

เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน

และกล้องดิจิทัลควบคุมโดยใช้ราสเบอร์รี่ พาย

DEVELOPED BONE DENSITOMETER USING DEXA  
AND DIGITAL CAMERA CONTROLLED BY RASPBERRY PI

วัลย์ลักษณ์ ภู่อสาร

WALAILAK PHUSARN

สุวิมล นภณฤมิตร

SUWIMON NAPHANARUEMIT

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน

และกล้องดิจิตอลควบคุมโดยใช้ราสเบอร์รี่ พาย

DEVELOPED BONE DENSITOMETER USING DEXA  
AND DIGITAL CAMERA CONTROLLED BY RASPBERRY PI

วลัยลักษณ์ ภู่อสาร

WALAILAK PHUSARN

สุวิมล นภณฤมิตร

SUWIMON NAPHANARUEMIT

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ปริญญานิพนธ์** สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ ปีการศึกษา 2562  
**ภาควิชา** วิศวกรรมชีวการแพทย์  
**คณะ** วิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
**เรื่อง** เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน และกล้องดิจิทัล  
ควบคุมโดยใช้ราสเบอร์รี่ พาย  
Developed bone densitometer Using DEXA and Digital camera controlled  
by Raspberry Pi  
**ผู้จัดทำ** นางสาววลัยลักษณ์ ภู่อสาร รหัสนักศึกษา 59011204  
นางสาวสุวิมล นภนภิมิต รหัสนักศึกษา 59011465

ปริญญานิพนธ์นี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูก โดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน และกล้องดิจิตอลควบคุมโดยใช้ราสเบอร์รี พาย	
นักศึกษา	นางสาววลัยลักษณ์ ภู่อสาร	59011204
	นางสาวสุวิมล นภนภุมิต	59011465
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมชีวการแพทย์	
พ.ศ.	2562	
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์	รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์	

### บทคัดย่อ

โรคกระดูกพรุน เป็นโรคที่มีความหนาแน่นของเนื้อกระดูกลดลงส่งผลให้กระดูกขาดความแข็งแรง ทำให้กระดูกแตกหักได้ง่ายแม้เกิดอุบัติเหตุเพียงเล็กน้อย ปัจจุบันสังคมไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุมากขึ้น ซึ่งโดยส่วนใหญ่ผู้สูงอายุมักจะมีความเสี่ยงในการเกิดโรคที่มีความเกี่ยวข้องกับกระดูกอย่างเช่น โรคกระดูกพรุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสตรีวัยหมดประจำเดือน การตรวจวินิจฉัยภาวะกระดูกพรุนทำได้หลายวิธี สำหรับวิธีที่นิยมทำกันในปัจจุบัน คือ การตรวจวัดความหนาแน่นของมวลกระดูก เพื่อนำไปประกอบการวินิจฉัยโรคกระดูกพรุนแล้วยังสามารถนำมาใช้ในการทำนายความเสี่ยงของการเกิดกระดูกหัก ช่วยให้แพทย์สามารถกำหนดได้ว่าควรเลือกใช้ยาชนิดใดและขนาดเท่าใด ในการรักษาโรคกระดูกพรุนสำหรับผู้ป่วยแต่ละรายได้อย่างเหมาะสมกับระดับความรุนแรงของโรค ซึ่งงานวิจัยนี้ได้มีการพัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงานและกล้องดิจิตอล เพื่อใช้ในการวินิจฉัยเบื้องต้นเกี่ยวกับโอกาสในการเป็นโรคกระดูกพรุนและได้มีการปรับปรุงในส่วนของการควบคุมการเก็บภาพและการแสดงผลค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก โดยใช้ราสเบอร์รี พาย และ อาร์ดูโน บอร์ด แทนการใช้ระบบคอมพิวเตอร์ มีการใช้แผ่นเรืองแสงและกล้องดิจิตอลมาใช้เป็นหน่วยรับภาพแทนหน่วยรับภาพสำเร็จรูป เพื่อให้สามารถผลิตเครื่องวัดความหนาแน่นของกระดูกที่มีราคาต้นทุนต่ำลงได้

<b>Thesis</b>	Developed Bone Densitometer Using DEXA and Digital Camera Controlled by Raspberry Pi	
<b>Student</b>	Miss Walailak Phusarn	59011204
	Miss Suwimon Naphanaruemit	59011465
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering	
<b>Program</b>	Biomedical Engineering	
<b>Year</b>	2019	
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Chuchart Pintavirooj	

## ABSTRACT

Osteoporosis disease, which the bone density is reduced, results in the bones lacking strength that makes the bones easily fractured even small accident. Nowadays, Thai has been become increasingly aging society. Most of the elderly people tend to have bone-related diseases such as osteoporosis, especially in postmenopausal women. There are several methods to diagnose osteoporosis. Currently, the most popular method used is Bone Mineral Density (BMD) to measure bone density in order to diagnose osteoporosis and can also be used to predict risk that causes of fractures of bone. Helps doctors determine what kind of medication and dosage of drug should be used to treat osteoporosis for each patient appropriately according to the severity of the disease. This research has developed a bone mineral density measurement using two levels energy of X-ray and digital camera for preliminary diagnosis of the possibility of osteoporosis, improvements in image control systems and displays BMD values with Raspberry Pi and Arduino Board instead of using computer systems. Use of an Intensifying screen and digital camera to be used as receptor unit instead of X-ray detector. Results in this study we will obtain low cost bone density meter.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัยจากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

รศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งเป็นผู้ให้ความรู้ คำปรึกษา และช่วยแนะนำวิธีการแก้ปัญหาต่าง ๆ ตลอดจนให้การช่วยเหลือสนับสนุน

ขอขอบคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการที่เป็นกำลังใจ ให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือจนกระทั่งโครงการชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะ อบรมเลี้ยงดู ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมาจนกระทั่งโครงการนี้สำเร็จ

วัลย์ลักษณ์ ภูสาร  
สุวิมล นภานฤมิต

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	VII
สารบัญตาราง.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ .....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.5 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ระบบกระดูก.....	5
2.1.1 องค์ประกอบของระบบกระดูก.....	5
2.2 โรคกระดูกพรุน.....	9
2.2.1 แคลเซียมกับโรคกระดูกพรุน.....	10
2.2.2 ปัจจัยเสี่ยงต่อการเป็นโรคกระดูกพรุน .....	18
2.2.3 ภาวะของโรคกระดูกพรุน.....	19
2.2.4 การวินิจฉัยโรคกระดูกพรุน.....	20
2.2.5 อันตรายและภาวะแทรกซ้อนจากโรคกระดูกพรุน .....	20
2.2.6 การป้องกันโรคกระดูกพรุน.....	21
2.3 การตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก.....	22
2.3.1 ความสำคัญของการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	22

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ข้อบ่งชี้ทางคลินิกของการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	23
2.3.3 การเลือกตำแหน่งในการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก.....	23
2.3.4 ลักษณะการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	23
2.3.5 การแปลผลการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	24
2.3.6 ข้อห้ามในการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	26
2.4 รังสีเอกซ์ .....	27
2.4.1 การค้นพบรังสีเอกซ์.....	28
2.4.2 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์.....	28
2.4.3 ประเภทของรังสีเอกซ์.....	29
2.4.4 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์.....	30
2.4.5 ประโยชน์ของรังสีเอกซ์ทางการแพทย์.....	32
2.4.6 ผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต.....	33
2.4.7 การป้องกันรังสี.....	33
2.5 วิธีการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก .....	34
2.6 ทฤษฎีของการวัดหนาแน่นกระดูกโดยใช้เอกซ์เรย์ 2 ระดับพลังงาน (Dual energy X-ray absorptiometry, DEXA) .....	39
2.6.1 กฎของแลมเบิร์ต – เบียร์ (Lambert-Beer law).....	39
2.6.2 หลักการของวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองพลังงาน (DUAL ENERGY X-RAY ABSORPTION TOMOMETRY).....	43
2.7 หลักการของกล้องดิจิตอล .....	47
2.7.1 ระบบชุมภาพในกล้องดิจิตอล.....	48
2.7.2 ตัวรับภาพซีซีดี (CCD) และความละเอียดของภาพ.....	48
2.8.3 ค่าความไวแสงและความเร็วชัตเตอร์.....	50
2.8.4 การนำภาพออกจากกล้องดิจิตอล .....	50

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 ระเบียบวิธีการวิจัย.....	52
3.1 หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Control Unit) .....	52
3.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray source) .....	52
3.1.2 บอร์ดอาร์ดูโน (Arduino Board) .....	54
3.1.2 โมดูลรีเลย์ (Relay Module) .....	57
3.1.3 มอเตอร์เซอร์โว (Servo motor) .....	59
3.2 หน่วยรับรังสี (Receptor Unit) .....	60
3.2.1 ฉากรเรืองแสง (Intensifying screen).....	60
3.2.2 กล้องดิจิทัล (Digital Camera).....	62
3.3 หน่วยประมวลผล (Processing Unit).....	63
3.3.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย.....	63
3.3.2 ส่วนประกอบของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย.....	64
3.3.3 การจัดเรียงขาของ GPIO (General-Purpose Input/ Output) .....	65
3.3.4 ระบบการทำงานของ การประมวลผลภาพ .....	65
3.4 หน่วยแสดงผล .....	70
3.5 การออกแบบและสร้างเครื่องมือ .....	71
3.6 แผนการดำเนินโครงการ .....	74
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	74
4.1 ระบบที่ใช้ทดลอง.....	75
4.2 การทดสอบระบบเพื่อใช้เก็บภาพ.....	76
4.3 การทดสอบระบบเพื่อใช้ประมวลผลภาพ.....	78
4.4 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องวัดมวลกระดูกต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลง.....	80
4.5 การทดสอบการฉายรังสีเอกซ์บริเวณข้อนิ้วมือ.....	84

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	85
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	86
5.2 ปัญหาและอุปสรรค .....	86
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปพัฒนาต่อ .....	87
เอกสารอ้างอิง .....	88



# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงภาพกระดูกแกนกลาง.....	7
2.2 แสดงภาพกระดูกข้อมือ.....	8
2.3 แสดงภาพกระดูกปกติ (ซ้าย) และภาพกระดูกพรุน (ขวา).....	10
2.4 แสดงสมดุลดแคลเซียม.....	13
2.5 การตอบสนองของร่างกายต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับแคลเซียมในเลือด.....	14
2.6 การดูดซึมแคลเซียมที่บริเวณส่วนของห้วงหลอดไตที่มีผนังหนา.....	16
2.7 การดูดซึมแคลเซียมที่บริเวณท่อไตส่วนปลาย.....	17
2.8 กลไกการควบคุมระดับแคลเซียมโดยวิตามินดี.....	18
2.9 แสดงส่วนประกอบภายในหลอดเอกซเรย์แบบแอนโนดอยู่กับที่.....	31
2.10 แสดงส่วนประกอบภายในหลอดเอกซเรย์แบบแอนโนดหมุนได้.....	32
2.11 การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีเรดิโอแกรมเมทรี.....	35
2.12 แสดงหลักการทำงานของซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทีโอเมทรี.....	35
2.13 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีแสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธี ดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (DEXA).....	36
2.14 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (DEXA) ที่กระดูกสันหลังส่วนเอว.....	37
2.15 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธี QUS.....	38
2.16 แสดงการดูดกลืนรังสีเอกซ์ในตัวกลางที่มีความหนา $x$ .....	39
2.17 แสดงกราฟความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อใช้วัสดุ.....	41
2.18 แสดงการฉายรังสีไปยังวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนหลายค่า.....	42
2.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของกระดูกที่ระดับพลังงานต่าง ๆ.....	43
2.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของเนื้อเยื่อที่ระดับพลังงานต่าง ๆ.....	44
2.21 แสดงการกำจัดเนื้อเยื่อที่อยู่รอบ ๆ กระดูก.....	47

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1 แสดงแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	53
3.2 แสดงปุ่มปรับค่าและจอแสดงผลบนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์.....	54
3.3 แสดงส่วนประกอบและขาพอร์ตของบอร์ดอาร์ดูโน (Arduino board).....	55
3.4 รูปแบบการเขียนโปรแกรมอาร์ดูโน ไอดีอี (Arduino IDE).....	57
3.5 แสดงภาพและขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อของโมดูลรีเลย์ 4 ช่อง.....	58
3.6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์เซอร์โว.....	59
3.7 แสดงลักษณะของฉากเรืองแสง.....	61
3.8 แสดงส่วนประกอบในฉากเรืองแสง.....	61
3.9 กล้องดิจิทัล OKER รุ่น OKER WEB CAMERAS 177.....	62
3.10 แสดงส่วนประกอบของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี.....	64
3.11 การจัดขาของคอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่ออินพุตเอาต์พุต (GPIO) ของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี.....	65
3.12 แผนผังการทำงานการจำลองการประมวลผลภาพรังสีเอกซ์และแสดงผลค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Simulation Mode).....	66
3.13 แสดงชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพ.....	67
3.14 แผนผังการทำงานการถ่ายภาพรังสีเอกซ์และประมวลผลภาพเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Shoot Mode).....	69
3.15 หน่วยแสดงผล จอแอลซีดีแบบสัมผัสขนาด 7 นิ้ว แบบสัมผัสหน้าจอบนคอปาคาซีทีพี.....	71
3.16 แสดงภาพการจัดวางของแหล่งจ่ายรังสี แผ่นเรืองเรืองแสง และกล้องดิจิทัล.....	72
3.17 แสดงภาพจำลองการจัดวางของแหล่งจ่ายรังสี แผ่นเรืองเรืองแสงและกล้องดิจิทัล เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบ.....	73
3.18 แสดงโครงสร้างภายนอกของเครื่องวัดความหนาแน่นกระดูกที่ออกแบบขึ้น.....	73

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 แสดงแผนภาพของระบบที่ใช้ในการทดลอง .....	75
4.2 แสดงภาพในการทดสอบระบบเก็บภาพขณะปิดหลอดไฟ .....	76
4.3 แสดงภาพในการทดสอบระบบเก็บภาพขณะเปิดหลอดไฟ .....	77
4.4 แสดงภาพระดับพลังงานสูงที่ได้จากการวัดบริเวณข้อนิ้วด้วยวิธีดูคลื่นรังสีเอกซ์สองระดับ พลังงานจากหน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป.....	78
4.5 แสดงภาพระดับพลังงานต่ำที่ได้จากการวัดบริเวณข้อนิ้วด้วยวิธีดูคลื่นรังสีเอกซ์สองระดับ พลังงานจากหน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป.....	78
4.6 แสดงภาพถ่ายรังสีที่ทำการลบเอาส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อออก.....	79
4.7 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกและปริมาณแร่ธาตุในกระดูก .....	80
4.8 แสดงตัวอย่างเม็ดแคลเซียมที่ใช้เป็นแบบจำลองของกระดูก.....	81
4.9 ผลลัพธ์จากการถ่ายภาพรังสีเม็ดแคลเซียมที่ได้จากการทดลอง.....	82
4.10 ภาพถ่ายรังสีเม็ดแคลเซียมเมื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวนออก.....	82
4.11 แสดงกราฟค่าความหนาแน่นมวลกระดูกของการตอบสนองความเข้มข้นของแคลเซียม ที่เปลี่ยนแปลง.....	83
4.12 แสดงภาพถ่ายรังสีระดับพลังงานสูงของข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวรับภาพ ประเภทภาพสี (ซ้าย) ภาพระดับเทา (ขวา).....	84
4.13 แสดงภาพถ่ายรังสีระดับพลังงานต่ำของข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวรับภาพ.....	84
4.14 แสดงภาพถ่ายรังสีที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์บริเวณข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิทัลเป็น ตัวรับภาพ.....	85

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการรักษาที่เหมาะสมสำหรับผลการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกแต่ละประเภท.....	27
2.2 แสดงความแตกต่างของวิธีการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก.....	38
2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์.....	41
3.1 แสดงแผนการดำเนินโครงการ.....	73
4.1 ตารางแสดงการตอบสนองของค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลง.....	80



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โรคกระดูกพรุนเป็นโรคที่พบบ่อยที่สุดในบรรดาโรคกระดูก พบว่าประชากรที่มีอายุมากกว่า 50 ปี ประสบกับโรคกระดูกพรุนก่อให้เกิดปัญหาทางสาธารณสุขอย่างมาก ทั้งในแง่บุคคลากรและงบประมาณ อย่างมากในการดูแลผู้ป่วยเหล่านี้ ผู้ป่วยที่เป็นโรคกระดูกพรุนมีปัจจัยเสี่ยงที่สำคัญต่อการเกิดกระดูกหัก เนื่องจากมวลกระดูกที่ลดลงประกอบกับโครงสร้างภายในของกระดูกที่ผิดปกติส่งผลให้กระดูกสามารถหัก แม้ได้รับแรงกระแทกที่ไม่รุนแรง เช่น การล้มจากระดับที่ไม่สูงกว่าการยืน

โรคกระดูกพรุนเป็นโรคที่สามารถป้องกันและรักษาได้ แต่เนื่องจากเป็นโรคที่ไม่มีอาการหรือสัญญาณใด ๆ บอกรอคอย ผู้ป่วยจึงไม่ได้รับการวินิจฉัยและรักษาในช่วงแรก ของการดำเนินโรค จนกระทั่งเกิดภาวะกระดูกหักตามมา การวินิจฉัยเมื่อมีกระดูกหักเกิดขึ้นจึงนับว่าล่าช้า ดังนั้น การคัดกรองผู้ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคกระดูกพรุนและการรักษาโรคกระดูกพรุนตั้งแต่ระยะแรกจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพื่อป้องกันการเกิดกระดูกหักที่อาจตามมาในอนาคต

ในปัจจุบันวิธีการวัดความหนาแน่นของกระดูกด้วยวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (DEXA) (Dual energy X-ray absorptiometry: DEXA) ถือว่าเป็นวิธีที่ปลอดภัย มีความเที่ยงตรงและเชื่อถือได้ต้องการอนามัยโลกจึงแนะนำให้ใช้การวัดความหนาแน่นของมวลกระดูกด้วยเครื่องฉายรังสีเอกซ์สองระดับพลังงานเป็นมาตรฐาน (gold standard)

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการวัดมวลกระดูกด้วยการถ่ายภาพรังสีเอกซ์
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการเก็บภาพถ่ายรังสีเอกซ์ด้วยกล้องดิจิทัล
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการวัดมวลกระดูกโดยการประมวลผลภาพที่ได้จากกล้องดิจิทัล
- 1.2.4 เพื่อพัฒนาระบบการเก็บภาพและประมวลผลโดยใช้ราสเบอร์รี่ พาย (Raspberry Pi) และ อาร์ดูโน บอร์ด (Arduino Board) แสดงผลทางจอแอลซีดี (LCD)
- 1.2.5 เพื่อออกแบบระบบที่สามารถใช้วัดความหนาแน่นของกระดูกบริเวณกระดูกข้อมือและนิ้ว ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งมีราคาถูก ขนาดเล็กและน้ำหนักเบา สะดวกในการเคลื่อนย้าย มีแบตเตอรี่ สามารถงานได้โดยไม่ต้องใช้แหล่งจ่ายไฟจากภายนอก

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

- 1.3.1 กล้องดิจิทัลสามารถเก็บภาพที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์
- 1.3.2 ภาพถ่ายรังสีที่ได้จากกล้องดิจิทัลสามารถนำไปประมวลผลโดยราสเบอร์รี่ พาย เพื่อ คำนวณค่าความหนาแน่นมวลกระดูกได้ และแสดงผลค่าที่คำนวณได้ทางจอแอลซีดี
- 1.3.3 สามารถพัฒนาระบบวัดความหนาแน่นของกระดูกให้มีขนาดเล็ก ราคาถูก ใช้แบตเตอรี่ เป็นแหล่งกำเนิดไฟฟ้า เพื่อความสะดวกในการเคลื่อนย้าย โดยทำการวัดกระดูกในบริเวณกระดูกข้อนิ้วมือ แทน ทั้งนี้เพื่อเป็นการวินิจฉัยโรคเบื้องต้น สามารถป้องกันการเกิดโรคที่รุนแรงได้อย่างทันท่วงที อีกทั้งยัง ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดได้อีกด้วย

## 1.4 ขอบเขตของการศึกษา

### 1.4.1 คุณสมบัติด้านฮาร์ดแวร์

1.4.1.1 ใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากเครื่องเอกซเรย์ฟัน

1.4.1.2 ใช้แผ่นอะลูมิเนียมและมอเตอร์เซอร์โวเป็นแผ่นกั้นเพื่อสร้างรังสีเอกซ์สองระดับ

พลังงานควบคุมโดยใช้บอร์ดอาร์ดูโน

1.4.1.3 ใช้แผ่นเรืองแสงจากรังสีเป็นฉากรับรังสี

1.4.1.4 ใช้กล้องดิจิทัลในการเก็บภาพที่จะถูกฉายอยู่บนแผ่นเรืองแสงจากรังสี

1.4.1.5 ใช้ราสเบอร์รี่ พาย ในการควบคุมระบบที่ใช้ในการเก็บภาพและประมวลผลภาพที่ได้เพื่อคำนวณหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูก

### 1.4.2 คุณสมบัติด้านซอฟต์แวร์

1.4.2.1 ใช้ราสเบอร์รี่ พาย ในการควบคุมระบบการเก็บภาพทั้งหมด โดยใช้ภาษาซี (C), ซีพลัสพลัส (C++) โดยส่งข้อมูลไปยังอาร์ดูโน บอร์ด ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เซอร์โวและโมดูลรีเลย์

1.4.2.2 ใช้โอเพนซีวี (OpenCV) ซึ่งเป็นไลบรารีฟังก์ชันการเขียนโปรแกรม ช่วยในการปรับปรุงและประมวลผลภาพ

## 1.5 ขั้นตอนการศึกษา

1.5.1 ศึกษาความสำคัญของการตรวจวัดค่าความหนาแน่นมวลกระดูกด้วยวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (Dual Energy X-ray Absorptiometry: DEXA)

1.5.2 ศึกษาการทำงานของเครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกรุ่นก่อน

1.5.3 ศึกษาการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบการเก็บภาพ และนำภาพมาประมวลโดยใช้ราสเบอร์รี่พายและอาร์ดูโน บอร์ด

1.5.4 ศึกษาการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลภาพที่จะนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นมวลกระดูก

1.5.5 ทดลองการเก็บภาพบนแผ่นเรืองแสงด้วยการใช้กล้องดิจิตอลและปรับปรุงข้อบกพร่องของภาพ

1.5.6 นำภาพที่ได้จากการทดสอบไปประมวลผลภาพและคำนวณค่าความหนาแน่นมวลกระดูก (Bone Mineral Density : BMD) และค่าองค์ประกอบของแร่ธาตุในกระดูก (Bone Mineral Content : BMC)

1.5.7 ทดสอบการประมวลผลด้วยภาพโดยใช้การจำลองแคลเซียมที่มีปริมาณต่าง ๆ แทนกระดูกจริง เพื่อเปรียบเทียบค่าความถูกต้องและปรับปรุงข้อบกพร่อง

1.5.8 ทดสอบการประมวลผลด้วยภาพโดยใช้กระดูกจริงบริเวณข้อนิ้วมือข้อกลาง

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6.1 เครื่องตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกที่มีราคาที่ถูกลง

1.6.2 ค่าใช้จ่ายในการตรวจวัดมวลกระดูกน้อยลง ทำให้สามารถคัดกรองผู้ที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคกระดูกพรุนได้ในเบื้องต้น

1.6.3 จำนวนผู้เข้ารับการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น

1.6.4 อัตราการเพิ่มขึ้นของผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนลดลง

1.6.5 ได้ศึกษาการประมวลผลภาพทางการแพทย์ในการหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้ภาษาเพอร์รี พาย

1.6.6 ได้ศึกษาพัฒนาความรู้ที่ประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ต่าง ๆ เช่น ซีพลัสพลัส (C++), โอเพนซีวี (OpenCV)

## บทที่ 2

# ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ระบบกระดูก

กระดูกเป็นโครงสร้างภายในร่างกาย ช่วยป้องกันอวัยวะภายใน องค์ประกอบสำคัญอีกอย่างหนึ่งภายในกระดูก คือ ไขกระดูก กระดูกยังเป็นแหล่งเก็บสะสมเกลือแร่ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แคลเซียมและฟอสฟอรัส บริเวณรอบกระดูกจะมีเนื้อเยื่อเยื่อหุ้มกระดูก เรียกว่า เยื่อหุ้มกระดูก (Periosteum) ซึ่งเยื่อหุ้มกระดูกนี้ ประกอบด้วยเซลล์กระดูกและหลอดเลือด ซึ่งจะนำเลือดมาเลี้ยงในส่วนของกระดูกชั้นนอก กระดูกชั้นนอกหรือเรียกว่า กระดูกทึบ (Compact bone) ประกอบด้วยเกลือแร่สะสมอยู่เป็นวงกลมล้อมรอบท่อขนาดเล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่า ท่อฮาเวอร์เซียน (Haversian canal) เซลล์กระดูกรอบ ๆ ท่อฮาเวอร์เซียน จะได้รับอาหารและออกซิเจนจากหลอดเลือดที่ผ่านท่อฮาเวอร์เซียนที่ผ่านท่อเหล่านี้ และถ้าหากว่า กระดูกเกิดแตกหัก เส้นประสาทในท่อเล็ก ๆ นี้ก็จะส่งกระแสประสาทไปยังสมองเราจึงรู้สึกถึงความเจ็บปวด ส่วนกระดูกชั้นในนั้นมองดูคล้ายรังผึ้ง เพราะมีลักษณะเป็นร่างแหที่มีช่องว่างระหว่างกระดูก เรียกว่า กระดูกพรุน (Spongy bone) แต่ก็มี ความแข็งแรงไม่แพ้ส่วนกระดูกทึบเช่นกัน ซึ่งถ้ากระดูกของคนเราเป็นกระดูกทึบทุกท่อนร่างกายคงหนักมาก ไขกระดูกจะมีปริมาณราว ๆ 227 กรัม สามารถผลิตเซลล์เม็ดเลือดแดงได้ประมาณ 5,000 เม็ดต่อวัน สำหรับทารกในครรภ์โครงกระดูกทุกชิ้นจะมีไขกระดูกแดงบรรจุอยู่ แต่เมื่อเจริญเติบโตถึงวัยผู้ใหญ่แล้วจะพบไขกระดูกนี้เฉพาะในส่วนของกะโหลกศีรษะ กระดูกหน้าอก กระดูกสันหลัง กระดูกสะโพกและบริเวณตอนปลายของกระดูกชั้นยาว ๆ เท่านั้น [1]

#### 2.1.1 องค์ประกอบของระบบกระดูก

ระบบโครงกระดูกประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

1. กระดูกอ่อน (Cartilage) ทำหน้าที่รองรับส่วนที่อ่อนนุ่มของร่างกาย เพื่อที่จะทำให้การเคลื่อนไหวได้สะดวก ป้องกันการเสียดสี เนื่องจากผิวของกระดูกอ่อนเรียบ จึงพบว่ากระดูกอ่อนจะอยู่ที่ปลายหรือหัวกระดูกที่ประกอบเป็นข้อต่อต่าง ๆ และยังเป็นต้นกำเนิดของกระดูกแข็งทั่วร่างกาย

2. ข้อต่อ (Joints) คือส่วนต่อระหว่างกระดูกตั้งแต่สองชิ้นขึ้นไปมาต่อกัน เพื่อการเคลื่อนไหวของร่างกาย

3. เอ็น (Tendon) มีทั้งที่เป็นเอ็นกล้ามเนื้อและเอ็นยึดข้อ (Ligament) เป็นเนื้อเยื่อที่มีความแข็งแรงมาก มีลักษณะเป็นเส้นใยเหนียว ช่วยยึดกระดูกกับกล้ามเนื้อส่วนต่าง ๆ ไว้ด้วยกัน

4. กระดูก (Bone) เป็นส่วนที่แข็งที่สุด โครงกระดูกในผู้ใหญ่ ประกอบด้วยกระดูกจำนวน 206 ชิ้น ส่วนในทารกแรกเกิดจะมีกระดูกถึง 300 ชิ้นเพราะกระดูกอ่อนยังไม่ติดกัน

กระดูกคนเรามีทั้งหมด 206 ชิ้น แบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) กระดูกแกนกลางของร่างกาย (Axial skeletal)

ประกอบด้วยกระดูก 80 ชิ้น ได้แก่

1.1 กระดูกกะโหลกศีรษะ (Cranium)

1.1.1 กระดูกหน้าผาก (Frontal bone) 1 ชิ้น

1.1.2 กระดูกด้านข้างศีรษะ (Parietal bone) 2 ชิ้น

1.1.3 กระดูกขมับ (Temporal bone) 2 ชิ้น

1.1.4 กระดูกท้ายทอย (Occipital bone) 1 ชิ้น

1.1.5 กระดูกชื่อจมูก (Ethmoid bone) 1 ชิ้น

1.1.6 กระดูกรูปผีเสื้อ (Sphenoid bone) 1 ชิ้น

1.2 กระดูกใบหน้า (Bone of face)

1.2.1 กระดูกสันจมูก (Nasal bone) 2 ชิ้น

1.2.2 กระดูกกั้นช่องจมูก (Vomer) 1 ชิ้น

1.2.3 กระดูกข้างในจมูก (Inferior concha) 2 ชิ้น

1.2.4 ถูงน้ำตา (Lacrimal bone) 2 ชิ้น

1.2.5 กระดูกโหนกแก้ม (Zygomatic bone) 2 ชิ้น

1.2.6 กระดูกเพดาน (Palatine bone) 2 ชิ้น

1.2.7 กระดูกขากรรไกรบน (Maxillary) 2 ชิ้น

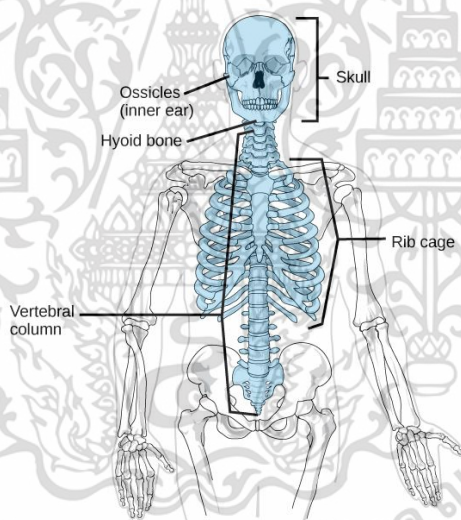
1.2.8 กระดูกขากรรไกรล่าง (Mandible) 1 ชิ้น

1.3 กระดูกหู (Bone of ear)

1.3.1 กระดูกรูปฆ้อน (Malleus) 2 ชิ้น

1.3.2 กระดูกรูปทั่ง (Incus) 2 ชิ้น

- 1.3.3 กระดูกรูปโกถอน (Stapes) 2 ชิ้น
- 1.4 กระดูกโคนลิ้น (Hyoid bone) 1 ชิ้น
- 1.5 กระดูกสันหลัง (Vertebrae) 26 ชิ้น ได้แก่
  - 1.5.1 กระดูกสันหลังส่วนคอ (Cervical vertebrae) 7 ชิ้น
  - 1.5.2 กระดูกสันหลังส่วนอก (Thoracic vertebrae) 12 ชิ้น
  - 1.5.3 กระดูกสันหลังส่วนเอว (Lumbar vertebrae) 5 ชิ้น
  - 1.5.4 กระดูกกระเบนเหน็บ (Sacrum) 1 ชิ้น
  - 1.5.5 กระดูกก้นกบ (Coccyx) 1 ชิ้น
- 1.6 กระดูกทรวงอก (Sternum) 1 ชิ้น
- 1.7 กระดูกซี่โครง (Rib) 24 ชิ้น



รูปที่ 2.1 แสดงภาพกระดูกแกนกลาง [1]

## 2) กระดูกกรยางค์ (Appendicular skeletal)

ประกอบด้วย กระดูก 126 ชิ้น ได้แก่

- 2.1 กระดูกไหล่ (Shoulder girdle) ประกอบด้วย
  - กระดูกไหปลาร้า (Clavicle) 2 ชิ้น
  - กระดูกสะบัก (Scapular) 2 ชิ้น
- 2.2 กระดูกต้นแขน (Humerus) 2 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2.3 กระดูกปลายแขน (Bone of forearm) ประกอบด้วย  
กระดูกปลายแขนท่อนใน (Ulna) 2 ชิ้น  
กระดูกปลายแขนท่อนนอก (Radius) 2 ชิ้น
- 2.4 กระดูกข้อมือ (Carpal bone) 16 ชิ้น
- 2.5 กระดูกฝ่ามือ (Metacarpal bone) 10 ชิ้น
- 2.6 กระดูกนิ้วมือ (Phalanges) 28 ชิ้น
- 2.7 กระดูกเชิงกราน (Hip bone) 2 ชิ้น
- 2.8 กระดูกต้นขา (Femur) 2 ชิ้น
- 2.9 กระดูกหน้าแข้ง (Tibia) 2 ชิ้น
- 2.10 กระดูกน่อง (Fibula) 2 ชิ้น
- 2.11 กระดูกข้อเท้า (Tarsal bone) 14 ชิ้น
- 2.12 กระดูกฝ่าเท้า (Metatarsal bone) 10 ชิ้น
- 2.13 กระดูกนิ้วเท้า (Phalanges) 28 ชิ้น



รูปที่ 2.2 แสดงภาพกระดูกกรยางค์ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

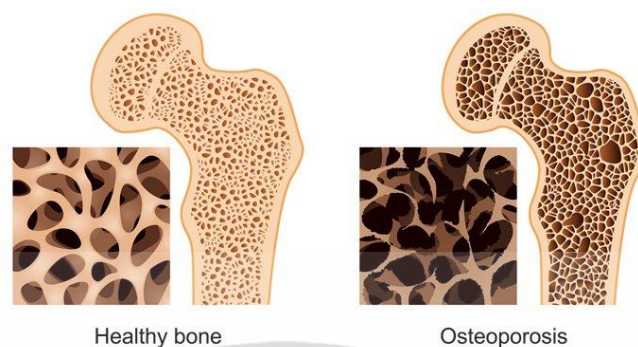
### 2.1.2 หน้าที่ของกระดูก

1. ช่วยรองรับอวัยวะต่าง ๆ ให้ทรงและตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ควรอยู่ เป็นส่วนที่ใช้ในการเคลื่อนไหว
2. เป็นที่ยึดเกาะของกล้ามเนื้อต่าง ๆ และ เอ็นยึดข้อ (Ligament) เพื่อทำหน้าที่เป็นคานาให้กล้ามเนื้อทำหน้าที่เกี่ยวกับการเคลื่อนไหว
3. ช่วยป้องกันอวัยวะสำคัญไม่ได้รับอันตราย เช่น สมอง ปอด และหัวใจ เป็นต้น
4. ทำให้ร่างกายคงรูปได้ (Shape to whole body)
5. ภายในกระดูกมีไขกระดูก (Bone marrow) ที่ทำหน้าที่ผลิตเม็ดเลือด (Blood cell)
6. เป็นที่เก็บแร่ธาตุแคลเซียมในร่างกาย
7. ป้องกันเส้นประสาทและหลอดเลือดที่ทอดอยู่ตามแนวของกระดูกนั้น

## 2.2 โรคกระดูกพรุน

โรคกระดูกพรุน (osteoporosis) คือ ภาวะที่เนื้อกระดูกฝ่อกร่อนไปจากปกติ เนื้อกระดูกลดลงอาจถึงขั้นอันตราย โครงกระดูกซึ่งเคยแข็งแรงจะเปลี่ยนเป็นโครงที่ฝ่อกร่อนพร้อมจะแตกหักได้ทุกเมื่อ เพียงแค่น้ำหนักหรือกระทบกระแทกเพียงเล็กน้อย [2]

เนื้อเยื่อมีการเสื่อมสลายและสร้างเสริมตลอดเวลา ตั้งแต่วัยเด็กจนถึงวัยรุ่นซึ่งกระดูกแข็งแรงจากการมีเนื้อกระดูกเพิ่มมากกว่าการสูญเสีย จากนั้นเมื่ออายุเกิน 30 ปี กระบวนการเสริมสร้างกระดูกจะเริ่มลดลงทั้งเพศหญิงและเพศชาย ตามปกติเพศหญิงจะมีมวลกระดูกน้อยกว่าเพศชายและเมื่อหมดประจำเดือนเพศหญิงจะมีอัตราการสูญเสียมากกว่าการสร้างกระดูก [10] ตามปกติกระบวนการสร้างและสลายกระดูกเกิดสมดุลขึ้นตลอดเวลาโดย เซลล์ออสทีโอเบลาส (Osteoblast) มีหน้าที่สำคัญในการสร้างกระดูกใหม่ ในขณะที่เซลล์ออสทีโอคลาส (Osteoclast) มีหน้าที่สำคัญในการสลายกระดูก เพื่อปรับรูปร่างของกระดูก [3]



รูปที่ 2.3 แสดงภาพกระดูกปกติ (ซ้าย) และภาพกระดูกพรุน (ขวา) [1]

### 2.2.1 แคลเซียมกับโรคกระดูกพรุน

แคลเซียม (Calcium, Ca) เป็นแร่ธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดในร่างกาย ประมาณร้อยละ 99 ของแคลเซียมเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างกระดูกและฟัน เพิ่มความหนาแน่นให้กระดูก ทำให้กระดูกมีความแข็งแรง ส่วนอีกร้อยละ 1 อยู่ในเลือด มีบทบาทควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น การหดตัวของกล้ามเนื้อ การเต้นของหัวใจ การแข็งตัวของเลือด เมื่อมีบาดแผล การทำงานของระบบประสาท และช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด [4]

กระดูกเป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยเซลล์กระดูก เส้นใย และส่วนที่เป็นของเหลวระหว่างเซลล์ โดยแคลเซียมจะไปเกาะที่กระดูกบริเวณของเหลวระหว่างเซลล์ นอกจากนี้ธาตุแคลเซียมที่เป็นส่วนสำคัญในการสร้างกระดูกแล้ว ยังมีธาตุอื่นที่ช่วยทำให้การเจริญเติบโตของกระดูกเป็นไปตามปกติ ได้แก่ [5]

- ฟอสฟอรัส (phosphorus, P) เป็นธาตุสำคัญในการสร้างกระดูกด้วย โดยจะรวมกับแคลเซียมเกิดเป็นแคลเซียมฟอสเฟต ด้วยแคลเซียม 1.5-2.5 ส่วนต่อ 1 ส่วนฟอสฟอรัส
- แมกนีเซียม (magnesium, Mg) ช่วยให้อัตราการรวมตัวระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัสเป็นไปตามปกติ
- โพแทสเซียม (potassium, K) ทำให้แคลเซียมเปลี่ยนเป็นแคลเซียมฟอสเฟตได้ดี เช่นเดียวกับแมกนีเซียม

- สตรอนเตียม (strontium, Sr) และฟลูออรีน (fluorine, F) ช่วยให้การดูดซึมแคลเซียมเข้าสู่ร่างกายได้เป็นปกติ

หากได้รับแคลเซียมไม่เพียงพอร่างกายจะดึงแคลเซียมที่สะสมอยู่ในกระดูกออกมาใช้เมื่อเกิดขึ้นเป็นประจำ แคลเซียมในกระดูกจะถูกดึงออกมามากจนกระทั่งกระดูกเริ่มพรุน เพราะทำให้ความแข็งแรงของกระดูกลดลงจึงแตกหักได้ง่ายแม้ว่าได้รับแรงกระแทกเพียงเล็กน้อย ซึ่งอาการเหล่านี้เป็นอาการของโรคกระดูกพรุน และถ้าได้รับแคลเซียมไม่เพียงพอตั้งแต่เด็กโอกาสที่จะเกิดโรคกระดูกพรุนก็ยิ่งเพิ่มขึ้น

### 2.2.1.1 ปริมาณแคลเซียมที่ร่างกายต้องการ [5]

แคลเซียมที่มีคุณภาพสูงควรมีแมกนีเซียมและแร่ธาตุอื่น ๆ เป็นองค์ประกอบร่วมด้วย แคลเซียม 1,000 มิลลิกรัม ถึง 1,200 มิลลิกรัม เป็นปริมาณที่จำเป็นต่อวันของผู้ที่มีอายุเกินกว่า 19 ปี ซึ่งการดูดซึมแคลเซียมของมนุษย์ลดลงตามอายุ 50 เปอร์เซ็นต์ของผู้หญิงทุกคนที่มีอายุมากกว่า 65 ปี และ 25 เปอร์เซ็นต์ของผู้ชายทุกคนมีประสบการณ์การแตกหักของกระดูกอย่างน้อยครั้งหนึ่งในชีวิต โดยสามารถเพิ่มปริมาณแคลเซียมขึ้นได้ด้วยการส่งเสริมด้วยโภชนาการอาหารที่ช่วยการดูดซึมด้วยวิตามินและอาหารเสริมปริมาณแคลเซียมที่ร่างกายต้องการต่อวัน

- 500 มิลลิกรัม สำหรับเด็กอายุ 1-3 ปี
- 800 มิลลิกรัม สำหรับเด็กอายุ 4-8 ปี
- 1,300 มิลลิกรัม สำหรับเด็กอายุ 9-18 ปี
- 1,000 มิลลิกรัม สำหรับผู้ที่มีอายุ 19-50 ปี
- 1,200 มิลลิกรัม สำหรับผู้ที่มีอายุ 51 ปีขึ้นไป
- 1,300 มิลลิกรัม สำหรับผู้หญิงตั้งครรภ์อายุต่ำกว่า 19 ปี
- 1,000 มิลลิกรัม สำหรับผู้หญิงตั้งครรภ์อายุ 19-50 ปี

### 2.2.1.2 การดูดซึมของแคลเซียม [4]

#### 1. ปัจจัยที่ส่งเสริมให้มีการดูดซึมแคลเซียม

ปริมาณแคลเซียมที่สะสมในร่างกายจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซึมและการขับออกจากร่างกาย

- วิตามินดี เป็นตัวเร่งให้มีการสังเคราะห์โปรตีนในชั้นเยื่อเมือกของผนังลำไส้ ซึ่งแคลเซียมจะเกาะติด และถูกลำเลียงผ่านผนังลำไส้เข้าสู่กระแสโลหิต ดังนั้นเมื่อมีวิตามินดี การดูดซึมแคลเซียมที่ลำไส้เกิดขึ้นได้ดีกว่า โดยวิตามินดีได้จาก 2 แหล่ง คือจากแสงแดด และอาหารจำพวกปลา ไข่แดง ตับ เนย เป็นต้น

- ความเป็นกรดอ่อน ๆ ในอาหาร โดยแคลเซียมจะละลายได้ง่ายในอาหารที่เป็นกรดอ่อน ๆ

- แลคโตส ช่วยในการดูดซึมแคลเซียมได้ดีขึ้น 15-50 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นนมสดจึงเหมาะที่เป็นอาหารสำหรับแหล่งแคลเซียม

- อัตราส่วนแคลเซียมต่อฟอสฟอรัสในอาหาร สำหรับผู้ใหญ่ควรเป็น 1:1 และ 2:1 ในเด็ก

- ความต้องการแคลเซียมของร่างกายของหญิงให้นมบุตร และในช่วงวัยรุ่นเป็นช่วงที่มีความต้องการสูง อาจดูดซึมได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

#### 2. ปัจจัยการยับยั้งการดูดซึมแคลเซียม

1. ปริมาณสารออกซาลิกแอซิด ในอาหารจะรวมกับแคลเซียมในอาหารเกิดเป็นแคลเซียมออกซาลेट ซึ่งเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้แคลเซียมจึงไม่สามารถดูดซึมได้ พบในพืช พริกขี้หนู พวยเล้ง ใบชะพลู หน่อไม้ ผักแพว

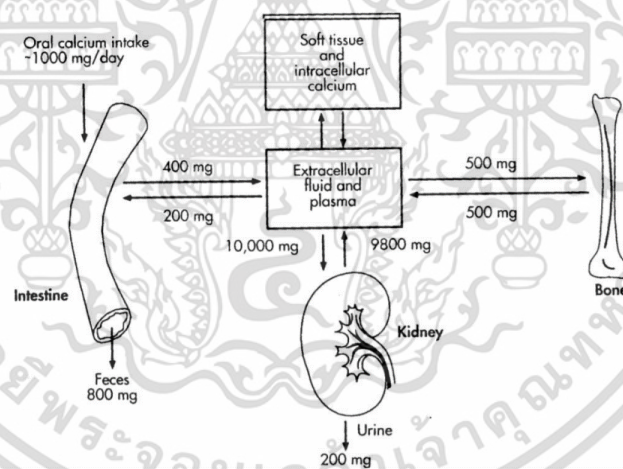
2. ปริมาณไฟติกของพวกแอซิด จะไปรวมตัวกับแคลเซียมเป็น แคลเซียมไฟเตทซึ่งไม่ละลายน้ำและไม่ถูกดูดซึมในลำไส้เล็ก พบในเปลือกนอกของพวกธัญพืช ผักใบเขียว

3. การเคลื่อนไหวของทางเดินอาหาร ถ้ามีการเคลื่อนไหวเร็ว จะทำให้การดูดซึมแคลเซียมลดลง เพราะลดระยะเวลาที่อาหารได้สัมผัสกับผนังลำไส้

4. การบริโภคอาหารที่มีเส้นใยอาหารมาก เส้นใยจะจับกับแคลเซียมในทางเดินอาหารทำให้แคลเซียมไม่ถูกดูดซึมในลำไส้

### 2.2.1.3 สมดุลแคลเซียมและกลไกการควบคุมระดับของแคลเซียมในกระแสเลือด [6]

คนปกติรับประทานแคลเซียมประมาณวันละ 1,000 มิลลิกรัม ซึ่งจะได้รับการดูดซึมกลับในทางเดินอาหารประมาณร้อยละ 40-50 หรือ 400-500 มิลลิกรัม แคลเซียมส่วนที่เหลือรวมทั้งที่ถูกขับออกมาพร้อมกับน้ำย่อยวันละ 200 มิลลิกรัม จะถูกขับถ่ายออกมาที่บ่อจากระ แคลเซียมที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ของเหลวระหว่างเซลล์ส่วนหนึ่งจะไปสะสมที่กระดูก อีกส่วนหนึ่งถูกขับออกทางปัสสาวะหลังผ่านกระบวนการกรองที่ไต และการดูดกลับที่ท่อหน่วยไต แคลเซียมที่สะสมในกระดูกนั้นสามารถถูกปลดปล่อยออกสู่ของเหลวระหว่างเซลล์ได้เมื่อร่างกายมีความต้องการแคลเซียม



รูปที่ 2.4 แสดงสมดุลแคลเซียม [6]

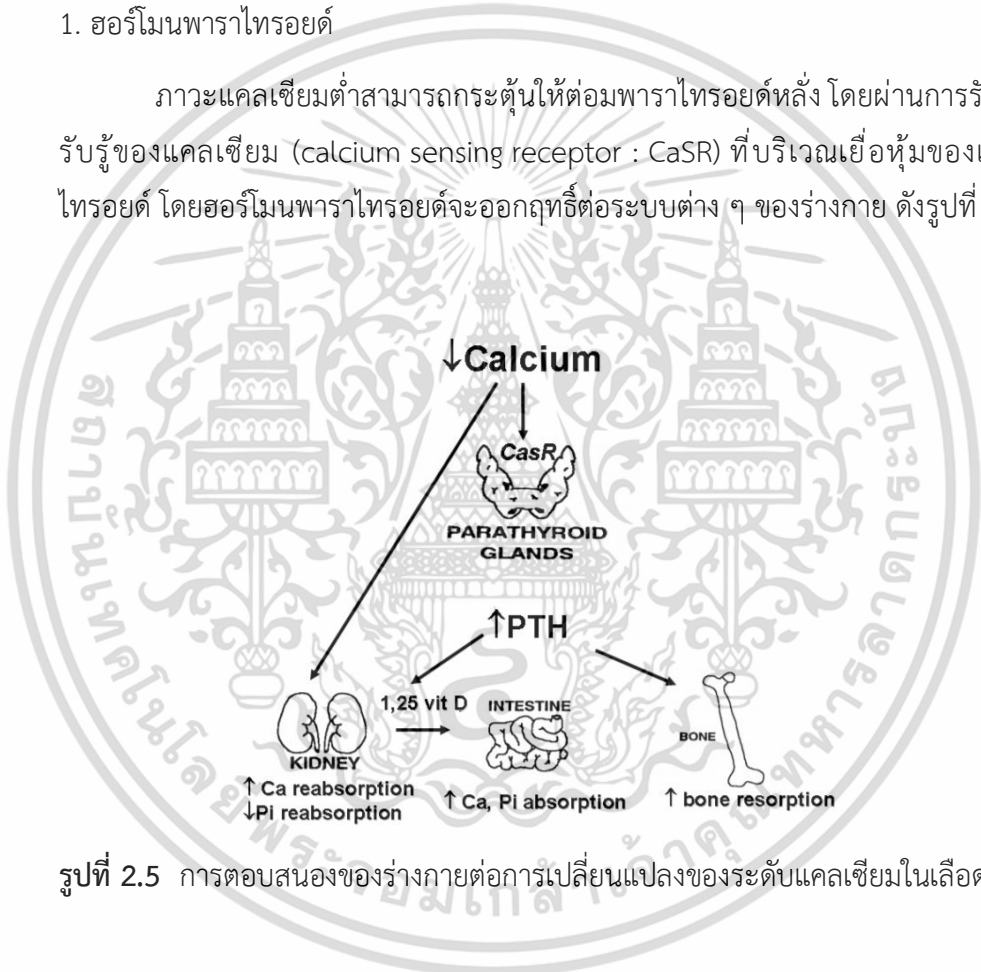
ในกระแสเลือดประมาณร้อยละ 40 ของแคลเซียมจะจับอยู่กับโปรตีนซึ่งส่วนมากเป็นอัลบูมิน ร้อยละ 15 จับกับ ซิเตรต ซัลเฟต และฟอสเฟต ที่เหลืออีกร้อยละ 45 จะอยู่ในรูปแคลเซียมอิสระ ส่วนของแคลเซียมอิสระนี้เป็นส่วนเดียวที่อยู่ภายใต้การควบคุมของฮอร์โมนต่าง ๆ นอกจากฮอร์โมนแล้วปัจจัยอื่น ๆ ที่ทำให้ระดับของแคลเซียมอิสระในเลือดเปลี่ยนแปลง

ได้แก่ ภาวะความเป็นกรดต่าง โดยภาวะความเป็นกรด (acidemia) ทำให้แคลเซียมจับกับอัลบูมินลดลง ส่งผลให้ระดับของแคลเซียมอิสระสูงขึ้น ในขณะที่ภาวะด่าง (alkalemia) จะทำให้แคลเซียมจับกับแอนไอออน (anions) ได้ดีขึ้น จึงทำให้ระดับของแคลเซียมอิสระลดลง

### กลไกการควบคุมระดับของแคลเซียมในกระแสเลือด

#### 1. ฮอร์โมนพาราไทรอยด์

ภาวะแคลเซียมต่ำสามารถกระตุ้นให้ต่อมพาราไทรอยด์หลั่ง โดยผ่านการรับรู้ของต่อมรับรู้ของแคลเซียม (calcium sensing receptor : CaSR) ที่บริเวณเยื่อหุ้มของเซลล์พาราไทรอยด์ โดยฮอร์โมนพาราไทรอยด์จะออกฤทธิ์ต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกาย ดังรูปที่ 2.5



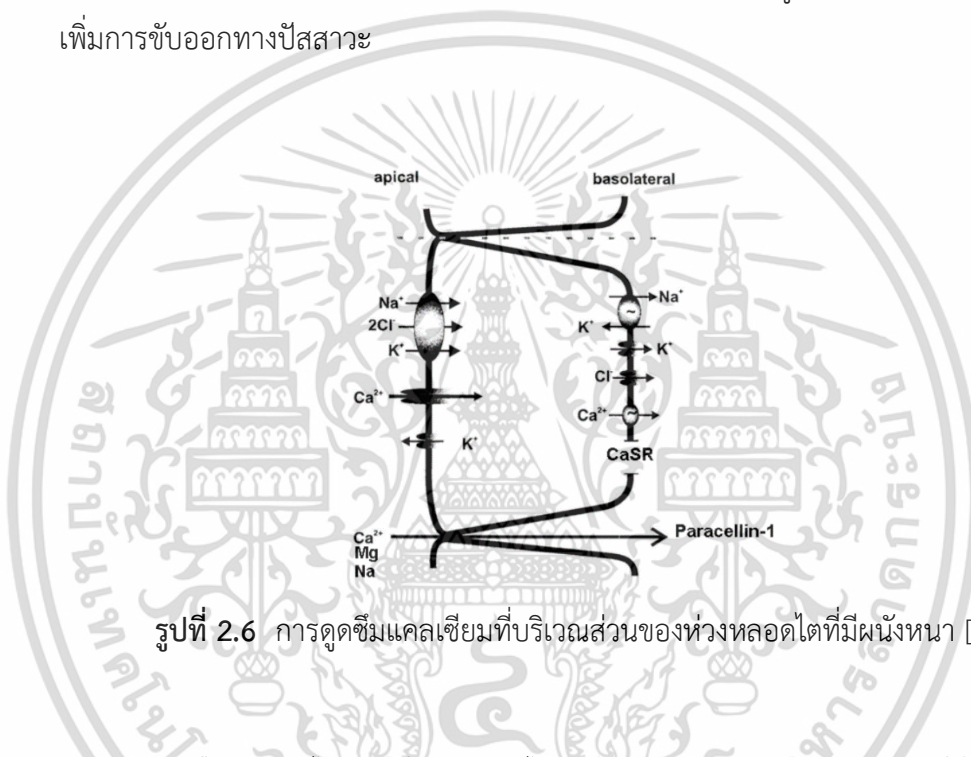
รูปที่ 2.5 การตอบสนองของร่างกายต่อการเปลี่ยนแปลงของระดับแคลเซียมในเลือด [6]

- 1.) กระตุ้นให้มีการสร้างแอกทีฟวิตามินดี (1,25 dihydroxyvitamin D) หรือ แคลซิไทรออล (calcitriol) ซึ่งจะไปเพิ่มการดูดซึม (absorption) ของแคลเซียมและฟอสเฟตในทางเดินอาหาร
- 2.) เพิ่มการดูดซึมกลับ (reabsorption) ของแคลเซียม แต่ลดการดูดซึมกลับของฟอสเฟตที่ไต
- 3.) เพิ่มการทำลายกระดูก (bone resorption) ทำให้มีปลดปล่อยแคลเซียมและฟอสเฟตออกสู่กระแสเลือดเช่นเดียวกัน ถ้าระดับแคลเซียมในเลือดสูงกว่าปกติเพียงเล็กน้อย ต่อมารับรู้ของแคลเซียมจะตอบสนองอย่างรวดเร็วใน การยับยั้งการหลั่งฮอร์โมนพาราไทรอยด์เพื่อรักษาระดับแคลเซียมให้เป็นปกติ นอกจากนี้จะเห็นว่านอกจากฮอร์โมนพาราไทรอยด์จะมีผลต่อแคลเซียมแล้ว ยังมีผลต่อฟอสเฟตอีกด้วย ในขณะที่ฮอร์โมนพาราไทรอยด์กระตุ้นการดูดซึมของฟอสเฟตในทางเดินอาหารผ่าน ทางแคลซิไทรออลและเพิ่มการปลดปล่อยฟอสเฟตออกจากกระดูกเข้าสู่กระแสเลือดผ่านทางกระบวนการของการเพิ่มการทำลายกระดูก ฮอร์โมนพาราไทรอยด์กลับเพิ่มการขับฟอสเฟตออกทางไตโดยไปยับยั้งการดูดซึมกลับที่ท่อหน่วยไตส่วนต้น (proximal tubule) กระบวนการดังกล่าวส่งผลให้ทั้งการเพิ่มขึ้นและลดลงของฟอสเฟตในเวลาเดียวกันทำให้เกิดความสมดุลของ ฟอสเฟตในกระแสเลือด กล่าวคือการออกฤทธิ์ของฮอร์โมนพาราไทรอยด์เพื่อเพิ่มระดับแคลเซียมนั้นจะไม่ส่งผลให้ระดับฟอสเฟต เปลี่ยนแปลงโดยเฉพาะผู้ป่วยที่มีการทำงานของไตเป็นปกติ

การดูดซึมกลับของแคลเซียมที่ไตเกิดได้ 2 ลักษณะ คือ

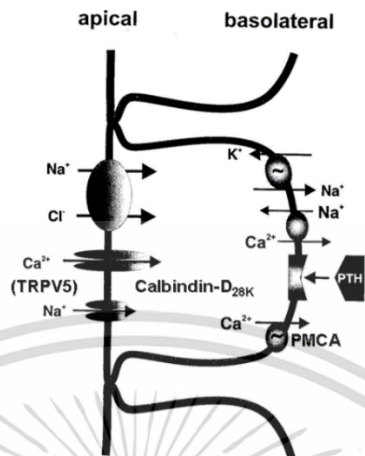
1. การดูดซึมกลับแบบไม่ใช้พลังงาน (passive reabsorption) ที่บริเวณหลอดไตส่วนต้น (proximal tubule) และส่วนของห่วงหลอดไตที่มีผนังหนา (thick ascending limb of loop of Henle ) โดยประมาณร้อยละ 80 ของแคลเซียมกรองจากโกลเมอรูลัส (glomerulus) จะถูกดูดซึมโดยวิธีนี้
2. การดูดซึมกลับแบบใช้พลังงาน (active reabsorption) ที่บริเวณหลอดไตส่วนปลาย (distal convoluted tubule) และส่วนหลอดไตรวม (collecting tubules) การดูดซึมของแคลเซียมที่บริเวณส่วนของห่วงหลอดไตที่มีผนังหนานั้นอาศัยการดูดซึมกลับ ของโซเดียม คลอรีน และโพแทสเซียม ผ่านทางตัวส่งสารโซเดียมโพแทสเซียมทูคโลไรด์ (Na-K-2Cl) ที่บริเวณเยื่อผนังส่วนปลาย (apical membrane) การดูดซึมผ่านทางตัวส่งสาร ต่อมารับรู้ของแคลเซียมนี้ ส่งผลให้เกิดการขับโพแทสเซียมออกทางโพแทสเซียมชาแนลที่บริเวณเยื่อผนังส่วนปลาย ซึ่งจะทำให้เกิดประจุบวกภายในลูเมนผลักดันให้โซเดียม แคลเซียม และแมกนีเซียม ซึ่งมีประจุบวกเช่นกันถูก

ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายผ่านทางไตตั้งจัน การดูดซึมของแคลเซียมผ่านทางไตตั้งจันนี้ ถูกควบคุมโดยต่อมรับรู้อของแคลเซียมที่อยู่บริเวณผนังเซลล์ฝั่งที่ติดกับหลอดเลือด โดยถ้าแคลเซียมในเลือดมีระดับสูงกว่าปกติ ต่อมรับรู้อของแคลเซียมจะส่งสัญญาณไปยังการทำงานของโพแทสเซียมซาแนลที่บริเวณเยื่อผนังส่วนปลาย ทำให้มีการขับแคลเซียมออกมาทางปัสสาวะเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การให้ยาขับ จะไปยับยั้งตัวส่งสารโซเดียมโพแทสเซียมทูลอไรด์ ทำให้มีการขับโพแทสเซียมออกจากโพแทสเซียมซาแนลลดลง ส่งผลยับยั้งการดูดซึมกลับของแคลเซียม และเพิ่มการขับออกทางปัสสาวะ



รูปที่ 2.6 การดูดซึมแคลเซียมที่บริเวณส่วนของท่อหลอดไตที่มีผนังหนา [6]

ฮอร์โมนพาราไทรอยด์และแคลซิไทรออล มีผลต่อการดูดซึมกลับแบบใช้พลังงานของแคลเซียมที่บริเวณท่อไตส่วนปลาย (distal tube) โดยฮอร์โมนทั้งสองมีผลในการเพิ่มปริมาณของแคลเซียมซาแนลที่บริเวณเยื่อผนังส่วนปลาย โปรตีนที่ช่วยจับกับแคลเซียม (calbindin-D28K) และโปรตีนที่สลายพลังงาน เพื่อนำมาจับแคลเซียม (calcium ATPase) และ โปรตีนที่ทำงานร่วมกับ Calcium ATPase ในการรักษาความเข้มข้นของแคลเซียม (Na<sup>+</sup>/Ca<sup>2+</sup> exchanger) ที่บริเวณผนังด้านที่ติดกับหลอดเลือดซึ่งเป็นโปรตีนที่กล่าวมานี้มีความสำคัญต่อการดูดซึมกลับของแคลเซียม



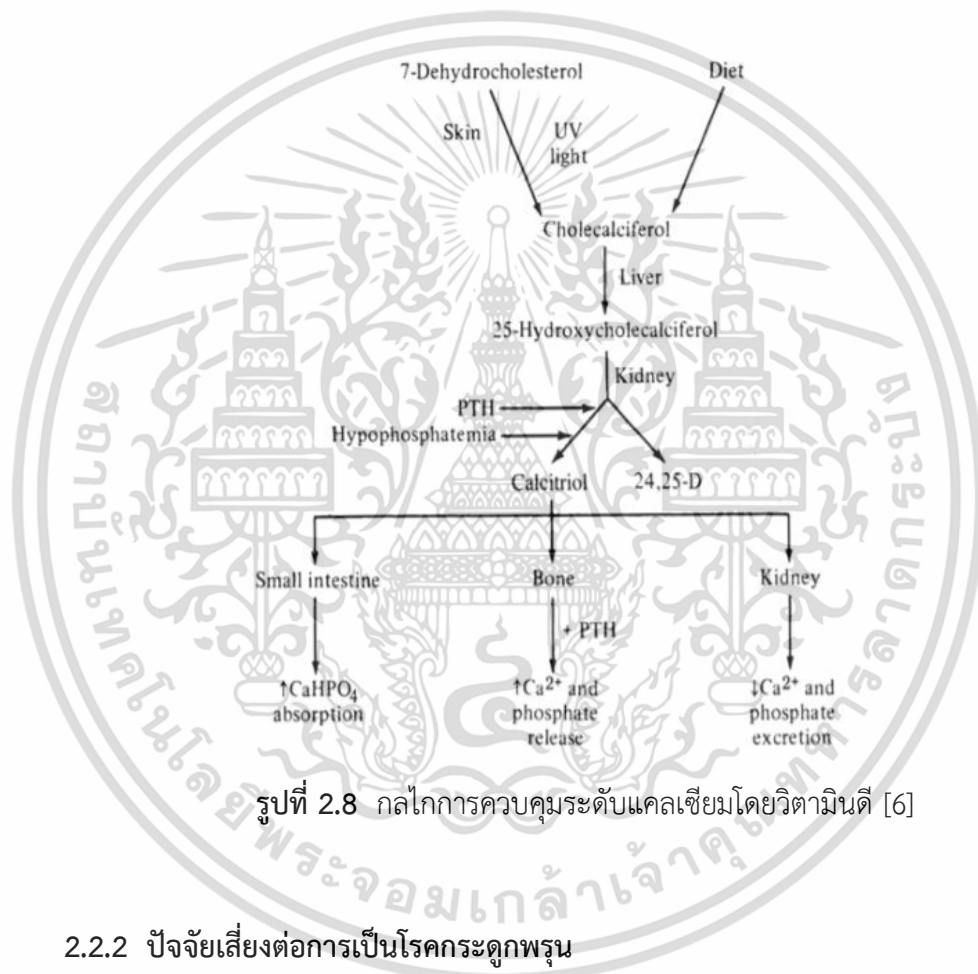
รูปที่ 2.7 การดูดซึมแคลเซียมที่บริเวณท่อไตส่วนปลาย [6]

## 2) วิตามินดี

ร่างกายได้รับวิตามินดีจากการสร้างทางผิวหนังโดยแสงอัลตราไวโอเลต และจากอาหารที่เป็นผลิตภัณฑ์ จากสัตว์ในรูปของโคเลคัลซิเฟอรอล (cholecalciferol) หรือวิตามินดี 3 (รูปที่ 2.8) จากนั้นอาศัยเอนไซม์ 25-ไฮดรอกซีเลส (25-hydroxylase) จากตับ ในการสร้าง 25-ไฮดรอกซีวิตามินดี (25-hydroxyvitamin D) หรือ แคลซิไดออล (calcidiol) ซึ่งต่อมาจะถูกนำเข้าสู่กระแสเลือดเดินทางไปที่ไต ในบริเวณท่อไต จะมีเอนไซม์ 1-อัลฟา-ไฮดรอกซีเลส (1-alpha-hydroxylase) และ 24-อัลฟา-ไฮดรอกซีเลส (24-alpha-hydroxylase) ทำหน้าที่เปลี่ยนแคลซิไดออลเป็นแคลซิไทรออล ซึ่งเป็นรูปที่ออกฤทธิ์ได้ทันที (active form) ของวิตามินดี หรือ 24,25-ไดไฮดรอกซีวิตามินดี (24,25-dihydroxyvitamin D) ซึ่งเป็นรูปที่ไม่มีฤทธิ์ (inactive metabolite)

นอกจากที่ไตแล้ว การสร้างแคลซิไทรออลยังเกิดได้ในสารในระบบภูมิคุ้มกัน ซึ่งเป็นที่มาของภาวะภาวะแคลเซียมในเลือดสูง (hypercalcemia) การสร้างแคลซิไทรออล โดยวิธีนี้ อาศัยการทำงานของ อินเตอร์เฟียร์รอน-แกมมา (interferon gamma ที่สร้างจากเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิดต่าง ๆ สำหรับโรควัณโรค (tuberculosis) แคลซิไทรออลที่เพิ่มขึ้นยังช่วยการกำจัดเชื้อโรคและลดการทำลายของเนื้อเยื่ออีกด้วย การสร้างแคลซิไทรออล นั้นสามารถถูกกระตุ้นได้ด้วย ฮอร์โมนพาราไทรอยด์ (การเพิ่มขึ้นของฮอร์โมนพาราไทรอยด์ มักเป็นผลมาจากการลดลงของแคลเซียมในเลือด) และภาวะฟอสฟอรัสในเลือดต่ำ (hypophosphatemia) โดยแคลซิไทรออล

จะไปกระตุ้นการดูดซึมของแคลเซียมในทางเดินอาหารและในไต และยังทำงานร่วมกับฮอร์โมนพาราไทรอยด์ ในการเพิ่มกระบวนการสลายกระดูก นอกจากนี้แคลซิโทรอลยังช่วยยับยั้งการหลั่งฮอร์โมนพาราไทรอยด์ได้ในผู้ป่วยไตวายเรื้อรังที่มีการสร้างแคลซิโทรอลลดลง มักพบว่ามีฮอร์โมนพาราไทรอยด์ เพิ่มขึ้นมีผลทำให้กระดูกผุ เรียกว่าภาวะดังกล่าวว่า ภาวะฮอร์โมนพาราไทรอยด์สูง (hyperparathyroidism)



รูปที่ 2.8 กลไกการควบคุมระดับแคลเซียมโดยวิตามินดี [6]

## 2.2.2 ปัจจัยเสี่ยงต่อการเป็นโรคกระดูกพรุน

1. ผู้สูงอายุทั้งชายและหญิง ด้วยวัยที่เพิ่มมากขึ้น กระบวนการเจริญเติบโตของร่างกายจะเริ่มช้า ๆ ลง การทดแทนกระดูกส่วนที่สึกหรอก็จะเป็นไปได้ช้าด้วย หากร่างกายขาดแคลเซียมในปริมาณที่จำเป็นต่อการสร้างกระดูกก็จะเสี่ยงต่อการเป็นโรคกระดูกพรุน เมื่อแก่ตัวลง กระดูกก็จะเปราะบางและแตกหักง่ายหากถูกกระทบกระเทือนแม้ไม่รุนแรงก็ตาม เช่น การล้ม การกระแทก เป็นต้น

2. ผู้หญิงที่ทำการผ่าตัดเอารังไข่ออกทั้ง 2 ข้าง

3. ผู้หญิงวัยหลังหมดประจำเดือน การลดระดับของฮอร์โมนเอสโตรเจน (Estrogen) ในเพศหญิงอย่างการเข้าสู่วัยหมดประจำเดือนก็อาจทำให้กระดูกพรุนและเปราะบาง ส่วนในเพศชายจะมีความเสี่ยงเกิดโรคกระดูกพรุนเมื่อมีการผลิตฮอร์โมนเทสโทสเตอโรน (Testosterone) น้อยลง

4. ผู้ที่มีประวัติบุคคลในครอบครัวที่เคยเป็นโรคกระดูกพรุน ผู้ที่มีญาติใกล้ชิดทางสายเลือดมีประวัติป่วยเป็นโรคกระดูกพรุนก็มีความเสี่ยงที่จะได้รับพันธุกรรมของโรคดังกล่าวไปด้วย

5. พฤติกรรมการบริโภค กินอาหารที่มีแคลเซียมไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายในการสร้างกระดูกและการเจริญเติบโต หรือกินอาหารที่ทำให้แคลเซียมเสียสมดุล อย่างอาหารจำพวกโปรตีนจากเนื้อสัตว์ซึ่งมีความเป็นกรดสูง ดื่มน้ำอัดลม ชา กาแฟ หรือเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ และสูบบุหรี่ติดต่อกันปริมาณมากเป็นเวลานาน

6. พฤติกรรมการใช้ชีวิตประจำวัน การนั่งหรืออยู่ในอิริยาบถเดิม ๆ เป็นเวลานาน รวมทั้งการทำงานที่ต้องเคลื่อนไหวร่างกายอย่างหักโหมล้วนส่งผลต่อสุขภาพกระดูกทั้งสิ้น

7. การใช้ยาบางชนิด ผู้ป่วยที่ต้องรักษาด้วยการใช้ยาบางชนิดติดต่อกันเป็นเวลานานก็มีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคกระดูกพรุนเช่นกัน เช่น กลุ่มยาสเตียรอยด์ เป็นต้น เพราะตัวยาบางชนิดจะออกฤทธิ์รบกวนกระบวนการสร้างกระดูก อย่างยาเพรดนิโซโลนที่มีฤทธิ์ต่อระบบภูมิคุ้มกันและใช้รักษาอาการอักเสบ

## 2.2.3 ภาวะของโรคกระดูกพรุน [1]

แบ่งออกเป็น 2 แบบ ได้แก่

### 1. แบบปฐมภูมิ

เป็นภาวะที่พบในผู้หญิงที่หมดประจำเดือนเพราะผู้หญิงประเภทนี้จะสูญเสียแคลเซียมในกระดูกเป็นจำนวนมากทำให้กระดูกนั้นมีโอกาสหักได้มากขึ้น และภาวะของโรคกระดูกพรุนแบบปฐมภูมินั้นยังพบได้ตามผู้สูงอายุทั้งชายและหญิง เพราะเมื่ออายุมากขึ้นกระดูกก็ย่อมมีความแข็งแรงลดน้อยลง ซึ่งจะสามารถสังเกตได้จากอาการปวดหลังปวดสะโพก

## 2. แบบทุติยภูมิ

เป็นภาวะของโรคกระดูกพรุนที่เกิดจากพฤติกรรมของผู้ป่วยไม่ว่าจะเป็นพฤติกรรมที่ไม่ออกกำลังกาย การสูบบุหรี่ การกินยาซึ่งยาบางชนิดมีผลข้างเคียงต่อมวลกระดูกหากรับประทานในปริมาณมากก็อาจทำให้มีโอกาสเป็นโรคกระดูกพรุนมากยิ่งขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นจากการเป็นโรคบางชนิดไม่ว่าจะเป็นโรคเมอเร็ง หรือ ฮอร์โมน บกพร่องก็สามารถทำให้เป็นโรคกระดูกพรุนได้

### 2.2.4 การวินิจฉัยโรคกระดูกพรุน [7]

แพทย์จะสามารถตรวจพบภาวะกระดูกพรุนเพื่อวางแผนการรักษาได้ตั้งแต่วัยแรกเริ่มของโรค สามารถแบ่งกระดูกตามค่ามวลกระดูกออกเป็น 4 ชนิดดังนี้

1. กระดูกปกติ (normal bone) คือ กระดูกที่มีค่ามวลกระดูกอยู่ในช่วง 1 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานใต้ต่อค่าเฉลี่ยของสตรีวัยเยาว์ที่มีค่ามวลกระดูกสูงสุด
2. กระดูกโปร่งบาง (osteopenia) คือ กระดูกที่มีค่ามวลกระดูกอยู่ระหว่างช่วง 1 ถึง 2.5 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานใต้ต่อค่าเฉลี่ยของสตรีวัยเยาว์ที่มีค่ามวลกระดูกสูงสุด
3. โรคกระดูกพรุน (osteoporosis) คือ กระดูกที่มีค่ามวลกระดูกอยู่ใต้ต่อค่าเฉลี่ยของสตรีวัยเยาว์ที่มีค่ามวลกระดูกสูงสุด 2.5 หรือต่ำกว่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
4. โรคกระดูกพรุนอย่างรุนแรง (severe or established osteoporosis) คือ กระดูกที่มีค่ามวลกระดูกอยู่ใต้ต่อค่าเฉลี่ยของสตรีวัยเยาว์ที่มีค่ามวลกระดูกสูงสุดต่ำกว่า 2.5 เท่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมกับมีกระดูกหัก

### 2.2.5 อันตรายและภาวะแทรกซ้อนจากโรคกระดูกพรุน [1]

การที่ผู้ป่วยปล่อยละเลยไม่ดูแลรักษามวลกระดูกจนเป็นโรคกระดูกพรุนจะทำให้ผู้ป่วยนั้นมีอาการปวดหลัง หลังค่อมหรือบางครั้งนั้นอาจทำให้ส่วนสูงนั้นลดลง เมื่อเกิดอุบัติเหตุที่ทำให้

กระดูกหักจะทำให้กระดูกของผู้ป่วยนั้นกลับมาแข็งแรงดังเดิมได้ยาก ซึ่งการที่ผู้ป่วยเป็นโรคกระดูกพรุนนั้นสามารถเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคอื่นตามมา เช่น โรคปอดบวม การติดเชื้อ เป็นต้น

เมื่อเกิดโรคกระดูกพรุน ปัญหาที่ตามมา คือ ความเจ็บปวดจากภาวะกระดูกทรุดตัวและอาการปวดหลัง ซึ่งส่งผลให้เคลื่อนไหวได้อย่างจำกัด มีความสามารถในการทำกิจกรรมต่าง ๆ ลดลง โดยเฉพาะกิจกรรมนอกบ้านหรือการเข้าสังคม จึงอาจทำให้ผู้ป่วยเก็บตัวหรือแยกตัวออกจากสังคม และอาจทำให้เกิดภาวะซึมเศร้าต่อไปได้ นอกจากนี้ หากเกิดอาการกระดูกหัก โดยเฉพาะการแตกหักบริเวณกระดูกสะโพก จะทำให้ผู้ป่วยเดินไม่ได้ ขยับตัวลำบากเพราะความเจ็บปวด ต้องนั่งหรือนอนอยู่กับที่ตลอดเวลา ซึ่งเสี่ยงต่อการเกิดโรคและอาการแทรกซ้อนที่อาจเป็นเหตุให้เสียชีวิตได้ อย่างการเกิดแผลกดทับหรือโรคติดเชื้อในระบบทางเดินปัสสาวะ

## 2.2.6 การป้องกันโรคกระดูกพรุน [1]

1. ในผู้หญิงวัยหมดประจำเดือนควรดูแลตัวเองมากกว่าปกติ กินอาหารที่มีแคลเซียมสูงหรือกินยาเพิ่มแคลเซียม โดยการเพิ่มแคลเซียมให้ผู้หญิงวัยหมดประจำเดือนนั้นจะไม่ทำให้มวลกระดูกนั้นกลับมามีปริมาณเท่าปกติได้ แต่จะช่วยชะลอการลดลงของมวลกระดูกซึ่งจะทำให้โอกาสที่จะเป็นโรคกระดูกพรุนลดน้อยลง
2. ออกกำลังกายอย่างสม่ำเสมอ เพราะช่วยลดการดึงแคลเซียมจากกระดูกไปใช้กระตุ้นการสร้างกระดูก และยังสร้างเนื้อกระดูกในบริเวณที่รับน้ำหนักจากการออกกำลังกายให้เพิ่มมากขึ้น
3. งดการสูบบุหรี่และดื่มเครื่องดื่มแอลกอฮอล์
4. หลีกเลี่ยงกิจกรรมที่มีโอกาสเสี่ยงทำให้เกิดการหกล้มเพราะอาจทำให้กระดูกหักได้ เพราะเมื่อกระดูกหักแล้วจะไม่สามารถกลับมาแข็งแรงดังเดิมได้

## 2.3 การตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก [1]

ในผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนนั้นปกติจะไม่สามารถทราบได้เลยว่าผู้ป่วยคนใดเป็นโรคกระดูกพรุน ซึ่งจะทราบได้ก็ต่อเมื่อผู้ป่วยคนนั้นประสบอุบัติเหตุเพียงเล็กน้อยแต่กระดูกกลับหัก และหากเป็นโรคกระดูกพรุนกระดูกจะไม่สามารถกลับมาแข็งแรงดังเดิมได้เพราะมวลกระดูกเมื่อเสียไปแล้วจะไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้อีก วิธีการที่จะทำให้รู้สภาพของกระดูกเพื่อจะได้มีการดูแลและเฝ้าระวังไม่ให้กระดูกสูญเสียมวลกระดูกเพิ่ม ก็คือ การวัดมวลกระดูก

การวัดมวลกระดูกทำให้ทราบได้ว่าขณะนี้สภาพของกระดูกเป็นอย่างไร มีมวลกระดูกเท่าไร อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมหรือไม่ ทำให้ได้ปริมาณมวลกระดูกที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ถึงโอกาสในการเป็นโรคกระดูกพรุนต่อไป

### 2.3.1 ความสำคัญของการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

ในปัจจุบันสังคมไทยกำลังเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุเพราะคนในปัจจุบันนิยมมีลูกน้อย ซึ่งโรคกระดูกพรุนนับได้ว่าเป็นโรคประจำผู้สูงอายุเลยทีเดียว ซึ่งหากเป็นแล้วไม่ได้รับการรักษาที่ทันท่วงทีก็อาจส่งผลถึงแก่ชีวิตได้ โรคกระดูกพรุนนับว่าเป็นโรคที่หากเป็นแล้วต้องการการรักษาและใช้ค่าใช้จ่ายสูง โดยค่ามวลกระดูกในร่างกายของคนเรานั้นจะมีค่ามากที่สุดเมื่อมีอายุประมาณ 30-35 ปี ซึ่งหลังจากอายุช่วงนี้ไปแล้วมวลกระดูกจะค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง

ความสำคัญของการวัดมวลกระดูก

1. การวัดมวลกระดูกเพื่อป้องกันการเกิดโรคกระดูกพรุน เพราะหากเราสามารถทราบค่ามวลกระดูกของเราตั้งแต่อายุน้อยก็จะทำให้เรามีแนวทางในการรักษาปริมาณมวลกระดูกสูงสุดไว้ให้นานที่สุด ด้วยเหตุนี้ก็จะทำให้ปริมาณผู้ป่วยโรคกระดูกพรุนนั้นมีปริมาณที่น้อยลง
2. การวัดมวลกระดูกเพื่อการรักษา การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกในรูปแบบนี้เพื่อตรวจหาความหนาแน่นของกระดูกที่ต่ำลง และให้การรักษาตั้งแต่ระยะแรก ๆ ก็จะสามารถป้องกันโรคกระดูกพรุนได้

### 2.3.2 ข้อบ่งชี้ทางคลินิกของการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

1. เพื่อวินิจฉัยและประเมินความรุนแรงของโรคกระดูกพรุน
2. เพื่อประเมินความเสี่ยงในการเป็นโรคกระดูกพรุน
3. เพื่อช่วยในการตัดสินใจในการรักษา
4. เพื่อติดตามผลการรักษา

### 2.3.3 การเลือกตำแหน่งในการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

การเลือกตำแหน่งในการตรวจวัดความหนาแน่นของมวลกระดูกนั้นตำแหน่งที่จะให้ค่าได้แม่นยำมากที่สุดควรจะเป็นตำแหน่งที่กระดูกนั้นหักเพราะสามารถให้ค่าที่ถูกต้องได้ โดยตำแหน่งที่สามารถประมาณค่ามวลกระดูกทั่วร่างกายได้ดีที่สุดมีอยู่ 3 ตำแหน่ง คือในส่วนของกระดูกสันหลัง กระดูกสะโพก และกระดูกส่วนปลายของข้อมือ ซึ่งถ้าหากเราเลือกใช้กระดูกส่วนอื่นในการประมาณค่ามวลกระดูกทั่วร่างกายจะสามารถบอกได้แค่บางสถานะเท่านั้น

อาทิเช่น เราสามารถเลือกใช้กระดูกปลายนิ้วในการประมาณค่ามวลกระดูกทั่วร่างกายได้เฉพาะในคนปกติ และค่าจะเริ่มผิดพลาดเมื่อใช้ในการวัดผู้ป่วยที่เป็นโรคกระดูกพรุน ซึ่งอาจเป็นเพราะกระดูกเนื้อพรุนนั้นมีการเผาผลาญที่สูงกว่ากระดูกทึบ ซึ่งเมื่อมีการเผาผลาญที่ต่างกันนั้นก็จะทำให้ระดับการสูญเสียมวลกระดูกในแต่ละตำแหน่งต่างกัน ซึ่งทำให้เราไม่สามารถทำนาย

### 2.3.4 ลักษณะการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

1. กรณีที่วัดมวลกระดูกเพื่อการวินิจฉัยในผู้ป่วยที่มีโอกาสเสี่ยงที่จะเป็นโรคกระดูกพรุน ควรเลือกตรวจในบริเวณกระดูกสันหลังส่วนเอว (lumbar spines) และกระดูกต้นขาส่วนต้น (proximal femur)
2. กรณีตรวจคัดกรองเราจะตรวจที่กระดูกส่วนปลาย เพราะการตรวจชนิดนี้จะใช้ตรวจคนจำนวนมาก ๆ ต้องอาศัยความรวดเร็ว และประหยัดค่าใช้จ่าย ซึ่งการตรวจชนิดจะบอกได้คร่าว ๆ ซึ่งมีความเหมาะสมในการตรวจคัดกรอง

### 2.3.5 การแปลผลการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

การแปลผลการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกในทางคลินิกมักอยู่บนพื้นฐานสำคัญ 3 ประการ ได้แก่ การวินิจฉัยโรคกระดูกพรุน การตัดสินใจให้การรักษา และการติดตามผลการรักษา

#### 2.3.5.1 การวินิจฉัยโรคกระดูกพรุน

การวินิจฉัยความเสี่ยงในการเป็นโรคกระดูกพรุน จะนำค่าความหนาแน่นของกระดูกของผู้ป่วยมาเทียบกับค่าความหนาแน่นของกระดูกอ้างอิงที่เหมาะสม โดยกำหนดเชื้อชาติและเพศเดียวกัน ตัวเปรียบเทียบมักใช้อยู่สองลักษณะ คือ

1) T-score หมายถึง การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้ กับค่าปกติของคนที่มีความหนาแน่นกระดูกสูงสุด (คนหนุ่มสาวที่มีอายุประมาณ 30-35 ปี) สามารถหาได้ดังสมการ (2.1)

$$Tscore = \frac{\text{MeasuredBMD} - \text{YoungAdultMeanBMD}}{\text{YoungAdultSD}} \quad (2.1)$$

เมื่อ Measured BMD คือ ค่าความหนาแน่นมวลกระดูกในผู้ป่วยที่ต้องการวัด

Young adult mean BMD คือ ค่าความหนาแน่นมวลกระดูกเฉลี่ยของคนปกติในที่อยู่ในวัยที่มีความหนาแน่นกระดูกสูงสุด

และ Young adult SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นมวลกระดูกของคนปกติ

2) T-score หมายถึง การเปรียบเทียบค่าที่วัดได้กับค่าปกติของคนที่อยู่ในช่วงอายุเดียวกัน สามารถหาได้ดังสมการ (2.2)

$$Tscore = \frac{\text{MeasuredBMD} - \text{AgeMatchedMeanBMD}}{\text{AgeMatchedMeanSD}} \quad (2.2)$$

เมื่อ age matched mean BMD คือ ค่าความหนาแน่นมวลกระดูกเฉลี่ยของคนปกติที่อยู่ในช่วงอายุเดียวกัน

age-matched SD คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของความหนาแน่นมวลกระดูกของคนปกติที่อยู่ในช่วงอายุเดียวกัน

องค์การอนามัยโลกใช้ค่า T-score แบ่งสภาพของกระดูกออกเป็น 3 ประเภท

1. T score  $>$  -1 SD หมายความว่า ความหนาแน่นของกระดูกอยู่ในเกณฑ์ปกติ
2.  $-2.5$  SD  $<$  T score  $<$  -1 SD หมายความว่า อยู่ในภาวะกระดูกบาง (Osteopenia)
3. T score  $<$  -2.5 SD หมายความว่า อยู่ในภาวะกระดูกพรุน (Osteoporosis)

### 2.3.5.2 การตัดสินใจในการรักษา

ตามการวินิจฉัยโรคกระดูกพรุน ผู้ป่วยที่มีค่า T score  $<$  -2.5 SD จะเป็นโรคกระดูกพรุน แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นเราควรพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบด้วย เช่น อายุ ประวัติกระดูกหักของผู้ป่วย และคนในครอบครัว และน้ำหนัก เป็นต้น

### 2.3.5.3 การติดตามผลการรักษา

การวัดความหนาแน่นของกระดูกซ้ำเพื่อติดตามอัตราการสูญเสียมวลกระดูก ความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำนั้นจะขึ้นอยู่กับความแม่นยำของเครื่องมือที่ใช้ และระยะห่างในการวัดแต่ละครั้ง

สำหรับคำแนะนำในการให้การรักษาที่เหมาะสมสำหรับผลการตรวจความหนาแน่นของกระดูกแต่ละประเภท เป็นดังตารางที่ 2.1

### 2.3.6 ข้อห้ามในการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก

1. สตรีมีครรภ์ ห้ามตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกเพราะรังสีจากการตรวจวัดอาจเป็นอันตรายต่อทารกในครรภ์ได้ และเนื่องจากสตรีมีครรภ์จะมีหน้าท้องที่ค่อนข้างหนาซึ่งจะส่งผลต่อการคำนวณค่าความหนาแน่นมวลกระดูก

2. บุคคลที่มีการรับประทานสารทึบรังสี ภายใน 2-3 วันก่อนหน้า ไม่ควรเข้ารับการตรวจหาความหนาแน่นมวลกระดูก เพราะสารทึบรังสีจะไปรบกวนการตรวจ แต่บุคคลที่ได้รับสารทึบรังสีทางหลอดเลือดดำสามารถเข้ารับการตรวจได้ตามปกติ เพราะสารทึบรังสีจะถูกขับออกทางปัสสาวะอย่างรวดเร็ว

3. บุคคลที่เพิ่งผ่านการตรวจทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์โดยใช้สารกัมมันตรังสี สารกัมมันตรังสีจะยังคงอยู่ในร่างกาย และแผ่รังสีแกมมาออกมาส่งผลกระทบต่อค่าความหนาแน่นมวลกระดูก ควรเว้นระยะประมาณ 2-3 วัน หลังการได้รับสาร

4. บุคคลที่ไม่สามารถควบคุมร่างกายให้อยู่นิ่งได้เป็นระยะเวลาเท่ากับที่ตรวจ

5. บุคคลที่มีโรคทางกระดูกสันหลัง หรือกระดูกสันหลังพิการไม่สามารถตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกเนื่องจากค่าที่ได้ไม่สามารถเชื่อถือได้ จึงควรเลี่ยงไปตรวจที่ตำแหน่งอื่นแทน

## ตารางที่ 2.1 แสดงการรักษาที่เหมาะสมสำหรับผลการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกแต่ละประเภท

[1]

ผลการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูก	ความเสี่ยงต่อการกระดูกหัก	การรักษา
อยู่ในเกณฑ์ปกติ	ต่ำ	ไม่จำเป็น
ภาวะกระดูกบาง	ปานกลาง	- กรณีวัยใกล้หมดประจำเดือน ควรให้การป้องกันหรือตรวจประเมินการสูญเสียกระดูก - กรณีผู้สูงอายุ ผู้ที่มีประวัติกระดูกหักจากความเปราะบางควรให้การรักษา
โรคกระดูกพรุน	สูง	ควรได้รับการรักษา
โรคกระดูกพรุนชนิดรุนแรง	สูงมาก	สำหรับผู้ที่มีอายุไม่มากควรหาสาเหตุและรีบเข้ารับการรักษา

## 2.4 รังสีเอกซ์ [1]

รังสีเอกซ์ เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสถานะของระดับพลังงานของอะตอมจากระดับพลังงานสูง ไปสู่ระดับพลังงานต่ำ ซึ่งอาจเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีและที่มนุษย์ผลิตขึ้นจากกลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ เมื่ออะตอมได้รับการกระตุ้นจะทำให้บริเวณวงโคจรอิเล็กตรอนของอะตอมนอกนิวเคลียสได้รับผลกระทบ ทำให้เกิดการเปลี่ยนจากสภาวะปกติไปสู่สภาวะกระตุ้นและจะลดระดับพลังงานกลับมาสู่สภาวะปกติ ในกระบวนการกลับเข้าสู่สภาวะปกตินี้จะเกิดการแทนที่ในที่ว่างจากชั้นอิเล็กตรอนวงนอกซึ่งมีพลังงานสูงเข้าแทนที่อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นให้หลุดออกไปจากวงโคจร การแทนที่นี้ก่อให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือโฟตอนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลดปล่อยออกมานี้เรียกว่า รังสีเอกซ์เรือง

### 2.4.1 การค้นพบรังสีเอกซ์ [7]

มีการค้นพบรังสีเอกซ์ เมื่อวันที่ 8 พฤศจิกายน พ.ศ. 2435 โดยศาสตราจารย์วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน (Wilhelm Konrad Roentgen, ค.ศ. 1845-1923 ชาวเยอรมัน) อาจารย์สอนวิชาฟิสิกส์แห่งมหาวิทยาลัย วูร์ซบูร์ก (Wurzburg) ประเทศเยอรมนี ในเวลาใกล้ ๆ กัน แอนโทนี เบ็กเกอร์เรล (Antoine Becquerel, ค.ศ. 1852-1908 ชาวฝรั่งเศส) ค้นพบว่า แร่ยูเรเนียมมีกัมมันตภาพรังสี และมาตามกูรี (Madame Marie Curie, ค.ศ. 1867- 1934 ชาวฝรั่งเศส) ค้นพบแร่กัมมันตรังสีเรเดียม

รังสีที่เรินต์เกนค้นพบนี้ เขาเรียกว่า รังสีเอกซ์ หรือเอกซเรย์ (X-rays) หมายความว่า เป็นรังสีใหม่ที่ไม่มีใครรู้จัก ในภายหลัง จึงมีผู้เรียกรังสีเอกซ์นี้ว่า รังสีเรินต์เกน เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้ค้นพบ เรินต์เกนพบว่า รังสีเอกซ์นี้สามารถฉายทะลุวัตถุทึบแสง เช่น ร่างกายมนุษย์ได้ เขาจึงลองเอารังสีเอกซ์มาใช้ประโยชน์ทางการแพทย์ โดยฉายรังสีเอกซ์ผ่านมือคน เนื้อ เอ็น และกระดูกในมือคน ซึ่งบางส่วนจะกั้นเอารังสีไว้และบางส่วนปล่อยให้รังสีทะลุผ่านไป บางส่วนของเนื้อและเอ็นกั้นรังสีได้น้อยก็จะมีรังสีผ่านออกมามาก กระดูกกั้นรังสีได้มากก็จะมีรังสีเหลือผ่านออกมาน้อย รังสีทั้งหมดที่ผ่านมือออกมาจึงมีความเข้มต่อพื้นที่ไม่เท่ากัน ทำให้เกิดเป็นรูปแบบ (pattern) ของความเข้มของรังสีในรูปมือขึ้น เมื่อเอารังสีที่มีรูปแบบแล้วนำไปกระทบวัสดุที่ไวต่อแสง เช่น ฟิล์มถ่ายรูปหรือกระดาษอัดรูป (photographic material) แล้วนำไปล้างด้วยน้ำยาล้างรูป ก็จะเกิดภาพของมือที่มีกระดูกซ่อนอยู่ในเนื้อด้วย แพทย์จึงสามารถบอกได้ว่ากระดูกข้างในมือนั้นหักหรือไม่ โดยจำเป็นต้องผ่าเอาเนื้อที่หุ้มกระดูกออกมาดู

### 2.4.2 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

1. เดินทางเป็นเส้นตรง ด้วยความเร็วเท่ากับ ความเร็วของแสงสว่างธรรมดา คือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ  $3 \times 10^{10}$  เซนติเมตรต่อวินาที
2. ไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
3. สามารถฉายให้ผ่านทะลุวัตถุทึบแสง เช่น ร่างกายมนุษย์ได้
4. เป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีอนุภาคจึงไม่มีมวล และไม่มีน้ำหนัก

5. เมื่อผ่านเข้าไปในวัตถุหรือสสารรังสีจะถูกดูดกลืนไปโดยสสารนั้น ๆ มากหรือน้อยแล้วแต่ความหนาแน่นของสสารนั้น ถ้าสสารมีความหนาแน่นมาก เช่น กระจก ดูดกลืนรังสีเอกซ์ไว้ได้มาก ทำให้รังสีผ่านไปได้น้อย ถ้าสสารมีความหนาแน่นน้อย เช่น อากาศ ดูดกลืนรังสีไว้ได้น้อย ทำให้รังสีผ่านไปได้มาก
6. เมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ จะทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า ถ้าเราวัดประจุไฟฟ้านี้แล้วจะนำไปคำนวณจำนวนของรังสีเอกซ์ที่ผ่านไป ในอากาศหรือก๊าซนั้นได้ จึงเป็นการวัดจำนวนรังสีทางอ้อม
7. ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อฟิล์มถ่ายรูป หรือ กระจกอัดรูปได้ เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
8. ทำให้เกิดการเรืองแสงเมื่อฉายกระทบบวัตถุบางอย่าง เช่น แบเรียมแพลทินไซอะไนด์ เพราะพลังงานจากรังสีเอกซ์จะเปลี่ยนรูปไปอีกเป็นแสงสว่างธรรมดาที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า
9. เมื่อฉายผ่านทะลุวัตถุบางอย่างนอกจากรังสีเอกซ์จะถูกดูดกลืนแล้ว ยังทำให้เกิดรังสีเอกซ์ชนิดใหม่ที่มีพลังงานน้อยกว่าเดิม และมีทิศทางผิดจากทิศทางเดิมด้วย เรียกว่า scattering effects
10. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมนุษย์จึงสามารถเอาผลการเปลี่ยนแปลงนี้มาประยุกต์ใช้ในวิชารังสีรักษาได้ เช่น การรักษาโรคมะเร็งโดยการฉายรังสีเอกซ์ เป็นต้น

### 2.4.3 ประเภทของรังสีเอกซ์

#### 2.4.3.1 รังสีเอกซ์ที่มีสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง

รังสีเอกซ์ที่มีสเปกตรัมแบบต่อเนื่องเป็นรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์โดยการเร่งให้อนุภาคมีประจุวิ่งเข้าชนเป้าโลหะ เช่น เร่งอิเล็กตรอนให้มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนเป้าโลหะ เมื่ออิเล็กตรอนสูญเสียความเร็วก็จะปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะของสเปกตรัมแบบต่อเนื่อง หรือที่เรียกว่า เบรมส์สตราลิ่ง

### 2.4.3.2 รังสีเอกซ์ที่มีสเปกตรัมแบบเฉพาะตัว หรือรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

เป็นรังสีเอกซ์ที่ได้มาจากการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีซึ่งเป็นการกระตุ้นโดยอาศัยพลังงานจากภายในอะตอม โดยเกิดการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอน จากชั้นพลังงานสูงกว่ามายังชั้นพลังงานต่ำกว่า การเปลี่ยนชั้นพลังงานนี้จะปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-rays) นอกจากนั้นยังมีการเกิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะของสเปกตรัมแบบเฉพาะตัวจากการ กระตุ้น โดยอาศัยพลังงานจากภายนอกอะตอม ซึ่งสามารถเกิดรังสีเอกซ์ที่มีลักษณะ ของสเปกตรัมแบบเฉพาะตัวตามชนิดของเป้าโลหะที่ใช้ลดความเร็วของอิเล็กตรอนในเครื่องกำเนิดรังสี

### 2.4.4 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

การสร้างรังสีเอกซ์จากพลังงานไฟฟ้า จะเร่งอิเล็กตรอนจากไส้หลอดเอกซเรย์ที่ถูกเผาให้ร้อน แล้วให้อิเล็กตรอนเหล่านั้นไปชนเป้าโลหะที่มีเลขอะตอมสูง ๆ เช่น ทังสแตน ทำให้เกิดการเปลี่ยนชั้นพลังงานของโลหะที่ใช้ทำเป็นเป้า และคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ โดยค่าที่ใช้ควบคุมพลังงานของรังสีเอกซ์คือค่าความต่างศักย์สูงที่ป้อนให้หลอดเอกซเรย์ และปริมาณของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะกำหนดโดยค่ากระแสไฟฟ้าที่ผ่านหลอด (mA) และเวลาที่ปล่อยรังสี (exposure Time)

หลอดเอกซเรย์ (x-ray tube) เป็นส่วนประกอบสำคัญในการผลิตเอกซเรย์ มีหน้าที่ให้กำเนิดรังสีเอกซ์ การทำงานของหลอดเอกซเรย์จะอาศัยหลักการการปล่อยเทอร์โมอิเล็กตรอน โดยกระแสไฟฟ้าจะเผาไส้หลอดให้ร้อน ทำให้มีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นเป็นจำนวนมากที่บริเวณไส้หลอดเอกซเรย์ เมื่อให้แรงดันไฟฟ้าแก่หลอดเอกซเรย์ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าที่สูงมาก ระหว่างขั้วหลอด อิเล็กตรอนจะถูกเร่งให้มีความเร็วสูง วิ่งไปยังส่วนที่เป็นเป้าโลหะ (Target) ที่ทำจากโลหะที่มีเลขอะตอมสูง ๆ ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้ทังสแตน ทำให้เกิดการชนกันของอิเล็กตรอนกับอะตอมของโลหะ เกิดอันตรกิริยา และปล่อยรังสีเอกซ์ออกมา

ชนิดของหลอดเอกซเรย์ แบ่งตามลักษณะของแอโนด

### 1. หลอดเอกซเรย์แบบแอโนดอยู่กับที่ (Stationary Anode)

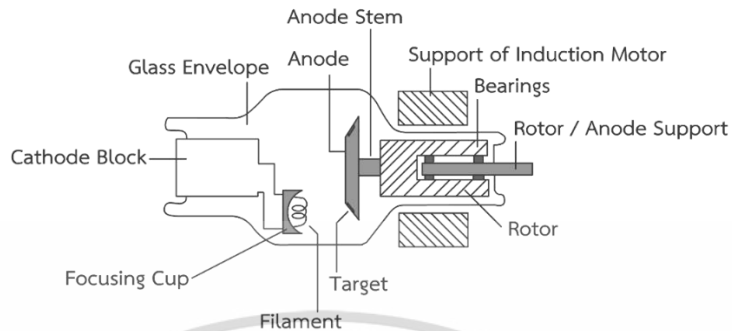
เป็นหลอดเอกซเรย์ชนิดขั้วแอโนดอยู่กับที่ ขั้วบวกประกอบด้วยแท่งทองแดง มีเป่าโลหะทำด้วยโลหะทั้งสแตนผสมฝังอยู่ในแท่งทองแดงเพื่อให้นำความร้อนได้ดี ด้านหน้าของแอโนดเอียงทำมุม 12-17 องศา เพื่อให้ได้เป่าจริงขนาดใหญ่ และจุดโฟกัสขนาดเล็ก หลอดชนิดนี้ใช้กับเครื่องที่มีกำลังไม่สูงมากนัก เช่น เครื่องเอกซเรย์เคลื่อนที่ที่มีขนาดประมาณ 50 มิลลิแอมแปร์ หรือ หลอดเอกซเรย์ที่ใช้กับเครื่องเอกซเรย์ฟัน ซึ่งมีกำลังเครื่องไม่มากนัก (ประมาณ 15-30 มิลลิแอมแปร์)



รูปที่ 2.9 แสดงส่วนประกอบภายในหลอดเอกซเรย์แบบแอโนดอยู่กับที่ [1]

### 2. หลอดเอกซเรย์แบบแอโนดหมุนได้ (Rotating Anode)

เป็นหลอดเอกซเรย์ชนิดขั้วแอโนดเป็นจานหมุน ดังนั้นตำแหน่งที่อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนจะเปลี่ยนไปตลอดเวลา สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น ทำให้สามารถทนกระแสไฟฟ้าที่ใช้ผ่านหลอดเอกซเรย์ได้สูงกว่าแบบอยู่กับที่ เป่าทำด้วยโลหะทั้งสแตนผสมรีเนียม 10 เปอร์เซ็นต์ ฉาบบนขั้วแอโนด ซึ่งทำด้วยโมลิบดีนัมหรือแกรไฟต์เพื่อให้ทนต่อการชนของอิเล็กตรอนเข้าต่อกับแกนซึ่งหมุนได้ ข้อดีคือใช้กระแสไฟสูงได้ เวลาที่ใช้ในการถ่ายสั้น และใช้จุดโฟกัสขนาดเล็กได้ เหมาะสำหรับใช้กับเครื่องเอกซเรย์ทั่ว ๆ ไป รวมทั้งเครื่องเอกซเรย์ชนิดพิเศษแบบต่าง ๆ เช่น เครื่องเอกซเรย์หลอดเลือด (Digital Subtraction Angiography : DSA) เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (Computer Radiography : CR) เป็นต้น



รูปที่ 2.10 แสดงส่วนประกอบภายในหลอดเอกซเรย์แบบแอโนดหมุนได้ [1]

## 2.4.5 ประโยชน์ของรังสีเอกซ์ทางการแพทย์

### 2.4.5.1 รังสีวินิจฉัย

รังสีเอกซ์ เมื่อฉายทะลุอวัยวะที่ต้องการตรวจแล้ว จะเกิดเป็นรูปแบบขึ้นบนแผ่นฟิล์มเอกซเรย์ เมื่อนำฟิล์มเอกซเรย์ไปล้างตามกรรมวิธีจะได้ภาพทั้งภายนอก และภายในของอวัยวะ เช่น กระดูกที่ฝังอยู่ในเนื้อ หรือแผลฉีกขาดที่อยู่ในเนื้อปอด ทำให้วินิจฉัยโรคได้โดยไม่ต้องผ่าอวัยวะนั้นเข้าไปดูภายใน

### 2.4.5.2 รังสีรักษา

การนำรังสีชนิดต่าง ๆ มาใช้ในการรักษาโรค เนื่องจากรังสีเอกซ์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีววิทยาต่อเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ถ้าเซลล์ได้รับรังสีเอกซ์ในขนาดสูงมาก จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไปในทางเสื่อม และขนาดสูงพอที่จะทำให้เซลล์ตายได้ มนุษย์จึงเอาคุณสมบัติข้อนี้มาใช้ในวิชารังสีรักษา คือ ฉายรังสีเอกซ์ให้เนื้อร้าย เช่น เนื้อมะเร็งตายได้ ทั้ง ๆ ที่ส่วนใหญ่ เนื้อมะเร็งก็ถูกล้อมรอบอยู่ด้วยเนื้อดี และเมื่อฉายเนื้อมะเร็งก็จะถูกเนื้อดีข้าง ๆ ด้วยเสมอแต่เนื้อมะเร็งเป็นเซลล์อ่อนเกิดใหม่ เมื่อถูกรังสีก็จะตายง่าย ผิดกับเนื้อดีที่เกิดมาก่อน จึงทนทานต่อรังสีเอกซ์มากกว่า ถ้าเรากะขนาดที่ใช้ให้ดีเนื้อมะเร็งก็จะตายแต่เนื้อดีรอบ ๆ จะยังอยู่

#### 2.4.6 ผลของรังสีต่อสิ่งมีชีวิต

รังสีที่แผ่ออกจากธาตุกัมมันตรังสีเมื่อผ่านเข้าไปในสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมตามแนวทางที่รังสีผ่านไป ทำให้เกิดผลเสียต่อสิ่งมีชีวิต 2 แบบ คือ

1. ผลของรังสีที่มีต่อร่างกาย คือเกิดเป็นผื่นแดงขึ้นตามผิวหนัง ผม่วรง เซลล์ตาย เป็นแผลเปื่อย เกิดเนื้อเส้นใยจำนวนมากที่ปอด เกิดโรคเม็ดโลหิตขาวมาก เกิดต่อกระดูกขึ้นในนัยน์ตา เป็นต้น ซึ่งผลที่เกิดขึ้นกับร่างกายจะเป็นมากหรือน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณของรังสีที่ได้รับ ส่วนของร่างกายที่ได้ และอายุของผู้ได้รับรังสี ดังนั้นถ้าผู้ได้รับรังสีมีอายุน้อยแล้วอันตรายเนื่องจากรังสีจะมีมากกว่าผู้ที่มีอายุมาก ในทารกแรกเกิดแล้วอาจได้รับอันตรายถึงพิการหรือเสียชีวิตได้ นอกจากนั้นผลของการรับรังสีแบบเฉียบพลัน ซึ่งมักเกิดจากอุบัติเหตุที่ได้รับรังสีปริมาณมากทันที ถ้ามากกว่า 50 เริ่มขึ้นไปจะมีอาการป่วยเนื่องจากรังสี ถ้ามากกว่า 400 เริ่มอาจทำให้ตายได้ ส่วนการรับรังสีเรื้อรังในปริมาณต่าง ๆ เกิดกับผู้ที่มีอาชีพเกี่ยวกับรังสีโดยตรง อาจมีผลทำให้อายุเฉลี่ยสั้นกว่าปกติ เป็นมะเร็งต่อกระดูก เป็นต้น

2. ผลของรังสีที่เกิดขึ้นทางพันธุกรรม คือ เกี่ยวกับระบบเซลล์สืบพันธุ์ เพราะจะทำให้โครโมโซมเกิดการเปลี่ยนแปลง มีผลทำให้อาจเป็นหมันหรือเกิดการแตกเหล่า (Mutation) ซึ่งมีผลกระทบถึงลูกหลานทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงได้

#### 2.4.7 การป้องกันรังสี

รังสีทุกชนิดมีอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต จึงต้องทำการป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสีหรือได้รับแต่เพียงปริมาณน้อยที่สุด ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีแล้ว ควรมีหลักยึดถือเพื่อปฏิบัติดังนี้

1. เวลาของการปล่อยรังสี (time of exposure) โดยใช้เวลาในการทำงานในบริเวณที่มีรังสีให้สั้นที่สุด เพราะปริมาณการปล่อยรังสีจะแปรผันโดยตรงกับเวลาของการปล่อยรังสีออกมา

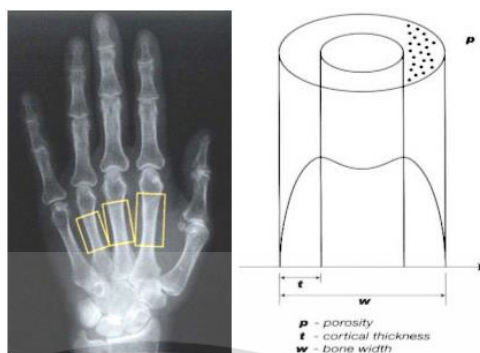
2. ระยะทาง (distance) การทำงานเกี่ยวกับรังสีควรอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีมาก ๆ ทั้งนี้เพราะความเข้มของรังสีจะแปรผกผันกับกำลังสองของระยะห่าง

3. เครื่องกำบัง (shielding) เครื่องกำบังที่วางกันระหว่างคนกับแหล่งกำเนิดรังสีจะดูดกลืนบางส่วนของรังสีหรืออาจจะทั้งหมดเลยก็ได้ ดังนั้นในกรณีที่ต้องทำงานใกล้กับสารกัมมันตรังสี และต้องใช้เวลาในการปฏิบัติงานต้องใช้เครื่องกำบังช่วย เครื่องกำบังที่ดีควรเป็นพวกโลหะหนัก เพราะโลหะหนักจะมีอิเล็กตรอนอยู่เป็นจำนวนมากทำให้รังสีเมื่อวิ่งมาชนกับอิเล็กตรอนแล้วจะสูญเสียพลังงานไปหมด ตัวอย่างของเครื่องกำบัง เช่น แผ่นตะกั่ว แผ่นเหล็ก แผ่นคอนกรีต

## 2.5 วิธีการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก [1]

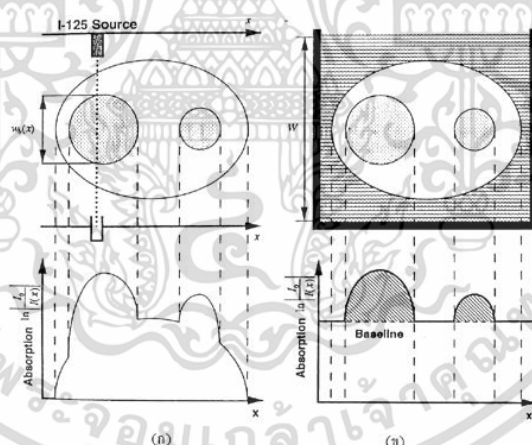
การตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูกสามารถวัดได้หลากหลายวิธีขึ้นอยู่กับรังสีที่เลือกใช้ ไม่ว่าจะเป็นรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ หรือ คลื่นความถี่สูง โดยการเลือกใช้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติและตำแหน่งของกระดูก โดยร่างกายของคนเรานั้นประกอบด้วยกระดูกทึบ (Compact bone) ประมาณร้อยละ 80 และกระดูกเนื้อพรุน (Spongy bone) อีกร้อยละ 20 ซึ่งกระดูกเนื้อพรุนนั้นมีการสร้างและสลายได้เร็วกว่ากระดูกทึบ ดังนั้นกระดูกเนื้อพรุนจึงเป็นกระดูกที่มีความไวสำหรับการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก การวัดมวลกระดูกรูปแบบต่าง ๆ

1. การวัดมวลกระดูกจากภาพถ่ายเอกซ์เรย์ (Routine Radiographic Evaluation of The Skeleton) วิธีนี้จะให้ภาพคุณภาพต่ำ เนื่องจากต้องมีการสูญเสียมวลกระดูกไปประมาณ 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ จึงจะสามารถวินิจฉัยได้
2. การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกจากภาพถ่ายเอกซ์เรย์ของมือ (Photo densitometry)
3. เรดิโอแกรมเมทรี (Radiogrammetry) การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวัดที่กึ่งกลางของกระดูกฝ่ามือ (Metacarpal) ชั้นที่สองของมือข้างที่ไม่ถนัด เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณความหนาแน่นพื้นที่ของกระดูกทึบ โดยวิธีนี้สามารถตรวจได้กับกระดูกที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอกซึ่งมักจะเป็นกระดูกทึบเท่านั้น



รูปที่ 2.11 การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีเรดิโอแกรมเมทรี [1]

4. ซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทีโอเมทรี (Single Photon Absorptiometry: SPA) เป็นวิธีการวัดความหนาแน่นมวลกระดูกที่ใช้การวัดความหนาแน่นมวลกระดูกที่กระดูกข้อมือ เพราะบริเวณที่จะทำการตรวจนั้นจะต้องมีเนื้อเยื่ออยู่รอบ ๆ น้อย และ สม่ำเสมอ ซึ่งในร่างกายคนเราก็จะมีที่บริเวณปลายแขนและสันเท้า โดยรังสีที่ใช้ในการตรวจจะเป็น I-125 หรือ AM-241



รูปที่ 2.12 แสดงหลักการทำงานของซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทีโอเมทรี

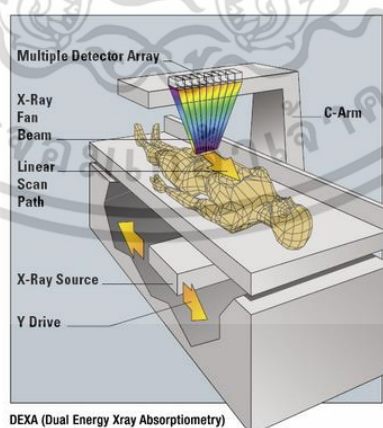
ก.บน แสดงวิธีการสแกนต้นแขนในอากาศ ซึ่งแหล่งกำเนิดรังสีและหัวรับรังสีจะเคลื่อนไปด้วยกัน  
 ก.ล่าง แสดงถึงการดูดกลืนรังสีของการสแกนในภาพ ก.บน  
 ข.บนและล่าง แสดงวิธีการสแกนต้นแขนในน้ำ และแสดงถึงการดูดกลืนรังสีของการสแกน ซึ่งการดูดกลืนรังสีในบริเวณน้ำและเนื้อเยื่อจะเท่ากันใช้เป็น baseline ในการแยกส่วนของกระดูกออกจากเนื้อเยื่อ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ซิงเกิลเอเนอร์จีเอกซ์เรย์แอบซอร์ปทิโอเมทรี (Single Energy X-ray Absorptiometry: SEXA) เป็นวิธีที่ใช้วัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยมีหลักการเช่นเดียวกับวิธีซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรี แต่มีการเปลี่ยนแหล่งกำเนิดจากสารกัมมันตรังสีมาเป็นรังสีเอกซ์เรย์ เพราะสารกัมมันตรังสีนั้นจะมีการสลายตัว แต่เอกซ์เรย์นั้นไม่มีการสลายตัว จึงทำให้แหล่งกำเนิดของวิธีนี้นั้นใช้งานได้ยาวนานกว่า

6. ดูออลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรี (Dual Photon Absorptiometry: DPA) เป็นวิธีที่ใช้หลักการเดียวกับวิธีซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรี แต่จะมีการใช้แหล่งกำเนิดที่ให้รังสี 2 ระดับพลังงาน ซึ่งจะใช้ GD-153 ซึ่งจะให้พลังงาน 40 keV และ 10 keV ซึ่งเนื้อเยื่อและกระดูกจะมีการดูดกลืนรังสีที่ไม่เท่ากัน ที่ต้องปรับมาใช้เป็นสองระดับพลังงานเพราะ วิธีซิงเกิลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรีนั้นไม่สามารถหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูกที่กระดูกสันหลังและกระดูก สะโพกได้อย่างแม่นยำซึ่งจะทำให้สามารถใช้งานได้ครอบคลุมมากกว่า

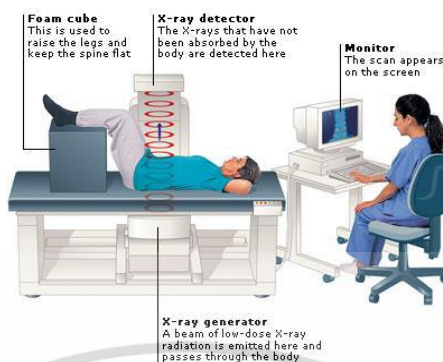
7. ดูออลเอเนอร์จีเอกซ์เรย์แอบซอร์ปทิโอเมทรี (Dual Energy X-ray Absorptiometry: DEXA) เป็นวิธีการวัดมวลกระดูกที่ถูกพัฒนามาจากวิธีดูออลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรี โดยการใช้รังสีเอกซ์ 2 ระดับพลังงาน ซึ่งการใช้รังสีเอกซ์ 2 ระดับพลังงานนั้น จะเพิ่มความคมชัด ให้กับภาพ และใช้เวลาสั้นน้อยกว่าวิธีดูออลโฟตอนแอบซอร์ปทิโอเมทรี ซึ่งวิธีนี้สามารถนำมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูกที่กระดูกสันหลังส่วนเอวกระดูกสะโพก และกระดูกบริเวณส่วนแขนท่อนระหว่างข้อศอกจนถึงข้อมือ โดย นอกจากจะสามารถนำมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูกเพื่อประกอบในการวินิจฉัยโรคกระดูกพรุนแล้วนั้นยังสามารถนำมาใช้ในการทำนายความเสี่ยงของการเกิดกระดูกหัก



รูปที่ 2.13 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (DEXA)

[1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน (DEXA) ที่กระดูกสันหลังส่วนเอว [1]

8. ควอนทิเททีฟอัลตราซาวด์ (Quantitative Ultrasound: QUS) เป็นวิธีที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูก โดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการตรวจ ซึ่งตำแหน่งที่ใช้ในการตรวจนั้นคือตำแหน่งของกระดูกสันหลัง วิธีนี้จะมีทรานสดิวเซอร์ 2 ตัว ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดเสียง และตัวรับสัญญาณเสียง จะมีน้ำหรือเจลเป็นตัวกลางเพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสียสัญญาณเสียง โดยสัญญาณเสียงที่รับได้นั้นจะถูกนำมาเป็นตัวกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เรียกว่า QUS โดยค่าที่จะบ่งชี้ถึงความหนาแน่นมวลกระดูกประกอบด้วย

1. ความเร็วของเสียง (Speed Of Sound) บ่งชี้ถึงความหนาแน่น และความยืดหยุ่น
2. การลดลงของความเข้มเสียง (Broad Band Ultrasound Attenuation) บ่งชี้ความหนาแน่นระดับโมเลกุล การเรียงตัว และความยืดหยุ่นของกระดูก
3. ควอนทิเททีฟอัลตราซาวด์อินเดกซ์ (Quantitative Ultrasound Index: QUI) เป็นตัวช่วยเพิ่มความไวในการตรวจความหนาแน่น ทำนายค่าความยืดหยุ่นและโอกาสการเกิดกระดูกหัก



รูปที่ 2.15 แสดงการตรวจความหนาแน่นมวลกระดูกโดยวิธี QUS [1]

9. ควอนไทเททีฟคอมพิวเตอร์โทโมกราฟี (Quantitative Computed Tomography: QCT) เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยการนำมวลกระดูกที่วัดได้นั้นไปเปรียบเทียบกับเครื่องมือพิเศษที่วางอยู่ใต้ผู้ป่วย ซึ่งการตรวจด้วยวิธีนี้จะถูกวัดเป็นปริมาตร โดยวิธีอื่นมักจะวัดเป็นหน่วยพื้นที่ ทำให้วิธีการวัดวิธีนี้นั้นเป็นวิธีที่ได้รับปริมาณรังสีสูงสุด แต่ผลที่ได้นั้นไม่ได้มีความแตกต่างจากผลจากวิธีที่ใช้รังสีเอกซ์ 2 ระดับพลังงาน ทำให้วิธีนี้ไม่ได้รับความนิยมในการใช้ตรวจวัดค่าความหนาแน่นมวลกระดูก เอกลักษณ์ของวิธีนี้คือสามารถแยกกระดูกทึบและกระดูกเนื้อพรุนได้ ซึ่งประโยชน์ตรงนี้ถูกนำไปใช้ในการดูการเปลี่ยนแปลงของกระดูกพรุนซึ่งจะเห็นการเปลี่ยนแปลงที่ไวกว่าวิธีอื่น

ตารางที่ 2.2 แสดงความแตกต่างของวิธีการตรวจวัดความหนาแน่นมวลกระดูก [1]

วิธีการ	ตำแหน่งกระดูกที่วัด	ความแม่นยำ	เวลาที่ใช้ตรวจและวิเคราะห์ผล (นาที)	ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ ( $\mu\text{sv}$ )
Radiographic Absorptiometry	มือ	1-2	5-10	<1
Single X-Ray Absorptiometry	ข้อมือ กระดูกสันเท้า	1-2	5-10	<1
Dual X-Ray Absorptiometry	กระดูกสันหลัง กระดูกต้นขา ข้อมือ	1-3	5-10	1-10

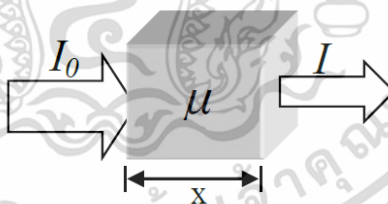
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	กระดูกทั้งร่างกาย			
Quantitative Computed Tomography	กระดูกสันหลัง ข้อมือ กระดูกต้นขา	2-4	10-15	50-100
Quantitative Ultrasound	กระดูกสันเท้านิ้วมือ กระดูกหน้าแข้ง	1-3	5-10	ไม่มี

## 2.6 ทฤษฎีของการวัดหนาแน่นกระดูกโดยใช้เอกซเรย์ 2 ระดับพลังงาน (Dual energy X-ray absorptiometry, DEXA) [1]

### 2.6.1 กฎของแลมเบิร์ต - เบียร์ (Lambert-Beer law)

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง และเป็นรังสีที่สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวขณะที่มันเคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางนั้น เมื่อยังรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานอยู่ในช่วงการวินิจฉัยโรคเข้าไปในตัวกลางใด ๆ เช่น ร่างกายมนุษย์ เป็นต้น จะเกิดปรากฏการณ์สำคัญ ได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และปรากฏการณ์คอมพ์ตัน ทำให้สูญเสียพลังงานไปบางส่วน เมื่อยังรังสีเอกซ์ทะลุผ่านตัวกลางออกมาแล้วจึงมีความเข้มลดลง



รูปที่ 2.16 แสดงการดูดกลืนรังสีเอกซ์ในตัวกลางที่มีความหนา  $x$  [1]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น แบ่งออกเป็น 2 กรณี

1. กรณีที่ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีเพียงค่าเดียว

เป็นการจำลองว่าตัวกลางที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านนั้นมีเพียงชนิดเดียว เมื่อรังสีเอกซ์ที่ระดับพลังงานหนึ่งมีค่าความเข้มเท่ากับ  $I$  เคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่มีความหนา  $X$  ความเข้มของรังสีเอกซ์จะถูกลดทอนเป็นตามกฎของแลมเบิร์ตเบียร์

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (2.3)$$

อินทิเกรตทั้งสองข้าง

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\mu \int_0^X dx \quad (2.4)$$

$$\ln I = \ln I_0 = -\mu \cdot X \quad (2.5)$$

จัดรูปใหม่จะได้สมการที่ (2.6)

$$I = I_0 e^{-\mu X} \quad (2.6)$$

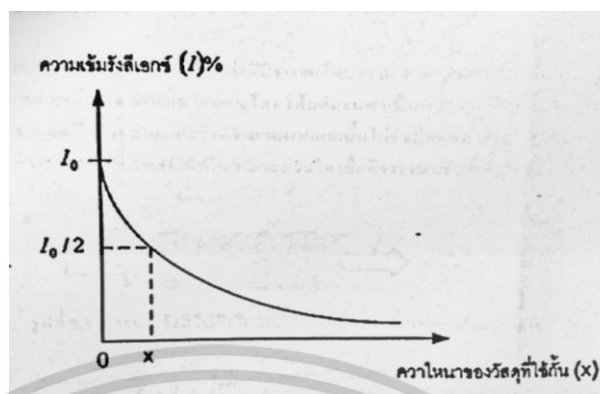
เมื่อ  $I$  คือ จำนวนโฟตอนที่ออกจากวัตถุ

$I_0$  คือ จำนวนโฟตอนที่ฉายเข้าวัตถุ

$\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$X$  คือ ความหนาของวัตถุ

จะเห็นว่าเป็นสมการที่แสดงค่าความเข้มของรังสี เอกซ์ โดยค่าความเข้มของรังสีเอกซ์นั้นจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลดังรูปที่ (2.17) โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดลงแบบเชิงเส้นของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในร่างกายที่รังสีเอกซ์ระดับพลังงานต่างกันแสดงดังตารางที่ (2.3)



รูปที่ 2.17 แสดงกราฟความเข้มของรังสีเอกซ์เมื่อใช้วัสดุกัน [1]

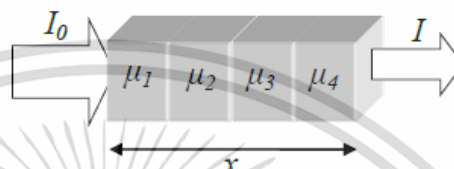
ตารางที่ 2.3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดลงเชิงเส้นของเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในร่างกายมนุษย์ที่ [1]

ชนิดของเนื้อเยื่อ	$\mu \text{ (cm)}^{-1}$		
	60 KeV	84 KeV	122 KeV
กระดูก	0.528	0.464	0.410
เลือด	0.208	0.182	0.163
เกรย์แมตเตอร์	0.212	0.184	0.163
ไวท์แมตเตอร์	0.213	0.187	0.166
ซีเอฟเอส (CFS)	0.207	0.181	0.160
น้ำ	0.206	0.180	0.160
ไขมัน	0.185	0.162	0.144
อากาศ	0.0004	0.0003	0.0002

## 2. กรณีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีหลายค่า

เป็นการอ้างอิงถึงความเป็นจริงของร่างกายมนุษย์ที่เนื้อเยื่อนั้นไม่ได้เป็นชนิดเดียวตลอด ซึ่งทำให้เกิดค่าสัมประสิทธิ์หลายค่า ซึ่งมีความขัดแย้งกับกรณีแรกจึงต้องมีการปรับปรุงทฤษฎีของแลมเบิร์ต-เบียร์ โดยการแบ่งย่อยในส่วนที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่านเป็นชั้นเล็ก ๆ โดยมีการ

อนุโลมว่าในแต่ละชั้นส่วนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนได้เพียงค่าเดียว ซึ่งในแต่ละชั้นไม่จำเป็นต้องมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนค่าเดียวกันขึ้นอยู่กับเส้นทางการเคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อของรังสีเอกซ์ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงการฉายรังสีไปยังวัตถุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนหลายค่า [1]

และทำให้ได้สมการที่ 2.7 ดังนี้

$$I = I_0 e^{-(\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \mu_4) \cdot x} \quad (2.7)$$

หากนำค่าสัมประสิทธิ์เชิงเส้นมาหารด้วยความหนาแน่น จะได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวล มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^2/\text{g}$  จะเขียนได้ดังสมการที่ 2.8

$$I = I_0 e^{-(\mu/\rho) \cdot (\rho x)} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\mu/\rho$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) ของวัตถุ

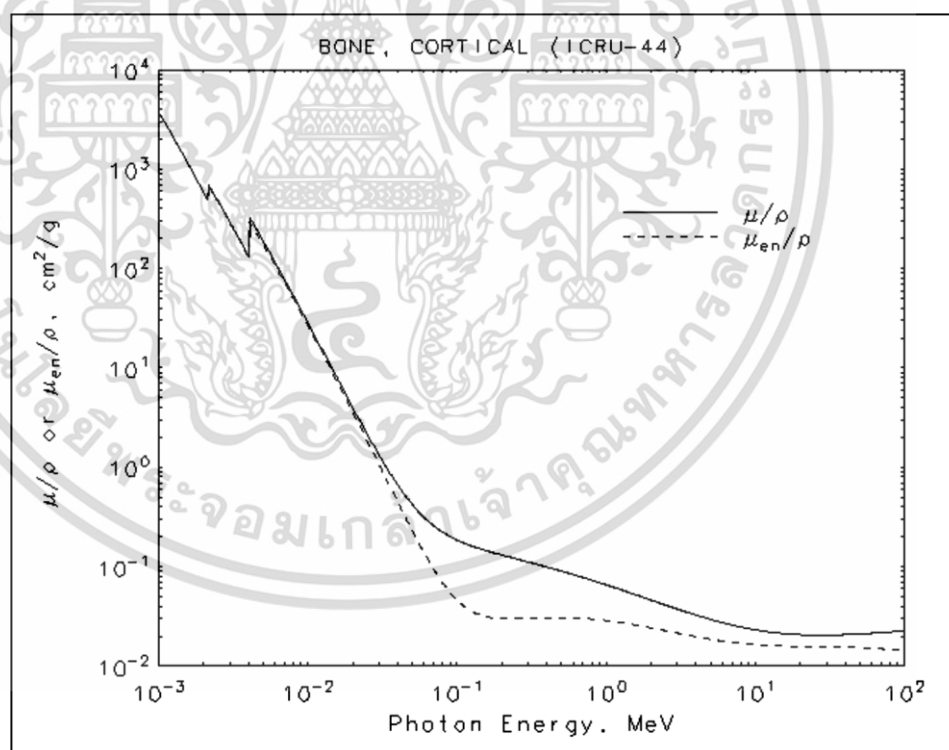
$\rho x$  คือ มวลของวัตถุต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (density thickness) มีหน่วยเป็น  $\text{g}/\text{cm}^2$

โดยค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวลในตัวกลางชนิดเดียวกันที่มีมวลเท่ากันจะมีค่าเท่ากันไม่ว่าจะมีสถานะต่างกัน โดยเราสามารถพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์เชิงมวลของตัวกลางชนิดต่าง ๆ ได้จาก

คณะกรรมการวิชาการ ระหว่างประเทศว่าด้วยหน่วยและการวัดรังสี (ICRU Report : The International Commission On Radiation Units And Measurement)

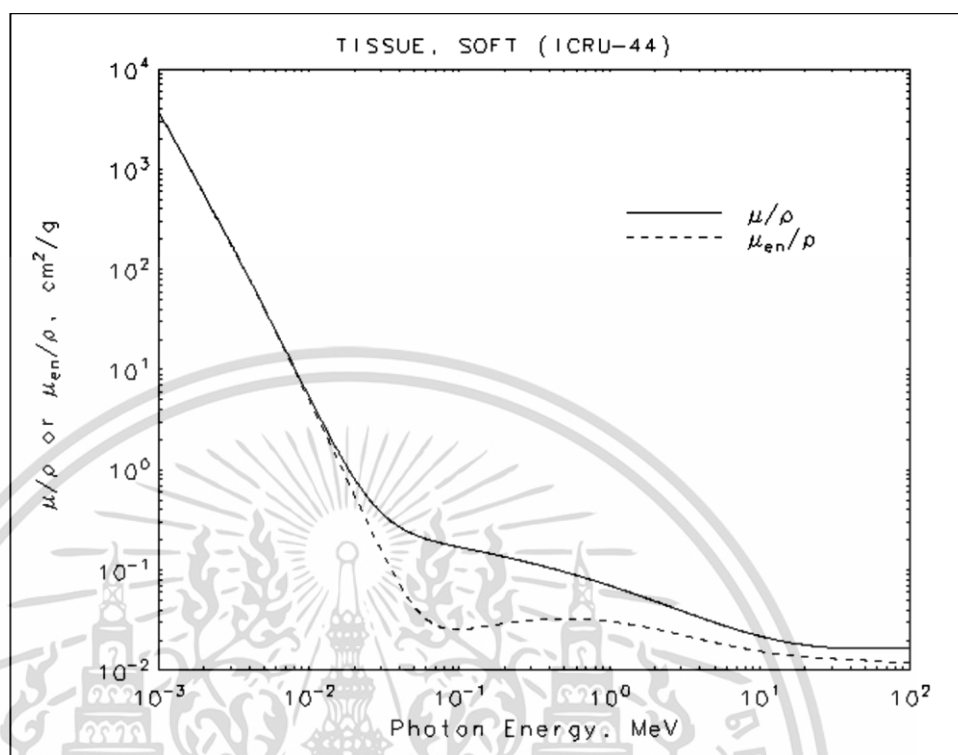
## 2.6.2 หลักการของวิธีดูดกลืนรังสีเอกซ์สองพลังงาน (DUAL ENERGY X-RRAY ABSORPTIOMETRY)

เป็นวิธีการใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงานสลับกันแล้วถ่ายภาพออกมา ซึ่งใช้รังสีเอกซ์พลังงานต่ำสองระดับพลังงาน เพื่อความรวดเร็วและแม่นยำมากยิ่งขึ้น ปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับ มีค่าน้อยกว่าวิธีอื่น สามารถนำไปใช้ในการประเมินเนื้อกระดูกที่ตำแหน่งกระดูกสันหลัง กระดูกแขน และกระดูกขา



รูปที่ 2.19 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของกระดูกที่ระดับพลังงานต่าง ๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของเนื้อเยื่อที่ระดับพลังงานต่าง ๆ [1]

เมื่อเราฉายรังสีเอกซ์ผ่านอวัยวะที่ต้องการ ซึ่งเส้นทางที่รังสีเคลื่อนที่ผ่านนั้นประกอบด้วยกระดูกและเนื้อเยื่อ จากสมการที่ (2.7) จะได้สมการในการคำนวณความเข้มของรังสีนั้นเป็นดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

$$I = I_0 e^{-(\mu_s \rho_s x_s + \mu_b \rho_b x_b)} \quad (2.9)$$

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = (\mu_s \rho_s x_s + \mu_b \rho_b x_b) \quad (2.10)$$

เมื่อใช้รังสีเอกซ์ที่สองระดับพลังงาน สามารถเขียนสมการได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่รังสีเอกซ์ระดับพลังงานต่ำ สมการที่ (2.11)

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^l = (\mu_s \rho_s X_s + \mu_b \rho_b X_b) \quad (2.11)$$

ที่รังสีเอกซ์ระดับพลังงานสูง สมการที่ (2.12)

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^h = (\mu_s \rho_s X_s + \mu_b \rho_b X_b) \quad (2.12)$$

เมื่อ  $X_s$  คือ ความหนาของเนื้อเยื่อ

$X_b$  คือ ความหนาของกระดูก

$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$  คือ ค่าเฉลี่ยของความเข้มภาพเอกซเรย์

$\mu_s$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของเนื้อเยื่อ

$\mu_b$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของกระดูก

ซึ่ง  $\mu_s$  และ  $\mu_b$  สามารถหาได้จากกราฟสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล

และ  $\rho_b X_b$  คือ ค่า BMD ที่เราต้องการ ซึ่งหาได้โดยการลบเอาส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อ

( $\rho_s X_s$ ) ออกเพื่อให้เหลือส่วนของกระดูก ดังนั้นกำหนดค่าคงที่  $k$  ดังนี้

$$k = \frac{\mu_s^l}{\mu_s^h} \quad (2.13)$$

นำสมการที่ (2.12) คูณกับสมการที่ (2.13) จะได้

$$k \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^h = (\mu_s^l \rho_s X_s + k \mu_b^h \rho_b X_b) \quad (2.14)$$

และนำสมการที่ (2.11) ลบด้วยสมการที่ (2.14) จะได้สมการที่ (2.15)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^L - k\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^h = (\mu_b^L \rho_b X_b + k\mu_b^h \rho_b X_b) \quad (2.15)$$

จัดรูปสมการที่ (2.15) ให้อยู่ในรูป  $\rho_b X_b$  จะได้สมการที่ (2.16)

$$\frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^L - k\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^h}{\mu_b^L - k\mu_b^h} = \rho_b X_b \quad (2.16)$$

ซึ่งค่าของ  $\rho_b X_b$  คือ ค่า BMD ในหน่วย  $g/cm^2$  ดังนั้นจะเขียนสมการ BMD ได้ดังสมการที่ (2.17)

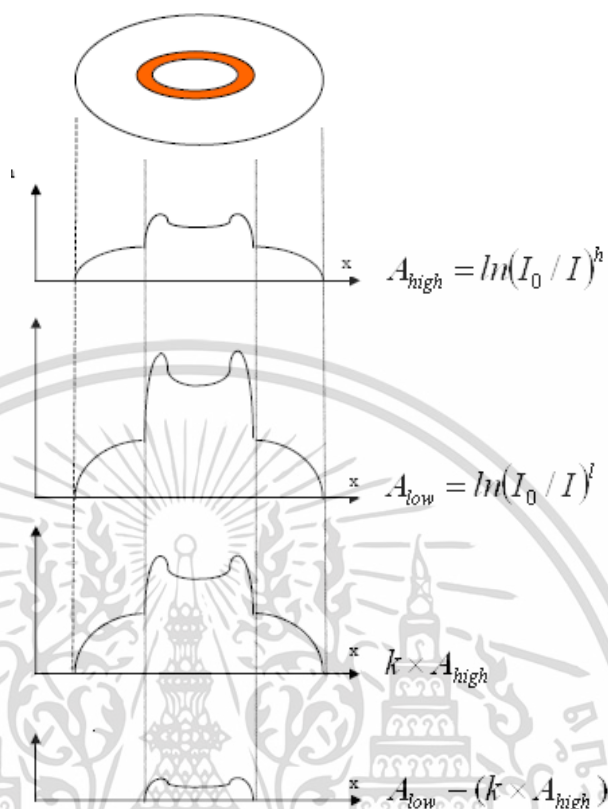
$$BMD = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^L - k\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)^h}{\mu_b^L - k\mu_b^h} \quad (2.17)$$

และค่า BMC หาได้จากค่า BMD ในสมการที่ (2.17) คูณด้วยพื้นที่ดังนี้

$$BMC = BMD \times Area \quad (2.18)$$

BMD คือ ความหนาแน่นของกระดูก (Bone Mineral Density)

BMC คือ ปริมาณแร่ธาตุในกระดูก (Bone Mineral Content)



รูปที่ 2.21 แสดงการกำจัดเนื้อเยื่อที่อยู่รอบ ๆ กระจก [1]

## 2.7 หลักการของกล้องดิจิทัล [1]

หลักการทำงานของกล้องดิจิทัลมีความคล้ายกับกล้อง 35 มิลลิเมตร ที่ใช้ฟิล์มธรรมดาทั่วไป คือ มีเลนส์สำหรับรับแสงที่สะท้อนจากวัตถุ และมีรูปรับแสง (Aperture) ซึ่งสามารถปรับขนาดได้ มีชัตเตอร์สำหรับเปิดรับแสงในปริมาณและนานเท่าใด ส่วนความแตกต่างจะอยู่ที่ตัวรับแสงของกล้อง กล้องดิจิทัลใช้ตัวรับแสงที่เรียกว่าซีซีดี (Charge-Coupled Device) ทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงแทนฟิล์ม และซีซีดีนี้จะมีทางยาวโฟกัสที่สั้น ทำให้ได้มุมมองของภาพ (Angle of View) แคบ เนื่องจากตัวรับภาพมีขนาดเล็กกว่าฟิล์ม กล้องดิจิทัลมีการทำงานเหมือนในขั้นตอนต่าง ๆ ของกล้อง 35 มิลลิเมตร คือ การล้าง อัด ขยาย เอาไว้ในขั้นตอนเดียวกัน

แบตเตอรี่ที่ใช้ในกล้องดิจิทัลมี 2 แบบคือ แบตเตอรี่ที่ใช้ได้ครั้งเดียว และแบตเตอรี่ที่นำกลับมาใช้งานได้โดยการชาร์จ กล้องดิจิทัลจึงมีความสิ้นเปลืองพลังงานมากกว่ากล้อง 35 มิลลิเมตร เนื่องจากกล้องดิจิทัลมีส่วนประกอบของการแสดงผลออกมาทางช่องมองภาพแบบแอลซีดี (LCD) ซึ่งเปรียบได้กับช่องมองภาพของกล้องแบบธรรมดา และหากเป็นกล้องดิจิทัลรุ่นใหม่ที่มีความละเอียดสูงจะมีช่องมองภาพอยู่ทั้ง 2 แบบ คือ ช่องมองภาพแบบออปติคอลและแบบดิจิทัล การทำงานของกล้องดิจิทัลประกอบด้วยระบบต่าง ๆ

### 2.7.1 ระบบซูมภาพในกล้องดิจิทัล

ระบบการซูมภาพในกล้องดิจิทัลมี 2 ชนิดคือ

1. การซูมแบบดิจิทัล (Digital Zoom) เป็นการซูมที่มีอยู่ในกล้องทั่ว ๆ ไป ได้ภาพที่มีคุณภาพพอใช้ได้ แต่หากซูมภาพเข้ามามากเกินไปจะทำให้ความคมชัดของภาพลดลง เนื่องจากไม่ได้เป็นการซูมภาพอย่างแท้จริง แต่เป็นเพียงการขยายภาพให้ใหญ่ขึ้นเท่านั้น และการซูมภาพชนิดนี้จะมีระยะโฟกัสที่สามารถปรับแต่งได้

2. การซูมด้วยเลนส์ (Optical Zoom) เป็นการซูมด้วยเลนส์ของกล้องซึ่งจะได้ภาพที่คมชัด และภาพไม่เบลอเมื่อซูมภาพเข้ามาในระยะใกล้ การซูมแบบนี้นิยมใช้ในการถ่ายภาพระยะใกล้เพราะจะได้ภาพที่ออกมาชัดเจน มีความคมชัดทุกจุด

### 2.7.2 ตัวรับภาพซีซีดี (CCD) และความละเอียดของภาพ

ตัวรับภาพบนกล้องดิจิทัลมี 2 ชนิดคือ ซีซีดี และซีโมส (CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor) กล้องดิจิทัลในปัจจุบันจะใช้ซีซีดีเป็นส่วนใหญ่ ทำหน้าที่เป็นตัวรับแสงของกล้องและรับรู้ระดับของความสว่างหรือเข้มของแสงเท่านั้น แต่ไม่สามารถรับรู้หรือแยกสีได้ ซีซีดีที่รับรู้สีต่าง ๆ ได้จะต้องวางฟิลเตอร์ลงบนชิป ซึ่งกล้องระดับกลางหรือกล้องที่ใช้ทั่วไปนิยมใช้ฟิลเตอร์ 3 สี อาร์จีบี (Red Green Blue) ซึ่งจะวางสลับกันเป็นตารางอย่างเป็นระเบียบ ตัวรับภาพซีซีดีที่บันทึกได้นั้น เรียกว่า ค่าความชัดลึก (Bit Depth) กล้องดิจิทัลทั่วไปสามารถบันทึกค่าความลึกได้ที่ 24 บิต เช่น กล้องที่ใช้ฟิลเตอร์อาร์จีบี จะมีค่าความลึกอย่างละ 8 บิต ได้แก่ R=8 บิต G=8 บิต B=8 บิต ก็ จะได้ค่าความชัดลึกที่ 24 บิต โดยจะเรียกค่าความละเอียดเป็นจำนวนพิกเซล (Pixel) เช่น 5 ล้านพิกเซล 4.1 ล้านพิกเซล และ 3.34 ล้าน-

พิกเซล จำนวนพิกเซลที่มากหมายถึงความคมชัดของภาพที่มีความคมชัดมากขึ้น เนื่องจากสามารถบันทึกรายละเอียดของภาพได้มากขึ้น ซึ่งความละเอียดของภาพจะระบุในคู่มือการใช้งาน กล้องดิจิทัล หรือตรวจสอบได้จากขนาดของภาพสูงสุดที่กล้องสามารถถ่ายได้ เช่น ภาพที่มีขนาด  $2,048 \times 1,536$  เมื่อคูณขนาดทั้งแนวตั้งและแนวนอนทั้ง 2 เข้าด้วยกันจะให้ความละเอียดเท่ากับ  $3,145,728$  ซึ่งจะเป็นค่าพิกเซลโดยประมาณ คือมีความละเอียดประมาณ 3 ล้านพิกเซล

ความละเอียดของภาพจากกล้องดิจิทัลหมายถึงจำนวนพิกเซลที่อยู่บนตัวรับภาพทั้งหมด เป็นการนำจุดที่เป็นสีหลายสีหลาย ๆ จุดมาต่อกันให้ได้เป็นภาพออกมา หากมองโดยทั่วไปจะไม่เห็นความแตกต่างว่าภาพเหล่านั้นมีจุดจำนวนมากต่อกันอยู่ในทางทฤษฎีเรียกภาพนี้ว่า ภาพแบบราสเตอร์ (Raster) หมายถึง ภาพที่นำเอาเม็ดสีจำนวนนับหมื่นนับแสนมาเรียงต่อกันแล้วเกิดเป็นรูป และเมื่อขยายภาพเหล่านั้นออกมาจะพบว่าเม็ดสีจำนวนมากเรียงกันอยู่ ส่วนภาพอีกลักษณะหนึ่งจะเป็นภาพที่เรียกว่า ภาพแบบเวกเตอร์ (Vector) ซึ่งจะไม่มีอยู่ภายในกล้องดิจิทัล เพราะเป็นภาพที่เกิดจากการใช้ซอฟต์แวร์และคอมพิวเตอร์สร้างขึ้นมา เมื่อขยายภาพเข้ามาในระยะใกล้ ๆ จะไม่พบอาการแตกของภาพเลย เนื่องจากภาพแบบเวกเตอร์เกิดจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ ไม่ได้เกิดจากพิกเซลเหมือนกับภาพแบบราสเตอร์

ความละเอียดของภาพจะเป็นตัวกำหนดประเภทของกล้องดิจิทัลได้ 4 ระดับ คือ

1. กล้องความละเอียดต่ำมาก มักจะเป็นกล้องรุ่นเก่า หรือ กล้องประเภทเว็บแคม ซึ่งมีความละเอียดไม่เกิน 3 แสนพิกเซล
2. กล้องความละเอียดต่ำ มีความละเอียดอยู่ที่ประมาณ 3 แสน – 1.5 ล้านพิกเซล
3. กล้องความละเอียดปานกลาง เป็นกล้องที่มีราคาอยู่ในระดับปานกลาง ภาพถ่ายมีคุณภาพพอใช้ได้ มีความละเอียดอยู่ที่ 2.1 – 4 ล้านพิกเซล
4. กล้องความละเอียดสูง มีความละเอียดมากกว่า 4 ล้านพิกเซล ตัวกล้องมีราคาค่อนข้างสูงและมีคุณภาพดี

### 2.8.3 ค่าความไวแสงและความเร็วชัตเตอร์

ค่าความไวแสงของกล้องหรือไอเอสไอ ย่อมาจาก “International Organisation for Standardisation” นั้นจะเป็นความไวในการเปิดรับแสง โดยที่ตัวเลขไอเอสไอมากก็จะมีค่าความไวแสงที่มากตามไปด้วย ถึงแม้ว่าค่าไอเอสไอที่มีค่ามาก ๆ นั้นจะช่วยให้เราสามารถถ่ายภาพในที่ที่มีแสงสว่างน้อย ๆ ได้ แต่มีข้อจำกัดคือ เมื่อนำภาพที่ได้มาขยายดูก็จะเห็นเป็นจุดเล็ก ๆ จำนวนมาก ทำให้ภาพที่มีความหยابพอสมควร

ชัตเตอร์มีหน้าที่เป็นตัวกำหนดการเปิด-ปิดของรูรับแสงว่าจะให้มีการเปิด-ปิดนานมากน้อย เพียงใดเพื่อให้แสงผ่าน การเปิด-ปิดชัตเตอร์นี้เรียกว่า ความเร็วชัตเตอร์ ซึ่งจะวัดเป็นเศษส่วนของวินาที เช่น 1/50 วินาที หรือ 1/500 วินาที ความเร็วของชัตเตอร์ที่มีสัดส่วนมากจะเป็นตัวช่วยให้จับการเคลื่อนไหวของภาพที่ถ่ายให้หยุดนิ่งได้ เช่น การถ่ายภาพรถที่กำลังวิ่งอยู่บนถนน ส่วนความเร็วชัตเตอร์ที่มีสัดส่วนต่ำ เช่น การถ่ายภาพการไหลของน้ำ การถ่ายภาพที่มีความเร็วชัตเตอร์ต่ำควรใช้ขาตั้งกล้องในขณะที่ถ่าย เพราะช่วงเวลาในการเปิดรับแสงจะนาน หากมือไม่นิ่งพอจะทำให้เกิดการเบลอของภาพได้

### 2.8.4 การนำภาพออกจากกล้องดิจิทัล

การนำรูปถ่ายที่ถ่ายมาใช้งานมีวิธีการทำหลายวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของกล้อง กล้องที่ใช้หน่วยความจำแบบภายในที่ไม่สามารถถอดเปลี่ยนได้จะต้องเชื่อมต่อโดยตรงจากกล้องสู่เครื่อง

1. ซูดฮาร์ดแวร์คอกิงสเตชัน (Docking Station) เป็นพอร์ตที่มีการถ่ายโอนข้อมูลสมัยแรกที่มีการเริ่มใช้กล้องดิจิทัลมีลักษณะเป็นฐานสำหรับเสียบตัวกล้องเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ เนื่องจากในยุคนั้นยังไม่มีเก็บข้อมูลประเภทหน่วยความจำแบบแฟลช (Flash Memory)

2. พอร์ตไฟร์ไวร์ (FireWire Port) เป็นพอร์ตที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท แอปเปิล แต่ผู้ผลิตรายอื่น ๆ จะเรียกชื่อต่างกันไป ชื่อเรียกมาตรฐานสากลคือ IEEE1394 แต่ถ้าใช้กับกล้องดิจิทัลวิดีโอจะเรียกว่าพอร์ตดีวี ทั้งนี้พอร์ตดังกล่าวสามารถใช้งานร่วมกันได้ภายใต้มาตรฐานที่ได้กำหนดขึ้นมาพอร์ตไฟร์ไวร์ เป็นพอร์ตความเร็วสูง นิยมใช้ในกล้องวิดีโอดิจิทัลดีวี และกล้องถ่ายภาพดิจิทัลระดับสูง เนื่องจากมีความเร็วสูงถึง 400 ล้านบิตต่อวินาที (400 Mbits/s) มีคุณสมบัติการเชื่อมต่อและใช้งาน (Plug & Play) สามารถต่ออุปกรณ์ได้ 63 ชิ้นต่อ 1 พอร์ต

แต่ไม่เป็นที่นิยมใช้กับกล้องดิจิทัลเนื่องจากราคาแพงและคอมพิวเตอร์ทั่วไปมักจะไม่มีพอร์ตนี้ หากต้องการใช้ต้องติดตั้งการ์ดไฟร์ไวร์เพิ่ม

3. พอร์ตยูเอสบี (Universal Serial Port: USB port) เป็นพอร์ตที่นิยมใช้กับกล้องดิจิทัลมากที่สุดในปัจจุบันเนื่องจากมีความเร็วสูง สามารถถ่ายโอนข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 12 ล้านบิตต่อวินาที (12Mbits/s) และสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ผ่านทางพอร์ตยูเอสบีได้ทันทีโดยไม่ต้องปิดเครื่องก่อน

4. พอร์ตขนาน (Parallel Port) เป็นการเชื่อมต่อสำหรับกล้องดิจิทัลรุ่นเก่า ๆ เพราะมีความเร็วต่ำในการส่งผ่านข้อมูลทำให้เสียเวลาในการอัปโหลดและดาวน์โหลดข้อมูลในแต่ละครั้งเป็นอย่างมาก จึงไม่เป็นที่นิยมใช้มากนัก

5. พอร์ตอนุกรม (Serial port) เป็นพอร์ตแบบเก่า มีความเร็วในการเชื่อมต่อต่ำ นิยมใช้ต่อกับอุปกรณ์ที่ไม่ต้องการความเร็วมากนัก เช่น โมเด็ม และเมาส์ ความเร็วสูงสุดที่ทำได้อยู่ที่ 115,200 บิตต่อวินาที พอร์ตอนุกรมจะอยู่บริเวณด้านหลังเครื่องคอมพิวเตอร์ มีลักษณะเป็นช่องสี่เหลี่ยมคางหมู มีขา 9 ขา (9 pin) อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อกับพอร์ตแบบนี้จะต้องรีสตาร์ทเครื่องก่อนคอมพิวเตอร์จึงจะสามารถมองเห็นอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ได้ทำให้ยุ่งยากในการใช้งาน จึงไม่เป็นที่นิยมใช้

6. พอร์ตเอสซีเอสไอ (SCSI Port) เป็นการเชื่อมต่อโดยใช้การ์ดเอสซีเอสไอ เป็นตัวกลางการเชื่อมต่อ มีความเร็วและเสถียรภาพในการทำงานสูง แต่มีค่าใช้จ่ายสูง

7. การ์ดหน่วยความจำ (Card Adapter) เป็นการเชื่อมต่อที่ต้องใช้การบันทึกแบบหน่วยความจำแบบแฟลช สามารถถอดเปลี่ยนได้ถ่ายโอนข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่านหน่วยความจำแบบแฟลช หาซื้อได้ง่าย การบำรุงรักษาไม่ยุ่งยาก และราคาไม่สูงนัก กล้องดิจิทัลที่มีการบันทึกข้อมูลลงบนตัวเก็บข้อมูลประเภทหน่วยความจำแบบแฟลช สามารถโอนถ่ายข้อมูลได้ 2 แบบคือการส่งข้อมูลโดยตรงจากกล้องเข้าคอมพิวเตอร์โดยตรง และการนำหน่วยความจำแบบแฟลชมาอ่านข้อมูลผ่านทางเครื่องอ่าน ชนิดนั้น ๆ วิธีการรับ-ส่งข้อมูลจากกล้องดิจิทัลไปยังคอมพิวเตอร์นั้นเรียกว่า ดาวน์โหลดและอัปโหลด (Download and Upload) การดาวน์โหลดเป็นการส่งข้อมูล เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์กำลังดึงข้อมูลมาจากกล้องดิจิทัล ส่วนการอัปโหลดเป็นการส่งข้อมูลจากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปยังกล้องดิจิทัล

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีการวิจัย

เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงานและกล้องดิจิตอลควบคุม โดยใช้ราสเบอร์รี่ พาย เป็นเครื่องที่ใช้เพื่อการวินิจฉัยโรคเบื้องต้นเกี่ยวกับโอกาสในการเกิดโรคกระดูกพรุน ในงานวิจัยนี้ได้มีการปรับปรุงและพัฒนาในส่วนของระบบที่ใช้ในการเก็บภาพซึ่งเลือกใช้ ราสเบอร์รี่ พาย เป็นตัวควบคุมระบบ โดยจะส่งข้อมูลไปยังบอร์ดอาร์ดูโน ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์เซอร์โวและรีเลย์ เช่น การควบคุมการเปิด-ปิดแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ การควบคุมการปล่อยรังสีเอกซ์ การควบคุมตำแหน่งของแผ่นอะลูมิเนียมผ่านมอเตอร์เซอร์โว เพื่อสร้างภาพรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน และใช้ในการควบคุมกล้องดิจิตอลแบบเว็บแคมในการบันทึกภาพจากแผ่นฉากเรืองแสงแทนการใช้หน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป

องค์ประกอบหลักของงานวิจัยนี้ประกอบด้วยการทำงาน 4 ส่วน คือ หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ หน่วยรับรังสี หน่วยประมวลผล และหน่วยแสดงผล

#### 3.1 หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Control Unit) [1]

หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ มีส่วนประกอบ ดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray source)

หน่วยควบคุมความต่างศักย์สูง (High Voltage Controller) จะประกอบด้วย ออโตทรานฟอร์มเมอร์ (Autotransformer) ที่ควบคุมการทำงานด้วยระบบมอเตอร์เซอร์โว เพื่อให้ง่ายต่อการควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ออโตทรานฟอร์มเมอร์ทำหน้าที่ปรับแรงดันที่ป้อนให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูง (High voltage transformer) หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงเป็นส่วนที่มีสำเร็ภายในหลอดรังสีเอกซ์ หลอดรังสีเอกซ์ที่ใช้จะใช้หลอดที่มีกำลังไม่สูงนัก เช่น หลอดรังสีเอกซ์สำหรับถ่ายฟันซึ่งมีขนาดโฟคอลสปอต (Focal Spot) เล็ก มีระบบหล่อเย็นเพื่อถ่ายเทความร้อนจากหัวหลอดรังสีเอกซ์ หน่วยสวิตช์เปิดปิดการจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงจะใช้อุปกรณ์ประเภทเอสซีอาร์ (SCR) ซึ่งทนกระแสได้สูง หน่วยควบคุมกระแสไส้หลอด (Tube

current) ประกอบด้วยอุปกรณ์ประเภทรีโอสตัท (ตัวต้านทานปรับค่าได้) และหม้อแปลงแบบลดแรงดัน (step-down transformer) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยหน่วยป้องกันอันตรายจากไส้หลอดขาดอันเกิดจากกระแสเกินพิกัด หน่วยป้องกันการโอเวอร์โวลตประกอบด้วยวงจรประเภทลอลจิกซึ่งจะควบคุมไม่ให้เกิดการตั้งพารามิเตอร์ของการถ่ายรังสีเอกซ์อันได้แก่ ความต่างศักย์สูง กระแสไส้หลอด และเวลาที่ใช้ปลดปล่อยรังสี สูงเกินกว่าความสามารถของหลอดรังสีเอกซ์อันจะก่อให้เกิดความเสียหายได้

ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำเลือกใช้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ที่ผลิตจากบริษัท อินเตอร์คอร์ปอเรชัน จำกัด ประเทศเกาหลี ดิจิเมด (DigiMed) รุ่น DIOX-602P ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นเครื่องผลิตรังสีเอกซ์ที่มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีฟังก์ชันการทำงานที่มีประสิทธิภาพ ปริมาณรังสีที่ผู้ใช้ได้รับมีปริมาณไม่มากนัก จึงทำให้ผู้ใช้งานไม่ได้รับอันตรายจากรังสีเอกซ์ภาพที่ได้มีความคมชัด หลอดรังสีเอกซ์ขนาด 2 มิลลิแอมแปร์ โฟคอลสปอต 0.8 มิลลิเมตร น้ำหนักสุทธิ 1.8 กิโลกรัม มีปุ่มปรับค่าและจอแสดงผลบนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่

3.2



รูปที่ 3.1 แสดงแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในงานวิจัย [1]



รูปที่ 3.2 แสดงปุ่มปรับค่าและจอแสดงผลบนแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์

หน่วยควบคุมการทำงานจะถูกควบคุมผ่านซอฟต์แวร์ ประกอบไปด้วยบอร์ดอาร์ดูโน (Arduino Board) เชื่อมต่อกับหน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ คือโมดูลรีเลย์ ที่ทำหน้าที่ควบคุมการปล่อยรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิด และทำหน้าที่เปรียบเสมือนสวิตช์เปิด - ปิดของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ผ่านโมดูลรีเลย์ 3 ช่อง และใช้บอร์ดอาร์ดูโนในการควบคุมตำแหน่งของแผ่นอะลูมิเนียมผ่านมอเตอร์เซอร์โวเพื่อสร้างภาพรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน

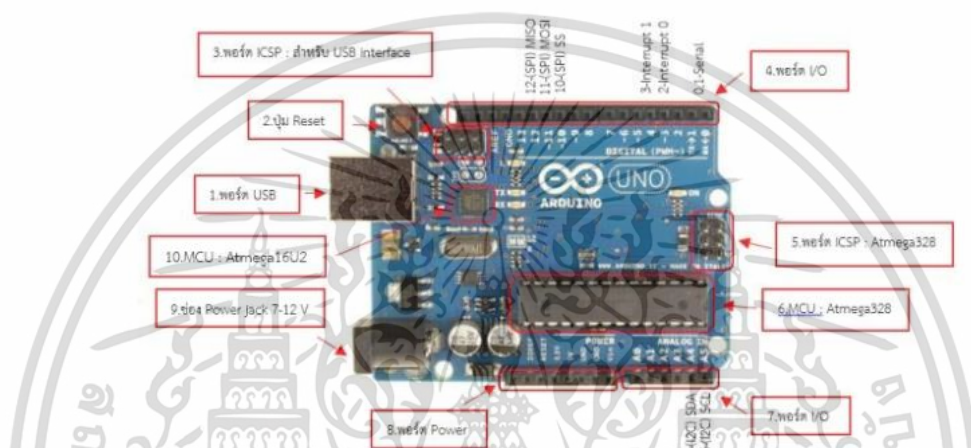
### 3.1.2 บอร์ดอาร์ดูโน (Arduino Board) [8]

บอร์ดอาร์ดูโน (Arduino Board) เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) หรือหน่วยประมวลผลขนาดเล็ก โดยใช้เอวีอาร์ (AVR) ขนาดเล็กเป็นตัวประมวลผลและสั่งงาน เหมาะสำหรับนำไปใช้ในการศึกษาเรียนรู้ระบบไมโครคอนโทรลเลอร์ และนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการควบคุมอินพุต เอาท์พุต (Input/output) ได้มากมายทั้งแบบดิจิทัล (Digital) และแอนะล็อก (Analog) เช่น การรับค่าจากสวิตช์ (Switch) หรืออุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) รวมไปถึงการควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น แอลอีดี (LED) หลอดไฟ มอเตอร์ รีเลย์ ฯลฯ โดยส่วนประกอบ และขาพอร์ตแสดงดังรูปที่ 3.3 การพัฒนาสามารถทำได้ง่าย สามารถใช้คำสั่งเขียนโปรแกรมได้เหมือนโปรแกรมภาษาขั้นสูงทั่วไป อาร์ดูโนมีจุดเด่นทั่วไป ดังนี้

- ราคาไม่แพง เนื่องจากมีซอร์สโค้ด (Source Code) และวงจรแจกให้ฟรี สามารถต่อวงจรขึ้นมาใช้งานได้เอง
- โปรแกรมที่ใช้พัฒนาของอาร์ดูโนรองรับการทำงานทั้งระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์แบบวินโดวส์ (Window) และลินุกซ์ (Linux)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- มีรูปแบบคำสั่งที่ง่ายต่อการใช้งานแต่สามารถนำไปใช้งานที่มีความซับซ้อนได้ และยังสามารถสร้างคำสั่งและไลบรารี (library) แบบใหม่ขึ้นมาใช้งานได้
- มีการเปิดเผยวงจรและซอร์สโค้ด (Source Code) ทั้งหมดทำให้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพิ่มเติมได้ตามความต้องการทั้งฮาร์ดแวร์ (Hardware) และซอฟต์แวร์ (Software)



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบและขาพอร์ตของบอร์ดอาร์ดูโน (Arduino board) [8]

1. ยูเอสบี พอร์ต (USB Port) : ใช้สำหรับต่อกับคอมพิวเตอร์ เพื่ออัปโหลด (upload) โปรแกรมเข้าเอ็มซียู (MCU) และจ่ายไฟให้กับบอร์ด
2. ปุ่มรีเซ็ต (Reset Button) : เป็นปุ่มรีเซ็ต ใช้กดเมื่อต้องการให้เอ็มซียู เริ่มการทำงานใหม่
3. ไอซีเอสพี (ICSP Port) ของ Atmega16U2 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรมมิววลคอมพอร์ต (Visual Com port) บน Atmega16U2
4. อินพุต/เอาต์พุต พอร์ต (I/O Port) : ดิจิทัลอินพุต/เอาต์พุต (Digital I/O) ตั้งแต่ขา D0 ถึง D13 นอกจากนี้ บางขาจะทำหน้าที่อื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น Pin 0,1 เป็นขา Tx,Rx Serial, Pin 3,5,6,9,10 และ 11 เป็นขา PWM
5. ไอซีเอสพี (ICSP Port) ของ Atmega328 เป็นพอร์ตที่ใช้โปรแกรม Bootloader
6. เอ็มซียู (MCU) : Atmega328 เป็นเอ็มซียูที่ใช้บนบอร์ดอาร์ดูโน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. อินพุท/เอาต์พุท พอร์ต (I/O Port) : นอกจากจะเป็นดิจิทัลอินพุท/เอาต์พุท (Digital I/O) แล้ว ยังเปลี่ยนเป็นช่องรับสัญญาณแอนะล็อก ตั้งแต่ ขา A0-A5
8. พอร์ตไฟเลี้ยง: ไฟเลี้ยงของบอร์ดเมื่อต้องการจ่ายไฟให้กับวงจรภายนอก ประกอบด้วยขา ไฟเลี้ยง +3.3 โวลต์, +5 โวลต์, กราวด์, Vin
9. ช่องจ่ายไฟ: รับไฟจากอะแดปเตอร์ (Adapter) โดยที่แรงดันอยู่ระหว่าง 7-12 โวลต์
10. เอ็มซียู (MCU) ของ Atmega16U2 เป็นเอ็มซียูที่ทำหน้าที่เป็น USB to Serial โดย Atmega328 จะติดต่อกับคอมพิวเตอร์ ผ่าน Atmega16U2

### 3.1.2.1 โปรแกรมอาร์ดูโน ไอดีอี (Arduino IDE)

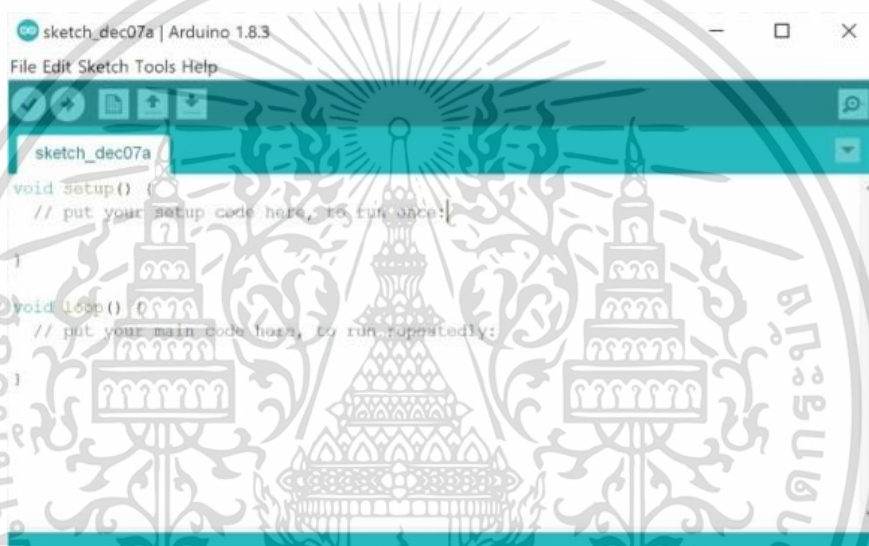
โปรแกรมอาร์ดูโน ไอดีอี (Arduino IDE) คือ เครื่องมือการเขียนโปรแกรมที่ใช้งานกับบอร์ดอาร์ดูโนได้ทุกรุ่น โดยภายในจะมีเครื่องมือที่จะเป็นส่วนสำหรับติดต่อกับบอร์ดอาร์ดูโน เช่น การค้นพอร์ตอาร์ดูโนที่ติดต่อกับเครื่องคอมพิวเตอร์ การเลือกรุ่นพอร์ตอาร์ดูโนที่เชื่อมต่ออยู่เพื่อตรวจสอบว่าขนาดของโปรแกรมที่เขียน หรือไลบรารีต่าง ๆ ที่สามารถใช้งานกับบอร์ดอาร์ดูโนได้อีกทั้งยังมีโปรแกรมติดต่อผ่านซีเรียล (serial) โดยตรงสำหรับคอมพิวเตอร์

### 3.1.2.2 โปรแกรมภาษาซีพลัสพลัส (C++) ในอาร์ดูโน ไอดีอี

โปรแกรมภาษาของอาร์ดูโน ไอดีอี ใช้ภาษาซีพลัสพลัส (C++) ซึ่งมีโครงสร้างของตัวภาษาโดยรวมใกล้เคียงกับภาษาซี (C) มาตรฐานแอนซี-ซี (ANSI-C) เพียงแต่ได้มีการปรับปรุงรูปแบบการเขียนโปรแกรมบางส่วนจากแอนซี-ซี เล็กน้อยเพื่อช่วยลด ความยุ่งยากในการเขียนโปรแกรมและให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเขียนโปรแกรมได้ง่ายและสะดวกมากขึ้นกว่าการเขียนตามแบบมาตรฐานของแอนซี-ซี โดยตรง

ภาษาซีของอาร์ดูโน ไอดีอี (Arduino IDE) จัดแบ่งรูปแบบโครงสร้างของการเขียนโปรแกรมออกเป็นหลายส่วน โดยเรียกแต่ละส่วนว่า “ฟังก์ชัน” เมื่อนำฟังก์ชันมารวมเข้าด้วยกัน จะเรียกว่า “โปรแกรม” โดยในโครงสร้างการเขียนโปรแกรมของอาร์ดูโน ไอดีอี ทุกโปรแกรมต้องประกอบไปด้วยฟังก์ชันอย่างน้อยที่จำนวน 2 ฟังก์ชัน คือ Void setup() เป็นฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีในทุกโปรแกรม แม้ในบางโปรแกรมไม่จำเป็นต้องใช้งานแต่จำเป็นต้องประกาศไว้

ด้วยเสมอ เพียงแต่ไม่เขียนคำสั่งไว้ในวงเล็บที่ใช้เป็นตัวกำหนดขอบเขตของฟังก์ชัน ฟังก์ชัน setup() ใช้สำหรับบรรจุคำสั่งในส่วนที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานเพียงรอบเดียวในตอนเริ่มต้นของโปรแกรม void loop() เป็นส่วนของฟังก์ชันบังคับที่ต้องกำหนดให้มีใน ทุก ๆ โปรแกรม เช่นเดียวกับฟังก์ชัน void setup() โดยฟังก์ชัน void loop() นี้ใช้บรรจุคำสั่งที่ต้องการให้โปรแกรมทำงานวนรอบซ้ำกัน ซึ่งถ้าเปรียบเทียบกับรูปแบบของแอนซี-ซี ส่วนนี้ก็คือฟังก์ชัน main() แสดงดังรูปที่ 3.4



```

sketch_dec07a | Arduino 1.8.3
File Edit Sketch Tools Help
sketch_dec07a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}

```

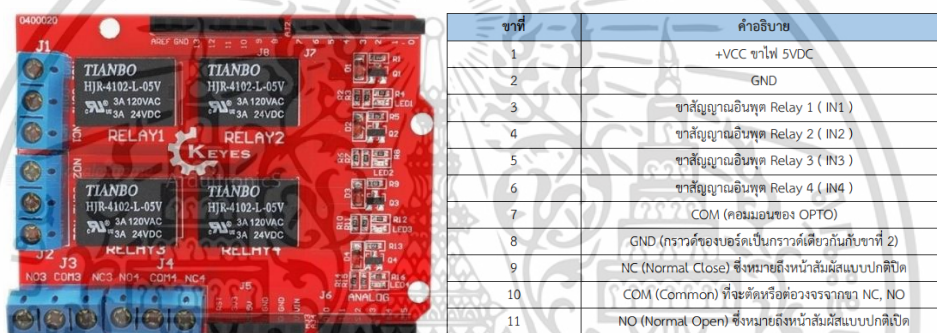
รูปที่ 3.4 - รูปแบบการเขียนโปรแกรมอาร์ดูโน้ ไอดีอี (Arduino IDE) [8]

### 3.1.2 โมดูลรีเลย์ (Relay Module) [9]

หลักการทํางานวงจรของโมดูลรีเลย์ ใช้การเปิด - ปิดวงจรด้วยแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อขดลวดเหนี่ยวนำมีกระแสไหลผ่านจะมีคุณสมบัติเป็นแม่เหล็ก สามารถส่งแรงผลักหรือดูดเพื่อเปลี่ยนตำแหน่งสวิตช์ได้ จึงสามารถนำรีเลย์ไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมวงจรไฟฟ้าต่าง ๆ โดยมีส่วนเชื่อมต่อฝั่งเอาต์พุตที่สามารถใช้กับโหลดได้ทั้งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง และกระแสสลับ โดยใช้สัญญาณในการควบคุมการทำงานด้วยสัญญาณลอจิกทีทีแอล (TTL)

### คุณสมบัติ (Features)

- รีเลย์เอาต์พุตแบบเอสพีดีที (SPDT) จำนวน 4 ช่อง
- สั่งงานด้วยระดับแรงดันที่ต่ำ
- หน้าสัมผัสฝั่งเอาต์พุตของรีเลย์รับแรงดันได้สูงสุด 250 VAC 10 A, 30 VDC 10 A
- มีไฟแอลอีดีแสดงสถานะการทำงานของรีเลย์และแสดงสถานะของบอร์ด
- มีจัมป์เปอร์สำหรับเลือกว่าจะใช้กราวด์ร่วมหรือแยก
- มีออปโต-ไอโซเลเตอร์ (Opto-Isolator) เพื่อแยกกราวด์ส่วนของสัญญาณควบคุมกับไฟฟ้าที่ขับรีเลย์ออกจากกัน



รูปที่ 3.5 แสดงภาพและขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อของโมดูลรีเลย์ 4 ช่อง [9]

ภายในรีเลย์จะประกอบไปด้วยขดลวดและหน้าสัมผัส โดยที่หน้าสัมผัส NC (Normally Close) เป็นหน้าสัมผัสปกติปิดในสภาวะปกติหน้าสัมผัสนี้จะต่อเข้ากับขา COM (Common) และจะลดยหรือไม่สัมผัสกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด ส่วนหน้าสัมผัส NO (Normally Open) เป็นหน้าสัมผัสปกติเปิด โดยในสภาวะปกติจะลดยอยู่ ไม่ถูกต่อกับขา COM (Common) แต่จะเชื่อมต่อกันเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวด

ขา COM (Common) เป็นขาที่ถูกใช้ใช้งานร่วมกันระหว่าง NC และ NO ขึ้นอยู่กับว่าขณะนั้นมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดหรือไม่ หน้าสัมผัสในรีเลย์ 1 ตัว อาจมีมากกว่า 1 ชุด ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและสวิตช์จะถูกแยกประเภทตามจำนวน Pole และจำนวน Throw ซึ่งจำนวน Pole (SP-Single Pole, DP-Double Pole, 3P-Triple Pole, etc.) จะบอกถึงจำนวนวงจรที่ทำการเปิด-ปิด หรือ จำนวนของขา COM นั้นเอง และจำนวน Throw (ST, DT) จะบอกถึง

จำนวนของตัวเลือกของ Pole ตัวอย่างเช่น SPST- Single Pole Single Throw สวิตช์จะสามารถเลือกได้เพียงอย่างเดียวโดยจะเป็นปกติเปิด (NO-Normally Open) หรือปกติปิด (NC-Normally Close) แต่ถ้าเป็น SPDT- Single Pole Double Throw สวิตช์จะมีหนึ่งคู่เป็นปกติเปิด (NO) และอีกหนึ่งคู่เป็นปกติปิดเสมอ (NC) ซึ่งขาที่ใช้ในการเชื่อมต่อของโมดูลรีเลย์ 4 ช่อง แสดงดังรูปที่ 3.5

### 3.1.3 มอเตอร์เซอร์โว (Servo motor) [10]

มอเตอร์เซอร์โว (Servo motor) คือ มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) ที่ถูกประกอบร่วมกับชุดเกียร์และส่วนควบคุมต่าง ๆ ไว้เป็นโมดูลเดียวกัน โดยจะมีสายไฟสำหรับต่อใช้งาน 3 เส้นด้วยกันคือ สายสัญญาณควบคุม 1 เส้น และสายแหล่งจ่ายไฟ 2 เส้นซึ่งเป็นสายไฟบวกและสายกราวด์ ส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์เซอร์โว แสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์เซอร์โว [6]

มอเตอร์เซอร์โวสามารถถูกควบคุมให้หมุนไปทางซ้ายหรือไปทางขวาได้จาก +90 องศา - 90 องศา (180 องศา) โดยสามารถสั่งงานในการหมุนให้หมุนไปได้ตามองศาต่าง ๆ ที่ต้องการได้ด้วยตัวของมอเตอร์เซอร์โวเอง โดยการป้อนสัญญาณความกว้างของพัลส์ หรือ Pulse width modulation (PWM) ให้กับมอเตอร์เซอร์โวซึ่งจะได้ทิศทางการหมุนและตำแหน่งของการหมุนตามที่ต้องการ เช่น ต้องการหมุน 1 องศา หรือ 15 องศา ก็ได้ ซึ่งไม่ต้องมีส่วนควบคุมหรือเซ็นเซอร์ใด ๆ กลับมาตรวจสอบอีก ทำให้ง่ายและสะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ มอเตอร์เซอร์โวสามารถใช้งานกับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 4 - 6 โวลต์ ขึ้นอยู่กับ

คุณสมบัติของมอเตอร์ แต่ละตัวทำให้มอเตอร์หมุนได้ 180 องศา และสามารถปรับแต่งให้มอเตอร์เซอร์โวสามารถหมุนได้รอบตัวหรือ 360 องศาได้

## 3.2 หน่วยรับรังสี (Receptor Unit) [1]

ในงานวิจัยนี้หน่วยรับรังสี จะประกอบด้วย ฉากรับรังสีและกล่องดิจิตอล ซึ่งกระบวนการทำงานของหน่วยรับรังสี คือเมื่อฉากรับรังสีโดนรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดก็จะเกิดการเรืองแสงขึ้น และใช้กล่องดิจิตอลทำหน้าที่ในการเก็บภาพที่เกิดขึ้นบนฉาก แล้วจึงนำไปประมวลผลต่อไป

### 3.2.1 ฉากรเรืองแสง (Intensifying screen)

ฉากเรืองแสง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทั่วไปในทางการแพทย์ มีลักษณะเป็นแผ่นคล้ายแผ่นพลาสติก สีขาว ความหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.7 โดยจะเปลี่ยนจากรังสีเอกซ์ที่มากกระทบไปเป็นแสงที่เรือง การถ่ายภาพรังสีเอกซ์จากฉากเรืองแสงจะช่วยเพิ่มความคมชัดให้กับภาพ

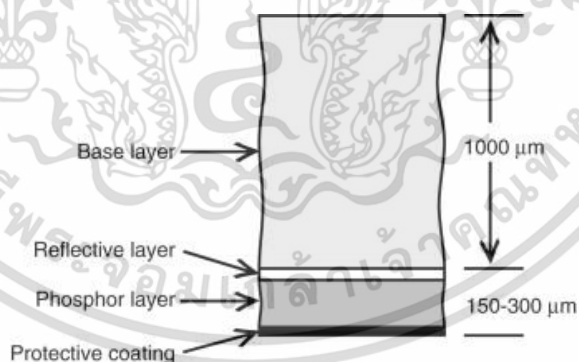
ส่วนประกอบในฉากเรืองแสงนั้น แสดงในรูปที่ 3.8 จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 4 ชั้น ได้แก่

1. พื้นรองรับ (Base) ทำด้วยกระดาษอัดหรือพลาสติกโพลีเอสเตอร์หนาประมาณ 7 มิลลิเมตร
2. แผ่นสะท้อนแสง (Reflective Layer) แสงเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับฟอสฟอรัสที่เคลือบอยู่นั้นจะถูกปล่อยออกมาทุกทิศทุกทาง แผ่นสะท้อนแสงนี้จะช่วยสะท้อนแสงจากด้านพื้นรองรับไปยังด้านหน้าฉาก สารสะท้อนแสงนี้จะทำด้วยวัสดุสีขาว เช่น ไทเทเนียมไดออกไซด์ และฉาบลงบนพื้นรองรับ
3. แผ่นเรืองแสง (Phosphor Layer) โดยชั้นของแผ่นเรืองแสงนี้จะประกอบด้วยผลึกของสารเรืองแสงที่แขวนลอยอยู่ในพลาสติกความหนาประมาณ 1 ถึง 4 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับค่าความไวของฉาก

4. ชั้นพลาสติกเคลือบเพื่อป้องกันผิว (Protective coating) ชั้นของพลาสติกเคลือบเพื่อป้องกันผิวส่วนใหญ่แล้วจะใช้สารประเภทเซลลูโลสหนาประมาณ 0.7 ถึง 0.8 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิต ป้องกันผิว และสามารถทำความสะอาดได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อชั้นฉากรีเอียงแสง



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของฉากรีเอียงแสง



รูปที่ 3.8 แสดงส่วนประกอบในฉากรีเอียงแสง [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 กล้องดิจิทัล (Digital Camera)

ภาพที่ถ่ายได้จากกล้องจะถูกบันทึกแบบดิจิทัลโดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภายในกล้องจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ภาพซึ่งสามารถส่งเข้าไปยังคอมพิวเตอร์ เพื่อพิมพ์ออกมาเป็นภาพ หรือ สามารถนำไฟล์ภาพไปประมวลผลภาพเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ก็ได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้กล้องดิจิทัลในการบันทึกภาพการเรืองแสงของฉากเรืองแสงเมื่อได้รับรังสีเอกซ์ แล้วนำไฟล์ภาพที่ได้ไปประมวลผลต่อไป

กล้องที่ใช้ในการบันทึกภาพเป็นกล้องเว็บแคม OKER รุ่น OKER WEB CAMERAS 177 ดังแสดงในรูปที่ 3.9 มาเป็นตัวรับภาพถ่ายรังสี ซึ่งเป็นกล้องดิจิทัลที่มีใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน มีความคมชัดของภาพระดับ HD 1050P มีความละเอียด 16 ล้านพิกเซล มีความเร็วในการจับภาพ 60 เฟรมต่อวินาที และมีค่ารับแสงที่ 2.0 คุณสมบัติในการเลือกกล้องดิจิทัลชนิดเว็บแคมมาใช้ คือ การถ่ายภาพ วิดีโอได้ดี มีขนาดเล็ก และราคาไม่สูง ภาพที่ได้มีความละเอียดที่ดี มองเห็นส่วนต่าง ๆ ชัดเจน คุณสมบัติต่อมาคือค่ารับแสง เพราะค่ารับแสงมีผลต่อความคมชัดของภาพหากเราใช้กล้องที่มีค่ารับแสงสูงมาก ๆ ภาพที่ได้ก็จะชัดทุกส่วน ทำให้ไม่สามารถโฟกัสส่วนใดส่วนหนึ่งของภาพได้ และความเร็วในการเก็บภาพ (ความสามารถในการเก็บภาพได้รวดเร็ว) เนื่องจากระยะเวลาที่รังสีจะปล่อยจากแหล่งกำเนิดไปกระทบแผ่นเรืองแสงปรากฏให้สามารถเก็บภาพได้มีระยะเวลาอันน้อยมาก การที่กล้องมีความสามารถในการเก็บภาพได้รวดเร็วนั้น ก็จะทำให้ได้ภาพถ่ายรังสีที่คุณภาพมากยิ่งขึ้น [11]



รูปที่ 3.9 กล้องดิจิทัล OKER รุ่น OKER WEB CAMERAS 177 [11]

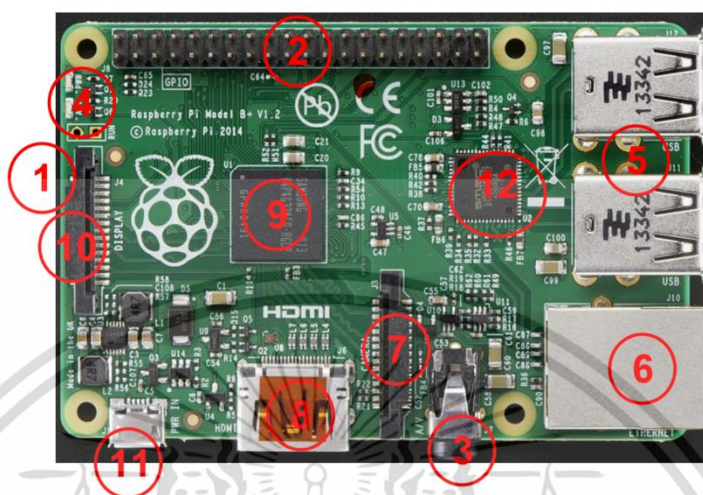
### 3.3 หน่วยประมวลผล (Processing Unit)

ในงานวิจัยนี้หน่วยประมวลผลจะใช้ราสเบอร์รี่ พาย (Raspberry Pi) เป็นบอร์ดคอมพิวเตอร์ขนาดเล็ก (Single-Board Computer หรือ SBC) 32 บิต ซึ่งมีขนาด 85 มิลลิเมตร x 56 มิลลิเมตร ซึ่งรองรับระบบปฏิบัติการลินุกซ์ (Linux Operating System) ได้หลายระบบ เช่น ระบบปฏิบัติการราสเบียน (Raspbian) ระบบปฏิบัติการเดเบียน (Debian) ระบบปฏิบัติการเฟดอรา (Fedora) เป็นต้น โดยติดตั้งบนเอสดีการ์ด (SD Card) บอร์ดราสเบอร์รี่ พายนี้ออกแบบมาให้มี ซีพียู (Central Processor Unit: CPU), จีพียู (Graphics Processing Unit: GPU) และแรม (Random Access Memory: RAM) อยู่ภายในชิปเดียวกัน มีจุดเชื่อมต่อ (General Purpose Input/Output: GPIO) ให้ผู้ใช้สามารถนำไปใช้ร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ ได้อีกด้วย ด้วยเป็นบอร์ดที่มีราคาไม่แพง ใช้งานง่าย เมื่อเทียบกับบอร์ดอื่นๆ จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการเริ่มต้นจึงทำให้เป็นที่นิยม รู้จักกันอย่างแพร่หลายไปอย่างรวดเร็ว [8]

#### 3.3.1 คุณสมบัติทางเทคนิคของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย

- 1) ใช้ชิพ Soc Broadcom BCM2835 ซึ่งรวม ซีพียู (CPU), จีพียู (GPU) และ SDRAM ไว้ในตัวถังเดียวกัน
- 2) หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) 700 MHz ARM1176JZF-S core
- 3) หน่วยประมวลผลภาพ (GPU) Broadcom VideoCore IV, OpenGL ES2.0, OpenVG 1080P30 H.264 High-Profile Encode/decode
- 4) หน่วยความจำ SDRAM 512 เมกะบิต
- 5) ขั้วต่อ USB2.0 จำนวน 4 พอร์ต
- 6) ขั้วต่อสัญญาณภาพแบบแจ๊ค RCA และ HDMI เลือกใช้อย่างใดอย่างหนึ่ง
- 7) ขั้วต่อสัญญาณเสียงโดยใช้แจ๊ค 3.5 มิลลิเมตร หรือผ่านทางเอชดีเอ็มไอ (HDMI)
- 8) คอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่ออินพุตเอาต์พุต (GPIO) และ UART (GPIO ต่าง ๆ ไม่สามารถรับแรงดันอินพุต 5 VDC ได้สูงสุดได้แค่ 3.3 VDC เท่านั้น)
- 9) ระบบปฏิบัติการบอร์ดจะทำงานผ่านเอสดีการ์ด (SD CARD)
- 10) ขั้วต่อ LAN 10/100 Mbps.
- 11) ไฟเลี้ยงบอร์ด 5 VDC กระแสอย่างน้อย 700 มิลลิแอมแปร์
- 12) ขนาดบอร์ด 85.0 x 56.0 มิลลิเมตร

### 3.3.2 ส่วนประกอบของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย



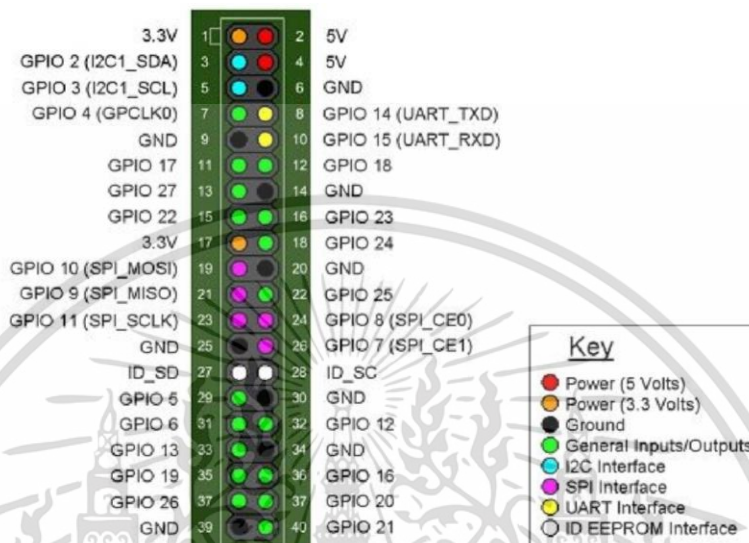
รูปที่ 3.10 แสดงส่วนประกอบของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี [12]

จากรูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี มีรายละเอียดดังนี้

- 1) คอนเน็คเตอร์ SD CARD ซึ่งจะติดตั้งอยู่ที่บอร์ด
- 2) คอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่ออินพุตเอาต์พุต (GPIO) และ UART ตำแหน่งขาต่างๆ
- 3) คอนเน็คเตอร์ต่อสัญญาณเสียงโดยใช้แจ็ก 3.5 มิลลิเมตร
- 4) แอลอีดี (LED) แสดงสถานะต่างๆ ของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย
- 5) คอนเน็คเตอร์ยูเอสบี (USB) 2.0 จำนวน 4 พอร์ต
- 6) คอนเน็คเตอร์แลน (LAN) 10/100 Mbps สำหรับเชื่อมต่อกับระบบเครือข่าย
- 7) คอนเน็คเตอร์ซีเอสไอ (CSI) สำหรับเชื่อมต่อกับโมดูลกล้อง
- 8) คอนเน็คเตอร์เอชดีเอ็มไอ (HDMI) สำหรับเชื่อมต่อสัญญาณภาพและเสียงที่เชื่อมต่อกับ จอภาพที่มีขั้วต่อแบบเอชดีเอ็มไอ เช่น โทรทัศน์หรือจอมอนิเตอร์
- 9) ใช้ชิพ Soc Broadcom BCM2835 ซึ่งรวม ชิพียู (CPU), จีพียู (GPU) และ SDRAM ไว้ใน ตัวถังเดียวกัน
- 10) คอนเน็คเตอร์ดีเอสไอ (DSI) สำหรับเชื่อมต่อกับจอภาพ
- 11) คอนเน็คเตอร์ไมโครยูเอสบี (Micro USB) สำหรับจ่ายไฟเลี้ยงให้บอร์ด
- 12) LAN Controller

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 การจัดเรียงขาของ GPIO (General-Purpose Input/ Output)



รูปที่ 3.11 การจัดเรียงขาของคอนเน็คเตอร์สำหรับเชื่อมต่ออินพุตเอาต์พุต (GPIO) ของบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี [12]

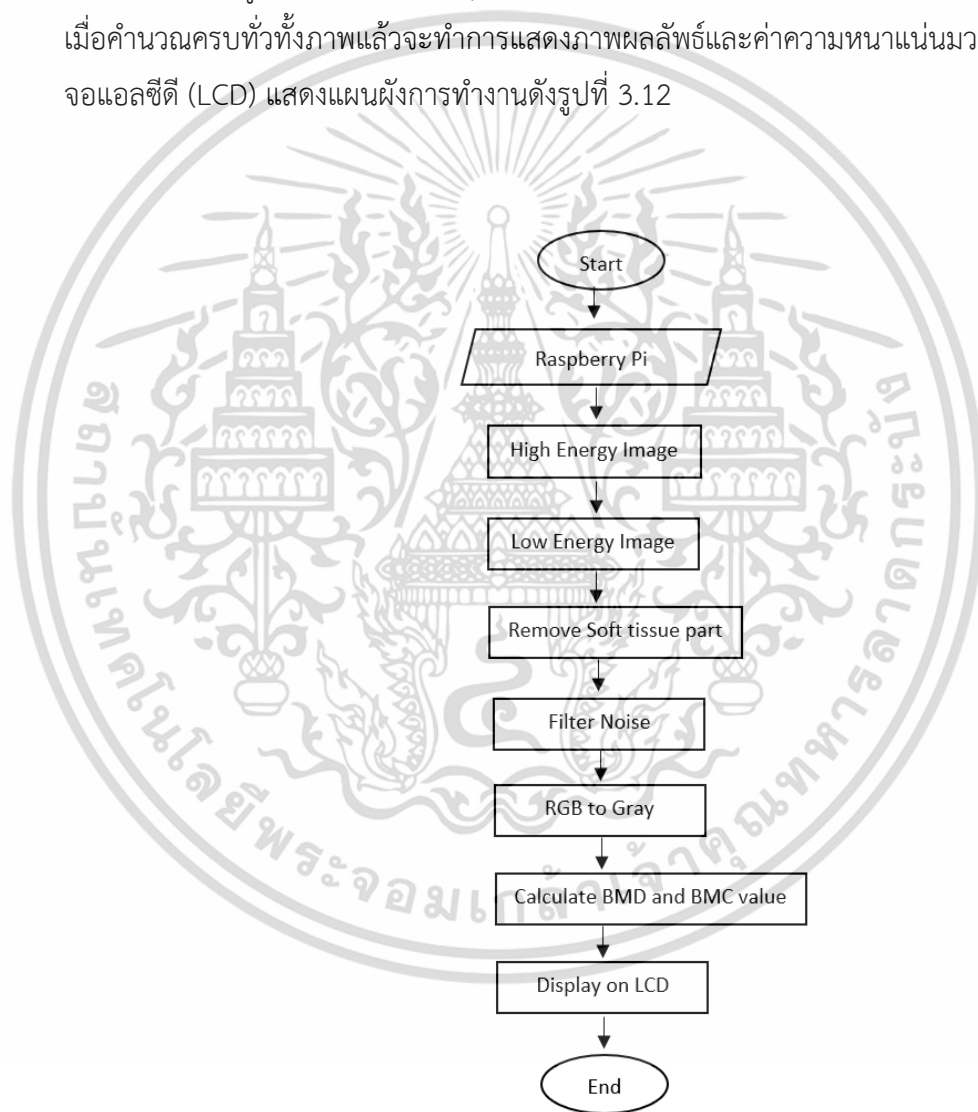
บอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โมเดล บี มีขาอินพุตเอาต์พุตดิจิทัลหรือ GPIO สำหรับติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกรวม 40 ขาโดยมีการจัดเรียงขามาตรฐานตามรูปที่ 3.11

### 3.3.4 ระบบการทำงานของระบบประมวลผลภาพ

การทำงานของระบบในงานวิจัยนี้ แบ่งการทำงานของระบบออกเป็น 2 โหมด

1. การจำลองการประมวลผลภาพรังสีเอกซ์ และแสดงผลค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Simulation Mode) เป็นโหมดที่จำลองการถ่ายภาพรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน เพื่อวัดความหนาแน่นของมวลกระดูก โดยไม่ต้องมีการปล่อยรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดจริง คำสั่งที่ได้ทำการเขียนขึ้นนั้น จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบ โดยการนำภาพถ่ายรังสีเอกซ์ระดับพลังงานสูง (High Energy Image) และ ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ระดับพลังงานต่ำ (Low Energy Image) ที่มีการถ่ายเก็บไว้ในไดเรกทอรี (Directory) ของราสเบอร์รี่ พาย มาทำการประมวลผล

ภาพเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกตามกฎของแลมเบิร์ต - เบียร์ (Lambert-Beer law) โดยจะ เริ่มจากการนำภาพต้นฉบับที่ได้มาไปปรับปรุงโดยใช้ฟิลเตอร์ในการกำจัดสิ่งรบกวนภายในภาพ (Filter Noise) และมีการเปลี่ยนรูปแบบของภาพจากระบบภาพ 3 สี (RGB) มาเป็นระบบภาพสีเทา (Gray Scale) ทำการกำจัดส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อออกจนเหลือแค่ส่วนที่เป็นกระดูก และนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกต่อไป ซึ่งการคำนวณจะเป็นการไปดึงค่าข้อมูลมาแต่ละพิกเซล (pixel) เมื่อได้ค่าที่คำนวณแล้วจะนำไปแสดงในรูปแบบผลลัพธ์เมื่อคำนวณครบทั่วทั้งภาพแล้วจะทำการแสดงผลภาพผลลัพธ์และค่าความหนาแน่นมวลกระดูกทางจอแอลซีดี (LCD) แสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แผนผังการทำงานการจำลองการประมวลผลภาพรังสีเอกซ์และแสดงผลค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Simulation Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การถ่ายภาพรังสีเอกซ์และประมวลผลภาพเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Shoot Mode) เป็นโหมดการถ่ายภาพรังสีสองระดับพลังงานเพื่อวัดค่าความหนาแน่นมวลกระดูกของนิ้วผู้ใช้งานจริง มีการปล่อยรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดจริง คำสั่งที่ได้ทำการเขียนขึ้น จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบ โดยควบคุมการเปิด-ปิดแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ การปล่อยพลังงานจากแหล่งกำเนิดรังสี ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์เซอร์โวที่มีการติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียมไว้ ทำให้ควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแผ่นอะลูมิเนียมได้ ทำให้เกิดการถ่ายภาพรังสีเอกซ์สองระดับพลังงาน เพราะระดับพลังงานของรังสีเอกซ์ขณะที่เปิดและปิดแผ่นอะลูมิเนียมมีค่าแตกต่างกัน นอกจากนี้ยังควบคุมการทำงานของกล้องดิจิทัลแบบเว็บแคม (webcam camera) เพื่อใช้ในการบันทึกภาพขณะที่แผ่นเรืองแสงเกิดการเรืองแสง ซึ่งการติดต่อกับกล้องนั้นจะใช้ชุดคำสั่งของโอเพนซีวี (Open Source Computer Vision : OpenCV) : เป็นไลบรารีฟังก์ชันการเขียนโปรแกรม ซึ่งเป็นชุดคำสั่งที่ใช้ในการประมวลผลภาพได้ แสดงดังรูปที่ 3.13



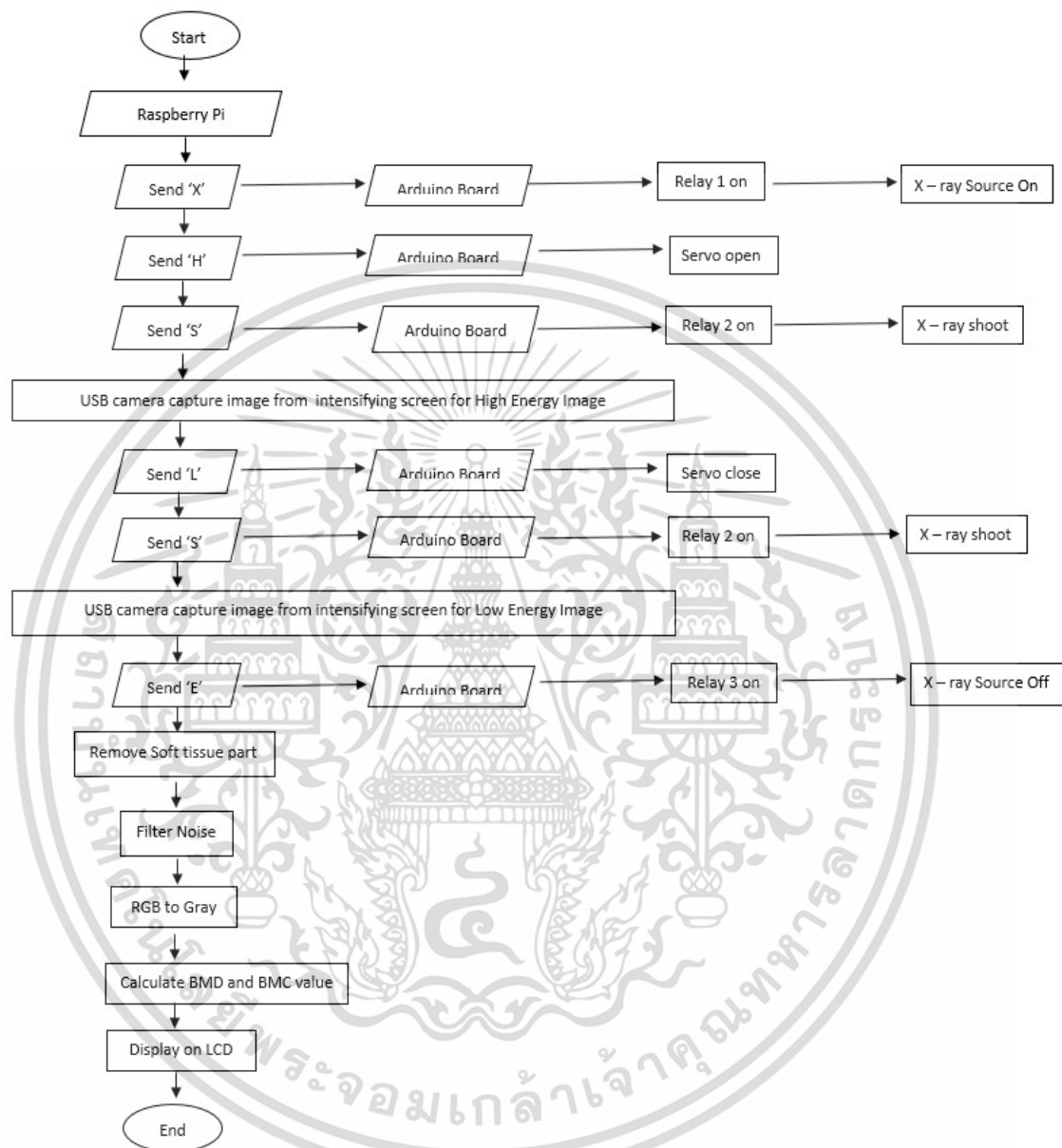
รูปที่ 3.13 แสดงชุดคำสั่งที่ใช้สำหรับการประมวลผลภาพ

ซึ่งเงื่อนไขของภาพพลังงานสูงและภาพพลังงานต่ำนั้นจะมีรูปแบบเดียวกันแต่จะแตกต่างกันที่ค่าสีที่กำหนดไว้เป็นขั้นต่ำ เมื่อได้ภาพถ่ายรังสีสองระดับพลังงานมา จะทำการคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกตามกฎของแลมเบิร์ต-เบียร์ (Lambert-Beer's Law) โดยจะเริ่มจากการนำภาพต้นฉบับที่ได้มาไปปรับปรุงคุณภาพโดยใช้ฟิลเตอร์ในการกำจัดสิ่งรบกวนภายในภาพออก (Filter Noise) และมีการเปลี่ยนรูปแบบของภาพจากระบบภาพ 3 สี (RGB) มาเป็นระบบภาพสีเทา (Gray Scale) และนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกต่อไป ซึ่งการคำนวณจะเป็นการไปดึงค่าข้อมูลมาแต่ละพิกเซล (pixel) เมื่อได้ค่าที่คำนวณ

แล้วจะนำกลับไปใส่ไปในรูปผลลัพธ์เมื่อคำนวณครบถ้วนทั้งภาพแล้ว จะทำการแสดงภาพผลลัพธ์ และค่าความหนาแน่นมวลกระดูกออกมา แสดงค่าทางจอแอลซีดี แสดงแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แผนผังการทำงานการถ่ายภาพรังสีเอกซ์และประมวลผลภาพเพื่อคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Shoot Mode)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 หน่วยแสดงผล

ในงานวิจัยนี้ผู้จัดทำเลือกใช้หน่วยแสดงผลเป็น จอแสดงผลแบบแอลซีดี (Liquid Crystal Display: LCD) ซึ่งจัดเป็นจอแสดงผลอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งจอแสดงผลแบบแอลซีดี นี้มีทั้งแบบที่แสดงผลเป็นอักขระเพียงอย่างเดียว (Character LCD) และแบบที่สามารถแสดงผลเป็น รูปภาพหรือสัญลักษณ์อื่น ๆ ตามความต้องการได้ (Graphic LCD) โดยจอแอลซีดีที่เราพบเห็นกันโดยทั่วไปในชีวิตประจำวันอาจมีอยู่หลายแบบ บางชนิดก็เป็นแบบที่มีการสั่งผลิตขึ้นเฉพาะงานโดยมีรูปแบบและรูปร่างเฉพาะ เช่น จอแอลซีดีที่นำไปใช้ในนาฬิกาข้อมือแบบดิจิทัล เครื่องเล่นเกม เครื่องคิดเลข หรือหน้าปัดวิทยุแบบต่าง ๆ เป็นต้น โดยที่พบเห็นกันทั่วไปได้แก่ ขนาด 16 ตัวอักษรไปจนถึง 40 ตัวอักษร และมีจำนวนบรรทัดตั้งแต่ 1 บรรทัดไปจนถึง 4 บรรทัด (หรืออาจมากกว่านั้น) โดยแอลซีดีเหล่านี้อาจมีหลายผู้ผลิต แต่ส่วนมากแล้วจะมีโครงสร้างการทำงานและชุดคำสั่งที่เหมือนกันเกือบทุกประการ อาจมีแตกต่างกันในเรื่องของความเร็วในการอ่านหรือเขียน (Access Time)

จอแอลซีดีที่ใช้ในหน่วยแสดงผลเป็นแบบหน้าจอสัมผัสขนาด 7 นิ้ว สำหรับราสเบอร์รี่ พาย และระบบปฏิบัติการราสเปียน (Raspbian) ความละเอียด 800 x 480 จุด แสดงดังรูปที่ 3.13 สามารถใช้ได้กับราสเบอร์รี่ พาย โมเดล A+, ราสเบอร์รี่ พาย 2 โมเดล B และราสเบอร์รี่ พาย 3 โมเดล B และ B+ ความสามารถในการแสดงภาพ 3 สี (RGB) ระดับ 24 บิต รองรับการสัมผัสหน้าจอบแบบคาปาซิทีฟ (Capacitive Touch) ใช้นิ้วมือสัมผัสได้โดยไม่ต้องใช้ปากกา (Stylus) หรือออกแรงกดด้วยเล็บ รองรับการสัมผัสหน้าจอพร้อมกันสูงสุด 10 จุด สัญญาณภาพและทัชสกรีนเชื่อมต่อผ่านพอร์ตดีเอสไอ (DSI : Display Serial Interface) บนบอร์ดราสเบอร์รี่ พาย โดยผ่านบอร์ดพีซีบี (PCB) แปลง ในการใช้งานต้องต่อใช้ไฟเลี้ยง 5 โวลต์เข้าที่พีซีบีสามารถใช้ได้จากแหล่งจ่ายภายนอก พอร์ตยูเอสบี หรืออาจเชื่อมต่อ 5 โวลต์ และขา GND จากราสเบอร์รี่ พาย [9]



รูปที่ 3.15 หน่วยแสดงผล จอแอลซีดีแบบสัมผัสขนาด 7 นิ้ว แบบสัมผัสหน้าจอบนคาปาซิทีฟ [13]

### 3.5 การออกแบบและสร้างเครื่องมือ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ ผู้จัดทำได้มีการทดลองสร้างระบบการทำงานของเครื่องเสมือนจริงขึ้นภายในห้องทดลอง ได้มีการทำภายในตู้ตะกั่ว เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของรังสี โดยมีการแบ่งการจัดวางของระบบ ออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

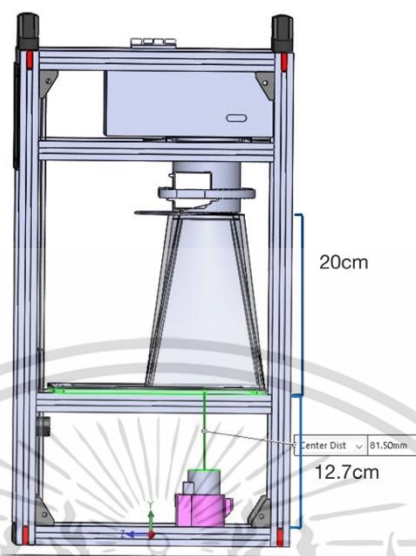
1. ส่วนบน เป็นตำแหน่งการวางของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และมอเตอร์เซอร์โวที่มีการติดตั้งแผ่นอะลูมิเนียม
2. ส่วนกลาง เป็นส่วนของแผ่นเรืองแสง โดยตำแหน่งนี้จะเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการวางวัตถุเพื่อจะทำการฉายรังสีลงไป
3. ส่วนล่าง เป็นตำแหน่งของกล้องดิจิทัลที่ทำหน้าที่ในการเก็บภาพของแผ่นเรืองแสงที่มีการเรืองแสง

ซึ่งในการออกแบบจะต้องมีการกำหนดระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และแผ่นเรืองแสง เพราะเนื่องจากแหล่งจ่ายรังสีจะยิงรังสีออกมาในรูปของทรงกรวย (Cone Beam) ซึ่งถ้าหากมีวางในตำแหน่งที่ไม่เหมาะสม จะทำให้พื้นที่ในการสัมผัสรังสีของวัตถุนั้นน้อยลงไปด้วย

ดังนั้นจึงได้มีการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการวาง เพื่อให้ได้พื้นที่บนแผ่นเรืองแสงที่มากที่สุด โดยตำแหน่งที่เหมาะสมจะทำให้รังสีเอกซ์กระจายทุกพื้นที่ของแผ่นเรืองแสง หลังจากนั้นต้องทำการหาระยะที่เหมาะสมระหว่างกล้องดิจิตอล ซึ่งระยะนี้มีความสำคัญที่จะทำให้เราเห็นแสงที่เรืองในมุมแคบหรือเห็นวัตถุที่เราฉายรังสีทั้งหมด โดยระยะที่เหมาะสมของระยะระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และแผ่นเรืองแสงจะอยู่ที่ 20 เซนติเมตร และระยะระหว่างแผ่นเรืองแสงกับกล้องดิจิตอล จะอยู่ที่ 12.7 เซนติเมตร แสดงดังรูปที่ 3.17

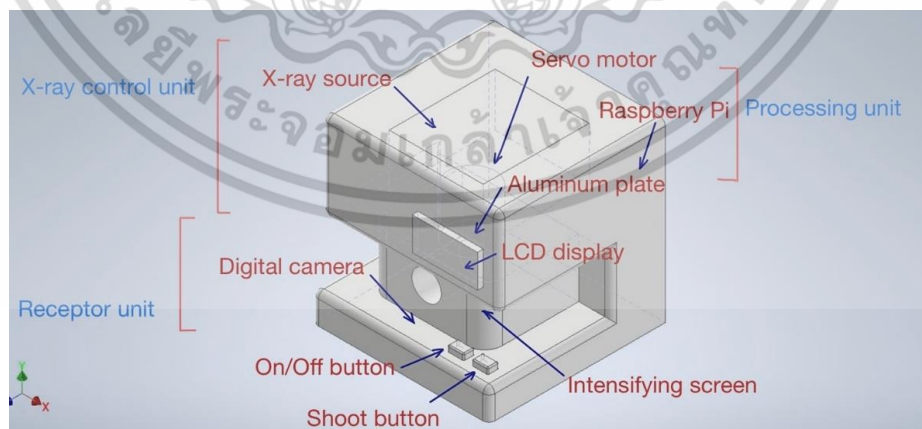


รูปที่ 3.16 แสดงภาพการจัดวางของแหล่งจ่ายรังสี แผ่นเรืองเรืองแสง และกล้องดิจิตอล



รูปที่ 3.17 แสดงภาพจำลองการจัดวางของแหล่งจ่ายรังสี แผ่นเรืองเรืองแสงและกล้องดิจิทัล เพื่อนำใช้ในการออกแบบ

การออกแบบโครงสร้างภายนอกของระบบวัดความหนาแน่นกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ซึ่งมีแทนวางเป็นรูปตัวยู ภายในมีการบุด้วยตะกั่วเพื่อป้องกันผู้ใช้จากอันตรายที่เกิดจากรังสี มีช่องไว้สำหรับสอดแขนที่ต้องการวัดความหนาแน่นของมวลกระดูก โครงสร้างภายนอกมีขนาดโดยประมาณ 25 เซนติเมตร x 25 เซนติเมตร x 40 เซนติเมตร



รูปที่ 3.18 แสดงโครงสร้างภายนอกของเครื่องวัดความหนาแน่นกระดูกที่ออกแบบขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 แผนการดำเนินงานโครงการ

แผนการดำเนินงานที่ผู้วิจัยได้วางแผนการดำเนินงาน แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงแผนการดำเนินงาน

ลำดับ	รายการ	ระยะเวลาดำเนินการ									
		ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	
1	ศึกษาหัวข้อเรื่องเกี่ยวกับงานโครงการ										
2	พบอาจารย์ที่ปรึกษาและรายงานความก้าวหน้าของโครงการ										
3	นำเสนอหัวข้อโครงการ										
4	วางแผนขั้นตอนการทำโครงการ										
5	ศึกษาทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับโครงการ										
6	ศึกษาการทำงานของเครื่องวัดความหนาแน่นของกระดูกรุ่นเก่า										
7	ศึกษาการใช้รหัสเบอร์รี่ พาย ในการควบคุมระบบที่ใช้ในการเก็บภาพ										
8	ศึกษาการใช้รหัสเบอร์รี่ พาย ในการควบคุมระบบประมวลผล และคำนวณค่าความหนาแน่นมวลกระดูก										
9	ออกแบบและสร้างเครื่องวัดมวลกระดูก พร้อมทดลองใช้เครื่อง										
10	ปรับปรุงระบบ เพื่อแก้ไขข้อผิดพลาด										
11	ทดสอบโดยใช้แท่งแคลเซียมที่มีปริมาณแคลเซียมแตกต่างกัน ทำการวัดหาปริมาณแคลเซียมทั้งหมด										
12	ทดลองวัดหาความหนาแน่นของกระดูกที่นิ้วมือของผู้ทดสอบ										
13	จัดทำรูปเล่มโครงการ										
14	นำเสนอผลงาน										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

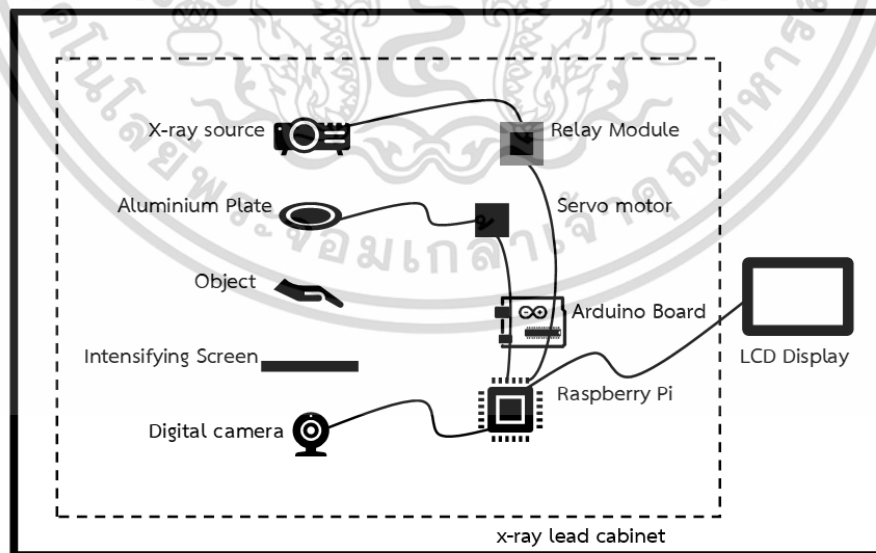
### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในส่วนของการทดลองงานวิจัยนี้ จะทำการทดลองระบบของเครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูก โดยใช้เทคนิคการฉายรังสีสองระดับพลังงานและใช้กล้องดิจิทัลเป็นตัวรับภาพ ซึ่งควบคุมการทำงานทั้งหมดโดยใช้ราสเบอร์รี่พาย

#### 4.1 ระบบที่ใช้ทดลอง

ระบบที่ใช้ทำการทดลองประกอบไปด้วย 4 ส่วน ได้แก่

1. หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ บอร์ดอาควาโน โมดูลรีเลย์ และมอเตอร์เซอร์โว
  2. หน่วยรับรังสี (Receptor Unit) ได้แก่ แผ่นเรืองแสง และกล้อง
  3. หน่วยประมวลผล (Processing Unit) ได้แก่ ราสเบอร์รี่พาย
  4. หน่วยแสดงผล (Display Unit) ได้แก่ จอแอลซีดี
- แสดงภาพระบบที่ออกแบบเพื่อใช้ในการทดลอง ดังรูปที่ 4.1



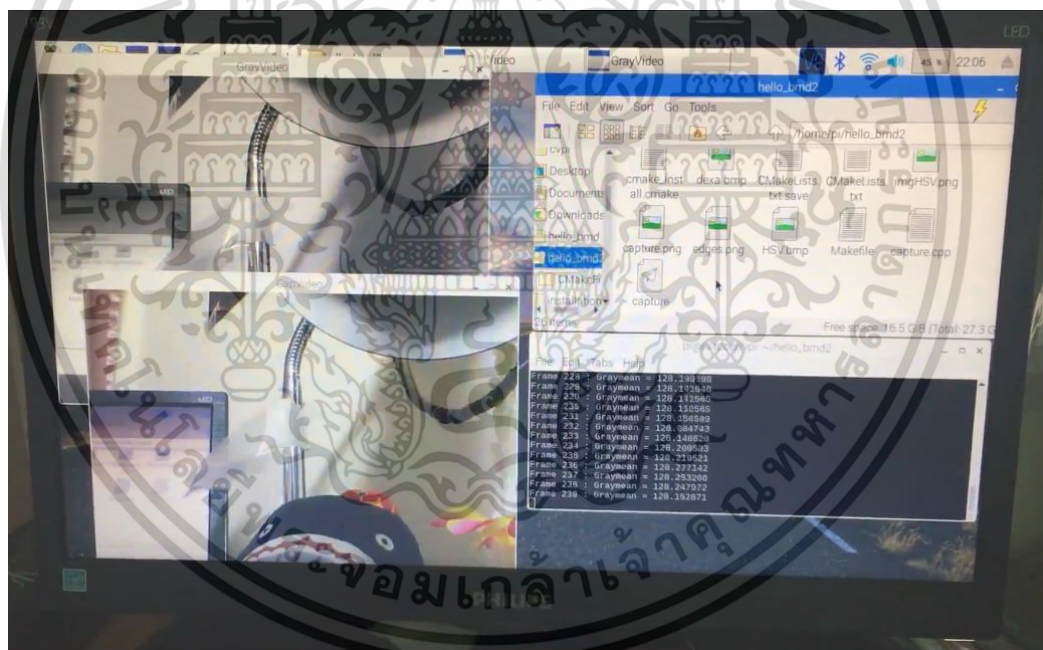
รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพของระบบที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดสอบระบบเพื่อใช้เก็บภาพ

การทดสอบระบบเพื่อใช้ในการเก็บภาพเอกซเรย์จากกล้องดิจิทัลเบื้องต้นนั้น เป็นกระบวนการจำลองขณะการยิงรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดมายังแผ่นเรืองแสง เมื่อแผ่นเรืองแสงเกิดการเรืองแสงขึ้น ระบบที่ทำการเปิดกล้องดิจิทัลไว้ในรูปแบบของวิดีโอเรียลไทม์จะตรวจจับภาพรังสีที่ผ่านวัตถุ และบันทึกภาพจากแผ่นเรืองแสงขณะนั้นออกมา ซึ่งในการทดลองนี้ทำการปิด และเปิดหลอดไฟเพื่อเป็นการจำลองขณะที่แผ่นเรืองแสงเกิดการเรืองแสงขึ้น เป็นการทดสอบว่าระบบสามารถตรวจจับค่าเฉลี่ยสีของภาพที่เปลี่ยนแปลงได้ และสามารถบันทึกภาพออกมาได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด

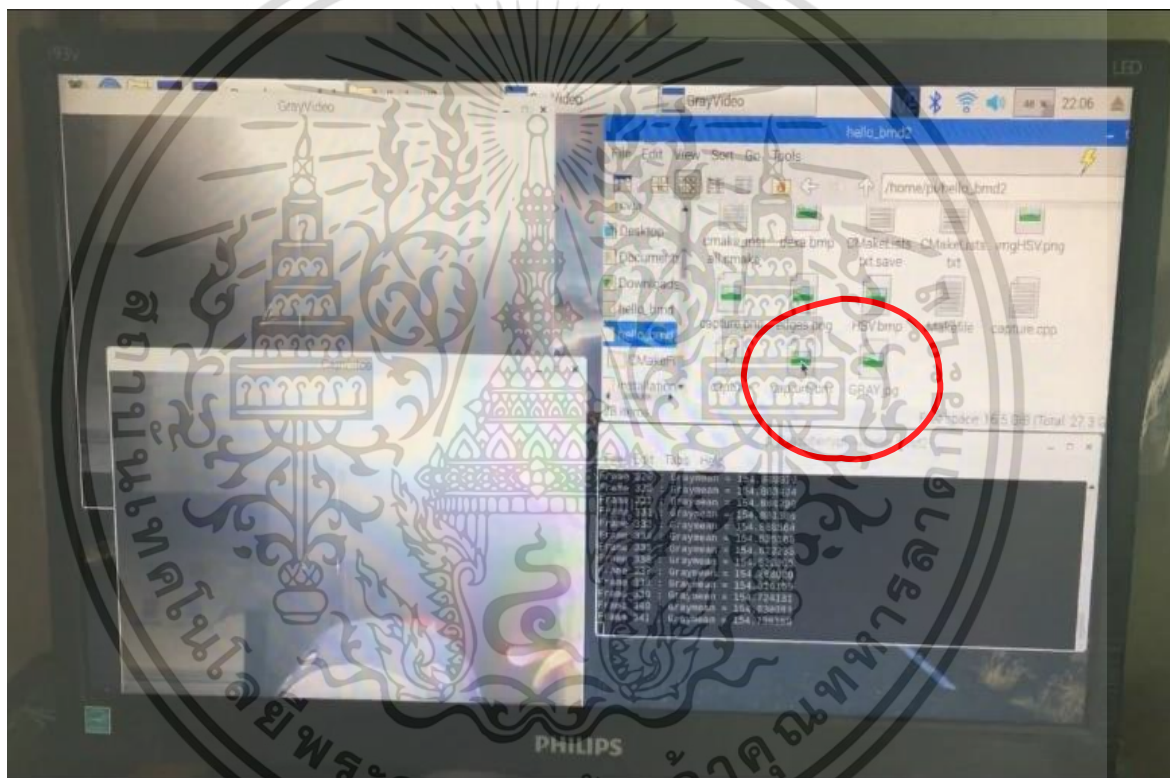
จากการทดลองขณะที่ปิดหลอดไฟระบบจะเปิดกล้องดิจิทัลไว้ในรูปแบบวิดีโอเรียลไทม์ และทำการเก็บภาพไปเรื่อย ๆ เพื่อนำภาพที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยสีของภาพและตรวจสอบเงื่อนไข ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงภาพในการทดสอบระบบเก็บภาพขณะปิดหลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบมีการกำหนดเงื่อนไขให้บันทึกรูปภาพทันทีขณะที่เปิดหลอดไฟ และทำการเปลี่ยนภาพสีให้เป็นภาพระดับสีเทา (Grayscale) เพื่อทำให้สามารถวิเคราะห์ภาพได้ง่ายขึ้น เมื่อแปลงภาพเป็นระดับสีเทาแล้วจะทำให้แต่ละจุดภาพของภาพเหลือเพียงค่าความเข้มของสีที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 255 (สีของภาพสูงสุดคือ 255 เป็นสีขาว ต่ำลงมาเป็นระดับสีเทา และต่ำสุดคือ 0 เป็นสีดำ) จากความสว่างน้อย เพิ่มขึ้นเป็นความสว่างมาก ภาพจะมีค่าเฉลี่ยของสีสูงขึ้น ดังนั้นเมื่อเปิดหลอดไฟระบบจะสามารถตรวจจับค่าความเข้มสีและบันทึกภาพเก็บไว้ได้ แสดงภาพที่เก็บได้ในไดเรกทอรีของหน่วยประมวลผล ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 แสดงภาพในการทดสอบระบบเก็บภาพขณะเปิดหลอดไฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การทดสอบระบบเพื่อใช้ประมวลผลภาพ

การทดสอบระบบที่ใช้ในการประมวลผลภาพ จะทำการนำภาพถ่ายรังสีเอกซ์สองระดับพลังงานที่ได้จากการเก็บภาพจากหน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป ได้ผลตัวเก็บภาพสำเร็จรูปซึ่งเก็บภาพบริเวณข้อนิ้วในระดับพลังงานสูงและพลังงานต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.4 และ 4.5



รูปที่ 4.4 แสดงภาพระดับพลังงานสูงที่ได้จากการวัดบริเวณข้อนิ้วด้วยวิธีดูคลื่นรังสีเอกซ์สองระดับพลังงานจากหน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป



รูปที่ 4.5 แสดงภาพระดับพลังงานต่ำที่ได้จากการวัดบริเวณข้อนิ้วด้วยวิธีดูคลื่นรังสีเอกซ์สองระดับพลังงานจากหน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำภาพถ่ายรังสีสองระดับพลังงานจากหน่วยรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูปมาคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกตามกฎของแลมเบิร์ต-เบียร์ ( Lambert-Beer's Law) โดยเริ่มจากการนำภาพต้นฉบับที่ได้มาปรับปรุงโดยใช้ฟิลเตอร์ในการกำจัดสิ่งรบกวนภายในภาพ (Filter Noise) และมีการเปลี่ยนรูปแบบของภาพจากระบบภาพ 3 สี (RGB) เป็นระบบภาพสีเทา (Gray Scale) แล้วนำมาลบเอาส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อออก จะได้ผลแสดงดังภาพรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงภาพถ่ายรังสีที่ทำการลบเอาส่วนที่เป็นเนื้อเยื่อออก

เมื่อได้ภาพเอกซเรย์ที่ทำการลบเอาเนื้อเยื่อออกแล้ว จะนำภาพที่ได้มาทำการหาค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (Bone Mineral Density, BMD) และปริมาณแร่ธาตุในกระดูก (Bone Mineral Content, BMC) จะได้ผลแสดงดังภาพรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 แสดงผลลัพธ์ที่ได้จากการหาค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกและปริมาณแร่ธาตุในกระดูก

#### 4.4 การทดสอบการตอบสนองของเครื่องวัดมวลกระดูกต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลง

การทดสอบการตอบสนองของเครื่องวัดมวลกระดูกต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่มีการเปลี่ยนแปลง เป็นการทดสอบระบบการเก็บภาพถ่ายรังสีจากกล้องดิจิทัลต่อความสามารถตอบสนองต่อปริมาณแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลงได้มากหรือน้อยเพียงใด โดยการทดลองนี้จะสร้างแบบจำลองของกระดูกเป็นเม็ดแคลเซียมโดยใช้ปริมาณแคลเซียมต่างกัน 5 ระดับ คือ 2 กรัม, 4 กรัม, 6 กรัม, 8 กรัม, และ 10 กรัม แล้วนำมาทดสอบหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูก โดยการจำลองเม็ดแคลเซียมจะใช้ส่วนผสมของปูนปลาสเตอร์ 5 กรัม น้ำ 6 มิลลิลิตร และเปลือกหอยบดละเอียด 2 กรัม, 4 กรัม, 6 กรัม, 8 กรัม, และ 10 กรัม ตามลำดับ จะได้เม็ดแคลเซียมที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นวงกลม ดังรูปที่ 4.8

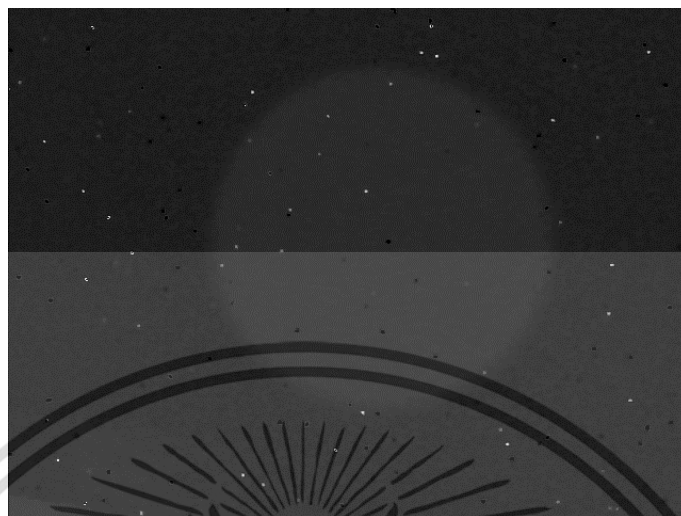


รูปที่ 4.8 แสดงตัวอย่างเม็ดแคลเซียมที่ใช้เป็นแบบจำลองของกระดูก

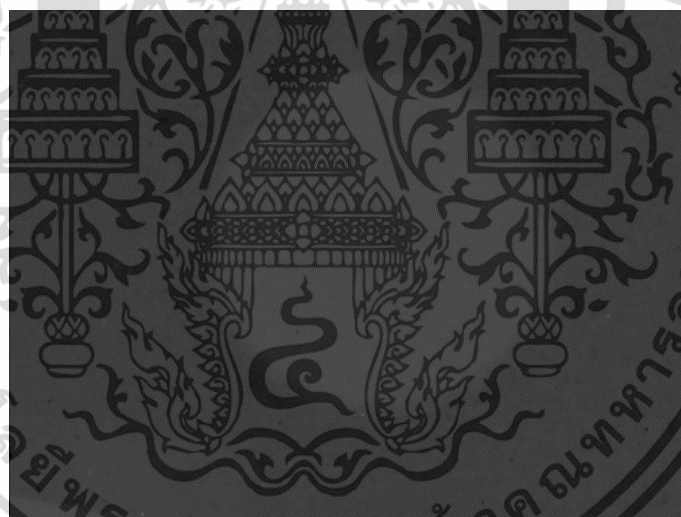
เมื่อนำเม็ดแคลเซียมที่ต้องการทดสอบวางในตำแหน่งที่เหมาะสมบนแผ่นเรืองแสง ทำการฉายรังสีเอกซ์ไปยังแผ่นเรืองแสง กล้องดิจิทัลจะทำการจับภาพขณะที่แผ่นเรืองแสงมีการเรืองแสงขึ้น โดยนำเม็ดแคลเซียมที่มีปริมาณแคลเซียมต่างกัน 5 ระดับ ทดสอบจำนวน 3 ครั้ง ค่าความหนาแน่นของมวลกระดูก (BMD) ที่ได้ปรากฏดังตารางที่ 4.1 และภาพผลลัพธ์จากการถ่ายภาพรังสีเม็ดแคลเซียมจากการทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.9 และเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาปรับปรุงภาพโดยการกรองข้อมูลภาพโดยใช้ค่ามัธยฐาน (Median filter) ในการกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพ จะได้ผลดังรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการตอบสนองของค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลง

ความเข้มข้นของแคลเซียม (กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร)	ค่า BMD (กรัม/ตารางเซนติเมตร)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0.3333	1.9750	1.9791	1.9730	1.9757
0.6667	1.9873	1.9874	1.9806	1.9851
1.0000	2.0001	1.9998	2.0101	2.0033
1.3333	2.0176	2.0227	2.0261	2.0221
1.6667	2.0369	2.0401	2.0461	2.0411

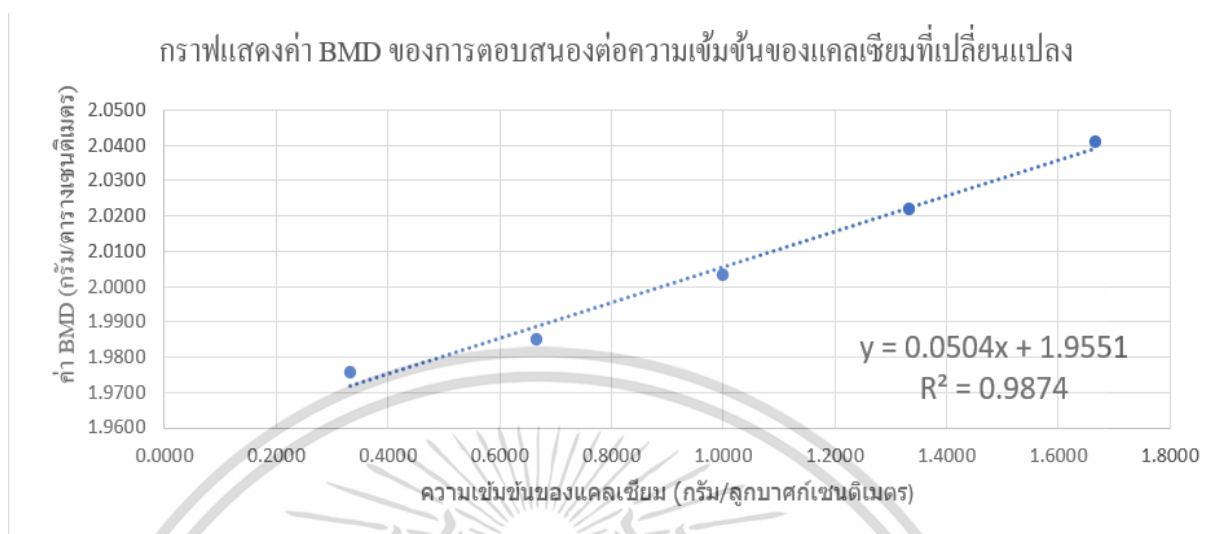


รูปที่ 4.9 ผลลัพธ์จากการถ่ายภาพรังสีเม็ดแคลเซียมที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายรังสีเม็ดแคลเซียมเมื่อทำการกำจัดสัญญาณรบกวนออก

และเมื่อนำค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกที่ตอบสนองต่อความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลงที่ได้จากการทดลองมาพล็อตกราฟ จะได้ความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.11

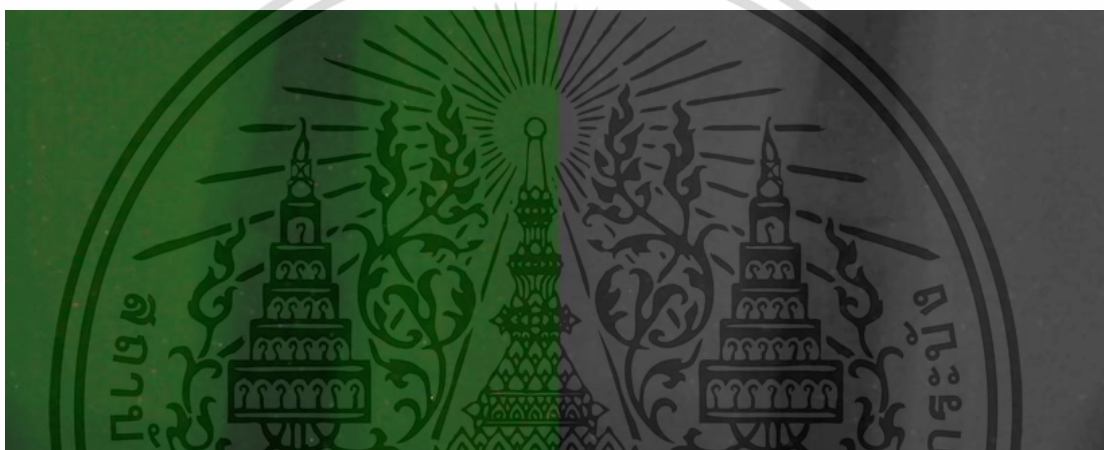


รูปที่ 4.11 แสดงกราฟค่าความหนาแน่นมวลกระดูกของการตอบสนองความเข้มข้นของแคลเซียมที่เปลี่ยนแปลง

จากผลการทดลองค่าการตอบสนองของความหนาแน่นของมวลกระดูกต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของแคลเซียม พบว่าผลการตอบสนองนั้นมีแนวโน้มเป็นแบบเชิงเส้น เมื่อวัดดูมีความเข้มข้นของแคลเซียมมากขึ้น ค่าความหนาแน่นของกระดูกมีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน

#### 4.5 การทดสอบการฉายรังสีเอกซ์บริเวณข้อนิ้วมือ

ในการหาค่าความหนาแน่นมวลกระดูก โดยใช้กล้องดิจิตอลเป็นตัวรับภาพ บริเวณที่ใช้ทดสอบการฉายรังสีเอกซ์ คือ ข้อนิ้วมือข้อกลางซึ่งสามารถเห็นได้ชัดเจน การเก็บภาพไว้ในไดเรกทอรีของหน่วยประมวลผลจะได้ภาพระดับสี (RGB) และใช้คำสั่งในการแปลงเป็นภาพระดับเทา (Gray scale) เพื่อใช้ในการหาค่าเฉลี่ยความเข้มของภาพต่อไป โดยได้ภาพถ่ายในระดับพลังงานสูงและระดับพลังงานต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.12 และ 4.13

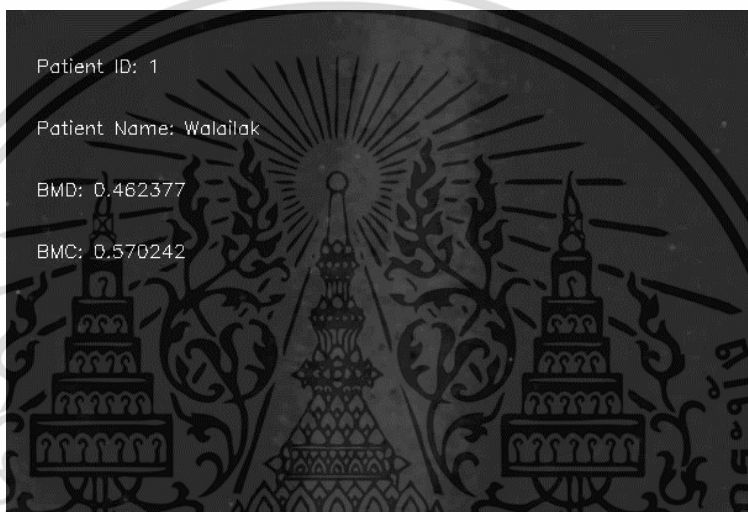


รูปที่ 4.12 แสดงภาพถ่ายรังสีระดับพลังงานสูงของข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิตอลเป็นตัวรับภาพ ประเภทภาพสี (ซ้าย) ภาพระดับเทา (ขวา)



รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายรังสีระดับพลังงานต่ำของข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิตอลเป็นตัวรับภาพ ประเภทภาพสี (ซ้าย) ภาพระดับเทา (ขวา)

ภาพถ่ายรังสีทั้งระดับพลังงานสูงและระดับพลังงานต่ำที่บันทึกได้ จะถูกนำมาประมวลผลโดยการเขียนคำสั่งในภาษาซี++ ร่วมกับโอเพนซีวี (OpenCV) อาทิ การกำจัดสัญญาณรบกวนในภาพ การปรับคุณสมบัติของภาพ การเข้าถึงข้อมูลแต่ละจุดของภาพเพื่อนำภาพทั้งสองระดับพลังงานมาลบกันและนำค่าที่ได้มาใช้ในการคำนวณเป็นค่าความหนาแน่นมวลกระดูก และค่าองค์ประกอบของแร่ธาตุในกระดูก เพื่อแสดงผลออกทางหน้าจอ แสดงภาพผลลัพธ์ภาพถ่ายรังสีหลังจากประมวลผลภาพได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายรังสีที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์บริเวณข้อนิ้วมือเมื่อใช้กล้องดิจิตอลเป็นตัวรับภาพ

จากการทดลองใช้กล้องดิจิตอลถ่ายภาพจากการฉายรังสีเอกซ์ พบว่าสามารถเก็บภาพของข้อนิ้วมือได้ดีพอสมควร จะเห็นได้จากรูปที่ 4.14 สามารถมองเห็นขอบเขตของกระดูกที่ได้จากการถ่ายภาพรังสีและนำไปคำนวณค่าความหนาแน่นของกระดูก (BMD) และ องค์ประกอบของแร่ธาตุในกระดูก (BMC) แสดงผลทางจอเพื่อให้ทราบได้

## บทที่ 5

# สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระบบจากตัวรับรังสีแบบสำเร็จรูปในเครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกมาเป็นกล้องดิจิทัล และใช้ราสเบอร์รี พายควบคุมระบบเก็บภาพและประมวลผลภาพ เพื่อเป็นการลดราคาต้นทุนในการผลิตเครื่องวัดความหนาแน่นของมวลกระดูก โดยระบบที่ใช้ทำการทดลองประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ๆ 4 ส่วน ได้แก่ หน่วยควบคุมแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ หน่วยรับรังสี (Receptor Unit) หน่วยประมวลผล (Processing Unit) และหน่วยแสดงผล (Display Unit) จากการศึกษาพบว่า สามารถใช้ราสเบอร์รี พาย ควบคุมระบบที่ใช้ในการเก็บภาพ และใช้ซอฟต์แวร์โอเพนซีวี (OpenCV) ในการประมวลผลภาพและคำนวณค่าความหนาแน่นของมวลกระดูกได้ และสามารถใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพจากการฉายรังสีเอกซ์แทนการใช้หน่วยรับรังสีเอกซ์แบบสำเร็จรูปได้

### 5.2 ปัญหาและอุปสรรค

1. ระบบไฟของราสเบอร์รี พาย ที่จ่ายไม่เพียงพอขณะใช้ร่วมกับอุปกรณ์อื่น ทำให้เมื่อใช้งานเป็นเวลานานแล้วเกิดปัญหาขึ้นกับระบบ จึงต้องใช้แหล่งจ่ายจากภายนอกเข้ามาใช้ร่วม
2. อายุการใช้งานของหลอดรังสีเอกซ์ที่นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ พบว่าปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อทำการฉายรังสีในแต่ละรอบเปลี่ยนแปลงไปเมื่อนำภาพที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยสีของภาพ ซึ่งถ้าหากสามารถเปลี่ยนหลอดรังสีเอกซ์ที่มีประสิทธิภาพมากกว่าจะทำให้ค่าที่ทดสอบได้มีความแม่นยำมากขึ้นเมื่อทำการทดสอบซ้ำ

### 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการนำไปพัฒนาต่อ

จากการดำเนินงานและทดลองเครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์สองระดับพลังงานและกล้องดิจิตอลควบคุมโดยใช้ราสเบอร์รี พาย มีข้อเสนอแนะ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การป้องกันอันตรายจากรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิด ผู้ใช้งานควรใช้เครื่องฉายรังสีเอกซ์ให้ถูกต้องตามวิธีการใช้งาน
2. เนื่องจากการเลือกใช้กล้องดิจิตอลมาเป็นตัวเก็บภาพถ่ายรังสี ถ้าเลือกกล้องที่มีค่าความละเอียดที่สูงและค่ารับแสงที่กว้างขึ้น อาจจะทำให้ภาพที่เก็บได้มีความคมชัดมากขึ้น
3. สามารถพัฒนาระบบเพิ่มเติมเพื่อให้ค่าความหนาแน่นมวลกระดูกที่วัดได้มีความแม่นยำ และถูกต้อง โดยนำค่าที่วัดได้จริงจากเครื่องที่ใช้ในโรงพยาบาลซึ่งมีมาตรฐานมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากเครื่องที่สร้างขึ้น



## เอกสารอ้างอิง

- [1] พุฒิพงศ์ กนกวิจิตร. 2560. **เครื่องวัดความหนาแน่นมวลกระดูกโดยใช้รังสีเอกซ์ 2 ระดับพลังงานและกล้องดิจิตอล**. ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] โรงพยาบาลกาบัง. **“โรคกระดูกพรุน” ภัยเงียบที่ถูกลืมมองข้าม**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.kabanghospital.go.th/kabang/?p=2570> [15 สิงหาคม 2562]
- [3] สุภาพ อารีเอื้อ. 2544. **ภาวะกระดูกพรุนในผู้สูงอายุ**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : [https://med.mahidol.ac.th/nursing/jns/DocumentLink/2544/issue\\_03/03.pdf](https://med.mahidol.ac.th/nursing/jns/DocumentLink/2544/issue_03/03.pdf) [15 สิงหาคม 2562]
- [4] โรงพยาบาลกรุงเทพ. **แคลเซียมกับโรคกระดูกพรุน**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://www.bangkokhospital.com/th/disease-treatment/calcium-and-osteoporosis> [18 พฤศจิกายน 2562]
- [5] ภัทรภรณ์ ปิ่นทรนทกะ. 2525. **แคลเซียมธาตุเสริมสร้างกระดูก**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : [http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol\\_10\\_No\\_4\\_P\\_300-304.pdf](http://scijournal.kku.ac.th/files/Vol_10_No_4_P_300-304.pdf) [18 พฤศจิกายน 2562]
- [6] ผ.ศ.พญ. สินี ดิษฐบรรจง. 2562. **ภาวะแคลเซียมสูงในเลือด (Hypercalcemia)**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://med.mahidol.ac.th/med/sites/default/files/public/pdf/medicinebook1/Hypercalcemia.pdf> [18 พฤศจิกายน 2562]
- [7] ยุทธชนม์ พรหมวน. 2558. **การพัฒนาระบบวัดความหนาแน่นของกระดูกแบบเคลื่อนที่บริเวณข้อนิ้วโดยใช้วิธีเอ็กซ์เรย์สองระดับพลังงาน**. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [8] SPMe studio. 2562. **เริ่มต้นใช้งาน Arduino UNO เบื้องต้น**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://medium.com/@pattanapong.sriph/> [17 มีนาคม 2563]

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] บริษัท วินัส ซัพพลาย จำกัด. 2560. ตัวอย่างการใช้งาน Arduino + Relay Module **ควบคุมการปิดเปิดเครื่องใช้ไฟฟ้า**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก :  
<https://www.thaieasyelec.com/article-wiki/review-product-article/Example-project-for-control-electrical-device-using-arduino-and-relay-module.html>  
 [17 มีนาคม 2563]
- [10] พชรนันท์ ศรีธนาอุทัยกร. 2555. **Mini Robo-Cop Assistant**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก :  
<http://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2555/25552391441160.pdf> [17 มีนาคม 2563]
- [11] OKER. 2562. **WEB CAMERA OKER OE-177**. (ออนไลน์). สืบค้นจาก :  
<http://www.okerthai.com/products/webcam-ok-er-full-hd-a-445/> [18 มีนาคม 2563]
- [12] Sathittham Songthong. 2018. **เริ่มต้นกับ Raspberry Pi ตอนที่ 1**. (ออนไลน์).  
 สืบค้นจาก : <http://www.sathittham.com/raspberry-pi/rpi-ep-1/> [19 สิงหาคม 2652]
- [13] Cytron Marketplace. 2563. **Raspberry Pi 7 Inch Touch Screen Display**.  
 (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <https://th.cytron.io/p-raspberry-pi-7-inch-touch-screen-display?src=us.adam.c> [1 เมษายน 2563]