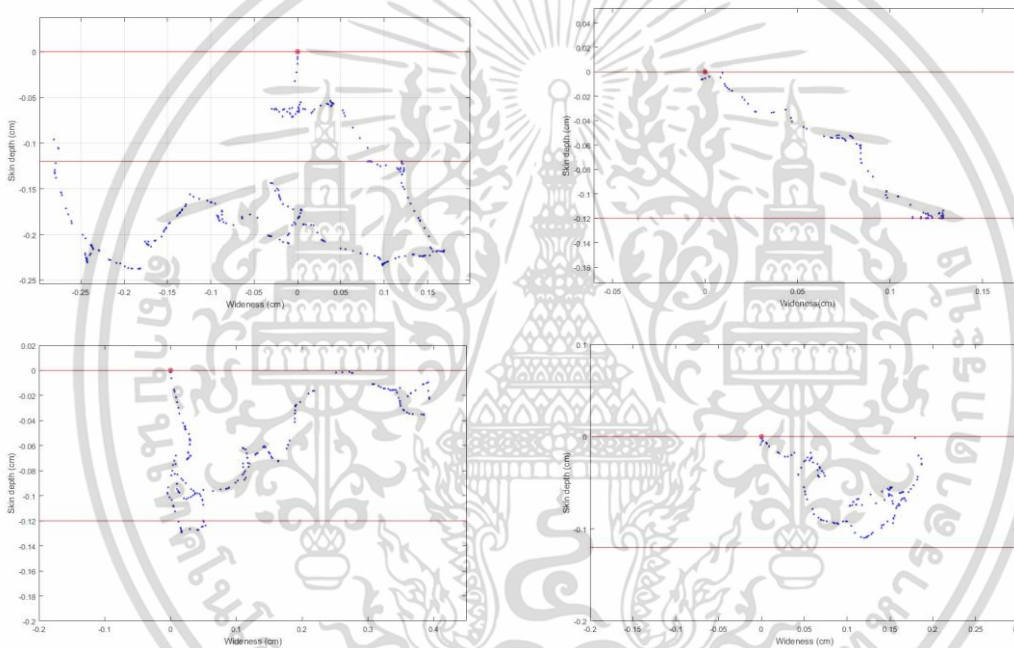
3.3.5 วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของระยะการกระจายตัวของโฟตอนบนชั้นผิวหนังเพื่อหาคำแนะนำการวางที่เหมาะสมสำหรับอุปกรณ์การวัดทางแสงต่อไป

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

#### 4.1 การเคลื่อนที่ของโฟตอนเดี่ยว

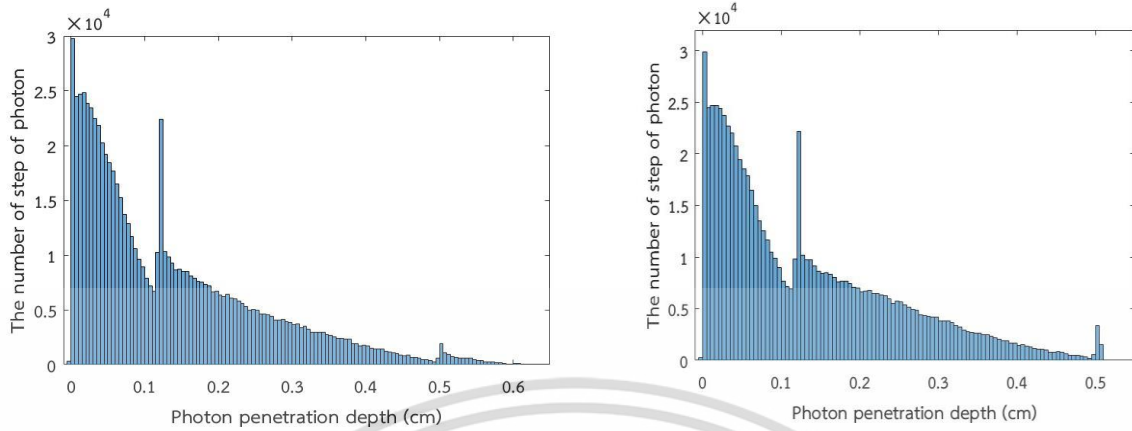
รูปแบบการเคลื่อนที่ของโฟตอน 1 ตัว มีลักษณะการเคลื่อนที่แบบสุ่มดังภาพที่ 4.1 เป็นไปตามกฎการกระจายตัวของโฟตอนแน่นอนที่มี  $\sigma$  เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการสร้างแบบจำลองหมายถึงระยะการเคลื่อนที่ของโฟตอนแต่ละสแต็ป  $s$  ทิศทาง มุมของการเคลื่อนที่ และน้ำหนักโฟตอนที่เหลือจนถึงจุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ของโฟตอน



ภาพที่ 4.1 การเคลื่อนที่ของโฟตอนเดี่ยว

#### 4.2 การเคลื่อนที่ของโฟตอนผ่านกล้ำมเนื้อลายเทียบกับทองคำ

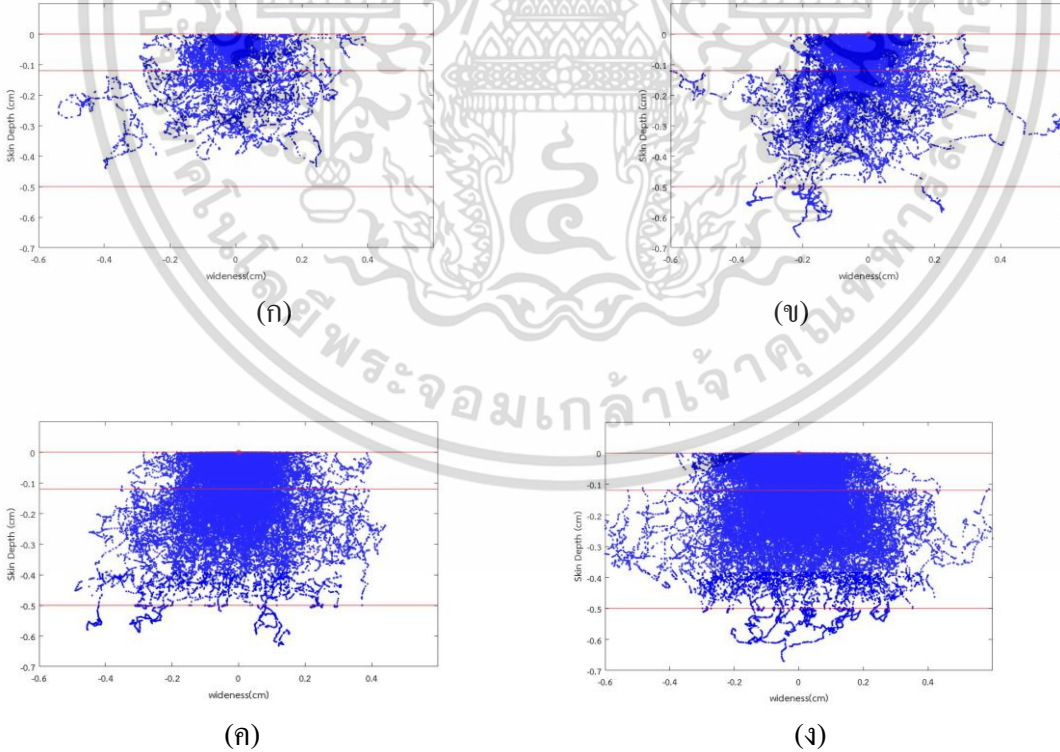
จากการแทนค่าพารามิเตอร์ของชั้นเนื้อเยื่อกล้ำมเนื้อลายเป็นทองคำที่มีความสามารถในการสะท้อนรังสีได้ดี โดยเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เป็นค่าของทองคำในชั้นที่ 3 ที่ความลึก 0.5 เซนติเมตร ยืนยันว่าโฟตอนไม่สามารถทะลุเข้าไปสู่ชั้นของเนื้อเยื่อทองคำได้ดังภาพที่ 4.2



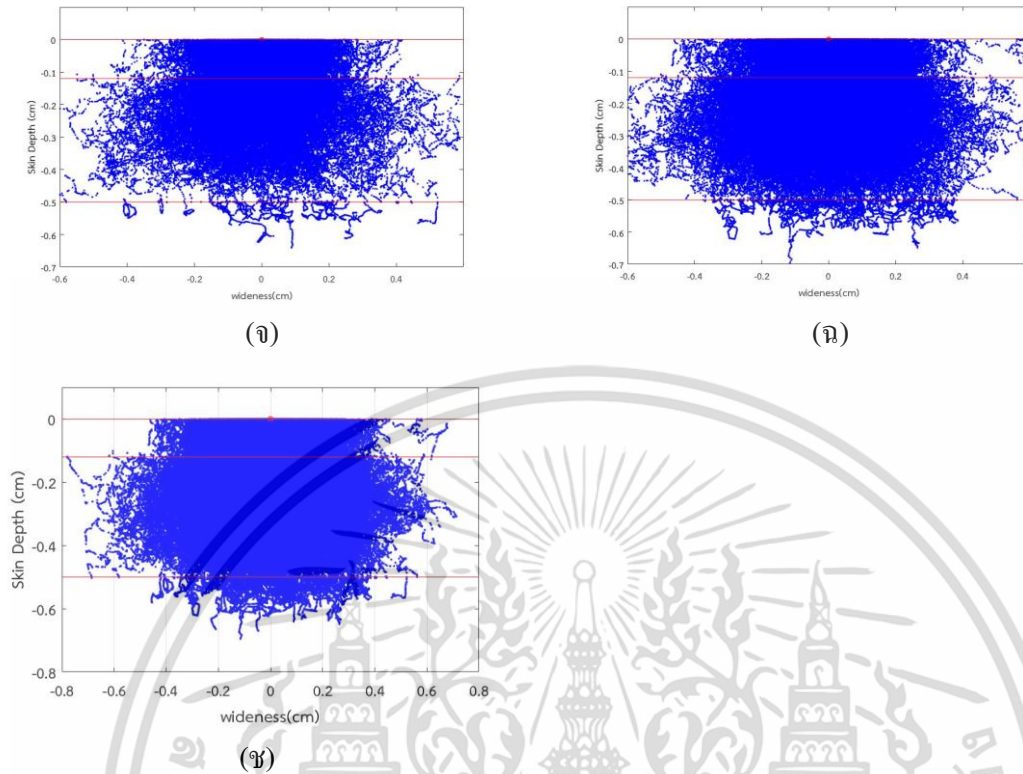
ภาพที่ 4.2 โฟตอนกระจายตัวลึกกลงในเนื้อเยื่อสามชั้น โดยที่ชั้นสุดท้ายเป็นกล้ามเนื้อลาย (ซี่ง) และทองคำ (ขาว)

4.3 การเคลื่อนที่ของโฟตอนหลายตัวบนและในเนื้อเยื่อ

- การเคลื่อนที่ของโฟตอน 100 ถึง 100000 ตัว ในเนื้อเยื่อที่ระนาบ (X,Z) แสดงดังภาพที่ 4.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



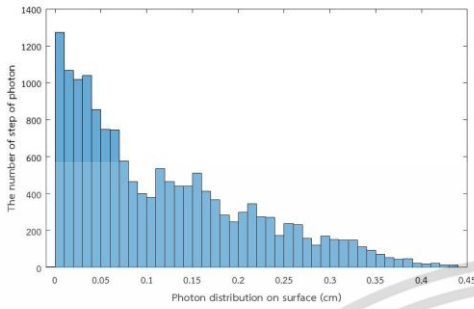
ภาพที่ 4.3 ตัวอย่างการกระจายตัวของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำนวน (ก) 100 (ข) 200 (ค) 500 (ง) 1000 (จ) 2000 (ฉ) 5000 (ช) 10000 ตัว

พบว่าเมื่อจำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นความสามารถในการกระจายตัวของโฟตอนมีการกระจายตัวเพิ่มขึ้นซึ่งมีความสอดคล้องกันกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนกับพลังงาน คือเมื่อจำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้นพลังงานก็จะเพิ่มขึ้นทำให้ความสามารถในการกระจายตัวการเคลื่อนที่ของโฟตอนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งระยะการกระจายตัวของโฟตอนทั้งสองทิศทางจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเนื้อเยื่อแต่ละประเภท ซึ่งเมื่อแบบจำลองใช้พารามิเตอร์ของเนื้อเยื่อผิวหนัง ไขมัน และเนื้อเยื่อของกล้ามเนื้อลายพบว่าระยะการกระจายตัวของโฟตอนอยู่ในระดับ 0 ถึง 2 เซนติเมตร ที่จำนวนโฟตอน 100 ถึง 100000 โฟตอน

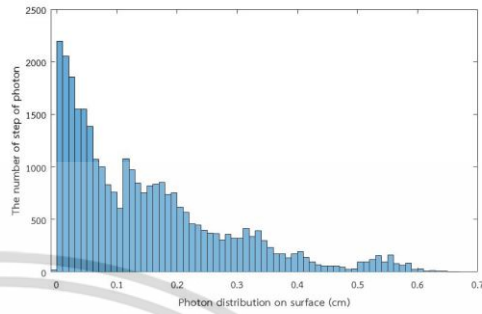
- สหสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของโฟตอน 100 ถึง 100000 ตัว ในเนื้อเยื่อที่ระดับความลึก (Z) แสดงดังภาพที่ 4.4 ผลจากการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนจากผลการทดลองที่ 4.1 พบว่าการเคลื่อนที่ของโฟตอนหนึ่งตัวจะมีสหสัมพันธ์การเคลื่อนที่หลายสหสัมพันธ์ขึ้นตอน ซึ่งโฟตอนแต่ละตัวก็จะมีสหสัมพันธ์การเคลื่อนที่ ทิศทางและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

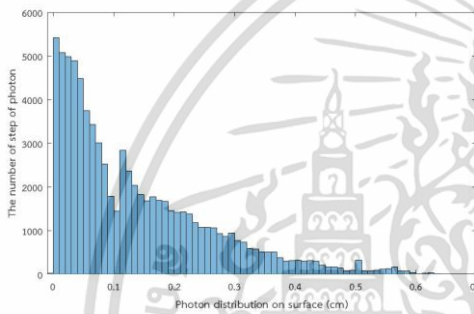
ขนาดที่ไม่เหมือนกัน จึงมีการบันทึกผลการสร้างแบบจำลองโดยบันทึกเป็นจำนวนสแต็ปของโฟตอนในแต่ละระดับความลึกลงไปเนื้อเยื่อ



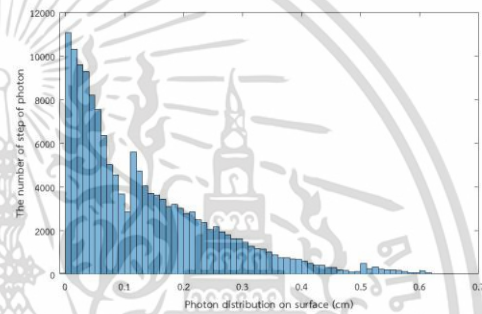
(ก)



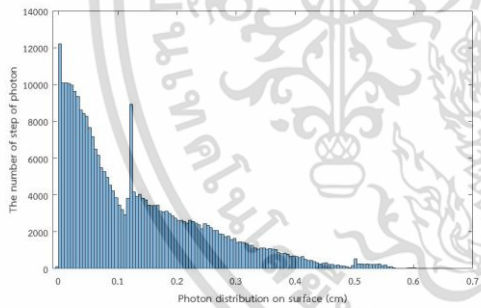
(ข)



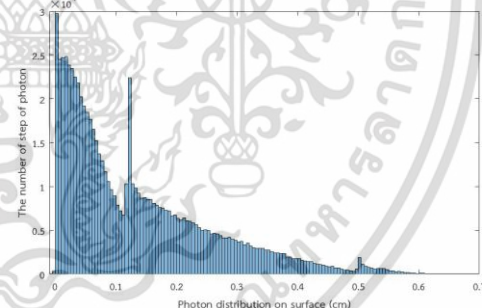
(ค)



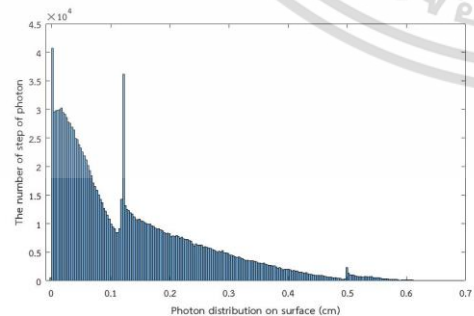
(ง)



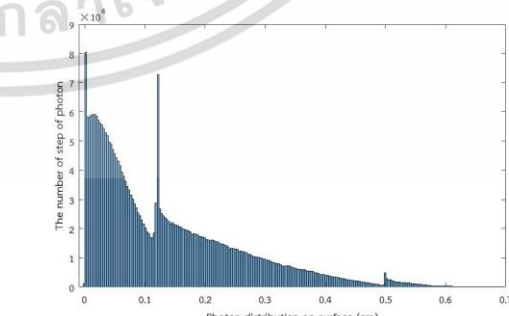
(จ)



(ฉ)

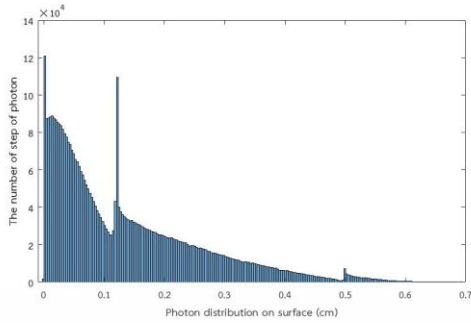


(ช)

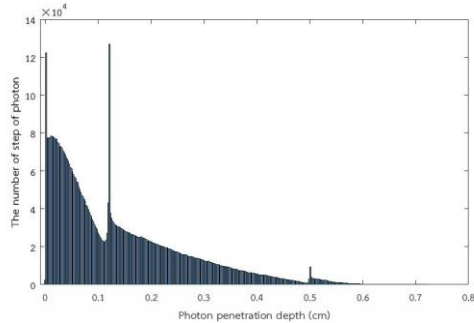


(ฌ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ)

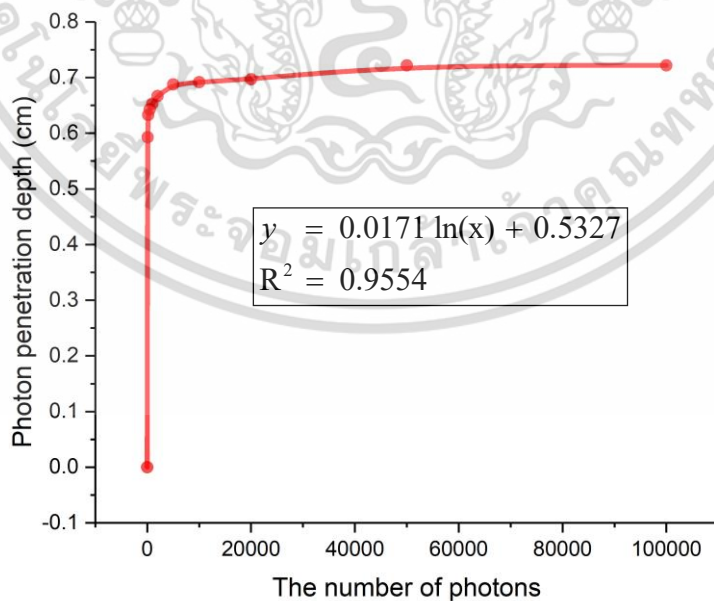


(ญ)

ภาพที่ 4.4 สตีบการเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำนวน (ก) 100 (ข) 200 (ค) 500 (ง) 1000 (จ) 2000 (ฉ) 5000 (ช) 10000 (ซ) 20000 (ฌ) 50000 (ญ) 100000 ตัว

พบว่าจำนวนสตีปโฟตอนจะมีค่ามากที่สุดของชั้นบนคือชั้นผิวหนังและค่อยๆลดลงตามชั้นถัดไปคือไขมันและชั้นเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อลาย และยังพบช่วงขอบเขตระหว่างชั้นรอยต่อระหว่างชั้นผิวหนังกับชั้นไขมัน และรอยต่อระหว่างชั้นไขมันกับชั้นเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อลาย อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากความแตกต่างของดัชนีหักเหของเนื้อเยื่อต่างชนิดกันทำให้เกิดการสะท้อนกลับบางส่วน ทำให้มีจำนวนสตีปโฟตอนมีการกระจายบริเวณนั้นเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆลดลง

จากการสร้างแบบจำลองเมื่อโฟตอนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อทั้ง 3 ชั้น จะ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของเนื้อเยื่อกับจำนวนโฟตอนดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของเนื้อเยื่อกับจำนวน โฟตอน

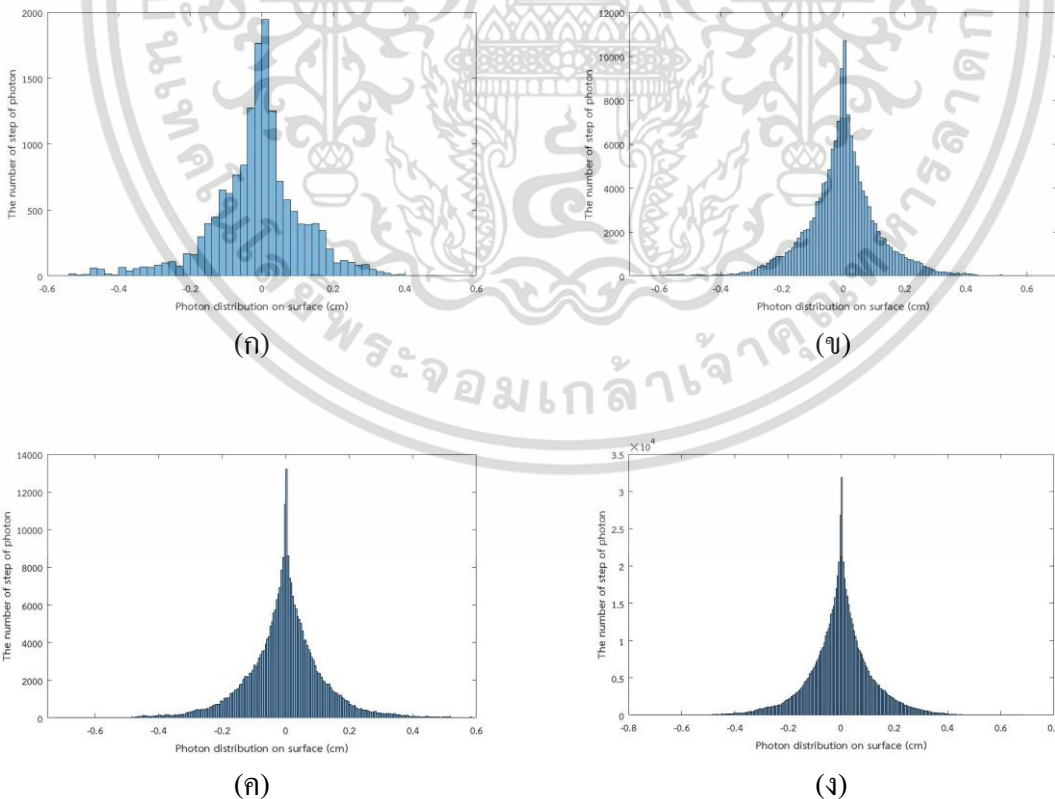
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแต่ละจำนวนโฟตอน (100 – 100000 ตัว ตามลำดับ) ต่อความลึกของเนื้อเยื่อจำนวน 6 runs มีค่าเท่ากับ 0.036, 0.004, 0.019, 0.012, 0.014, 0.012, 0.005, 0, 0 และ 0 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของความแปรผันเฉลี่ยของแต่ละจำนวนโฟตอนต่อความลึกของเนื้อเยื่อจำนวน 6 runs มีค่าเท่ากับ 6.15, 0.69, 2.95, 1.76, 2.14, 1.68, 0.75, 0.06, 0, และ 0 % ตามลำดับ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของความแปรผันเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเหมาะต่อการจำลองการเดินทางของโฟตอนในเนื้อเยื่อ นอกจากนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนกับความลึกของโฟตอนในเนื้อเยื่อให้สมการต่อไปนี้คือ

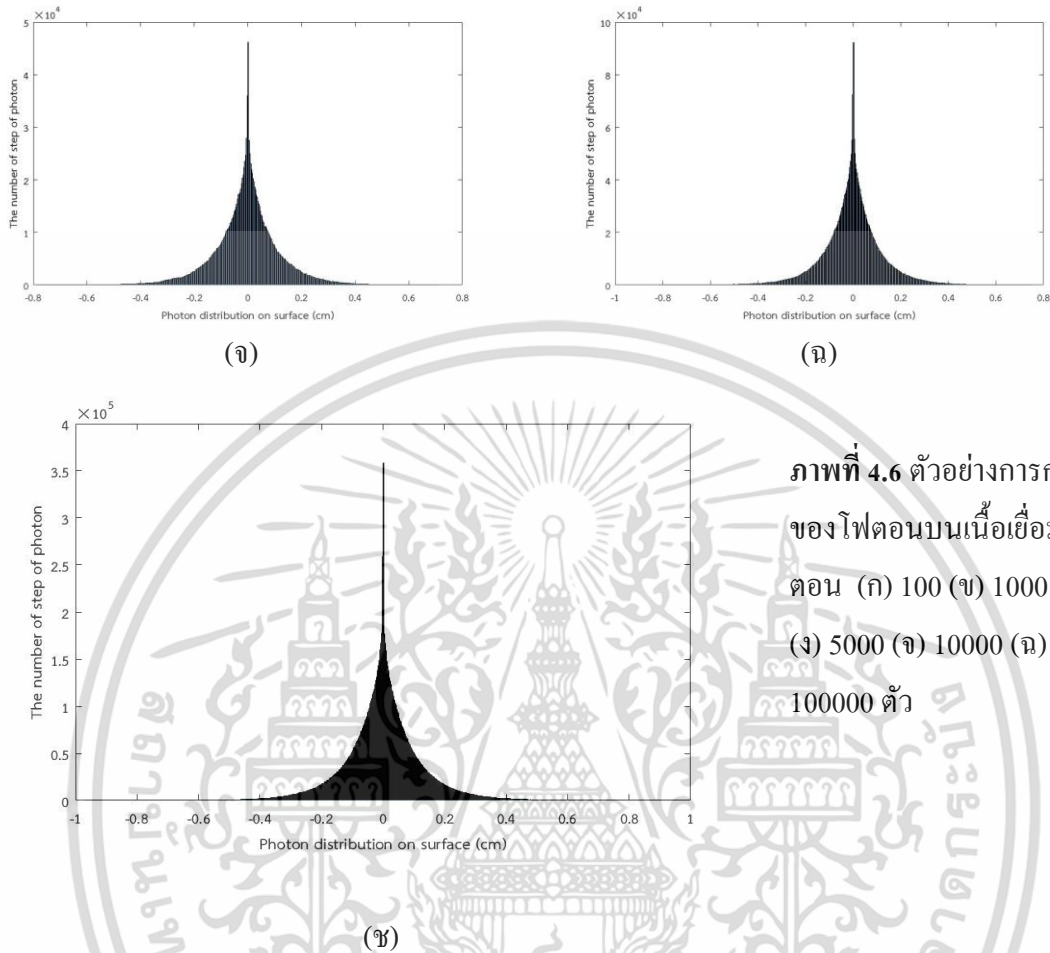
$$y = 0.0171 \ln(x) + 0.5327 \quad (4.1)$$

โดยสามารถนำสมการนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์หาระยะการกระจายตัวของโฟตอนที่ทะลุเข้าไปในเนื้อเยื่อได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการใช้งานจริง ซึ่งตัวแปร  $y$  คือ ระยะความลึกของโฟตอนต้องการทราบ และตัวแปร  $x$  คือ ค่าแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการใช้โดยคิดเป็นจำนวนโฟตอนที่ใช้ในแบบจำลอง

- สดเทียบการเคลื่อนที่ของโฟตอน 100 ถึง 100000 ตัว ที่ผิวหน้าของเนื้อเยื่อ (X) แสดงดังภาพที่ 4.6



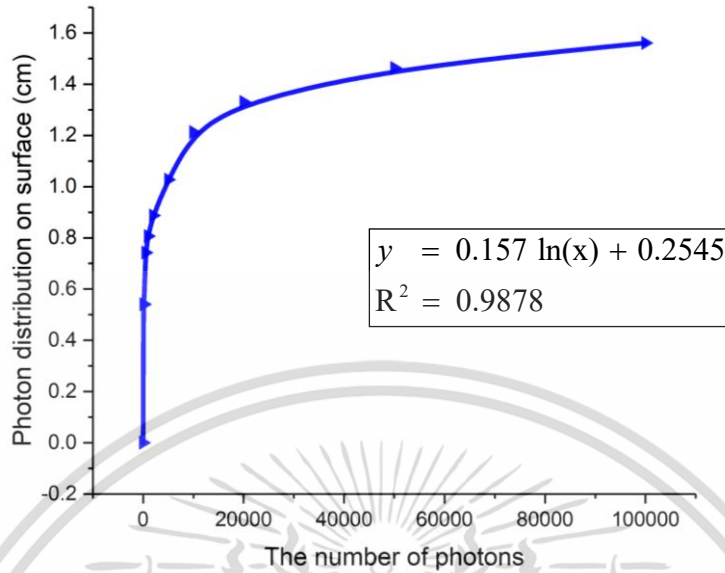
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



พบว่าโฟตอน 100000 ตัว กระจายตัวบนเนื้อเยื่อที่ความกว้างเท่ากับ 1.966 เซนติเมตร จากการสร้างแบบจำลองเมื่อโฟตอนกระจายตัวบนเนื้อเยื่อจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างบนเนื้อเยื่อกับจำนวนโฟตอนดังภาพที่ 4.7

จากค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของแต่ละจำนวนโฟตอน (100 – 100000 ตัว ตามลำดับ) ต่อความกว้างบนเนื้อเยื่อจำนวน 6 runs มีค่าเท่ากับ 0.028, 0.009, 0.007, 0.038, 0.125, 0.215, 0.107, 0.158, 0.007 และ 0 ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของความแปรผันเฉลี่ยของแต่ละจำนวนโฟตอนต่อความกว้างบนเนื้อเยื่อจำนวน 6 runs มีค่าเท่ากับ 5.21, 1.71, 0.98, 4.87, 14.68, 22.03, 8.93, 12.40, 0.50 และ 0.02 % ตามลำดับ พบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของความแปรผันเฉลี่ยมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเหมาะต่อการจำลองการเดินทางของโฟตอนบนเนื้อเยื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างบนชั้นผิวหนึ่งกับจำนวนโฟตอน

นอกจากนี้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนกับความกว้างของโฟตอนบนเนื้อเยื่อให้สมการต่อไปนี้เป็นคือ

$$y = 0.157 \ln(x) + 0.2545 \quad (4.2)$$

โดยสามารถนำสมการนี้ไปใช้ในการวิเคราะห์หาระยะการกระจายตัวของโฟตอนบนเนื้อเยื่อได้เมื่อมีแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการใช้งานจริง ซึ่งตัวแปร  $y$  คือ ระยะความกว้างของโฟตอนต้องการทราบ และตัวแปร  $x$  คือ ค่าแหล่งกำเนิดแสงที่ต้องการใช้โดยคิดเป็นจำนวนโฟตอนที่ใช้ในแบบจำลอง

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลจากการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของโฟตอนในเนื้อเยื่อจำนวนสามชั้น โดยเริ่มต้นทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของโฟตอนเดี่ยวที่มีการเคลื่อนที่แบบสุ่มขึ้นกับค่าตัวแปรที่ได้จากการสุ่มทำให้สตีปการเคลื่อนที่ของโฟตอนในแต่ละโฟตอนในแต่ละครั้งมีทิศทางและขนาดไม่เหมือนกัน การทดสอบแบบจำลองกับทองคำที่แทนที่ด้วยกลีมาเนื้อลายในชั้นล่างสุดยืนยันว่าโฟตอนไม่สามารถทะลุผ่านชั้นของทองคำได้จริง และจากความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโฟตอนกับพลังงานคือเมื่อจำนวนโฟตอนเพิ่มขึ้น พลังงานก็จะเพิ่มขึ้นตามทำให้ความสามารถในการกระจายตัวของโฟตอนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งระยะการกระจายตัวของโฟตอนนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเนื้อเยื่อแต่ละประเภท (ผิวหนัง ไขมัน และเนื้อเยื่อของกลีมาเนื้อลาย) โดยพบว่าการกระจายตัวของโฟตอนบนเนื้อเยื่ออยู่ในระดับความกว้าง 1.5 เซนติเมตร และระดับความลึก 1.966 เซนติเมตร เทียบกับจำนวนโฟตอน 100 - 100000 ตัว นอกจากนั้นจำนวนของสตีปโฟตอนจะมีค่ามากที่ส่วนของชั้นบนคือชั้นผิวหนังและค่อยๆ ลดลงในชั้นถัดๆ ไป และยังสามารถพบขอบเขตรอยต่อระหว่างชั้นผิวหนังกับชั้นไขมันและรอยต่อระหว่างชั้นไขมันกับชั้นเนื้อเยื่อกลีมาเนื้อลายเนื่องจากความแตกต่างของดัชนีหักเหของเนื้อเยื่อต่างชนิดกันทำให้เกิดการสะท้อนกับบางส่วนโดยพบจำนวนสตีปโฟตอนมีการกระจายบริเวณรอยต่อเพิ่มขึ้นแล้วค่อยๆ ลดลงสุดท้ายพบว่าค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรผันสำหรับโฟตอน 100 - 100000 ตัว ที่กระจายในแนวระนาบและแนวความลึกมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้มีความถูกต้องและน่าเชื่อถือเหมาะสำหรับการจำลองการเดินทางของโฟตอนในเนื้อเยื่อจริงๆ

บทที่ 6  
สรุปผลผลิตที่ได้จากงานวิจัย

G. Kaewboonrueng, Y. Özmen, S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Monte Carlo Simulation of Photon-Skeletal Muscle Interaction in Human Tissue Model, Advanced Materials Research 1147 (2018) 12-17.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวมทั้งโครงการ (บาท)	ค่าใช้จ่ายจากรายงานครั้งก่อน (บาท)	ค่าใช้จ่ายงวดปัจจุบัน (บาท)	รวมค่าใช้จ่ายสะสมถึงปัจจุบัน (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน) (บาท)
งบดำเนินงาน					
ค่าใช้สอย	6,000	-	3,176.50	3,176.50	-
ค่าวัสดุ	44,000	46,823.50	-	46,823.50	-
<b>รวม</b>	<b>50,000</b>	<b>46,823.50</b>	<b>3,176.50</b>	<b>50,000</b>	<b>-</b>

จำนวนเงินที่ได้รับและจำนวนเงินที่ใช้จ่าย

งวดเงินที่ได้รับ	จำนวนเงินที่ได้รับ (บาท)	เมื่อ
งวดที่ 1	42,500	พฤศจิกายน 2560
งวดที่ 2	7,500	มกราคม 2561
<b>รวม</b>	<b>50,000</b>	<b>①</b>

งวดเงินที่ใช้จ่าย	จำนวนเงินที่ใช้จ่าย (บาท)	เมื่อ
งวดที่ 1	46,823.50	พฤศจิกายน 2560
งวดที่ 2	3,176.50	กรกฎาคม 2561
<b>รวม</b>	<b>50,000</b>	<b>②</b>

จำนวนเงินคงเหลือ ① - ② 0 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้วิจัย

### ประวัติส่วนตัวหัวหน้าวิจัย

ชื่อ-สกุล นาย กฤษกร โส้เจริญรัตน์

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
PhD	Physical Materials Science	JAIST	2007
MSc	Processing Technology	AIT	2000
BSc	Chemical Technology	Chulalongkorn University	1994

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

K. Locharoenrat, A. Sugawara, S. Takase, H. Sano, and G. Mizutani, Shadow Deposition of Copper Nanowires on the Facted NaCl(110) Template, *Surface Science*, 601 (2007) 4449.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Phenomenological Studies of Optical Properties of Cu Nanowires, *Science & Technology of Advanced Materials*, 8 (2007) 277.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Self-Organized Copper Nanowires Studied by Second Harmonic Spectroscopy, *Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Materials, Fundamentals and Applications* (2007) WE5.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Rotational Anisotropy in Second Harmonic Intensity from Copper Nanowire Arrays on the NaCl(110) Substrates, *J. Luminescence*, 128 (2008) 824.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Second Harmonic Spectroscopy of Copper Nanowire Arrays of on the (110) Faceted Faces of NaCl Crystals, *J. Physics: Conference Series*, 100 (2008) 052050.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Field Enhancement in Arrays of Copper Nanowires Investigated by the Finite-Difference Time-Domain Method, *Surface and Interface Analysis*, 40 (2008) 1635.

K. Locharoenrat, H. Sano, and G. Mizutani, Demonstration of Confocal Sum Frequency Microscopy, *Physica Status Solidi (c)*, 6 (2009) 304.

G. Mizutani, K. Locharoenrat, H. Li, and H. Sano, Construction of an Optical Sum Frequency Microscope with Confocal Optics, *Optical Society of America Technical Digest of Nonlinear Optics: Optics & Photonics Congress (2009) JWA23*.

G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Quantification of Fluorescence Target in Tissue Phantoms by Time-domain Diffuse Optical Tomography with Phantoms – Total-Light Approach, *Optical Society of America Technical Digest of Biomedical (2010)*, BTuD11.

G. Nishimura, K. Awasthi, K. Locharoenrat, S. Okawa, and Y. Yamada, Time-Domain Fluorescence Diffuse Optical Tomography for Live Animals by Total-Light Algorithm, *Proceedings of SPIE*, 7896 (2011) 78962Q.

C-Y. Kao, C-W. Chang, K. Locharoenrat, C-M. Chang, Max T-K. Hou, and I-J. Hsu, Compact Optical Delay Line for Long-Range Scanning, *Optics Communications*, 284 (2011) 4243.

K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Optical Delay Line for Rapid Scanning Low-Coherence Reflectometer, *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2 (2012) 904.

K. Locharoenrat, and G. Mizutani, Characterization, Optical, and Theoretical Investigation of Arrays of the Metallic Nanowires Fabricated by a Shadow Deposition Method, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 652.

K. Locharoenrat, Nonlinear Optical Properties of Controlled Fabrication of Copper Nanowires by a Shadow Deposition, *Advanced Materials Research*, 622-623 (2013) 777.

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Nitrogen Concentrations on Structural and Optical Properties of Aluminium Nitride Films Deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research*, 631-632 (2013) 186.

A. Thedsakhulwong, K. Locharoenrat, and W. Thowladda, Structure and Piezoelectric Properties of Aluminium Nitride Thin films on the Quartz Substrates deposited by Reactive RF-Magnetron Sputtering, *Advanced Materials Research* 699 (2013) 308.

K. Locharoenrat, and I-J. Hsu, Construction of the Optical Delay Line for the Optical Coherence Tomography, *International Journal of Applied Physics and Mathematics* 3 (2013) 137.

K. Locharoenrat, Copper Nanowires on NaCl (110) Template, *Applied Mechanics and Materials*, 313 (2013) 198.

K. Locharoenrat, Investigation of Temporal Profiles at the Symmetrical Points of the Target in Tissue Phantoms by Time-Resolved Fluorescence Diffuse Optical Tomography, *Proceedings of SPIE*, 8883 (2013) 88831L.

K. Locharoenrat, Preparations and Field Emission from Tungsten Nanotips, *Ferroelectrics*, 457 (2013) 76.

K. Locharoenrat, Second-Order Nonlinear Optical Response of Metal Nanostructures, *Advanced Materials Research* 858 (2014) 147.

K. Locharoenrat, Mechanism of Resonant Enhancement of Gold- and Copper-nanowires Arrays, *Advanced Materials Research*, 902 (2014) 29.

K. Locharoenrat, Recent Advances in Nanomaterial Fabrication, *Journal of. Physics: Conference Series* 495 (2014) 012018.

K. Locharoenrat, Optical Property of Indocyanine Green in a Tissue Model, *Molecular Crystals and Liquid Crystals* 604 (2014) 59.

K. Locharoenrat, Second Harmonic Generation Based on Strong Field Enhancement in Metallic Nanostructured Surface, *Materials Science – Medziagotyra*, 20(4) (2014) 387.

K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Plasmonic Properties of Gold-Palladium core-shell Nanorods, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 16(3) (2015) 120.

K. Locharoenrat and S. Srivatcharakul, Optical Studies of Zinc Oxide Nanoparticles and Their Biomedical Application, *Chinese Journal of Physics* 53(4) (2015) 080901.

K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Enhancement of Fluorescence in Inorganic Dyes by Metallic Nanostructured Surfaces, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 17(1) (2016) 21-26.

K. Locharoenrat, Preparation and Metal Removal from Chitosan/PEG Blend, *Applied Mechanics and Materials*, 835 (2016) 348.

S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Recent Trend of Solar Tracking System for Electric Power Conversion, *Applied Mechanics and Materials*, 835 (2016) 731.

M. Brankov and K. Locharoenrat, Photostability Testing of Coumarin-153 Doped ZnO Thin Films Prepared with Spin-Coating Technique, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 17(2) (2016) 75-80.

K. Locharoenrat, Preparation and Heavy Metal Removal from Chitosan Composite, *Materiale Plastice*, 53(2) (2016) 292.

N. Boonpiphobanun, P. Damrongsak and K. Locharoenrat, Comparison of Fluorescence Behaviors of Rhodamine 6G with Palladium-coated Gold Nanorods in Formations of Solutions and Thin Films, *Applied Mechanics and Materials*, 851, (2016) 14.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

L. Suanlim, S. Srivatcharakul and K. Locharoenrat, Photocatalytic Effect of Metal Oxide Nanoparticles on Cultured Human Breast Cancer Cells, *Applied Mechanics and Materials*, 851, (2016) 144.

K. Saenyot, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Design and Fabrication of Gamma-Type Stirling Engine on Parabolic Dish of Solar Concentrator by Compression Ratio Method, *Applied Mechanics and Materials*, 851, (2016) 383.

K. Jianwattananukul, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Design and Construction of New Hybrid Solar Tracking System, *Applied Mechanics and Materials*, 851, (2016) 510.

A. Chittawanij and K. Locharoenrat, Characteristic Evaluation of Organic Light-emitting Diodes Prepared with Stamp Printing Technique, *Advances in Condensed Matter Physics*, 2017 (2017) Article ID 2414798.

E. Rammarat, K. Locharoenrat, W. Yindeesuk and P. Damrongsak, Studies of Concentration Dependence of the Fluorescent Quantum Yield from Rhodamine6G and Au-Pd Core-Shell Nanorods, Using a Response Surface Methodology, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 18(3) (2017) 179-186.

T. Leelawattananon, K. Locharoenrat and S. Chittayasothorn, Simulation of Copper Thin Film Thickness Optimization for Surface Plasmon using the Finite Element Method, *Proceedings of SIMULTECH 2017* (2017) 188-195.

K. Locharoenrat and P. Damrongsak, Optical Performance of Fluorescent Collectors Integrated with Microlens Arrays, *Materials Research Express* 4(9) (2017) Article ID 095502.

S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Calculation of Lead-Iron Double-Layer Thickness for Gamma-ray Shielding by MATLAB Program, *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2017 (2017) Article ID 6078461.

P. Thonglim, M. Sirivichai, O. Thanjai and K. Locharoenrat, Removal of Metals Using a ZnO/Au Composite under Visible-Light Illumination, *Ukrainian Journal of Physical Optics* 19(1) (2018), 60-68.

A. Chittawanij and K. Locharoenrat, Improvement of Power Efficiency of Hybrid White OLEDs Based on p-i-n Structures, *Materia-Rio De Janeiro* 23(1) (2018) 1-9.

P. Damrongsak, E. Ramarat and K. Locharoenrat, Effects of Gold Nanoparticles on Fluorescence Polarization and Emission Spectra of Rhodamine 6G Solution, *Key Engineering Materials* 765 (2018) 39-43.

G. Kaewboonrueng, Y. Özmen, S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Monte Carlo Simulation of Photon-Skeletal Muscle Interaction in Human Tissue Model, *Advanced Materials Research* 1147 (2018) 12-17.

Sergi Mor Cases, K. Jianwattananukul, K. Saenyot, S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Portable Laser 1-D Barcode Scanner for Material Identification, *Materials Today: Proceedings* 5 (2018) 15143-15148.

C.F. Wong, N. Phitagragsakul, P. Jornsamer, P. Kaewmeesri, P. Jantakot and K. Locharoenrat, Design and Construction of Smart Cane Using Infrared Laser-based Tracking System, *AIP Conference Proceedings* 1973 (2018) 020021-1-5.

T. Detmod, Y. Ozmen, K. Songkaiwong, K. Saenyot, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Home-made Temperature Monitoring System from Four-channel of K-Type Thermocouples via Internet of Thing Technology Platform, *AIP Conference Proceedings* 1973 (2018) 020022-1-5.

K. Saenyot, P. Chamdee, P. Raksrithong, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Improvement of Thermal Performance of Gamma-type Stirling Engine, *AIP Conference Proceedings* 1973 (2018) 020023-1-5.

### ประวัติส่วนตัวผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ-สกุล นาง สาหรัย เล็กชะอ่อม

ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.ม	นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	1995
วท.บ	ฟิสิกส์	มหาวิทยาลัยบูรพา	1991

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Recent Trend of Solar Tracking System for Electric Power Conversion, Applied Mechanics and Materials, 835 (2016) 731.

K. Saenyot, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Design and Fabrication of Gamma-Type Stirling Engine on Parabolic Dish of Solar Concentrator by Compression Ratio Method, Applied Mechanics and Materials, 851, (2016) 383.

K. Jianwattananukul, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Design and Construction of New Hybrid Solar Tracking System, Applied Mechanics and Materials, 851, (2016) 510.

S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Calculation of Lead-Iron Double-Layer Thickness for Gamma-ray Shielding by MATLAB Program, Science and Technology of Nuclear Installations, 2017 (2017) Article ID 6078461.

G. Kaewboonrueng, Y. Özmen, S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Monte Carlo Simulation of Photon-Skeletal Muscle Interaction in Human Tissue Model, Advanced Materials Research 1147 (2018) 12-17.

Sergi Mor Cases, K. Jianwattananukul, K. Saenyot, S. Lekchaum and K. Locharoenrat, Portable Laser 1-D Barcode Scanner for Material Identification, Materials Today: Proceedings 5 (2018) 15143-15148.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T. Detmod, Y. Ozmen, K. Songkaiwong, K. Saenyot, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Home-made Temperature Monitoring System from Four-channel of K-Type Thermocouples via Internet of Thing Technology Platform, AIP Conference Proceedings 1773 (2018) 020022-1-5.

K. Saenyot, P. Chamdee, P. Raksrithong, K. Locharoenrat and S. Lekchaum, Improvement of Thermal Performance of Gamma-type Stirling Engine, AIP Conference Proceedings 1773 (2018) 020023-1-5.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้