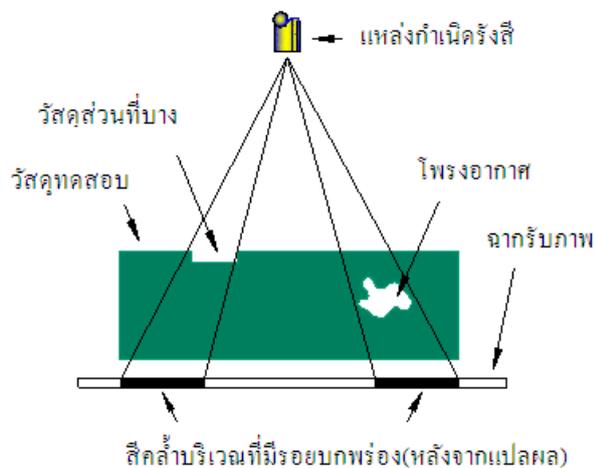


## บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิทยานิพนธ์เรื่องการเปรียบเทียบขนาดรอยบกพร่องและคุณภาพของภาพถ่ายด้วยรังสีที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดฟิล์มและชนิดดิจิทัล โดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และแกมมา ซึ่งผู้วิจัยได้ดำเนินการค้นคว้าทฤษฎี หลักการทดสอบ มาตรฐานในการทดสอบ มาตรฐานตัวอย่างในการเปรียบเทียบขนาด ปัจจัยของพลังงานที่ส่งผลกับความสามารถในการวัดขนาดรอยบกพร่องและคุณภาพของภาพถ่ายโดยใช้การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และแกมมา โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (Software) ในการวัดขนาดรอยบกพร่องและคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดฟิล์มและชนิดดิจิทัล ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 หลักการเบื้องต้นในการทดสอบภาพถ่ายด้วยรังสี [4]

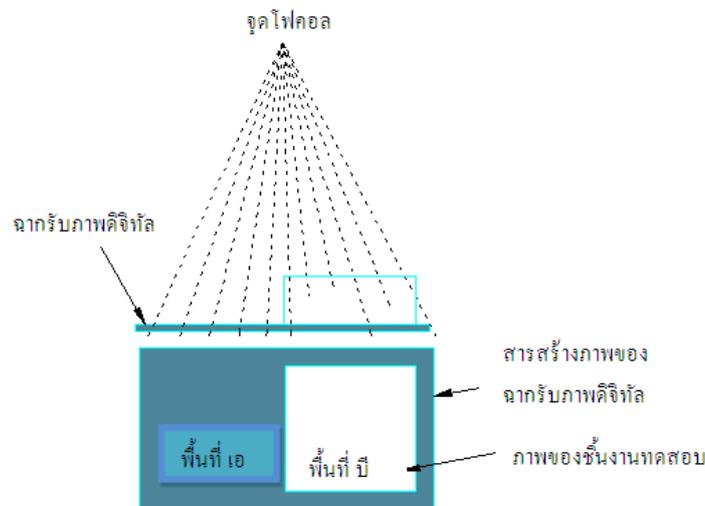
การทดสอบภาพถ่ายด้วยรังสีเป็นการทดสอบโดยการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ที่มีความถี่สูงจากต้นกำเนิดรังสี (Ray-Source) ผ่านชิ้นงานซึ่งอาจทำจากวัสดุชนิดต่างๆอาศัยหลักการการดูดซับ (Absorb) ดังรูปที่ 2.1 พลังงานที่ไม่เท่ากันของวัสดุหรือการที่วัสดุมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เช่น มีโพรงอากาศภายในทำให้พลังงานของรังสีผ่านชิ้นงานตรงที่มีโพรงอากาศได้มากกว่าและทำปฏิกิริยากับสารที่เคลือบอยู่บนฟิล์มได้มากกว่าส่วนอื่นเมื่อล้างฟิล์มออกมาแล้วก็จะสีคล้ำกว่าบริเวณอื่นดังนั้นการถ่ายภาพด้วยรังสีจึงเป็นการแปลผลจากเงาของภาพจากชิ้นงาน (Shadow Picture) ที่ปรากฏอยู่บนฟิล์ม



รูปที่ 2.1 หลักการเบื้องต้นของการทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสี [5]

หลักการเบื้องต้นของการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ

1. ต้นกำเนิดรังสีซึ่งอาจเป็นได้ทั้งรังสีแกมมา ( $\gamma$ -Ray) หรือรังสีเอกซ์ (X-Ray)
2. ชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ
3. ฉากรับภาพซึ่งโดยปกติจะบรรจุอยู่ในซอง (Cassette) และฉากตะกั่วประกอบอยู่ทั้งด้านบนและด้านล่าง เมื่อรังสีทะลุผ่านชิ้นงานจะทำปฏิกิริยากับฉากรับภาพ ความดำที่ปรากฏให้เห็นบนฉากรับภาพภายหลังจากการแปลงผลของฉากรับภาพจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานไปทำปฏิกิริยากับฉากรับภาพ สำหรับชิ้นงานที่เป็นวัสดุชนิดเดียวกัน ในบริเวณที่หนากว่าของวัสดุรังสีจะทะลุผ่านได้น้อยทำให้เกิดภาพบริเวณฉากรับภาพมีความดำน้อย ในทางกลับกันบริเวณที่บางกว่าของวัสดุรังสีทะลุผ่านได้มาก ทำให้เกิดภาพบริเวณฉากรับภาพมีความดำมากกว่า โดยสามารถยกตัวอย่างได้ในกรณีที่มีความไม่ต่อเนื่องอยู่ภายในชิ้นงานดังรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่าความไม่ต่อเนื่องอยู่ภายในชิ้นงานทำให้เนื้อวัสดุมีความหนาลดลง ดังนั้นปริมาณรังสีจึงทะลุผ่านชิ้นงานในบริเวณดังกล่าวได้มาก ทำให้เห็นภาพความไม่ต่อเนื่องนั้นเป็นบริเวณสีดำนอกจากการแปลงผลของฉากรับภาพซึ่งในบริเวณนั้นจะตรงกับตำแหน่งของความไม่ต่อเนื่องอยู่ภายในชิ้นงาน



รูปที่ 2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีผ่านวัสดุต่างชนิดกัน [6]

รังสีใช้ในการทดสอบจะเป็นพลังงานที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งการใช้งานในภาคอุตสาหกรรมจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. รังสีเอกซ์ (X-Ray) โดยรังสีเอกซ์นี้จะใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดรังสีทำให้สามารถควบคุมระดับพลังงานและปริมาณของอิเล็กตรอน (Electron) ที่ใช้ในการทดสอบได้

2. รังสีแกมมา ( $\gamma$ -Ray) รังสีชนิดนี้ได้จากสารกัมมันตภาพรังสีจึงไม่สามารถที่จะควบคุมระดับพลังงานและปริมาณของพลังงาน (kV) ที่ใช้ในการทดสอบได้ โดยรังสีแกมมา ( $\gamma$ -Ray) ที่ใช้กันจะมีอยู่หลายชนิด เช่น Co-60 Ir-192 Cs-137 เป็นต้น จึงทำให้คุณภาพของการทดสอบที่ได้ไม่เท่ากัน โดยรังสีเอกซ์จะให้คุณภาพในการทดสอบที่ดีกว่ารังสีแกมมา ( $\gamma$ -Ray)

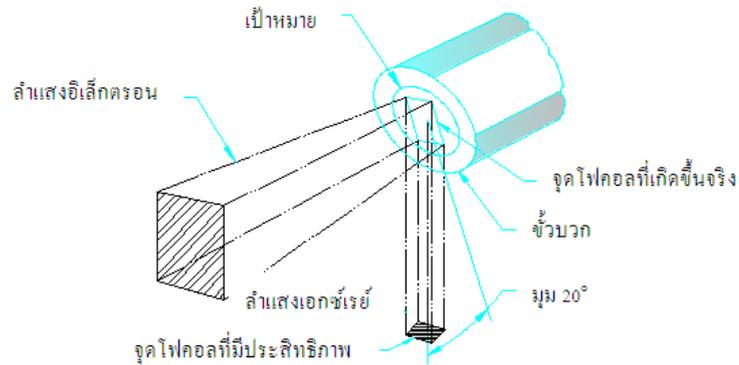
### 2.1.1 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์

ในปัจจุบันการผลิตรังสีเอกซ์จะใช้หลอดรังสีเอกซ์ที่เป็นหลอดแก้วสุญญากาศคล้ายหลอดไฟดังรูปที่ 2.3 ซึ่งภายในประกอบด้วย 2 ขั้วคือ ขั้วลบ (Cathode) และขั้วบวก (Anode) จากหลักการที่ว่า วัสดุร้อนสามารถปล่อยอิเล็กตรอน (Electron) ออกมาได้



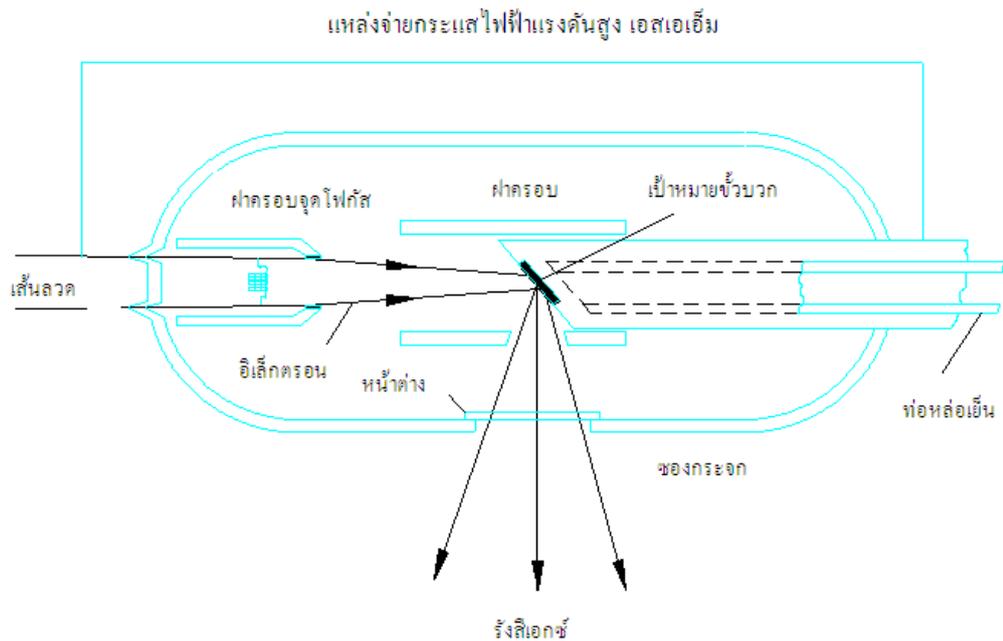
รูปที่ 2.3 หลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) [7]

ดังนั้นในหลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) จึงมีไส้หลอด (Filament) ทำหน้าที่เป็นต้นกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron) โดยการทำงานเมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับไส้หลอด ทำให้ไส้หลอด (Filament) ร้อนและปล่อยอิเล็กตรอน (Electron) อีสารซึ่งพร้อมที่จะเคลื่อนที่ออกจากไส้หลอด แต่เนื่องจากที่อุณหภูมิของไส้หลอดสามารถควบคุมได้โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอด จึงเปรียบเสมือนกับว่าสามารถควบคุมปริมาณอิเล็กตรอนได้จากการควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไส้หลอด โดยที่กระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่จากขั้วลบ (Cathode) ไปยังขั้วบวก (Anode) มีหน่วยวัดเป็นมิลลิแอมป์ (mA) ซึ่งเป็นตัวกำหนดปริมาณรังสีเอกซ์ (X-Ray) ที่เกิดขึ้นบริเวณรอบๆ ขั้วลบ (Cathode) มีลักษณะเป็นไส้หลอดโลหะรูปโค้งเพื่อปรับอิเล็กตรอนให้วิ่งเข้าชนเป้าหมาย (Target) ในตำแหน่งเดียวกันบนขั้วบวก (Anode) เรียกว่าจุดโฟลคอล (Focal Spot) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ตำแหน่งจุดโฟกอล (Focal Spot) บนขั้วบวก (Anode) [8]

การปรับระยะระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) จะทำให้ได้ขนาดของจุดโฟกอล (Focal Spot) แตกต่างกันได้ หากจุดโฟกอล (Focal Spot) มีขนาดเล็กจะทำให้ความคมชัด (Contrast) ของภาพถ่ายด้วยรังสีดีขึ้นแต่จะมีผลเสียต่ออายุการใช้งานของหลอดเนื่องจากการระบายความร้อนจากไส้หลอด (Filament) ระหว่างขั้วบวก (Anode) และขั้วลบ (Cathode) ของหลอดรังสีเอกซ์ (X-Ray Tube) ดังรูปที่ 2.5 ต้องมีความต่างศักย์ที่มีค่าสูงในหน่วยของ กิโลโวลต์ (kV) หรือเมกะโวลต์ (MV) หากเป็นเครื่องกำเนิดรังสีพลังงานสูง ซึ่งจะเร่งให้อิเล็กตรอนจากไส้หลอด (Filament) วิ่งชนจุดโฟกอล (Focal Spot) โดยที่หากว่าค่ากิโลโวลต์สูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนจุดโฟกอลด้วยความเร็วสูงขึ้นทำให้ได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานสูงขึ้นด้วย ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นรังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นต่ำแต่มีความถี่สูง การใช้ค่ากิโลโวลต์ที่สูงขึ้นทำให้ได้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานที่สูงขึ้น รังสีเอกซ์ที่เกิดจากจุดโฟกอล (Focal Spot) จะกระจายเป็นรูปครึ่งวงกลมรอบจุดโฟกอล (Focal Spot) แต่รังสีเอกซ์ที่ใช้งานจริงนั้นจะผ่านออกทางช่องทางออก (Window) เพื่อบังคับทิศทางของรังสีเอกซ์ให้ลงไปยังตำแหน่งที่ต้องการเท่านั้น ขนาดของจุดโฟกอล (Focal Spot) เป็นองค์ประกอบสำคัญของความคมชัด (Contrast) ของภาพถ่ายด้วยรังสี รังสีเอกซ์ที่ฉายไปกระทบสิ่งรอบข้างและสะท้อนกลับมายังฉากรับภาพจะมีผลเสียกับผลการทดสอบโดยจะทำให้ความคมชัด (Contrast) ลดลง



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของหลอดรังสีเอกซ์และการกำเนิดของรังสีเอกซ์ (X-Ray Source) [7]

### 2.1.2 ต้นกำเนิดรังแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก ไม่มีประจุและไม่มีมวล ไม่เบี่ยงเบนในสนามไฟฟ้า มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสุด สามารถทะลุผ่านแผ่นไม้ โลหะและเนื้อเยื่อได้ แต่ถูกกั้นได้โดยคอนกรีตหรือแผ่นตะกั่วหนา โดยสามารถทะลุผ่านแผ่นตะกั่วหนา 8 mm หรือผ่านแผ่นคอนกรีตหนาๆได้ มีอำนาจในการไอออนไนซ์น้อยมาก รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดคลื่นสั้นที่แผ่ออกมาจากนิวเคลียส เกิดจากการสลายของนิวเคลียสที่ไม่เสถียรหรือจากปฏิกิริยานิวเคลียร์มักเกิดร่วมกับอนุภาคแอลฟาและอนุภาคบีตา เนื่องจากรังสีแกมมามีปริมาณสูงทำให้มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูงด้วย ดังนั้นในการป้องกันอันตรายจากรังสีต้องใช้วัสดุที่มีความหนาแน่นสูง เช่น ตะกั่ว คอนกรีตหนา เป็นเครื่องกำบัง

ในงานวิจัยนี้จะใช้รังสีเอกซ์ (X-Ray) และ รังสีแกมมา ( $\gamma$ -Ray) ในการทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดฟิล์ม ในส่วนของการถ่ายภาพด้วยดิจิทัลจะใช้เพียงรังสีเอกซ์เท่านั้น เนื่องจากข้อจำกัดของอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดดิจิทัลไม่สามารถใช้กับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาได้

### 2.1.3 เอกซ์โพเชอร์ (Exposure) [9]

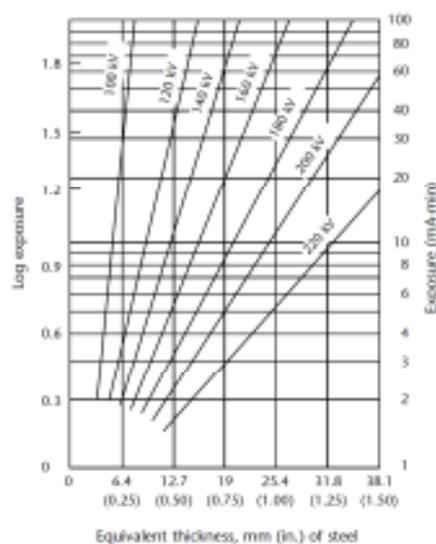
ความเข้มที่เหมาะสมของจากรับภาพเกิดจากการเลือกใช้ระดับพลังงานและปริมาณของรังสีที่เหมาะสมกับองค์ประกอบอื่น ๆ ของการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการปรับความเร็วหน้ากล้องและขนาดรูรับแสงของกล้องถ่ายรูป สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-Ray) เมื่อกำหนดค่ากิโลโวลต์ (kV) ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแล้ว ต้องทำการประมาณค่าปริมาณของรังสีเอกซ์ (X-Ray) ที่ใช้ โดยที่ปริมาณรังสีที่ใช้เรียกว่า เอกซ์โพเชอร์ (Exposure) ซึ่งเป็นผลคูณระหว่างมิลลิแอมป์ (mA) และเวลาในการฉายรังสีดังสมการที่ 2.1

$$E = \text{mA} \times T \quad (2.1)$$

โดยที่

E	คือ เอกซ์โพเชอร์ (mA.min)
mA	คือ มิลลิแอมป์ (mA)
T	คือ เวลา (min)

การกำหนดค่าเอกซ์โพเชอร์ (Exposure) อาจใช้ความชำนาญจากประสบการณ์หรือจากการลองผิดลองถูกกับชิ้นงาน ซึ่งเป็นวิธีการที่ไม่ให้ผลดีนักจึงได้มีการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอกซ์โพเชอร์และองค์ประกอบอื่นๆ ที่มีผลต่อการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งเรียกว่าเอกซ์โพเชอร์ชาร์ท (Exposure Chart) ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เอกซ์โพเชอร์ชาร์ท (Exposure Chart) [10]

### 2.1.4 การดูดกลืนรังสี (Attenuation) [9]

การดูดกลืนรังสีถ้าไม่คำนึงถึงการกระจายตัวของรังสี รังสีจะสามารถทะลุผ่านวัสดุใดๆ ได้ แต่ระหว่างที่รังสีทะลุผ่านนั้นจะเกิดปฏิกิริยาร่วมระหว่างรังสีและวัสดุนั้น ซึ่งเป็นผลให้ปริมาณของรังสีลดลง ลักษณะการลดลงของรังสีนั้นมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุ ความหนาแน่นของวัสดุ (Density) หรือระดับพลังงานของรังสี (kV) ที่ใช้และวัสดุที่เป็นชนิดเดียวกันความสามารถในการดูดกลืนรังสีจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$I = I_0 \times \exp^{-\mu x} \quad (2.2)$$

โดยที่	I	คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุ
	$I_0$	คือ ความเข้มของรังสีที่ฉายเข้าสู่วัสดุ
	$\mu$	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน หรือสัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient) (1/cm)
	x	คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ (cm)
	exp	คือ ค่าคงที่ (Natural Exponential)

ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีจะเป็นค่าคงที่ที่พิจารณาจากชนิดของวัสดุ แต่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงเมื่อพิจารณาจากระดับค่าพลังงานของรังสี โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี (Attenuation Coefficient) จะแปรผกผันกับค่าระดับพลังงาน เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อรังสีมีค่าระดับพลังงานที่ต่ำลง ดังนั้นเมื่อทำให้ค่าระดับพลังงานของรังสีสูงขึ้น จะทำให้ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านวัสดุได้มากขึ้นและถ้าวัสดุที่รังสีตกกระทบเป็นชนิดเดียวกัน ค่าความยาวคลื่นและค่าความหนาแน่นของวัสดุจะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสี เช่น วัสดุที่มีความยาวคลื่นมาก ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีก็จะมีค่ามากขึ้น ถ้าความยาวคลื่นมีค่าเท่ากัน วัสดุที่มีความหนาแน่นสูงหรือเลขอะตอมสูง ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนก็จะมีค่าสูงดังสมการที่ 2.3 และ 2.5

$$\mu = f(K \times \lambda^3 \times z^3) \quad (2.3)$$

ดังนั้นสามารถแทนค่าในสมการ (2.2)

$$\frac{dI}{dI_0} = -\mu dx \quad (2.4)$$

$$\frac{I}{I_0} = (K \times \lambda^3 \times z^3) \Delta x \quad (2.5)$$

โดยที่	คือ ความหนาแน่นของวัสดุ
$\lambda$	คือ ความยาวคลื่น (Wavelength) (nm) คือ เลขอะตอมของวัสดุ
$\Delta x$	คือ ความหนาของวัสดุที่เปลี่ยนไป (mm)

### 2.1.5 การกระจายตัวของรังสี [9]

ในการทดสอบถ่ายภาพด้วยรังสีสิ่งที่ต้องพิจารณาคือ ระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับแหล่งกำเนิดรังสี จะต้องมีความเหมาะสม ถ้าระยะห่างมากเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานมากทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีนานขึ้น ซึ่งการสูญเสียพลังงานของรังสีสามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

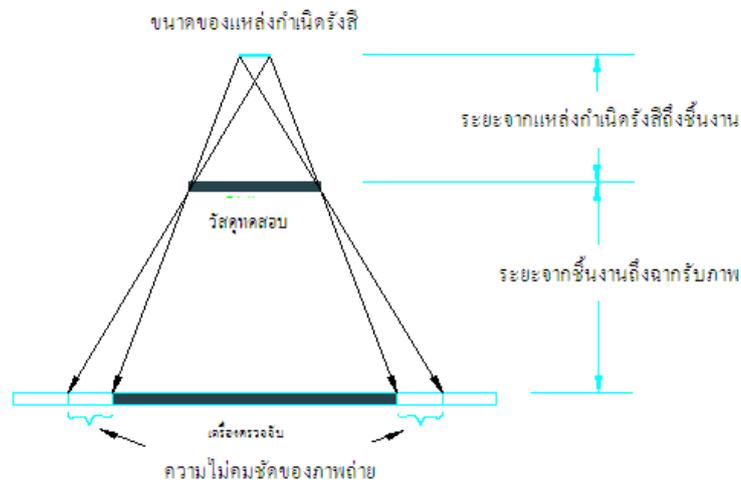
$$\left(\frac{D_0}{D}\right)^2 = \left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่	$D_0$	คือ ระยะเดิมจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงฉากรับภาพ คือ ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงฉากรับภาพที่เปลี่ยนแปลง
	$I_0$	คือ ความเข้มของรังสีที่ฉายเข้าสู่วัสดุ คือ ความเข้มของรังสีที่ผ่านออกจากวัสดุ

ถ้าระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงฉากรับภาพหรือชิ้นงานทดสอบนั้นมีระยะน้อย จะทำให้ชิ้นงานได้รับพลังงานรังสีมากและเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีน้อยลง ซึ่งการที่ชิ้นงานได้รับพลังงานรังสีที่มากเนื่องจากระยะทางที่ใกล้กันจะส่งผลต่อค่าความไม่คมชัดของภาพดังสมการที่ 2.7

$$U_g = F \cdot b / a \quad (2.7)$$

- โดยที่
- $U_g$  คือ ความไม่คมชัดของภาพถ่ายด้วยรังสี (mm)
  - $F$  คือ ขนาดของแหล่งกำเนิดรังสี (mm)
  - $b$  คือ ระยะจากชิ้นงานถึงฉากรับภาพ (mm)
  - $a$  คือ ระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงชิ้นงาน (mm)



รูปที่ 2.7 ความไม่คมชัดของภาพถ่ายด้วยรังสี [5]

จากรูปที่ 2.7 ถ้าระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงชิ้นงานทดสอบมีค่าน้อย จะทำให้ค่าความไม่คมชัดของการถ่ายภาพด้วยรังสียิ่งมีค่าที่สูง ดังนั้นระยะจากแหล่งกำเนิดรังสีถึงชิ้นงานที่จะทดสอบควรมีระยะที่เหมาะสมเพื่อให้ค่าความไม่คมชัดภาพสามารถยอมรับได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดค่าสูงสุดของความไม่คมชัดทางเรขาคณิต [11]

ความหนาของชิ้นงาน	ค่าความไม่คมชัดสูงสุดที่ยอมรับได้
< 50 มิลลิเมตร	0.51 มิลลิเมตร
50 - 75 มิลลิเมตร	0.76 มิลลิเมตร
75 - 100 มิลลิเมตร	1.02 มิลลิเมตร
> 100 มิลลิเมตร	1.78 มิลลิเมตร

### 2.1.6 การเลือกค่าพลังงานในการทดสอบ [9]

การเลือกใช้ค่าพลังงานในการทดสอบที่มีค่าสูงจะทำให้ค่าช่วงความเข้มของฉากรับภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานช่วงความหนาที่แตกต่างกันที่สามารถตรวจสอบได้ (Latitude) มีช่วงที่สูงขึ้น แต่ถ้าใช้ค่าระดับพลังงานที่ต่ำจะทำให้ค่าช่วงความเข้มของฉากรับภาพที่เหมาะสมกับการใช้งานช่วงความหนาที่แตกต่างกันที่สามารถตรวจสอบได้ (Latitude) มีช่วงที่ต่ำลงและจะทำให้ภาพเกิดความเปรียบต่าง (Contrast) ที่ไม่ดีโดยสามารถคำนวณค่าระดับพลังงานในการถ่ายภาพด้วยรังสีที่มีความหนาต่างๆของชิ้นงานทดสอบได้จากสมการที่ 2.8 ซึ่งใช้ค่าคงที่ในการคำนวณตามตารางที่ 2.2

$$kV = A + Bx \quad (2.8)$$

โดยที่	kV	คือ ค่าพลังงานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี (kV)
	A	คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ
	B	คือ ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ
	x	คือ ความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบ (mm)

### ตารางที่ 2.2 การเลือกค่าพลังงานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี [9]

ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณ	ความหนาของชิ้นงานอลูมิเนียม (มิลลิเมตร)		ความหนาของชิ้นงานเหล็ก (มิลลิเมตร)	
	0.5 – 5.0	5.0 – 50.0	0.5 – 5.0	5.0 – 50.0
A	20	40	40	80
B	5.0	1.5	10	5

### 2.1.7 ความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer: HVL) [9]

โดยทั่วไปปริมาณรังสีที่ลดลงเมื่อผ่านวัสดุใดๆ สามารถพิจารณาได้ในรูปของความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer) ซึ่งหมายถึง ความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มหรือปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มรังสีที่ตกกระทบ ซึ่งค่าความหนาครึ่งค่า (Half Value Layer) ไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับ

พลังงานของรังสีและชนิดของวัสดุ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.3 โดยความหนาครึ่งค่าจะแปรผกผันกับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีดังสมการที่ 2.9

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (2.9)$$

โดยที่ HVL คือ ค่าความหนาครึ่งค่า (cm)  
 $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Attenuation Coefficient) (1/cm)

ตารางที่ 2.3 ความหนาครึ่งค่าของวัสดุ [9]

ระดับค่าพลังงาน ของรังสี (kV)	ตะกั่ว	เหล็ก	คอนกรีต
	HVL (มิลลิเมตร)	HVL (เซนติเมตร)	HVL (เซนติเมตร)
50	0.06	0.43	0.017
70	0.17	0.84	0.03
100	0.27	1.6	0.08
125	0.28	2.0	0.1
150	0.30	2.24	0.13
200	0.52	2.5	0.3
250	0.88	2.8	0.35
300	1.47	3.1	0.4
400	2.5	3.3	0.6

### 2.1.8 ตัวประกอบความหนาสมมูลย์ (Equivalent Thickness Factor) [9]

ตัวประกอบความหนาสมมูลย์สามารถใช้ในการปรับค่าเอกซ์โพเชอร์ (Exposure) สำหรับชิ้นงานที่เป็นวัสดุต่างชนิดกับชนิดของวัสดุของเอกซ์โพเชอร์ (Exposure) เดิม โดยการใช้งานตัวประกอบของค่าความหนาสมมูลย์ (Equivalent Thickness Factor) เป็นค่าโดยประมาณดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ค่าตัวประกอบความหนาสมมูล (Equivalent Thickness Factor) [9]

ชนิดของวัสดุ	ระดับค่าพลังงานของรังสี (kV)					
	50	100	150	200	250	300
แมกนีเซียม	0.034	0.43	0.055	0.071	-	-
อลูมิเนียม	0.057	0.077	0.125	0.159	0.182	0.192
เหล็ก	1	1	1	1	1	1
ทองแดง	1.33	1.47	1.43	1.37	1.47	1.53
ทองเหลือง	-	-	1.25	1.25	1.25	1.25
ตะกั่ว	5.26	8.33	11.11	13.33	15.38	16.67

### 2.1.9 การวัดความเข้มของฉากรับภาพ [9]

ความเข้มของฉากรับภาพ (Density) ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นค่าที่วัดได้โดยการส่งแสงผ่านฉากรับภาพ แล้วหาอัตราส่วนของความเข้มของแสง ก่อนผ่านฉากรับภาพต่อความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฉากรับภาพ ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2.10

$$D = \text{Log}_{10} \left( \frac{I_1}{I_2} \right) \quad (2.10)$$

โดยที่

- D คือ ความเข้มของฉากรับภาพ
- $\text{Log}_{10}$  คือ ฟังก์ชันผกผันของฟังก์ชันเลขชี้กำลังฐาน 10
- $I_1$  คือ ความเข้มของแสงก่อนผ่านฉากรับภาพ
- $I_2$  คือ ความเข้มของแสงเมื่อผ่านฉากรับภาพ

ความเข้มของฟิล์มจะต้องวัดโดยทั่วบริเวณพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบหาความไม่ต่อเนื่อง โดยความเข้มทั่วทั้งพื้นที่นั้นๆ จะต้องมามีค่าความเข้มอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนด โดยจะทำการวัดความเข้มของฟิล์มที่ผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม โดยใช้เครื่องมือวัดความเข้มของฟิล์ม (Densitometer)

## 2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดฟิล์ม [12]

ปัจจุบัน เทคโนโลยีในการถ่ายภาพด้วยรังสีชนิดฟิล์มยังเป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลายในงานอุตสาหกรรม โดยเฉพาะการทดสอบแบบไม่ทำลาย ในงานวิจัยนี้ได้เลือกรังสีในการถ่ายภาพออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ชนิดของฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ

- 1) ฟิล์มกลุ่มที่ใช้งานทางการแพทย์เป็นชนิดที่ผลิตขึ้นมาใช้งานกับฉากเรืองแสง ซึ่งจะเรืองแสงได้เมื่อสัมผัสกับรังสีและจะทำให้ลดเวลาในการฉายรังสีลง
- 2) ฟิล์มกลุ่มที่ใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นฟิล์มที่ผลิตขึ้นมาเพื่อการใช้งาน โดยไม่มีฉากเรืองแสง แต่เหมาะกับฉากเพิ่มความเข้มที่ทำจากโลหะ
- 3) ฟิล์มกลุ่มที่ใช้งานเฉพาะทางเป็นฟิล์มที่เคลือบสารไวแสงมาด้านเดียวเพื่อให้ความคมชัดพิเศษ หรือใช้กับรังสีอื่นที่ไม่ใช่รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา

### 2.2.1 ลักษณะของฟิล์ม

ฟิล์มเป็นส่วนที่ใช้บันทึกภาพถ่ายด้วยรังสีไวอย่างถาวร โดยทั่วไปจะมีการเคลือบสารไวแสงเอาไว้ทั้ง 2 ด้านของแผ่นฟิล์ม ซึ่งส่วนประกอบของฟิล์มแบ่งออกเป็นชั้นได้ ดังนี้



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของฟิล์มแบ่งออกเป็นชั้นต่างๆ [12]

2.2.1.1 ฐานหรือแผ่นรอง (Base) เป็นแผ่นพลาสติกบางใส เป็นแกนของแผ่นฟิล์มทำมาจากโพลีเอสเตอร์ (Polyester) เนื่องจากทำให้ฟิล์มแข็งแรงโค้งงอได้ เก็บได้นาน หนักขาคยาก ไม่ดูดความชื้น มีความหนาประมาณ 180  $\mu\text{m}$  เป็นแกนกลางให้ส่วนอื่นๆยึดไว้เท่านั้น

2.2.1.2 ชั้นอิมัลชัน (Emulsion) เป็นชั้นที่มีส่วนผสมของสารที่มีความไวต่อแสง รั้งสีความร้อน สารเคมี ความหนาประมาณ 10-15  $\mu\text{m}$  ประกอบด้วย Silver Bromide (AgBr) ประมาณ 95% และ Silver iodide (AgI) = 5% (10-1%) (ฟิล์มบางชนิดอาจใช้ AgCl แทน AgI) และมักผสมกับเจลาติน เนื่องจากช่วยให้เจลาตินดูดน้ำจากน้ำยาฟิล์ม ทำให้เจลาตินบวมเปิดทางให้สารเคมีจากน้ำยาเข้าไปทำปฏิกิริยากับโครงสร้างโมเลกุลของฟิล์มได้ง่าย นอกจากนี้ยังรักษาสาร AgBr ให้แขวนตะกอนและป้องกันการแยกออกเป็นอิสระของผลึกได้ง่าย

2.2.1.3 ชั้นซับสตราตัม (Substratum) เป็นชั้นที่อยู่ระหว่างอิมัลชันกับแผ่นรองเป็นชั้นของการช่วยยึดอิมัลชันให้ติดกับฐานหรือแผ่นรอง

2.2.1.4 ชั้นนอกสุด (Super Coat) เป็นชั้นบางใสทำให้เจลาตินแข็งตัวเคลือบอยู่บนอิมัลชันป้องกันไม่ให้เสียหาย ปกติผิวของชั้นนอกสุดจะต้องเรียบและแข็ง แต่ไม่ควรแข็งมาก เพราะสารเคมีจะทำปฏิกิริยากับผลึก  $\text{Ag}^+$  ได้ยาก ทำให้ใช้เวลาในการล้างนานขึ้น

## 2.2.2 การเลือกชนิดของฟิล์ม

การเลือกชนิดฟิล์มให้เหมาะสมกับการถ่ายภาพด้วยรังสี ต้องพิจารณาถึงชนิดและความหนาของชิ้นงาน ชนิดและระดับพลังงานหรือความเข้มที่ใช้ ระดับความเข้มงวดของการทดสอบ ระดับความคมชัดคอนทราสต์และเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีตามมาตรฐาน ASTM โดยชนิดของฟิล์มที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมแบ่งได้เป็น 4 ประเภทดังนี้

2.2.2.1 ฟิล์มเม็ดละเอียดมาก (Ultra-Fine Grain) เป็นฟิล์มที่มีผลึกของของเกรนเล็กและละเอียดมาก ทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีรายละเอียดมาก มีความไวแสงที่ต่ำมาก (Vary Low Speed) ทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีนาน

2.2.2.2 ฟิล์มเม็ดละเอียด (Fine Grain) เป็นฟิล์มที่มีผลึกของเกรนละเอียด ให้รายละเอียดที่ดีมีความไวแสงต่ำ (Low Speed) ต่ำ

2.2.2.3 ฟิล์มเม็ดปานกลาง (Medium Grain) เป็นฟิล์มที่มีผลึกของเกรนปานกลาง มีความไวแสงปานกลาง (Medium Speed)

2.2.2.4 ฟิล์มเม็ดหยาบ (Coarse Grain) เป็นฟิล์มที่มีผลึกของเกรนหยาบ มีความไวแสงสูง (High Speed) ใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อย

ซึ่งจากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแสดงการแบ่งชนิดของฟิล์มตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การแบ่งชนิดของฟิล์มตามมาตรฐาน ASTM SE94 [9]

ประเภท	ความไวแสง	ขนาดของเกรน	คอนทราสต์
1	ต่ำมาก	ละเอียดมาก	สูง
2	ต่ำ	ละเอียด	สูง
3	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
4	เร็ว	ปานกลาง	ปานกลาง

ตารางที่ 2.6 ค่าคงที่ความเร็วของฟิล์ม [9]

KODAK	K		AGFA
	$K_K$	$K_A$	
CX	0.65	0.6	D8
AA400	1	1	D7
T200	1.9	1.6	D5
MX125	3.1	2.6	D4
M	4.4	4.2	D3
DR	9	10	D2
Double M	2.75	2.70	Double D3

ชนิดของฟิล์มที่ใช้ในงานอุตสาหกรรม ฟิล์มที่อยู่อันดับบนจะให้ภาพที่ดีมีคุณภาพมากกว่าฟิล์มที่อยู่อันดับล่างลงมา ดังแสดงตามตารางที่ 2.7 ชนิดของฟิล์มที่ควรเลือกใช้ตามกำลังในการทะลุผ่านของแหล่งกำเนิด ดังแสดงตามตารางที่ 2.8 โดยทั่วไปการทดสอบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุเหล็กจะใช้ชนิดฟิล์มที่ II ส่วนการทดสอบชิ้นงานที่ทำจากวัสดุอะลูมิเนียมมักจะใช้ฟิล์มชนิดที่ I



ตารางที่ 2.8 มาตรฐานการเลือกใช้ฟิล์ม แบ่งออกได้ ดังนี้ [9]

ชนิดวัสดุทดสอบ	ความหนา (mm)	รังสีเอกซ์(kVp)								รังสีแกมมา		
		<50	50 - 80	80- 120	120- 150	150 - 250	250 - 400	1000	10 – 20 MeV	192Ir	132Cs	60Co
โลหะผสมเบา	0-6	II	I	I								
	6-13	II,III	II	I	I							
	13-25	II,III	II	II	I					I		
	25-50		II,III	II	II	I				I		
	50-100		III,IV	II,III	II	II				II		
	>100			III	II,III	III				II,III		
เหล็กกล้า	0-6		III	III	II	I		I		I		
	6-13		IV	III	II	II	I	I		I,II	I	
	13-25			IV	III	II	II	I		II	I,II	I
	25-50				IV	II,III	II	I	I	II	II	I,II
	50-100					IV	III, IV	I,II	I	II,III	II,III	II
	>100						IV	II,III	II		III	II,III

ในงานวิจัยนี้จะเลือกฟิล์มที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นฟิล์มที่ผลิตขึ้นมาเพื่อการใช้งาน โดยไม่มีฉากเรืองแสง ซึ่งจะใช้ฟิล์มความไวแสงปานกลาง ทดสอบกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และแกมมา

### 2.2.3 การล้างฟิล์ม

การเตรียมการก่อนการล้างฟิล์ม เนื่องจากการล้างฟิล์มต้องทำในสภาวะแสงสว่างน้อยมากดังนั้นจึงต้องเตรียมการก่อนการล้างฟิล์มให้ถูกต้อง ก่อนที่จะทำการดับไฟแสงสว่างและนำฟิล์มออกมาจากช่องฟิล์ม ขั้นตอนการเตรียมก่อนการล้างฟิล์มมีดังต่อไปนี้

- 2.2.3.1 ตรวจสอบระดับของสารเคมีที่ใช้ในขบวนการโดยที่ระดับสารเคมีจะต้องไม่ล้นออกนอกภาชนะบรรจุ เมื่อสารเคมีกระเพื่อมจากการล้างฟิล์มและต้องมีระดับน้ำที่ท่วมฟิล์มมิดเพื่อให้ฟิล์มได้สัมผัสสารเคมีได้อย่างทั่วถึง
- 2.2.3.2 กวนสารเคมีให้เข้ากันทั่ว เนื่องจากสารเคมีที่ไม่ได้ใช้งานช่วงระยะเวลาหนึ่งสารเคมีจะตกตะกอน จึงต้องทำการกวนสารเคมีให้เข้ากัน จึงจะทำให้สารเคมีสามารถเข้าทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ
- 2.2.3.3 ตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำโดยที่อัตราการไหลที่เหมาะสมระหว่าง 4 ถึง 8 เท่าของปริมาตรถังต่อชั่วโมง
- 2.2.3.4 ตรวจสอบอุณหภูมิของสารเคมี ซึ่งมักจะควบคุมไว้ที่ 20°C แต่ในเขตร้อนอาจมีอุณหภูมิสูงกว่านี้ได้บ้าง
- 2.2.3.5 จากอุณหภูมิของสารเคมีที่ได้จากข้อที่ 4 ให้คำนวณเป็นเวลาที่ใช้ในขบวนการล้างฟิล์มและเตรียมน้ำพักจบบเวลาให้เรียบร้อยโดยทั่วไปจะใช้เวลาในการสร้างภาพ 5 นาทีที่ 20°C
- 2.2.3.6 เตรียมบริเวณสำหรับถอดฟิล์มออกจากซองฟิล์มโดยต้องทำความสะอาดให้ปราศจากฝุ่นและคราบสารเคมี รวมทั้งทำความสะอาดอุปกรณ์ประกอบ เช่น ที่แขวนฟิล์มด้วยล้างมือให้สะอาดและเช็ดให้แห้ง
- 2.2.3.7 การล้างฟิล์มทุกครั้ง เมื่อเตรียมตามข้อ 1-7 แล้ว จึงพร้อมที่จะล้างฟิล์มซึ่งสมควรทำตามด้วยความเคร่งครัดเพื่อให้ขบวนการในขั้นตอนต่อไปดำเนินไปด้วยความเรียบร้อย
- 2.2.3.8 ขั้นตอนการล้างฟิล์ม
- 2.2.3.8.1 การสร้างภาพ (Developing) ทำได้โดยการแช่ฟิล์มลงในสารสร้างภาพ (Developing Agent) ความเข้มข้นของสารสร้างภาพเพียงพอ อุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรสูงกว่า 25°C เนื่องจากจะทำให้ฟิล์มเกิดการหมองคล้ำ และไม่ควรต่ำกว่า 18°C เนื่องจากสารสร้างภาพไม่สามารถทำปฏิกิริยาได้ ขั้นตอนการสร้างภาพควรทำการเขย่าฟิล์มในสารสร้างภาพเป็นจังหวะๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงแรกของการกระบวนการเพื่อเป็นการกำจัดฟองอากาศที่เกาะอยู่บนฟิล์มและเป็นการหมุนเวียนสารสร้างภาพใหม่เข้ามาทำปฏิกิริยา หลังจากการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง สารสร้างภาพจะมีความสามารถในการทำปฏิกิริยาลดต่ำลง จึงควรเติมสารสร้างภาพใหม่เพื่อให้ได้ ความเข้มข้น และระดับของสารสร้างภาพที่เหมาะสมอย่างไรก็ตามสารสร้างภาพที่ไม่ได้ใช้งานก็สามารถเสื่อมสภาพไปได้เอง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับออกซิเจนในอากาศ โดยทั่วไปสารสร้างภาพจะมีอายุการใช้งานไม่เกิน 1 เดือน จะต้องทำการผสมหรือเตรียมสารใหม่ฟิล์มเกิดจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมี 2 ชนิด คือสารเคมีสร้างความเข้มดำ (Phenidone) ซึ่งสร้างความเข้มดำ (สีเทา) ในเวลาที่รวดเร็ว และสารเคมีสร้างความเข้มสูง (Hydroquinone) ซึ่งสร้างความเข้มสูง (สีดำ) แต่ใช้เวลานาน ดังนั้นความเข้มของฟิล์มจึงเป็นผลรวมของการทำปฏิกิริยาของสารเคมีทั้ง 2 ชนิด เมื่อทำการจุ่มฟิล์มลงในสารสร้างภาพปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ผลึกสารไวแสงที่ได้รับรังสีแล้วเปลี่ยนเป็นสีดำ ซึ่งความเข้มที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามเวลา

ที่ใช้ในการจุ่มฟิล์มลงในสารสร้างภาพ ใช้เวลา 5 นาที ที่ 20°C หากอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่านี้จะมีอัตราในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันออกไป การใช้เวลานานเกินไปย่อมทำให้ฟิล์มมีความเข้มสูงมากเกินไป (Over Developing) ส่วนเวลาที่เร็วเกินไปอาจไม่สามารถทำให้ฟิล์มเกิดความเข้มได้

2.2.3.8.2 การกันชนเนื่องจากสารสร้างภาพเป็นสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่างและสารเคมีในขั้นตอนฟิกเซอร์มีฤทธิ์เป็นกรดดังนั้นหากนำฟิล์มจากการจุ่มสารสร้างภาพผ่านลงฟิกเซอร์โดยตรง ย่อมทำให้ฟิกเซอร์เกิดการปนเปื้อนและเสื่อมสภาพเร็วขึ้น ดังนั้นก่อนขั้นตอนของฟิกเซอร์จึงควรจุ่มฟิล์มลงในสารเคมีที่สามารถป้องกันการปนเปื้อนนี้ได้ โดยที่สารนี้สามารถเตรียมขึ้นได้จากกรดอะซิติกชนิดเกรด 2.5 ml ต่อน้ำ 1 ลิตร ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ 30 วินาที นอกจากนี้ยังสามารถใช้น้ำบริสุทธิ์ที่มีการหมุนเวียนโดยใช้เวลา 1-2 นาที

2.2.3.8.3 ฟิกเซอร์ หน้าที่ของสารฟิกเซอร์ (Fixer) คือ

1. หยุดการทำงานของสารสร้างภาพ
2. กำจัดสารไวแสงที่ไม่ได้รับรังสี (ไม่ทำปฏิกิริยากับสารสร้างภาพ)
3. ทำให้สารเคลือบแข็งตัว

สารเคมีที่ใช้ ในขั้นตอนนี้แสดงดังตาราง

ตารางที่ 2.9 สารฟิกเซอร์และหน้าที่ของสารฟิกเซอร์ [9]

สารเคมี	หน้าที่
Ammonium Thiosulfate	กำจัดสารไวแสงที่ไม่ได้รับรังสี
Aluminium Chloride	ทำให้สารเคลือบแข็งตัว
Acetic Acid	กำจัดฤทธิ์ของสารสร้างภาพ (หยุดทำงาน)
Sodium sulfite	สารกันเสีย
Water	ตัวทำละลาย

เวลาที่ใช้ในขั้นตอนนี้สามารถคำนวณได้จากเวลาเคลียร์ริง (Clearing Time) โดยที่

$$\text{เวลาในขั้นตอนฟิกซิ่ง} = 3 \times \text{เวลาเคลียร์ริง} \quad (2.11)$$

เวลาเคลียร์ริง (Clearing Time) หมายถึง เวลาที่นับเริ่มต้นจากการจุ่มฟิล์มลงในสารฟิกเซอร์จนครบน้ำมันบนฟิล์มที่ผ่านสารสร้างภาพจางหายไป แต่เวลาฟิกซิ่งต้องไม่ต่ำกว่า 3 นาที และใช้เวลาไม่เกิน 15 นาที หากต้องใช้นานกว่านี้ถือว่าสารฟิกเซอร์หมดอายุการใช้งานต้องเตรียมขึ้นมาใหม่ ในขณะการใช้งานควรเติมสารฟิกเซอร์ใหม่ลงบ้างเพื่อรักษาความเข้มข้นและระดับของสารฟิกเซอร์ เนื่องจาก

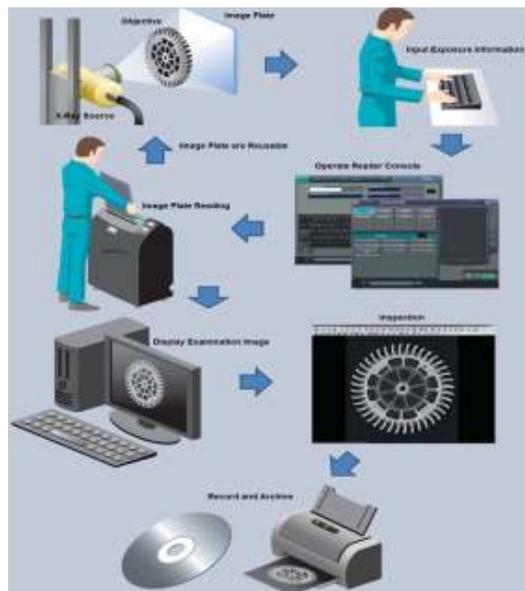
ในขั้นตอนนี้มีการกำจัดสารไวแสงที่เป็นสารประกอบของเงิน ซึ่งตกตะกอนภายในภาชนะนี้ ดังนั้นเมื่อสารฟิสิกเซอร์ หมคอายุการใช้งานจึงสามารถนำสารประกอบนี้มาใช้ใหม่ได้

2.2.3.8.4 การล้างน้ำขั้นตอนนี้เป็นการล้างฟิสิกเซอร์ออกจากแผ่นฟิล์ม เพื่อป้องกันสารฟิสิกเซอร์ตกค้าง ซึ่งเป็นผลเสียกับฟิล์มการล้างต้องใช้น้ำสะอาดที่มีการหมุนเวียนอย่างสม่ำเสมอเป็นเวลา 15-30 นาที หากนานกว่านี้จะทำให้สารเคลือบหลุดออกได้ น้ำที่ใช้ไม่ควรมีอุณหภูมิสูงกว่า  $25^{\circ}\text{C}$  ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อสารเคลือบได้และไม่ควรมีอุณหภูมิต่ำกว่า  $15^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากไม่สามารถละลายสารฟิสิกเซอร์ออกจากฟิล์มได้

2.2.3.8.5 การอบแห้งเป็นขั้นตอนสุดท้ายเพื่อเร่งเวลาให้ฟิล์มที่เปียกน้ำแห้งโดยเร็วเพื่อนำไปทำการตรวจสอบ อุณหภูมิของลมร้อนสำหรับการอบแห้งไม่ควรเกิน  $50^{\circ}\text{C}$  มิฉะนั้นจะทำให้เกิดความเสียหายกับแผ่นฟิล์ม ลมที่ใช้ควรปราศจากฝุ่นที่อาจมาเกาะติดบนฟิล์มได้ ที่แขวนฟิล์มในตู้อบฟิล์มควรออกแบบให้มีที่ว่างเพื่อป้องกันไม่ให้ฟิล์มมาแตะกันได้

### 2.3 การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล (Digital Computed Radiography) [10]

เทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการพัฒนาระบบการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งทำให้ได้ผลการทดสอบของภาพบนฉากรับภาพที่สามารถแสดงออกมาในลักษณะดิจิทัล (Digital) เพื่อให้ได้ผลการทดสอบของภาพที่มีคุณภาพมากขึ้นทำให้สามารถส่งผ่านข้อมูลของผลการทดสอบได้สะดวกรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.9

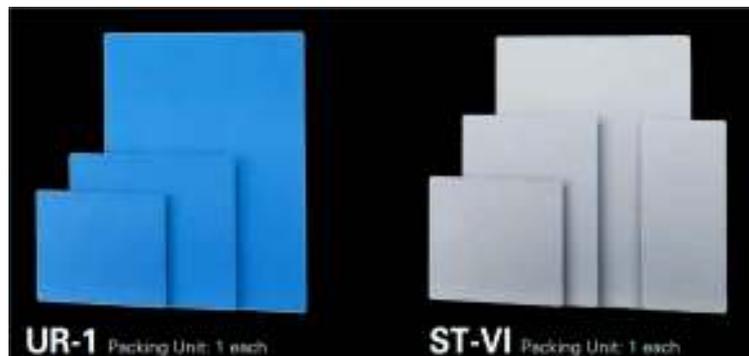


รูปที่ 2.9 หลักการทำงานของ การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล (Digital Radiography) [13]

การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล (Digital Computed Radiography) จึงเป็นอีกเทคโนโลยีหนึ่งที่ได้ถูกนำมาใช้ในการทดสอบเพื่อหาค่าความหนาของชิ้นงานท่อหุ้มฉนวนในภาคอุตสาหกรรมและนอกจากนี้การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล (Digital Computed Radiography) ยังได้มีกระบวนการปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้จากการทดสอบและสามารถใช้ตัวกรองภาพ (Image Filter) เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำที่สุด ซึ่งส่งผลโดยตรงกับการทดสอบและในบางครั้งก็ไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบฉายรังสีซ้ำ การเก็บรักษาข้อมูลภาพที่ได้จากการทดสอบไม่มีความจำเป็นต้องใช้พื้นที่มากและลดการสูญหายของข้อมูลภาพที่ได้จากการทดสอบ

### 2.3.1 ฉากรับภาพ (Image Plate) [13]

ฉากรับภาพ (Image Plate) ดังรูปที่ 2.10 เป็นวัสดุบันทึกภาพจากการทดสอบด้วยรังสีชนิดหนึ่งคล้ายกับฟิล์ม (Film) ที่ใช้บันทึกภาพที่ถ่ายด้วยรังสี ทำจากวัสดุเรืองแสงที่สามารถเก็บพลังงานของรังสีที่ได้รับเอาไว้ แล้วนำมาสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งฉากรับภาพจะคายพลังงานที่เก็บไว้ โดยการเรืองแสงออกมาด้วยคุณสมบัติของสารเรืองแสง จึงมีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกทางการแพทย์ในงานด้านรังสีวินิจฉัย โดยใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ จากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการวิจัยทางวิทยาศาสตร์



รูปที่ 2.10 ฉากรับภาพ [13]

#### 1. ส่วนประกอบของฉากรับภาพ [14]

ฉากรับภาพเป็นแผ่นบันทึกภาพที่มีความยืดหยุ่น ประกอบด้วยผลึกสารเรืองแสงขนาดเล็ก ซึ่งมีขนาดของผลึกประมาณ  $5\ \mu\text{m}$  เป็นสารประกอบโบรไมด์ ฟลูออโร แบเรียม (Barium Fluoro Bromide) ที่เจือด้วยบิวาเลนท์ ยูโรเพียม (Bivalent Europium) เล็กน้อย ทำหน้าที่เป็นจุดกึ่งกลางในการเรืองแสง (Luminescence Center) มีสูตรโมเลกุลเป็น  $\text{BaFBr: Eu}^{2+}$  เคลือบอยู่บนแผ่นฟิล์มโพลิเอสเตอร์ (Film

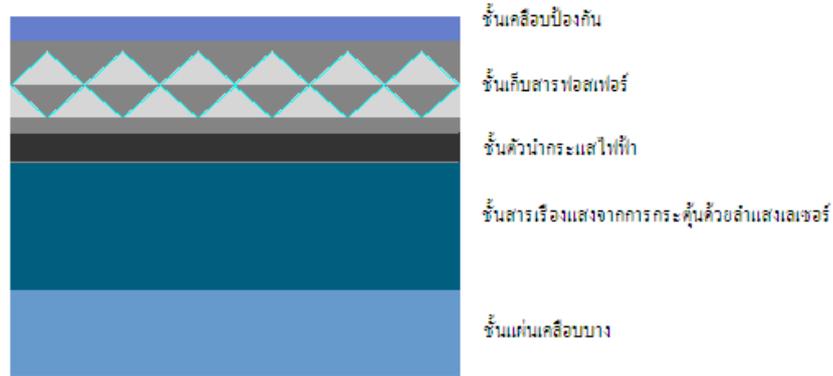
Polyester) โดยทั่วไปวัสดุชนิดนี้ เรียกว่า วัสดุเรืองแสง (Fluorescent Substances) มีลักษณะเป็นผง ซึ่งสามารถเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อถูกกระตุ้นบางอย่าง เช่น รังสีเอกซ์ แสงที่เปล่งออกมา จะหมดลงทันทีที่หยุดการกระตุ้น ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่าปรากฏการณ์เรืองแสง (Fluorescence) สารเรืองแสงบางชนิด ยังเปล่งแสงออกมาได้ เมื่อหยุดการกระตุ้นแล้ว ซึ่งเรียกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) ส่วนคำว่าลูมิเนสเซนส์ (Luminescence) เป็นคำรวมที่ใช้เรียกปรากฏการณ์ในการเปล่งแสงทั้งสองแบบ

- ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) เป็น การเรืองแสงชนิดที่การปลดปล่อยแสงออกมาเกิดขึ้นทันทีทันใดภายในเวลา 10-8 วินาที และหยุด เมื่อหยุดการกระตุ้น

- ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) เป็นการเรืองแสงชนิดที่การปลดปล่อยแสงออกมาหลังจากได้รับการกระตุ้นแล้วนานกว่า 10-8 วินาที และการเรืองแสงดำเนินต่อไปอีกนานกว่าสัดส่วนของวินาที เมื่อหยุดการกระตุ้นแล้ว เหตุการณ์นี้เรียกว่า After Glow หรือ Lag

ในการพัฒนาสารเรืองแสง (Phosphor) มีการพิจารณาคุณสมบัติในการเรืองแสง (Luminescence) ทั้งแบบฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และแบบฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) เพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท มีการศึกษาวิจัยในการปรับสัดส่วนองค์ประกอบของสารเรืองแสง และขั้นตอนในกระบวนการผลิต สารเรืองแสงที่ใช้ในการผลิตมีคุณสมบัติในการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (Photo-Stimulated Luminescence: PSL) ซึ่งมีความแตกต่างจากฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) และฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)

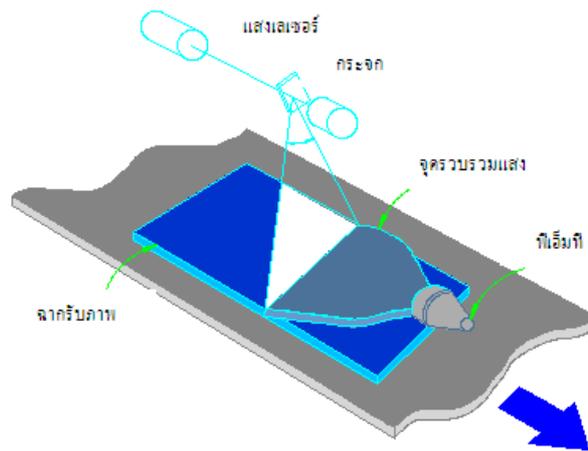
ปรากฏการณ์ของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสีค้นพบโดยเบ็กเคอเรล (Becquerel) นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ตอนกลางศตวรรษที่ 19 ซึ่งเป็นปรากฏการณ์เมื่อวัตถุถูกกระตุ้นครั้งแรกด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง เช่น รังสี และจะเปล่งแสงออกมา เมื่อถูกกระตุ้นครั้งที่สอง ด้วยคลื่นที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ปรากฏการณ์การเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสีไม่ได้รับความสนใจ จนกระทั่งปลายสงครามโลกครั้งที่สอง มีการพัฒนาไปใช้ในการตรวจวัดรังสีอินฟราเรด ของนักวิจัยในกองทัพญี่ปุ่น และใช้บันทึกภาพถ่ายด้วยรังสีในสหรัฐอเมริกา ในปี 1947 ฉากรับภาพ (Image Plate) จึงใช้บันทึกภาพจากรังสีเอกซ์ โดยใช้หลักการพื้นฐานมาจากปรากฏการณ์ของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี ในการเก็บข้อมูลที่มาจากรังสี แล้วคายออกมาในรูปของแสง ซึ่งแสดงส่วนประกอบดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างและส่วนประกอบของฉากรับภาพ [10]

### 2. การเก็บข้อมูลของฉากรับภาพ [14]

การถ่ายภาพด้วยรังสี โดยการใช้ฉากรับภาพมีขั้นตอนวิธีการคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยการใช้ฟิล์ม (Film) ซึ่งฉากรับภาพที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยรังสีแล้วจะนำไปสแกนด้วยแสงเลเซอร์ โดยมีตัวอ่านความละเอียดสูงเพื่อเก็บรายละเอียดของแสงที่เปล่งออกจากฟอสเฟออร์ (Phosphor) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การเก็บข้อมูลตามปริมาณรังสีของฉากรับภาพ [14]

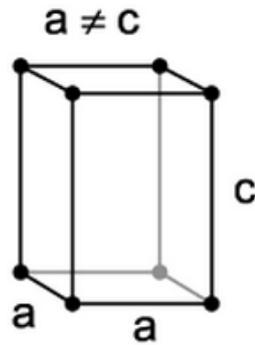
หลังจากได้รับพลังงานจากการถ่ายภาพโดยใช้รังสีฉากรับภาพที่ฉายรังสีแล้ว เมื่อสแกนด้วยลำแสงเลเซอร์ การเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสีที่เปล่งออกมาจะถูกอ่านและส่งผ่านหลอดรับแสง

จากการกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ (Photo-Multiplier Tube: PMT) ไปยังส่วนอ่านความเข้มแสงในแต่ละบริเวณและแปลงค่าที่อ่านได้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยการอ่านความเข้มของแสงที่เปล่งออกมาสามารถปรับค่าความละเอียดได้ตั้งแต่ 5 ถึง 40 พิกเซลต่อมิลลิเมตร (Pixel Per mm) ช่วงของความไวของสี (Sensitivity Range) และความไวของสีในการอ่าน (Reading Sensitivity) สามารถปรับค่าได้ แสงจากการกระตุ้นด้วยรังสีที่เปล่งออกมาอยู่ในช่วงแสงสีน้ำเงินม่วง 400 นาโนเมตร (nm) จะถูกอ่านและส่งไปยังหลอดรับแสงจากการกระตุ้นด้วยลำแสงเลเซอร์ (Photo-Multiplier Tube: PMT) เมื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้ว จะถูกเปลี่ยนจากสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ซึ่งปรับค่าได้ระหว่าง 8 - 16 บิต

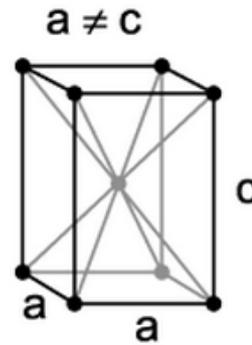
### 3. หลักการทำงานของงานของฉากรับภาพ [14]

กระบวนการทำงานของฉากรับภาพเริ่มต้นที่ผลึก  $\text{BaFX: Eu}^{2+}$  ( $X = \text{Cl, Br or I}$ ) เป็นสารประกอบอนินทรีย์ มีโครงสร้างเป็นแบบประกอบด้วยแกน 3 แกนตัดตั้งฉากกันที่กึ่งกลางมีสองด้านยาวเท่ากัน ส่วนอีกด้านอาจจะยาวหรือสั้นกว่าก็ได้ (Tetragonal) แสดงคังรูปที่ 2.13 เมื่อแทนที่ Ba ด้วยไอออนของ  $\text{Eu}^{2+}$  จะทำให้อยู่ในรูปแบบของแข็ง (Solid Solution) เมื่อผลึกนี้ได้รับรังสี อิเล็กตรอนจะถูกจับอยู่ในโครงผลึกที่ว่าง ในส่วนไอออนของ F หรือ X ซึ่งจะทำให้เกิดการรวมประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) ขึ้นในผลึกได้ 2 ชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบของ F กับ X ส่วนชนิดของการรวมประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) สามารถหาได้จากการวัดสเปกตรัมของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (Electron Spin Resonance Spectrum) จากการวัดค่าสามารถสรุปได้ว่า ถ้า  $X = \text{Br}$  และได้รับปริมาณรังสีที่เพียงพอ สเปกตรัมของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (ESR) จะให้แสงที่สอดคล้องกับความหนาแน่นของแสง (Optical Density) กระแสของแสง (Light Current) ความเข้มของสเปกตรัมของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (ESR Intensity) และความเข้มของการเรืองแสงจากการกระตุ้นด้วยรังสี (PSL Intensity) ของการรวมประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) นอกจากนั้น ยังพบว่า ความเข้มของการเรืองแสงสีฟ้า (Blue Luminescence) แปรตามจำนวนไอออนของ  $\text{Eu}^{2+}$  ขณะที่การเรืองแสงสีแดง (Red Luminescence) แปรเปลี่ยนตามจำนวนไอออนของ  $\text{Eu}^{3+}$

simple tetragonal

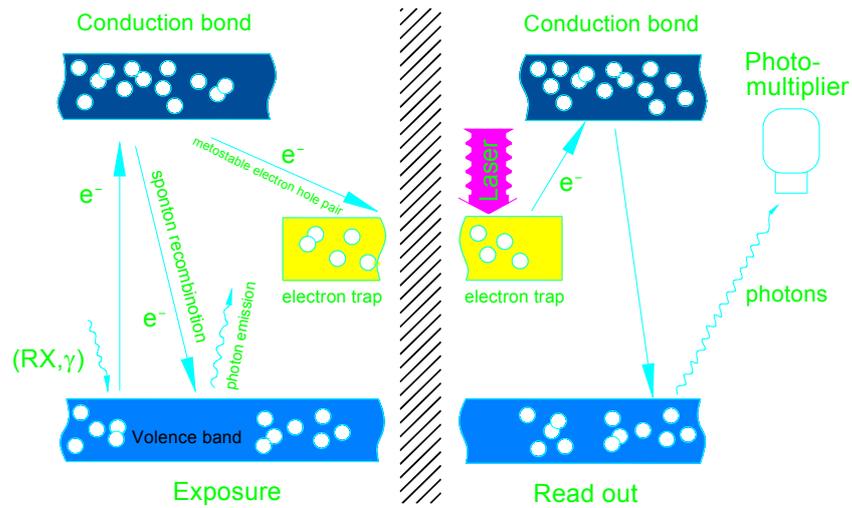


body-centered tetragonal



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของระบบผลึกแบบเตตระโกนัล (Tetragonal) [14]

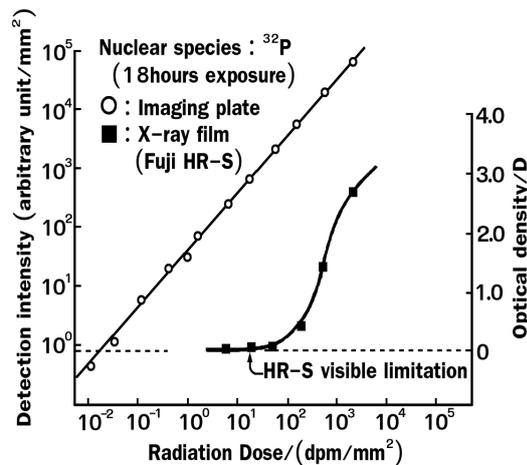
สามารถสรุปได้ว่า BaFBr:  $\text{Eu}^{2+}$  จากการกระตุ้นด้วยรังสีมีกลไกการเรืองแสงตามขั้นตอนคือ เมื่อฟอสเฟอร์ (Phosphor) ถูกกระตุ้นจากการได้รับรังสีเอกซ์ ไอออน  $\text{Eu}^{2+}$  จะเปลี่ยนไปเป็นไอออน  $\text{Eu}^{3+}$  ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาอยู่ที่แถบการนำอิเล็กตรอน (Conduction Band) และถูกจับอยู่ที่ตำแหน่งว่างในผลึกเดี่ยวซึ่งประกอบด้วยอะตอมต่างๆ เรียงต่อกันซ้ำๆ (Lattices) ของผลึก โดยที่ตำแหน่งอะตอมของ Br ion ทำให้เกิดการรวมประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) ในลักษณะของสถานะถูกกระตุ้นกึ่งเสถียร (Meta Stable State) เมื่อประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) ได้รับรังสีอีกครั้ง อิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ จะหลุดออกเป็นอิสระไปอยู่ที่แถบการนำอิเล็กตรอน (Conduction Band) อีกครั้ง หรือทำให้  $\text{Eu}^{3+}$  ion กลายเป็น  $\text{Eu}^{2+}$  ion ที่อยู่ในสถานะเร็ว ซึ่งจะเรืองแสงในรูปแบบของการกระตุ้นด้วยรังสีออกมาตามกลไกของการเรืองแสง อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ถูกจับอยู่ในช่องว่างของโครงสร้างผลึก ตรงส่วนของ Halogen ion ทำให้ประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นกึ่งเสถียร (Meta Stable State) และให้พลังงานรังสีออกมา เมื่อฉายด้วยแสงเลเซอร์และประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) ดูดกลืนพลังงานไว้ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นอีกครั้งอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นจะถูกจับอยู่ที่ Halogen ion ตรงตำแหน่งว่างของผลึก ทำให้ประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) อยู่ในสถานะถูกกระตุ้นกึ่งเสถียร (Meta Stable State) และคายแสงออกมา เมื่อฉายด้วยลำแสงเลเซอร์ประจุเรืองแสงกลางอะตอม (Color Center) จะดูดกลืนไว้ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นอีกครั้ง และจะกลับลงมารวมกับช่องว่างระหว่างอะตอม (Hole) ของ io ซึ่งเป็นจุดศูนย์กลางของอะตอมที่ใช้ในการเปล่งแสง (Luminescence Center) โดยคายพลังงานด้วยการเรืองแสงออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กลไกการเรืองแสงของฉากรับภาพ [15]

4. ลักษณะเฉพาะของฉากรับภาพ [14]

ลักษณะเฉพาะของฉากรับภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ฟิล์ม (Film) แล้วสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.15 เมื่อแกนนอนเป็นปริมาณรังสีจาก P-32 ซึ่งให้รังสีบีตา (β-Ray) พลังงาน 1.7 เมกะโวลต์ (MV) แกนตั้งด้านซ้ายเป็นความเข้มของแสงสีเทา (Gray Value) ที่ได้จากฉากรับภาพและแกนตั้งด้านขวาเป็นความดำของฟิล์ม (Film) สำหรับขีดจำกัดในการมองเห็น ซึ่งเป็นการแสดงส่วนที่สามารถมองเห็นได้ในภาพ มีค่าหนึ่งในสิบเท่าของค่าปกติในการมองเห็น



รูปที่ 2.15 คุณสมบัติเฉพาะของฉากรับภาพและฟิล์ม [14]

โดยนักรับภาพแสดงคุณสมบัติที่คล้ายกันเมื่อทดสอบด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ซึ่งจะเห็นลักษณะเด่นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์รับรังสีชนิดอื่นและนอกจากนี้ยังมีลักษณะเด่นอื่นๆดังต่อไปนี้

- มีความไวในการรับรังสีสูง ซึ่งมากกว่าฟิล์ม (Film) หลายสิบเท่าหรืออาจไวกว่าหลายพันเท่าขึ้นอยู่กับชิ้นงานทดสอบและชนิดของนักรับภาพ

- มีช่วงการหาความหนาที่แตกต่างกัน (Dynamic Range) ที่กว้าง โดยมีช่วงกว้างมากกว่า  $10^4$  นาโนเมตร (nm) ถึง  $10^5$  นาโนเมตร (nm) ซึ่งสูงกว่าการใช้ฟิล์ม (Film) ที่มีอยู่ในช่วง  $10^2$  นาโนเมตร (nm)

- มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า ซึ่งมีการเรืองแสงแปรผันโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ได้รับตลอดช่วง

- มีการแสดงรายละเอียด (Spatial Resolution) ได้สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่น มีความหนาแน่นของพิกเซล (Pixel) สูงกว่า

- ใช้สัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลโดยตรงจากเครื่องอ่าน ทำให้มีกระบวนการทางคอมพิวเตอร์หรือการประสานงานกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นได้สะดวก

- ค่าของรังสีจากสิ่งแวดล้อมที่บันทึกอยู่ สามารถลบออกได้ก่อนจะใช้งาน

ดังนั้นนักรับภาพจึงสามารถนำมาใช้แสดงผลภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งนอกจากจะมีความไวสูงและทำให้แปลงค่าปริมาณรังสีที่ได้จากการทดสอบออกมาเป็นภาพได้แล้ว ยังสามารถแสดงความเข้มของรังสีในแต่ละจุดได้

## 2.4 ตัววัดค่าความไวและคุณภาพในการทดสอบภาพถ่ายด้วยรังสี [9]

ไอคิวไอ (Image Quality Indicator: IQI) เป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้วัดค่าความไวในการทดสอบ โดยต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกับชิ้นงานหรือต้องมีคุณสมบัติในการดูดซับรังสีเหมือนกัน ภาพของไอคิวไอต้องปรากฏบนนักรับภาพเดียวกันกับภาพของชิ้นงานที่ทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี การออกแบบและเลือกใช้ไอคิวไอ ควรคำนึงถึงสิ่งต่อไปนี้

1. ต้องสามารถรายงานการเปลี่ยนแปลงของความไวได้เมื่อเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีเปลี่ยนไป
2. อ่านค่าได้ง่าย และควรต้องอ่านค่าได้เท่ากับการวัดด้วยวิธีอื่น เพื่อเปรียบเทียบกับกันได้
3. ง่ายต่อการใช้งาน และสามารถเข้าถึงชิ้นงานได้เป็นอย่างดี
4. มีขนาดเล็กไม่รบกวนต่อการทดสอบสอบความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงาน
5. ราคาถูกเมื่อทำให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

เนื่องจากค่าความไวในการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี เป็นการเปรียบเทียบขนาดความไม่ต่อเนื่องของชิ้นงาน ซึ่งตัวเลขค่าหมายถึงความไวในการทดสอบที่ดีกว่า ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12 [9]

$$S\% = \left( \frac{IQI_{min}}{t} \right) \times 100 \tag{2.12}$$

โดยที่ S% คือ เปอร์เซ็นต์ความไว  
 t คือ ความหนาของชิ้นงาน (mm)  
 IQI<sub>min</sub> คือ ส่วนเล็กสุดของตัววัดที่มองเห็นบนฉากรับภาพ (mm)

### 2.4.1 ชนิดของตัววัดคุณภาพของการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล

ตัววัดคุณภาพของภาพที่ได้จากฉากรับภาพในการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลในการวิจัยนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

#### 1.1 ไอคิวไอชนิดเส้นลวดตามมาตรฐาน ASME Section V: 2010 [11]

ไอคิวไอชนิดเส้นลวดที่ใช้ในการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลมีลักษณะเดียวกันกับการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไป โดยประกอบด้วยเส้นลวดบรรจุในซองพลาสติก ความยาวเส้นลวดต่ำสุด 25.4 mm สำหรับชุด A และ B และยาว 50.8 mm สำหรับชุด C และ D ระยะห่างระหว่างเส้นลวดไม่ต่ำกว่า 3 เท่า ของขนาดเส้นลวดไม่เกิน 5.08 mm สำหรับชุด A และ B และไม่เกิน 19 mm สำหรับชุด C และ D ไอคิวไอชนิดนี้ ออกแบบเพื่อให้ใช้กับงานที่มีความหนา 6.4 ถึง 152 mm ซึ่งมีการจัดชุดแสดงดังรูปที่ 2.16

SET A		SET B		SET C		SET D	
Wire Diameter, in. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter, in. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter, in. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter, in. (mm)	Wire Identity
0.0032 (0.08) <sup>a</sup>	1	0.010 (0.25)	6	0.032 (0.81)	11	0.10 (2.5)	16
0.004 (0.1)	2	0.013 (0.33)	7	0.040 (1.02)	12	0.126 (3.2)	17
0.005 (0.13)	3	0.016 (0.4)	8	0.050 (1.27)	13	0.160 (4.06)	18
0.0063 (0.16)	4	0.020 (0.51)	9	0.063 (1.6)	14	0.20 (5.1)	19
0.008 (0.2)	5	0.025 (0.64)	10	0.080 (2.03)	15	0.25 (6.4)	20
0.010 (0.25)	6	0.032 (0.81)	11	0.100 (2.5)	16	0.32 (8)	21

<sup>a</sup>The 0.0032 wire may be used to establish a special quality level as agreed upon between the purchaser and the supplier.

รูปที่ 2.16 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและการจัดชุดไอคิวไอตามมาตรฐาน ASME Section V: 2010 [11]

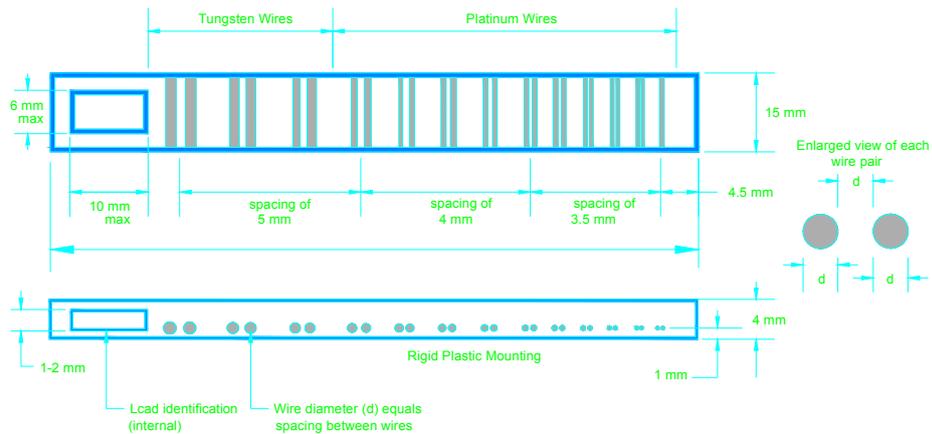
ซึ่งจากรูปที่ 2.16 การเลือกขนาดของเส้นลวดที่ใช้งานจะขึ้นอยู่กับค่าความหนาของชิ้นงานทดสอบ โดยตำแหน่งที่จะวางเป็นด้านต้นกำเนิดรังสีหรือด้านฉากรับภาพและความไวในการทดสอบที่ต้องการ ตามมาตรฐาน ASME Section V: 2010 [11] ได้แสดงการเลือกขนาดของเส้นลวดกับค่าความสัมพัทธ์ของค่าความหนาที่จะทำการทดสอบดังรูปที่ 2.17

IQI SELECTION		
Nominal Single-Wall Material Thickness Range, in. (mm)	IQI	
	Source Side Wire-Type Essential Wire	Film Side Wire-Type Essential Wire
Up to 0.25, incl. (6.4)	5	4
Over 0.25 through 0.375 (6.4 through 9.5)	6	5
Over 0.375 through 0.50 (9.5 through 12.7)	7	6
Over 0.50 through 0.75 (12.7 through 19.0)	8	7
Over 0.75 through 1.00 (19.0 through 25.4)	9	8
Over 1.00 through 1.50 (25.4 through 38.1)	10	9
Over 1.50 through 2.00 (38.1 through 50.8)	11	10
Over 2.00 through 2.50 (50.8 through 63.5)	12	11
Over 2.50 through 4.00 (63.5 through 101.6)	13	12
Over 4.00 through 6.00 (101.6 through 152.4)	14	13
Over 6.00 through 8.00 (152.4 through 203.2)	16	14
Over 8.00 through 10.00 (203.2 through 254.0)	17	16
Over 10.00 through 12.00 (254.0 through 304.8)	18	17
Over 12.00 through 16.00 (304.8 through 406.4)	20	18
Over 16.00 through 20.00 (406.4 through 508.0)	21	20

รูปที่ 2.17 การเลือกขนาดของเส้นลวดกับช่วงความหนาของชิ้นงานทดสอบ [11]

## 1.2 ไอคิวไอชนิด Duplex Wire ตามมาตรฐาน ASTM E2002: 2009 [16]

ในการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล อุปกรณ์ไอคิวไอชนิด Duplex Wire ใช้ในการหาค่าความไม่คมชัดของภาพ (Image Unsharpness) หรือการแสดงรายละเอียดของระบบการแสดงผลภาพ (Spatial Resolution) ด้วยความสามารถของไอคิวไอชนิดนี้สามารถใช้ในการวัดค่าความไวในการทดสอบได้เช่นเดียวกับไอคิวไอชนิดเส้นลวดและสามารถใช้ร่วมกันในกรณีที่ต้องการวัดค่าความละเอียดของระบบการแสดงผลของภาพที่ได้จากการทดสอบหรือทำหน้าที่ในการควบคุมประสิทธิภาพในการทำงานของระบบการแสดงผลภาพให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน โดยไอคิวไอชนิดนี้ประกอบด้วยส่วนย่อย 13 ส่วนบรรจุในซองพลาสติก โดยแต่ละส่วนย่อยจะมีเส้นลวด 2 เส้น บรรจุไว้เป็นคู่และมีขนาดของเส้นลวดในแต่ละคู่ที่แตกต่างกันในแต่ละส่วนย่อยดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ส่วนประกอบของไอคิวไอชนิด Duplex Wire [16]

วัสดุที่ใช้ในการผลิตไอคิวไอชนิด Duplex Wire โดยเส้นลวดคู่ที่ 1 ถึงเส้นลวดคู่ที่ 3 ทำมาจากทังสแตน และเส้นลวดคู่ที่ 4 ถึงเส้นลวดคู่ที่ 13 ทำมาจากแพลตตินั่มและมีความแตกต่างกันของขนาดเส้นลวดในแต่ละคู่รวมถึงระยะห่างของเส้นลวดแต่ละคู่ โดยสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.19

Element Number, Corresponding Unsharpness and Wire Diameter<sup>A</sup>

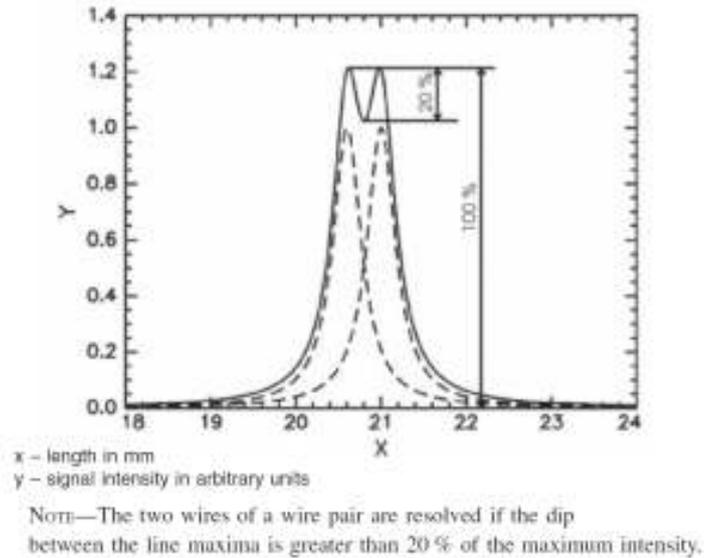
Element Number	Corresponding Unsharpness (mm)	Wire Diameter and Spacing, d (mm)	Tolerance of Wire Diameter and Wire Spacing (mm)
Pt <sup>B</sup>	13	0.10	0.05
Pt	12	0.13	0.063
Pt	11	0.16	0.08
Pt	10	0.20	0.10
Pt	9	0.26	0.13
Pt	8	0.32	0.16
Pt	7	0.40	0.20
Pt	6	0.50	0.25
Pt	5	0.64	0.32
Pt	4	0.80	0.40
W <sup>C</sup>	3	1.00	0.50
W	2	1.26	0.63
W	1	1.60	0.80

<sup>A</sup> This table is based on data provided in EN-462-5:1994.  
<sup>B</sup> Pt = Platinum.  
<sup>C</sup> W = Tungsten.

รูปที่ 2.19 วัสดุที่ใช้ในการผลิตไอคิวไอชนิด Duplex Wire และขนาดเส้นลวดแต่ละคู่ [16]

เนื่องจากมาตรฐานในการพิจารณาค่าความไม่คมชัดของภาพ (Image Unsharpness) หรือการแสดงรายละเอียดของระบบการแสดงผลภาพ (Spatial Resolution) โดยการใช้ไอคิวไอ Duplex Wire นั้น จะอ่านค่าได้จากเปอร์เซ็นต์ของค่าความเข้มสัญญาณที่วัดได้บริเวณระหว่างเส้นลวดแต่ละคู่ ในส่วนย่อยของไอคิวไอ Duplex Wire ที่ปรากฏบนหน้าจอ โดยค่าที่นำมาใช้พิจารณาค่าความไม่คมชัดนั้นจะเป็น

จุดแรกของส่วนย่อยที่มีความเข้มของสัญญาณระหว่างเส้นคู่ นั้น โดยมีค่าความเข้มของสัญญาณน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มสัญญาณบริเวณรอบนอกของเส้นลวดคู่ นั้น แสดงดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ความเข้มของสัญญาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของความเข้มสัญญาณบริเวณเส้นลวดทั้ง 2 เส้น [16]

#### 2.4.2 การหาค่าการแสดงรายละเอียดเบื้องต้น (Basic Spatial Resolution)

ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM E2445: 2010 [17] สามารถบอกได้ถึงค่าการแยกบริเวณ 2 บริเวณที่อยู่ใกล้เคียงกันของระบบการทดสอบด้วยการหาค่าการแสดงรายละเอียดเบื้องต้น (Basic Spatial Resolution) โดยใช้ค่าของฉากรับภาพที่มีค่าการแยกแยะบริเวณได้ 200 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ทำการสแกนแผ่นฉากรับภาพในแนวเดียวกับการอ่านของลำแสงเลเซอร์ และเมื่อทำการสแกนฉากรับภาพแผ่นเดิมแต่ตั้งฉากกับการอ่านของลำแสงเลเซอร์ได้ค่าการแยกแยะบริเวณได้ 100 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) ดังนั้นตามมาตรฐานจึงสรุปได้ว่าฉากรับภาพที่ทำการทดสอบมีค่าการแยกแยะบริเวณได้สูงสุด 200 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ )

#### 1. การแสดงรายละเอียด (Spatial Resolution) [16]

ความสามารถในการแยกบริเวณ 2 บริเวณที่อยู่ใกล้เคียงกันออกจากกัน โดยมีหน่วยเป็น Line Pairs Per Millimeter (lp/mm) ความละเอียดทางขนาดขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยประกอบกัน 1 หน่วย (Unit) หรือ 1 พิกเซล (Pixel) โดยขนาดของจุดภาพที่มีขนาดเล็กโดยทั่วไปแล้วจะให้ภาพที่ละเอียดกว่าจุดภาพที่มีขนาดใหญ่ แต่ในบางกรณีที่มีสัญญาณรบกวนมาก จุดภาพขนาดใหญ่อาจให้ภาพที่

ดีกว่าในการทำการทดสอบความสามารถในการแยกบริเวณ 2 บริเวณที่อยู่ใกล้เคียงกันโดยใช้การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล จะใช้มาตรฐาน ASTM E2002: 2009 [16] เพื่อใช้หาความสามารถในการแยกบริเวณ 2 บริเวณบนภาพการทดสอบที่อยู่ใกล้เคียงกันออกจากกันและใช้ในการชี้วัดคุณภาพของผลการทดสอบ รวมถึงความละเอียดในการวัดค่าพิกเซลของระบบที่ใช้ในการทดสอบด้วย

การคำนวณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากค่าเฉลี่ย ( $\sigma_{PSL100}$ ) จากค่าความเข้มของสัญญาณ ( $I_{meas_i}$ ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_{PSL}$ ) ควรจะใช้ชุดข้อมูลที่ 1,100 หรือมากกว่าขึ้นไปในการคำนวณ โดยต้องอยู่บริเวณกึ่งกลางของฉากรับภาพ (Image Plate) ที่ต้องการทดสอบและในบริเวณนั้นๆ ไม่มีรอยขีดข่วน ฝุ่นละอองหรือเงาซ้อนในภาพ โดยชุดข้อมูลที่ได้อาจจะถูกแบ่งย่อยเป็น 55 กลุ่มหรือมากกว่า โดยที่แต่ละกลุ่มข้อมูลจะมีค่าน้อย 20 ค่า การใช้ดัชนีการชี้วัดเฉพาะ ( $\bar{z}$ ) การหาค่า ( $I_{meas}$ ) สามารถหาค่าได้โดยการหาค่ากลางของกลุ่มที่ไม่ถูกสุ่มเลือกและเช่นเดียวกันกับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะถูกคำนวณจากค่าที่สอดคล้องภายในกลุ่มที่ถูกสุ่มเลือก

สามารถสรุปได้ว่าค่า ( $I_{meas}$ ) จะได้มาจากค่าเฉลี่ยของ ( $I_{meas_i}$ ) ทั้งหมด เช่นเดียวกับกับค่า ( $\sigma_{PSL}$ ) จะได้มาจากค่าเฉลี่ยของ ( $\sigma_{PSLi}$ ) การหาค่า ( $\sigma_{PSL}$ ) ควรคำนวณไปยังค่า 100 ไมโครเมตร ( $\mu m$ ) เมื่อใช้ตัวเลือกที่มีลักษณะเป็นวงกลมดั่งสมการที่ 2.14 และควรคำนวณไปยังค่า 88.6 ไมโครเมตร ( $\mu m$ ) เมื่อใช้ตัวเลือกที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$\sigma_{PSL100} = \sigma_{PSL} \quad \text{สมการสำหรับตัวเลือกที่มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยม} \quad (2.13)$$

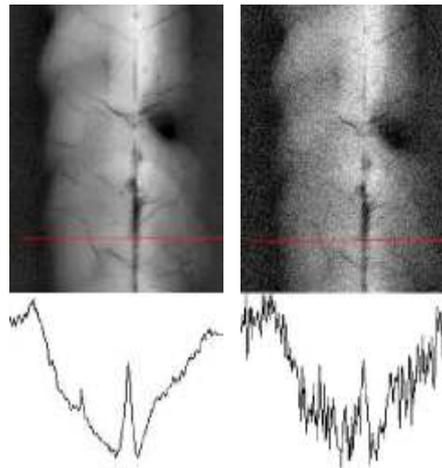
$$\sigma_{PSL100} = \sigma_{PSL} \frac{SR_{max}}{100} \quad \text{สมการสำหรับตัวเลือกที่มีลักษณะเป็นวงกลม} \quad (2.14)$$

โดยที่ค่า  $SR_{max}$  เป็นค่าสูงสุดของการแสดงรายละเอียดเบื้องต้นหน่วยเป็นไมโครเมตร ( $\mu m$ ) และค่าสัดส่วนปกติของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Normalized Signal to Noise Ratio : $SNR_N$ ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากค่าความเข้มของสัญญาณ ( $I_{meas}$ ) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ( $\sigma_{PSL}$ ) ดังสมการที่ 2.15

$$SNR_N = \frac{I_{meas}}{\sigma_{PSL}} \quad (2.15)$$

การเลือกใช้ฉากรับภาพที่มีค่าสัดส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) สูงๆ นั้นเป็นทางเลือกที่ดีเพราะจะทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัด (Contrast) ของภาพดียิ่งขึ้นดังรูปที่ 2.21

แต่ก็ไม่ได้ขึ้นอยู่กับฉากรับภาพเพียงอย่างเดียว เครื่องอ่านฉากรับภาพยังต้องสามารถให้ความละเอียดในการสแกน และการส่งผ่านข้อมูลจากอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital) ได้ดีเช่นเดียวกัน ในการทำงานโครงการวิจัยในครั้งนี้จึงใช้ความละเอียดในการสแกน 100  $\mu\text{m}$  และสามารถปรับแต่งฟังก์ชันการส่งผ่านสัญญาณจากอะนาล็อกเป็นดิจิทัล (Transfer Function Analog to Digital) เพื่อให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในการปฏิบัติงาน



รูปที่ 2.21 ผลกระทบของค่าสัดส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) ที่มีต่อภาพถ่ายด้วยรังสี [10]

### 2.4.3 ค่าสัดส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) [14]

ค่าสัดส่วนของสัญญาณที่ต้องการจากการทดสอบต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) ที่เกิดขึ้นในการทดสอบ เนื่องจากในการทดสอบสัญญาณรบกวนจะมาจากหลายแหล่งแต่โดยทั่วไปภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล จะมีสัญญาณรบกวนส่วนใหญ่ที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบควอนตัม การกระจายของจำนวนโฟตอนตามพื้นที่ เป็นไปตามกฎการกระจายแบบปัวซอง (Poisson) ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian) ที่มีการกระจายแบบรูปประฆังคว่ำโดยมีค่าการกระจายสูงสุดที่ตรงกลางหรือบริเวณค่าเฉลี่ย

ในงานวิจัยฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยรังสีโดยการวัดค่าการมองเห็นเส้นลวดขนาดเล็กที่สุดของตัววัดคุณภาพ (IQI) ชนิด EN FE 10-16

#### 2.4.4 การถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลเปรียบเทียบกับภาพถ่ายด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม (Film)

การทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล (Digital Computed Radiography) เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม สามารถแบ่งส่วนประกอบของการทดสอบในแต่ละขั้นตอนการทดสอบ โดยสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

1. ต้นกำเนิดรังสี (Ray Source) ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล สามารถพิจารณาเลือกใช้ได้ตามชนิดของการทดสอบเช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม โดยต้นกำเนิดรังสีส่วนมากที่ใช้ในการทดสอบมี 2 ชนิด คือ ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-Ray) และรังสีแกมมา (γ-Ray) โดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล สามารถใช้ต้นกำเนิดรังสีในการทดสอบได้ทั้ง 2 ชนิด
2. การบันทึกข้อมูลของการทดสอบในการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล สามารถป้อนข้อมูลหรือบันทึกข้อมูลลงในไฟล์ข้อมูลภาพได้ เช่น ความแรงของรังสี ชนิดของรังสี ระยะเวลาในการทดสอบ วันที่ทำการทดสอบและชื่อผู้ทดสอบ เป็นต้น โดยการป้อนข้อมูลสามารถที่จะทำก่อนหรือหลังการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล ซึ่งแตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม โดยจำเป็นต้องระบุรายละเอียดทั้งหมดของการทดสอบลงบนฟิล์มที่ใช้ในการทดสอบ ก่อนที่จะทำการทดสอบเท่านั้น
3. การบันทึกข้อมูลภาพในการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล ซึ่งการบันทึกข้อมูลภาพจะใช้นาฬิกาภาพ (Image Plate) ที่สามารถนำกลับมาทำการทดสอบซ้ำได้หลังจากการประมวลผลของข้อมูลภาพ แต่ในการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์มจะใช้การบันทึกข้อมูลภาพด้วยฟิล์ม (Film) ซึ่งฟิล์มที่ได้รับรังสีแล้วจะไม่สามารถนำกลับมาทำการทดสอบซ้ำได้
4. การสร้างภาพจากข้อมูลภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลจะใช้ตัวแปลงสัญญาณข้อมูลภาพจากนาฬิกาภาพ (Image Plate Reading) เพื่อประมวลผลข้อมูลภาพที่ได้จากการทดสอบและเก็บข้อมูลภาพการทดสอบให้อยู่ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์ (Electronic File) ซึ่งแตกต่างกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม ที่ใช้กระบวนการล้างฟิล์มในการสร้างภาพ โดยที่ฟิล์มจะทำปฏิกิริยากับน้ำยาล้างฟิล์มทำให้เกิดข้อมูลภาพที่ได้จากการทดสอบและเก็บข้อมูลภาพการทดสอบไว้ในตัวฟิล์มของการทดสอบแต่ละครั้ง
5. การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลและการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม สามารถเปรียบเทียบการตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลภาพได้ 2 ส่วน ดังต่อไปนี้

- ความไวในการทดสอบ (Sensitivity) เปรียบเสมือนการหาขนาดของสิ่งบ่งชี้ที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ข้อมูลภาพจะสามารถแสดงออกมาได้ โดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลจะใช้การวัดค่ารายละเอียดของระบบภาพ (Spatial Resolution) ด้วยไอคิวไอ (Image Quality Indicator: IQI) ชนิด Duplex Wire ส่วนการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์มจะใช้การวัดค่าความไวในการทดสอบด้วยไอคิวไอ (Image Quality Indicator: IQI) ชนิดเส้นลวด ซึ่งความไวในการทดสอบจะอ่านค่าได้จากเส้นลวดเส้นที่เล็กที่สุด

- ความเปรียบต่าง (Contrast) ของข้อมูลภาพในการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลจะพิจารณาจากค่าสัดส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio) โดยสามารถคำนวณจากบริเวณพื้นที่ของข้อมูลภาพ ซึ่งการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์มจะใช้การวัดค่าความเข้มของข้อมูลภาพจากฟิล์ม ในบริเวณที่มีค่าความเข้มแตกต่างกัน เพื่อแสดงค่าความเปรียบต่างกันของข้อมูลภาพในแต่ละบริเวณ

6. การแสดงผลการทดสอบจากข้อมูลภาพ โดยที่การทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลนั้น จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลข้อมูลภาพและแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งแตกต่างกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้ฟิล์ม โดยจะต้องนำฟิล์มที่ได้จากการทดสอบมาเปิดอ่านกับเครื่องอ่านฟิล์ม (Film Viewer) เพื่อทำการแสดงผลของการทดสอบ

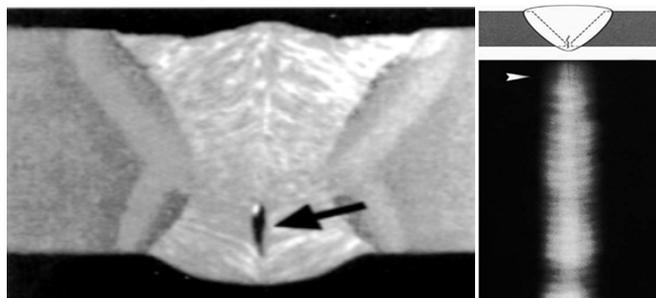
ดังนั้นหลักการการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลมีพื้นฐานการทำงานเหมือนกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไป คือ การฉายรังสีจากเครื่องฉายรังสีเคลื่อนที่ผ่านชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ ตกกระทบบนฉากรับภาพ (Image Plate) ที่มีลักษณะคล้ายกับคาสเซต (Cassette) ภายในฉาบด้วยสารเรืองแสง (Phosphors) ทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานของรังสีไว้ภายในโครงสร้าง และเมื่อผลึกเหล่านี้ได้รับพลังงานแสง สารเรืองแสงที่อยู่ในฉากรับภาพจะปล่อยพลังงานที่ดูดกลืนไว้ออกมา ซึ่งพลังงานที่ปล่อยออกมาจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของรังสีที่ดูดกลืนไว้ จากนั้นเมื่อต้องการสร้างภาพจะทำการกระตุ้นสารเรืองแสงในฉากรับภาพด้วยเลเซอร์ ทำให้สารเรืองแสงปล่อยพลังงานที่เก็บไว้ออกมาในรูปของแสง โดยมีหลอดรับแสง (Photomultiplier Tube) ทำหน้าที่แปลงแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Electrical Signal) และสัญญาณดิจิทัล (Digital Signal) เมื่อผ่านกระบวนการประมวลผลข้อมูลและแสดงผลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ฉากรับภาพที่ผ่านการอ่านข้อมูลรังสีแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้อีก โดยการนำสารเรืองแสงดังกล่าวไปผ่านการลบล้างรังสีตกค้างด้วยแสงสว่างออกแล้ว จึงนำฉากรับภาพกลับไปใช้งานใหม่อีกครั้ง ซึ่งอายุการใช้งานของฉากรับภาพขึ้นอยู่กับชนิดของสารเรืองแสงภายในฉากรับภาพ

## 2.5 รอยความไม่ต่อเนื่องในงานเชื่อมและมาตรฐานตัววัดขนาดรอยบกพร่อง [18]

รอยความไม่ต่อเนื่องในงานเชื่อม (Welding Discontinuities) คือความไม่สมบูรณ์ในแนวเชื่อม ในอุดมคติรอยเชื่อมที่สมบูรณ์จะต้องไม่มีรอยความไม่ต่อเนื่องอยู่เลย แนวเชื่อมที่สมบูรณ์จะประกอบไปด้วยอะตอมของโลหะที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ แต่ถ้าเกิดการขัดขวางไม่สามารถที่จัดโครงสร้างทางฟิสิกส์หรือทางรูปแบบได้แล้ว ถือว่าชิ้นงานนั้นมีความไม่ต่อเนื่อง รอยความไม่ต่อเนื่องที่มีโอกาสเกิดขึ้นในงานเชื่อม สามารถแบ่งได้หลายชนิดในงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษาในเรื่อง รอยแตกร้าว (Cracks) รอยหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion) และรูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity)

### 2.5.1 รอยแตกร้าว (Cracks) [12]

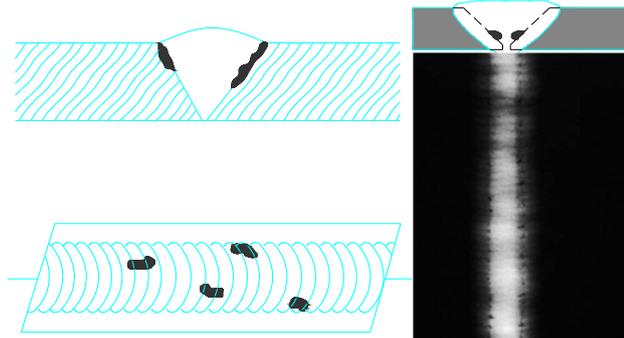
การแตกร้าวที่เกิดขึ้นในเนื้อเชื่อมและโลหะ เพราะความเค้นที่เกิดขึ้น เฉพาะที่สูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุงาน อันเนื่องมาจากตำหนิในรอยเชื่อมและโลหะ รอยบาก (Notch) ในรอยเชื่อม ความเค้นตกค้างสูงและความเปราะเนื่องจากไฮโดรเจน การแตกร้าวมีสาเหตุมาจากโลหะมีความเปราะ เมื่อพิจารณาครอยแตกหักจะพบว่า โลหะเกิดการเปลี่ยนรูปเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การแตกร้าวแบ่งเป็นการแตกร้าวร้อน (Hot Cracks) และการแตกร้าวเย็น (Cold Cracks) การแตกร้าวร้อนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงปกติ เมื่อเป็นของแข็งจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิใกล้จุดหลอมละลาย การแตกร้าวร้อนจะขยายจากระหว่างเกรน การแตกร้าวเย็นเกิดขึ้นหลังจากโลหะเย็นตัวแล้วซึ่งบางครั้งเรียกว่า การแตกร้าวหลังจากเย็นตัว (Delayed Crack) มีสาเหตุจากไฮโดรเจนและความเค้นตกค้างสูงเกินไป การเกิดอาจเกิดขึ้นผ่านเกรนหรือตามเกรนก็ได้ โดยทั่วไปการแตกร้าวแบ่งเป็น 3 ลักษณะ คือ การแตกร้าวตามยาว (Longitudinal Cracks) การแตกร้าวตามขวาง (Transverse Cracks) การแตกร้าวที่บ่อหลอมละลาย (Crater Cracks) ซึ่งลักษณะการแตกร้าวต่าง ๆ จะแสดงดังในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 รอยแตกร้าวขนานแนวเชื่อม (Longitudinal Crack)

## 2.5.2 รอยหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion) [19]

การหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ หมายถึงเนื้อเชื่อมกับชิ้นงาน หรือเนื้อเชื่อมกับเนื้อเชื่อมระหว่างแนวเชื่อมไม่หลอมลึกลึกติดกัน รอยบกพร่องนี้สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งรอยเชื่อมบากร่องและรอยเชื่อมมุม จะแสดงดังในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 ลักษณะการหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion)

การหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion) สามารถเกิดขึ้นได้จากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งหรือจากหลายๆสาเหตุรวมกัน สาเหตุที่ทำให้เกิดการหลอมลึกลึกด้านข้างไม่สมบูรณ์มีดังนี้

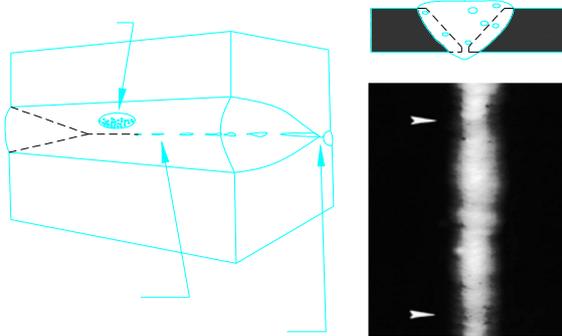
1. เดินลวดเชื่อมเร็วเกินไป
2. ใช้ลวดเชื่อมโตเกินไป สำหรับรอยเชื่อมบากร่องแคบ
3. กระแสไฟฟ้าเชื่อมไม่เพียงพอ เป็นผลให้ปริมาณความร้อนไม่เพียงพอที่จะหลอมชิ้นงานกับลวดเชื่อม
4. สายลวดเชื่อมไม่เหมาะสม ตำแหน่งการเชื่อมที่ผิด
5. การออกแบบรอยต่อของงานเชื่อมไม่ดี เช่น รอยบากแคบเกินไป

แนวทางป้องกันและการแก้ไข

1. ลดความเร็วในการเดินลวดเชื่อม
2. เลือกใช้ขนาดของลวดเชื่อมให้เหมาะสม
3. ปรับกระแสไฟฟ้าให้เหมาะสมกับงานเชื่อม
4. เชื่อมงานในตำแหน่งที่ถูกต้อง
5. ออกแบบรอยต่อของงานเชื่อมให้เหมาะสม

### 2.5.3 รูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity) [18]

เป็นช่องว่างหรือโพรงอากาศภายในโลหะเชื่อม อาจมาจากฝุ่นละอองและความชื้นที่เกาะอยู่ตามผิวโลหะงาน ลวดเชื่อมแก๊สคลุมหรือเกิดจากอุปกรณ์เชื่อมเอง เช่น ระบบระบายความร้อนและลูกกลิ้งในระบบขับเคลื่อนลวดเชื่อม รูพรุนมีลักษณะเป็นโพรงแก๊สทรงกลม ซึ่งแตกต่างจากสแลกฝังในที่เป็นของแข็งฝังอยู่ภายใน การป้องกันทำได้โดยเลือกใช้วัสดุที่สะอาดและอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาพดี ไม่ควรใช้กระแสและระยะอาร์คสูงเกินไป เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียออกซิเจน (Deoxidizing) มากเกินไป จึงมีจำนวนไม่พอที่จะรวมตัวกับแก๊สในรอยเชื่อมขณะเย็นตัว รูพรุนมีลักษณะกระจายแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 รูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity)

### 2.5.4 กระบวนการเกิดรอยความไม่ต่อเนื่อง

ในงานวิจัยฉบับนี้ชิ้นงานทดสอบที่ใช้ในการทดลองได้ถูกออกแบบให้มีรอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานทดสอบจำนวน 3 ชนิดได้แก่ รอยแตกร้าว (Cracks) รอยหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion) และรูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity) ซึ่งกระบวนการสร้างรอยความไม่ต่อเนื่องในชิ้นงานทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

#### 1. รอยแตกร้าว (Cracks)

สาเหตุการเกิดรอยแตกร้าว (Cracks) ในรอยเชื่อมจากการเย็นตัวอย่างรวดเร็วในบ่อหลอมละลายของงานเชื่อมจนเกิดความเค้นสูงสุดทำให้เกิดรอยแตกร้าวขึ้น โดยคุณสมบัติของลวดเชื่อมที่ใช้ในการ

เชื่อมที่มีค่าความเค้นสูงนั่นเอง โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) โดยใช้ลวดเชื่อม S 700BB

### 2. รอยหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion)

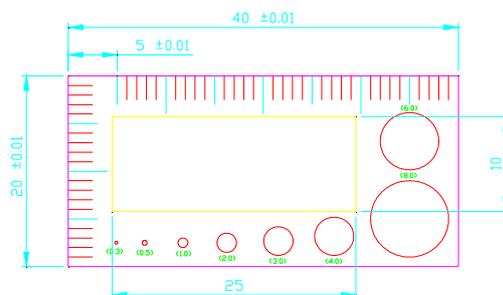
สาเหตุการเกิดรอยหลอมละลายด้านข้างไม่สมบูรณ์ (Lack of Side Wall Fusion) ในรอยเชื่อมจากการให้ความร้อนไม่เพียงพอในกระบวนการเชื่อม รวมไปถึงมีวัสดุไปขัดขวางกระบวนการเชื่อมในบริเวณนั้นไม่ให้เกิดการหลอมละลายขึ้นในชิ้นงาน โดยใช้กระบวนการเชื่อมอาร์คทั้งสแตคแก๊สคลุม (GTAW) โดยใช้ลวดเชื่อม ER70S-G

### 3. รูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity)

สาเหตุของการเกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศ (Porosity) ในรอยเชื่อมจากสิ่งเจือปนเช่น น้ำมันหล่อลื่นหรือจาระบี ลงไปในชิ้นงานเชื่อม เพราะสิ่งเจือปนเหล่านี้จะไปรวมตัวอยู่ในเนื้อโลหะขณะทำการเชื่อมทำให้เกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศขึ้นในงานเชื่อม รวมไปถึงกระแสลมที่เกิดขึ้นขณะทำการเชื่อมก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดรูพรุนหรือโพรงอากาศในรอยเชื่อม โดยกระบวนการเชื่อมอาร์คด้วยลวดหุ้มฟลักซ์ (SMAW) โดยใช้ลวดเชื่อม E7016

## 2.5.5 มาตรฐานตัวเปรียบเทียบขนาดรอยบกพร่อง

ตัวเปรียบเทียบขนาดรอยบกพร่องได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวัดขนาดรอยบกพร่องที่ได้จากภาพถ่ายด้วยรังสีชนิดฟิล์มและชนิดดิจิทัล ได้ถูกออกแบบและทำจากวัสดุทองแดงที่มีขนาดความกว้าง 20 มิลลิเมตรและความยาว 40 มิลลิเมตร มีความหนาที่ 0.8 มิลลิเมตร ซึ่งได้ออกแบบตามมาตรฐาน GB/T 3233-2005 [20] และ JB/T4730-2008 [21] โดยมีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดกว้าง 10 มิลลิเมตรและความยาว 25 มิลลิเมตรและมีรูกลมเจาะทะลุขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3, 0.5, 1.0, 2.0 3.0, 4.0, 6.0 และ 8.0 ดังแสดงในรูปที่ 2.25

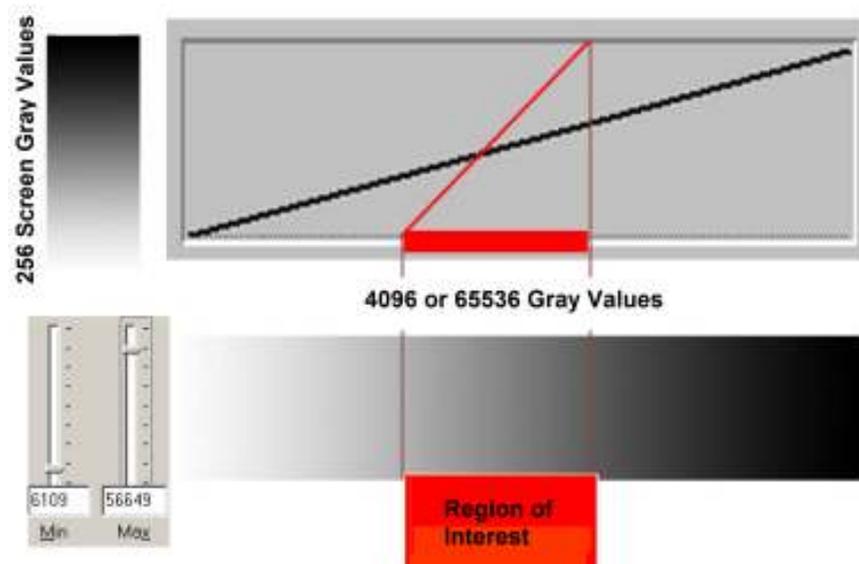


รูปที่ 2.25 ตัวเปรียบเทียบขนาดรอยบกพร่อง (Sample Defect Comparison)

## 2.6 การตรวจวัดขนาดของรอยบกพร่อง (Sample Defect Measurement)

ในการวัดขนาดของรอยบกพร่องจากข้อมูลภาพที่ได้จากภาพถ่ายชนิดฟิล์มและชนิดดิจิทัลโดยการทดสอบด้วยการถ่ายภาพด้วยรังสี สามารถทำได้โดยใช้มาตรฐานตัวอย่างขนาดรอยบกพร่องซึ่งได้ออกแบบและทราบขนาดของรอยบกพร่องที่พบบนภาพถ่าย ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณในแต่ละวิธีดังต่อไปนี้

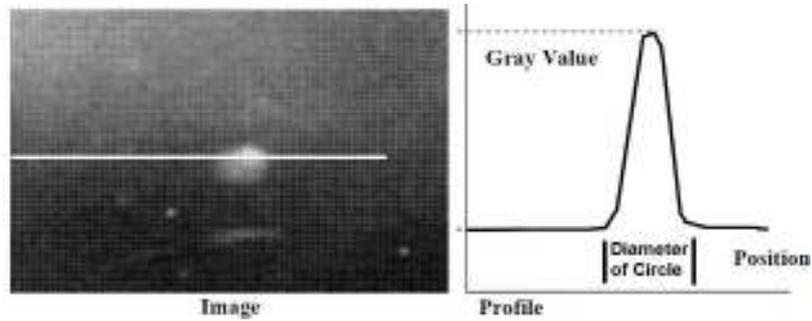
1. การตรวจวัดรอยบกพร่องจากภาพที่ได้จากการทดสอบ เป็นการเทียบค่าในมาตรฐานตัวอย่างขนาดรอยบกพร่องบนภาพดิจิทัลที่ได้จากการอ่านค่าของฉากรับภาพ เมื่อต้องการขนาดของรอยบกพร่องใด รอยบกพร่องหนึ่งบนภาพดิจิทัล สามารถหาค่าได้โดยการพิจารณาจากค่าระดับความเข้มสีเทา (Gray Value) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการพิจารณาระดับค่าความเข้มสีเทา (Gray Value) ที่ดวงตามนุษย์สามารถแยกแยะได้ คือ 60 ระดับความเข้มสีเทา ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการมองเห็นและสภาพแวดล้อม แต่ในการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัล จะมีความสามารถในการแยกแยะระดับค่าความเข้มสีเทาได้ โดยเริ่มต้นที่ 256 จนถึง 65536 ระดับความเข้มสีเทา โดยขึ้นอยู่กับความละเอียดของฉากรับภาพและเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี แสดงได้ดังรูปที่ 2.26 ซึ่งจะนำระดับค่าความเข้มสีเทาในบางช่วง มาใช้ในการพิจารณาตามความเหมาะสมในการทดสอบ



รูปที่ 2.26 ตัวอย่างระดับค่าความเข้มสีเทา (Gray Value) ที่คอมพิวเตอร์สามารถแสดงผลได้ [15]

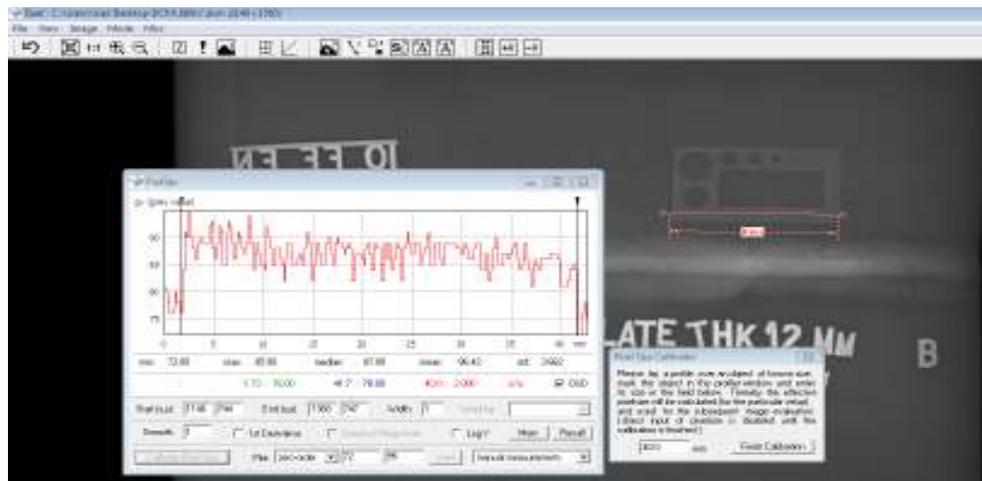
ดังนั้นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์การแยกแยะค่าระดับความเข้มสีเทา (Gray Value) ในลักษณะฟังก์ชันโปรไฟล์ (Profile) ช่วยทำให้สามารถพิจารณาระดับค่าความเข้มสีเทาที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละพิกเซล (Pixel) บนหน้าจอแสดงภาพ ระหว่างช่วงที่ต้องการจะวัดค่าความหนาหรือระยะได้โดยการ

ลากเส้นบนมาตรฐานตัวอย่างขนาดรอยบกพร่องที่ทราบขนาดบนภาพถ่ายด้วยรังสี เส้นที่ลากจะตัดกับพิกเซลบนจอแสดงผลทำให้ปรากฏค่าระดับความเข้มสีเทาของแต่ละพิกเซลในรูปแบบของกราฟ ทำให้สามารถพิจารณาค่าขนาดของรอยบกพร่องได้ แสดงดังรูปที่ 2.27 ซึ่งขนาดของวงกลมในรูปด้านซ้ายจะปรากฏในกราฟความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของเส้นที่ลากและค่าระดับความเข้มสีเทา



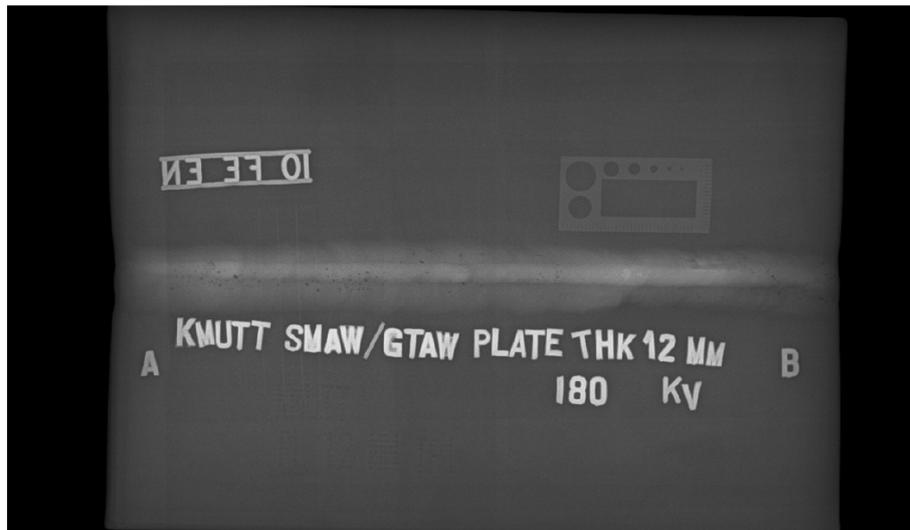
รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นที่ลากบนหน้าจอและค่าระดับความเข้มสีเทา (Gray Value) [15]

การวัดระยะทางที่ต้องการบนหน้าจอแสดงผลของภาพดิจิทัลที่ต้องการความถูกต้องและแม่นยำ เช่น การวัดค่าขนาดมาตรฐานตัวอย่างขนาดรอยบกพร่องที่ทำการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีนั้น จำเป็นที่จะต้องทราบขนาดที่แท้จริงของจุดอ้างอิงในภาพดิจิทัลที่ได้จากการทดสอบ อย่างน้อยหนึ่งจุด เพื่อใช้ในการสอบเทียบระหว่างขนาดของจุดอ้างอิงในภาพกับอัตราส่วนความละเอียดของพิกเซล ดังรูปที่ 2.28 เมื่อทราบขนาดของจุดอ้างอิงแล้วว่ามีความยาว 40 มิลลิเมตร จึงสามารถปรับอัตราส่วนความละเอียดของพิกเซลให้แม่นยำเพื่อใช้ในการวัดค่าขนาดของรอยบกพร่องอื่นๆที่ต้องการได้



รูปที่ 2.28 ตัวอย่างการวัดขนาดจุดอ้างอิงเพื่อใช้ในการปรับอัตราส่วนความละเอียดของพิกเซล [15]

ภาพที่ได้จากการทดสอบการถ่ายภาพด้วยรังสี เพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดรอยบกพร่อง ดังรูปที่ 2.29



รูปที่ 2.29 ตัวอย่างผลการทดสอบเพื่อใช้ในการตรวจวัดขนาดรอยบกพร่อง

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Chaoming SUN [3] ได้ทำการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี โดยวิธีการจัดลำดับข้อบกพร่องสำหรับภาพเอกซเรย์ดิจิทัล ด้วยเทคนิค linear array detector โดยการออกแบบมาตรฐานตัวอย่างเปรียบเทียบบกร่องเพื่อช่วยให้การวัดที่แม่นยำจากการบิดเบือนและการขยายของภาพ โดยเปรียบเทียบกับระดับมาตรฐานในการเปรียบเทียบตัวอย่าง นอกจากนี้วิธีการตีความข้อบกพร่องจากคอมพิวเตอร์ พบว่าการจัดลำดับของข้อบกพร่องโดยรวมและการวางตำแหน่งของข้อบกพร่องที่สำคัญได้อย่างง่ายดายและมีประสิทธิภาพการใช้งาน

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ ฉัฐพล ธรรมโชติ [2] ได้ทำการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี โดยใช้เทคนิคแทนเจนทอล (Tangential Technique) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 60 มิลลิเมตร ลักษณะเป็นแบบชั้นบันได 6 ช่วงความหนา คือความหนาตั้งแต่ 2 มิลลิเมตร ถึง 4.5 มิลลิเมตร หุ้มด้วยฉนวนร้อนที่มีความหนา 50 มิลลิเมตร โดยใช้ตัวกรองชนิดที่ยอมให้ค่าของความถี่ต่ำผ่านได้ (Low-Pass Filter) และการใช้ตัวกรองที่ยอมให้ค่าของความถี่สูงผ่านได้และปรับให้ค่าเฉลี่ยโดยรวมของผลการทดลองมีความถี่สูงขึ้น (Hi-Boost Filter) พบว่าเมื่อใช้พลังงานต่ำทำให้ช่วงของความหนาและความถูกต้องของค่าความหนาที่ได้ดีขึ้น ประโยชน์ของงานวิจัยทำให้รู้จักวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีระบบดิจิทัลและการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ เพื่อใช้เป็นทางเลือกในการตรวจสอบการกัดกร่อนแทนวิธีทดสอบแบบดั้งเดิม

ผลงานวิจัยที่ผ่านมาของ Ramesh J. Patel [22] ได้ทำการทดสอบโดยการถ่ายภาพด้วยรังสี โดยใช้ฟิล์มเทียบกับถ่ายภาพดิจิทัล เพื่อตอบสนองความหลากหลายของการใช้งานในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายกับการแก้ปัญหาในรูปแบบดิจิทัล ที่สามารถใช้สำหรับการตรวจสอบขยายภาพและความสมบูรณ์ของภาพถ่าย เอกซ์เรย์ดิจิทัลมีข้อได้เปรียบอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการถ่ายภาพด้วยฟิล์มทั่วไปสำหรับการใช้งานบางอย่างและความเป็นไปได้ของการตรวจสอบ พบว่าภาพรวมของการถ่ายภาพด้วยระบบดิจิทัล วิธีการ การใช้งานและประโยชน์ที่สำคัญการถ่ายภาพด้วยรังสีด้วยฟิล์ม