บทที่ 3

วัสดุและอุปกรณ์

3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน(neutron source)

3.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1ปรับปรุงครั้งที่1 (Thai research reactor -1/ modification1) หรือTRR-1/M1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบวิจัยขนาดกำลังสม่ำเสมอ(steady state) 2 เมกะวัตต์ความร้อน สามารถทำงานแบบทวีกำลัง(pulsing)ได้ถึงประมาณ 2,000 เมกะวัตต์ ในระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 10 มิลลิวินาที ผู้สร้างคือบริษัท เยนเนอรัลอะตอมมิค (The general atomics company) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกาตามแบบ TRIGA MARK III มีองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้

บ่อเครื่องปฏิกรณ์(reactor pool) แบ่งออกเป็น 2 ส่วนมีความจุทั้งสิ้นประมาณ 64,800 แกลลอน ผนังบ่อเป็นคอนกรีตชนิดความหนาแน่นสูง (high density,3.5กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร) ปากบ่อหนา 1.5 ฟุต และจะเพิ่มความหนาชั้นละ 1 ฟุต ตามระดับความลึกและที่ระดับต่ำสุดหนา 4.5 ฟุต แกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core) มีลักษณะการจัดเชื้อเพลิงในแกนปฏิกรณ์เป็นรูปหกเหลี่ยม(hexagonal array) แกนเครื่องปฏิกรณ์บรรจุอยู่ในถังอะลูมิเนียมทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 55 เซนติเมตร สูงประมาณ 2 เมตร ภายในบรรจุแท่งเชื้อเพลิง และแท่งควบคุม

แท่งเชื้อเพลิงยูเรเนียม(fuel elements) เนื้อเชื้อเพลิงเป็นยูเรเนียม -เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ (uranium-zirconium hydride,U-ZrH) มีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอก เส้นผ่าศูนย์กลาง 1.5 นิ้ว ยาวประมาณ 30 นิ้ว คิดเป็นปริมาณยูเรเนียมขั้นต้น 6.0 กิโลกรัม

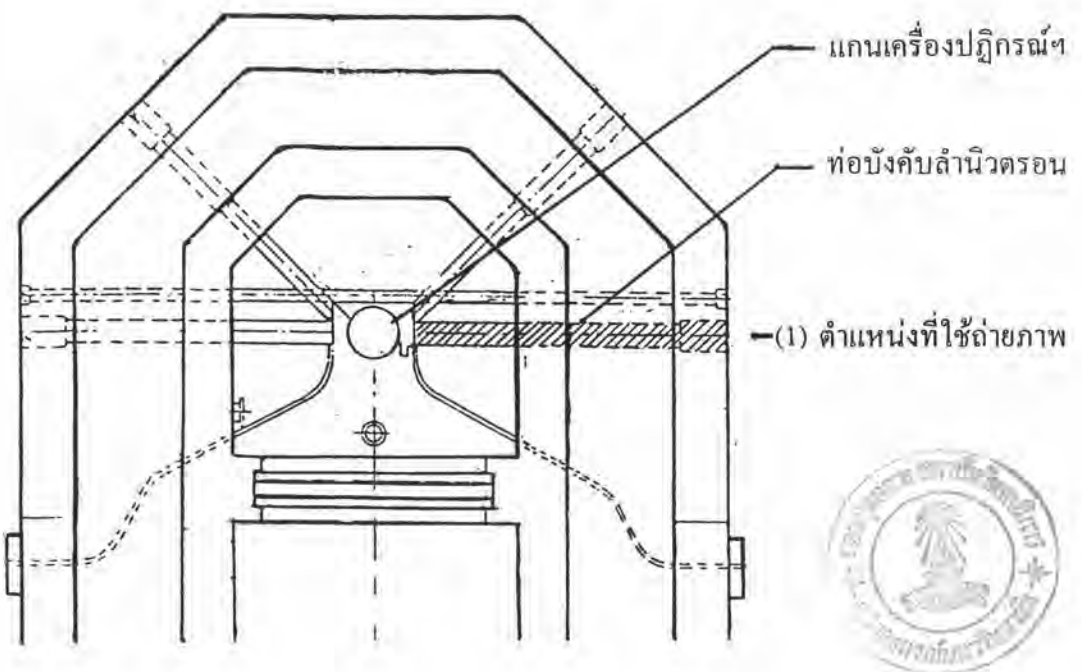
แท่งควบคุม(control rod) มีลักษณะคล้ายแท่งเชื้อเพลิง มีส่วนบนเป็นโบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide, B_4C) ส่วนล่างเป็นเนื้อเชื้อเพลิงยูเรเนียม - เซอร์โคเนียมไฮไดรด์ แท่งควบคุมชนิดนี้มี 4 แท่งและแท่งควบคุมทรานส์เซนต์(transient) ไม่มีเนื้อเชื้อเพลิงอีก 1 แท่ง

สารหน่วงนิวตรอน(moderator)เนื่องจากเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นยูเรเนียมเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ นิวตรอนความเร็วสูงจะถูกหน่วงความเร็วตั้งแต่ในเชื้อเพลิงบางครั้งจึงเรียก เชื้อเพลิงนี้ว่า fuel moderator element ส่วนสารหน่วงนิวตรอนถัดออกมาคือ น้ำบริสุทธิ์

ระบบระบายความร้อน (cooling system) ใช้ระบบระบายความร้อนแบบการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (natural convection) โดยน้ำที่ร้อนจะลอยตัวสูงขึ้นสู่ผิวน้ำ แล้วถูกดูดออกไปด้วยปั๊มในอัตราความเร็วประมาณ 900 แกลลอนต่อนาที ผ่านตัวแลกถ่ายความร้อน (heat exchanger) และระบายสู่บรรยากาศ

ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี (radioisotope source) อเมริเซียม-241/เบริลเลียม (americium-241/ beryllium, ^{241}Am-Be)มีความแรง 3 คูรี ครึ่งชีวิต 458 ปี ภายหลังเกิดปฏิกริยาฟิชชัน (fission reaction) ยูเรเนียม-235 กับนิวตรอน จะให้นิวตรอนฟลักซ์สูงสุดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแกนปฏิกรณ์ฯ วัดได้ประมาณ 3.11×10^3 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ที่กำลัง 1 เมกกะวัตต์

ท่อบังคับลำรังสีนิวตรอน (neutron collimator) เป็นอุปกรณ์บังคับทิศทางนิวตรอนให้วิ่งออกไปเฉพาะทิศทางที่มีชิ้นงานและฟิล์มรองรับอยู่เท่านั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียพลังงานไปทางอื่น ทำให้ประหยัดเวลาในการถ่ายภาพและทำให้ได้รายละเอียดของภาพสูงขึ้น ท่อบังคับลำรังสีนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัย เป็นท่อทางด้านทิศใต้ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 8 นิ้ว



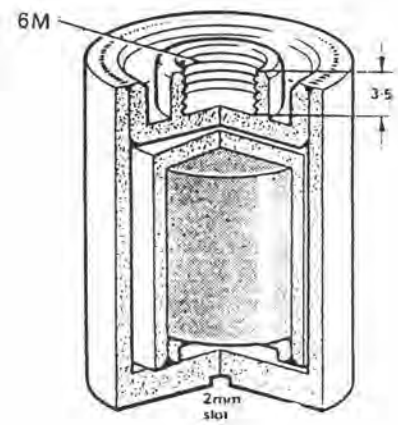
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 และบริเวณที่ใช้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คือ บริเวณหมายเลข (1) ทางทิศใต้

I1t84CAC9

3.1.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากสารกัมมันตรังสี พลูโตเนียม-238/เบริลเลียม (^{238}Pu-Be)ความแรง 5 คูรี รูปร่างทรงกระบอกขนาด 1.5 x 2.0 นิ้ว พลูโตเนียม-238 สลายตัวตามธรรมชาติ โดยมีค่าครึ่งชีวิต 86.40 ปี ให้รังสีอัลฟาออกมาพลังงาน 5.50 MeV 72 % และ 5.46 MeV 28 % และรังสีอัลฟาจะทำปฏิกริยากับธาตุเบริลเลียมอีกทีหนึ่ง ให้ความเข้มรังสีนิวตรอนออกมาจำนวน $1.6x10^6$ นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี จากปฏิกริยา (α,n) ดังนี้

$$^{238}Pu \rightarrow \alpha + {}^{234}U$$

$$^{9}Be + \alpha \rightarrow {}^{1}n + {}^{12}C$$



รูปที่ 3.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโตเนียม- 238/เบริลเลียม

3.2 ฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน (neutron converter screens)

เพื่อนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติกับฉากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน)ที่สร้างขึ้น ได้แก่ NE-426 และ NE-905 ฉากทั้งสองชนิด ผลิตขึ้นโดยบริษัท NE Technology ประเทศอังกฤษ เป็นฉากที่ให้รีโซลูชันของภาพ(resolution) ด้อยกว่าฉากโลหะ แต่ให้ความไว(sensitivity)สูงกว่า รายละเอียดของฉากทั้งสองชนิดพร้อมกับฉากโลหะแกโดลิเนียม ที่นำมาใช้ในงานวิจัยแสดงในตารางที่ 3.1 พร้อมกับรายละเอียดของฉากโลหะแกโดลิเนียมที่นำมาใช้ในงานวิจัย

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน NE-426 และ NE-905 และโลหะแกโดลิเนียม

ชนิดของฉาก	ความหนา (มม.)	ความไม่ชัดที่เกิดขึ้น (ไมครอน)	ฟิล์มที่เหมาะสม	อัตราส่วนนิวตรอนต่อแกมมาสำหรับ 90%นิวตรอนต่อ10% แกมมาอิมเมจ($n/cm^2 \cdot mR$)
NE-426	0.25	400	ฟิล์มไวแสง ฟิล์มเอกซ์เรย์	$5.0x10^4$
NE-905	1.0	400	ฟิล์มไวแสง ฟิล์มเอกซ์เรย์	$2.0x10^5$
Gd foil	0.025	< 100	ฟิล์มเอกซ์เรย์	$1.0x10^6$

รายละเอียดเฉพาะของฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ

ฉาก NE-905 ประกอบด้วยลิเทียม-6 ซึ่งเพิ่มปริมาณสูงถึง 95 %สำหรับลิเทียม 6.6 % ในสารประกอบรูปร่างเป็นแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว

ฉากโลหะแกโดลิเนียม ทำจากโลหะแกโดลิเนียม ซึ่งนำมารีดให้เป็นแผ่นบาง 0.001 นิ้ว หรือ 0.0254 มิลลิเมตร ขนาด กว้าง 3.15 นิ้ว ยาว 7.85 นิ้ว

ฉาก $Gd_2O_2S(Tb)$ ผลิตขึ้นโดย บริษัท โคนิก้า (Konica) หมายเลขฉาก คือ SRO-750F 1D8015 ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 25 เซนติเมตร

3.3 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างฉากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน)

3.3.1 ลิเทียมเมตาบอเรต(lithium metaborate) มีสูตรโมเลกุล คือ $LiBO_2$ จากการเปรียบเทียบปริมาณ ลิเทียม-6 และโบรอน-10 ในสารประกอบต่างๆได้แก่ กรดบอริค (H_3BO_3), ลิเทียมเตตราบอเรต ($Li_2B_4O_7$), ลิเทียมคาร์บอเนต ($LiCO_3$), ลิเทียมคลอไรด์ ($LiCl_2$), ลิเทียมไฮดรอกไซด์($Li(OH)_2$), ลิเทียมไนเตรต ($LiNO_3$) และลิเทียมเมตาบอเรต ($LiBO_2$) ดังแสดงผลในตารางที่ 4.1 พบว่าลิเทียมเตตราบอเรต มีปริมาณลิเทียม-6 และ โบรอน-10 สูงที่สุดแต่เนื่องจากมีราคาสูงมากไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในงานวิจัย จึงเลือกลิเทียมเมตาบอเรต ซึ่งมี

ปริมาณ ลิเทียม-6 และโบรอน-10 รองลงมา จึงนำมาใช้ทำฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)โดยทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีอัลฟาตามปฏิกิริยา (n,α) ลิเทียมเมตาบอเรตที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดไร้น้ำ(anhydrous) เกรดปฏิบัติการ (lab grade)หมายเลข 62615 ซึ่งผลิตโดยบริษัท ฟลูกา เคมิก้า (Fluka chemika) ประเทศเยอรมัน

3.3.2 สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) (silver-activated zinc sulfide)มีสูตรโมเลกุล คือ ZnS (Ag)เมื่อถูกกระตุ้นด้วยอนุภาคมีประจุใดๆ จะปล่อยแสงในช่วงสีน้ำเงิน ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 450 นาโนเมตร ในงานวิจัยนี้ใช้สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) ซึ่งมีชื่อสารเรืองแสงคือ P22-B1 และหมายเลข E10-140 ผลิตโดยบริษัท คาเซอิ ออปโทนิค (Kasei optonix,Ltd.) ประเทศญี่ปุ่น

ตารางที่ 3.2 การกระจายของขนาดอนุภาคสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)ที่นำมาสร้างฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)

diameter (μm)	volume(%)
2	0
4-6	29.1
6-8	34.8
8-10	19.5
10-12	5.7
12-14	1.9
14-16	0.4
16	0

3.3.3 สารยึดเหนี่ยว(binder) ที่นำมาใช้ในงานวิจัยเพื่อทำให้ลิเทียมเมตาบอเรต และสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) ยึดเกาะกันอย่างเหนียวแน่น ได้แก่

3.3.3.1 โพลีเอธิลีนชนิดความหนาแน่นสูง(high density polyethylene) มีความเป็นผลึกสูง เหนียว ทนทาน โครงสร้างเป็นสายตรง จุดหลอมเหลวที่ 135 องศาเซลเซียส และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

3.3.3.2 แลคเกอร์ (lacquer)ประกอบด้วยเซลลูโลสไนเตรต เอทานอล และน้ำ มีลักษณะเป็นของเหลวใส มีความหนืดพอควร ปกติใช้เคลือบวัสดุให้มีความเงา แข็งแรง ทนทานต่อการสึกกร่อน แลคเกอร์ที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ แลคเกอร์เบอร์ 6 ตราปลาฉลาม

3.3.3.3 กาวสารพัดประโยชน์ตราดูโร (duro)เป็นกาวชนิดหนึ่งมีความแข็งแรง ทนทาน ทนความร้อน ไม่ละลายน้ำ ค่อนข้างใส แห้งสนิทภายใน 2-3 ชั่วโมง และถ้าทิ้งไว้นานก็จะยิ่งแข็งแรง ทั้งนี้ขึ้นกับปริมาณกาวที่ใช้ และลักษณะของวัตถุ ส่วนประกอบที่สำคัญของกาวชนิดนี้ คือ อะซิโตน(acetone)และไอโซบิลทิล อะซิเทต (isobutyl acetate) ผลิตโดยบริษัท ลอกซ์ไท คอปอเรชั่น ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.3.3.4 กาวสารพัดประโยชน์ตราโอลิมปิค(olympic)REG.NO.98135 เป็นกาวยางชนิดหนึ่ง มีความแข็งแรง ทนความร้อน ไม่ละลายน้ำ ราคาไม่แพง หาซื้อง่าย

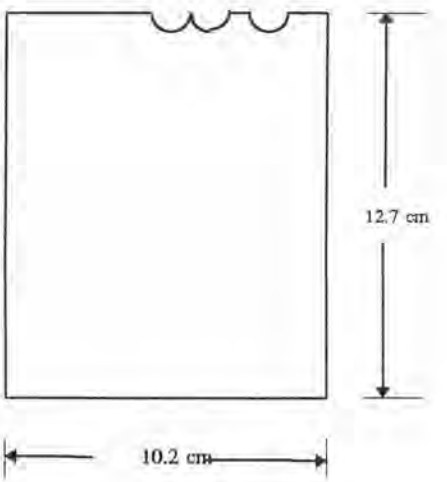
3.3.4 ทินเนอร์ชนิดเกรด AAA ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่ดีจึงสามารถละลายแลคเกอร์และกาวสารพัดประโยชน์ให้มีความหนืดลดลง ช่วยให้แลคเกอร์ และกาวสารพัดประโยชน์แข็งตัวช้าขึ้น ทำให้การปฏิบัติสะดวกขึ้น

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างสารยึดเหนี่ยวที่นำมาใช้ในการทดลอง

3.4 ฟิล์ม (flim)

ฟิล์มที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส(Ilford HP5 Plus) เป็นฟิล์ม ขาวดำชนิดแพนโครเมติค(pancromatic film)ขนาดความกว้าง 10.2 เซนติเมตร ความยาว 12.7 เซนติเมตร ซึ่งมีความไวต่อสีทุกสี(colour sensitivity)ในสเปกตรัม ที่มีความยาวคลื่นแสงไม่เกิน 670 นาโนเมตร ความไวแสง(speed)โดยปกติของฟิล์มชนิดนี้ คือ ISO 400/27 แต่สามารถทำให้มีความไวอยู่ในช่วง EI 200/24 ถึง EI 3200/36 โดยกระบวนการสร้างภาพด้วยน้ำยาสร้าง

ภาพและ น้ำยาคงสภาพของอิลฟอร์ด คือ Ilford plus developer และ Ilford Microphen จึงใช้งานได้ดีแม้ในที่ซึ่งมีแสงน้อย EI คือ หน่วยวัดความไวแสงของฟิล์ม ภายหลังการปรับค่าความไวแสงปกติ โดยผ่านกระบวนการสร้างภาพ ส่วนประกอบของ ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี5 พลัสได้แก่ ฐานรองรับตัวยาไวแสงเป็นโพลีเอสเตอร์(polyester)หนา 0.18 มิลลิเมตร(7/100 นิ้ว) ชั้นอิมัลชันเป็นชั้นของสารไวแสงผลึกเงินโบรไมด์(silver bromide)เม็ดละเอียดเคลือบอยู่บนฐานรองรับ และฉาบด้านหลังของฟิล์มไว้ด้วยชั้นของแอนติฮาเลชั่น แบคกิ้ง (antihalation backing)เพื่อป้องกันมิให้เกิดแสงสะท้อนที่เป็นวงๆ (flare)



รูปที่ 3.4 ด้านหน้าของแผ่นฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี5 พลัส

3.5 กระดาษอัดภาพ (photographic paper)

กระดาษอัดภาพที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้ชื่อ ฟอร์เต้สปีด (fortespeed) ผลิตขึ้นโดยบริษัท โฟโตเคมิคอล อินดรัสทรี ฟอร์เต้ ประเทศฮังการี (Photochemical industry Forte,Va 'c. Hungary) สามารถนำไปใช้กับฟิล์มที่มีคอนทรัสต์สูง คอนทรัสต์ปานกลางหรือคอนทรัสต์ต่ำได้ เป็นกระดาษอัดภาพชนิดขาวดำที่มีเรซิน เคลือบอยู่บางๆบนแผ่นกระดาษ คุณสมบัติของกระดาษอัดภาพชนิดนี้คือ สามารถอัดภาพได้อย่างรวดเร็ว ใช้ได้กับน้ำยาสร้างภาพ (developer solution) หลายชนิด และไม่ต้องนำกระดาษอัดภาพไปผ่านกระบวนการรีดให้เรียบเนื่องจากผิวหน้าของกระดาษมีลักษณะเป็นมันวาวและเรียบอยู่แล้ว

ตารางที่ 3.3 เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพโดยใช้กระดาษอัดภาพ ฟอร์เต้สปีด ที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ (° ซ.)	เวลาในการสร้างภาพ (วินาที)
20	60-80
25	50-60
30	30-40
35	20-30

3.6 เคมีภัณฑ์สำหรับการสร้างภาพ

3.6.1 น้ำยาสร้างภาพ(developer solution) ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยาสร้างภาพของ 2 บริษัทคือ

3.6.1.1 Kodak industrex manual developer and replenisher ของบริษัท โกดัก ประกอบด้วยน้ำยา 2 ส่วนคือ

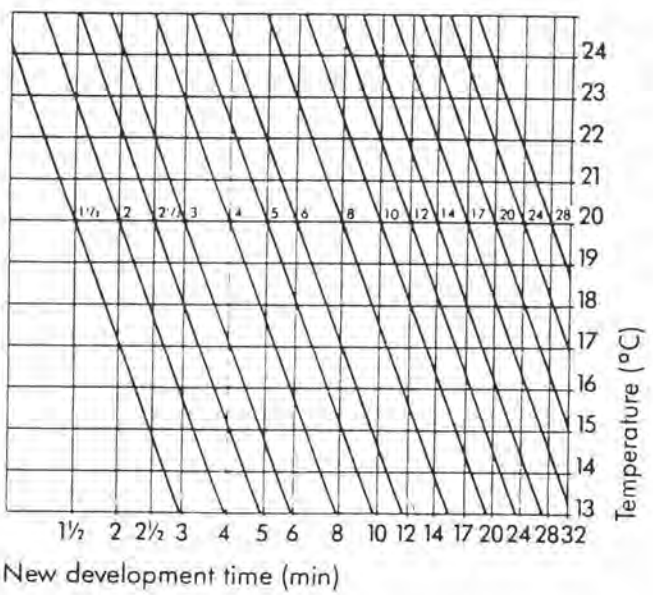
ส่วน A ประกอบด้วย potassium hydroxide(131D-58-3)
hydroquinone(123-31-9)
P-methylaminophenol sulfate(55-55-0)
potassium sulfite(10117-38-1)
sodium sulfite(7757-83-7)

ส่วน B ประกอบด้วย acetic acid(64-19-7)
water(7732-18-5)

3.6.1.2 ไมโครเฟน(microphen) ของบริษัท อิลฟอร์ด เป็นน้ำยาสร้างภาพสำหรับฟิล์มชนิดละเอียด(film grain film) ช่วยเพิ่มความไวแสงให้แก่ฟิล์ม อิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส สามารถเพิ่มความไวแสงได้ตั้งแต่ El 200/20 ถึงEl 3200/36 โดยขึ้นกับความเข้มข้นของน้ำยา เวลาในการล้างฟิล์มและอุณหภูมิ ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 เวลาที่ใช้ในการล้างฟิล์ม (นาที)สำหรับน้ำยาสร้างภาพไมโครเฟน และน้ำยาสร้างภาพของบริษัท โกดัก

ชนิดของน้ำยาสร้างภาพ	ความเข้มข้น	เวลาสำหรับ EI 400/27	เวลาสำหรับ EI 800/30	เวลาสำหรับ EI 1600/33	เวลาสำหรับ EI 3200/36
โกดัก	stock	7(1/2)	9(1/2)	12(1/2)	-
	1+1	11	13	-	-
	1+3	22	-	-	-
ไมโครเฟน	stock	6(1/2)	8	11	16
	1+1	12	15	-	-
	1+3	23	-	-	-



รูปที่ 3.5 เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพ สำหรับน้ำยาสร้างภาพไมโครเฟน ที่อุณหภูมิต่างๆและความไวแสงต่างๆ

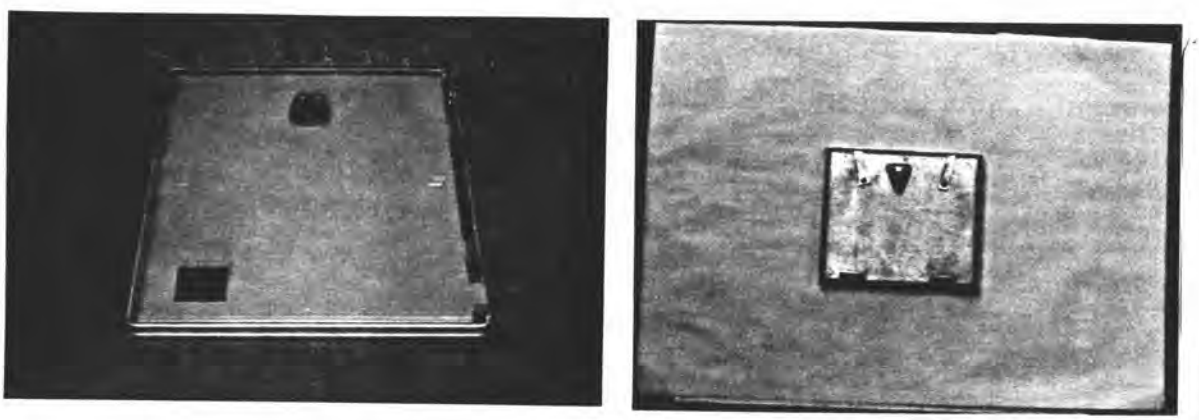
3.5.2 น้ำยาคงสภาพ (fixer solution)ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำยาคงสภาพ 2 บริษัท คือ

3.5.2.1 Kodak Rapid Fixer ของบริษัท โกดัก ใช้คู่กับน้ำยาสร้างภาพ Kodak liquid x-ray Developer and Replenisher อุณหภูมิที่ใช้ในการคงสภาพฟิล์มอยู่ในช่วง 18 ถึง 24 องศาเซลเซียสและใช้เวลาในการคงสภาพประมาณ 4 ถึง 6 นาที

3.5.2.2 Ilford Hypam Fixer ของบริษัท อิลฟอร์ด ใช้คู่กับน้ำยาคงสภาพ ไมโครเฟน อุณหภูมิที่ใช้ในการคงสภาพฟิล์มประมาณ 20 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการคงสภาพประมาณ 2 ถึง 4 นาที

3.7 ตลับใส่ฟิล์ม (film cassette)

ตลับใส่ฟิล์มทำจากโลหะอะลูมิเนียม มี 2 ขนาด คือ ขนาดกว้าง 23 เซนติเมตร ยาว 28 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร และขนาดเล็กซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเพิ่มเติม ให้มีขนาดพอเหมาะกับขนาดของฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) และแผ่นฟิล์มกว้าง 14 เซนติเมตร ยาว 16 เซนติเมตร หนา 1.3 เซนติเมตร



รูปที่ 3.6 ตลับใส่ฟิล์มทั้ง 2 ขนาด

3.8 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)

3.8.1 แผ่นอะลูมิเนียม หนา 1 มิลลิเมตร

3.8.2 วงแหวนอะลูมิเนียม หนา 1 มิลลิเมตรขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8.0 เซนติเมตร

3.8.3 ปืนฉีดพ่น (spray gun) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.7 ปืนฉีดพ่น

3.8.4 ปั๊มความดัน (pressure pump)

รูปที่ 3.8 ปั๊มความดันที่ใช้ในงานวิจัย

3.8.5 เครื่องอัดความดัน 55 ton ของศูนย์เครื่องมือและศูนย์วิจัยจุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

3.8.6 เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค centrifugal particle size anaiyzer SA-CP2 Shimadzu ของบริษัท ชิมัสซุ ประเทศญี่ปุ่น

3.8.7 เครื่องบดสาร หรือเรียกว่า ครกไฟฟ้าอาเกต โดยบริษัทไซแอนติฟิค โปรโมชั่น จำกัด

รูปที่ 3.9 เครื่องบดสาร

3.8.8 ตะแกรงร่อนสารขนาด 45 ไมครอน mesh no. 325

3.8.9 ขวดผสมสารขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร สูง 6.0 เซนติเมตร

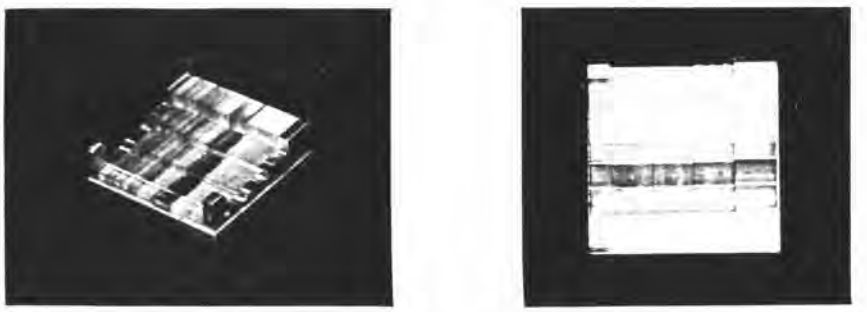
3.9 อุปกรณ์วัดคุณภาพของฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)

ฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)ที่สร้างขึ้นต้องนำมาทดสอบคุณภาพของฉาก ได้แก่ ความไวแสงและรายละเอียดของภาพโดยอุปกรณ์ชิ้นเล็กๆ เรียกว่า IQIs ย่อมาจาก Image Quality Indicators ได้แก่

3.9.1 BPI ประกอบด้วย TFE-fluorcarbon block ภายในบรรจุ โพลีเตตราฟลูออโร-เอธิลีน (polytetrafluroethylene) แผ่นวงกลมทำจาก โบรอนไนไตรด์ (boron nitride) 2 ชิ้น แผ่นวงกลมทำจากตะกั่ว (lead disks) 2 ชิ้น และเส้นโลหะแคดเมียม 2 เส้น ดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 beam purity indicator

3.9.2 SI ผลิตโดย The American Society for Testing and Material มีลักษณะเป็นขั้นบันได(step wedge) ภายในบรรจุ อะครีลิก เรซิน(acrylic resin) ตะกั่วและอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 sensitivity indicator

3.9.3 IQIs strip B เป็นอุปกรณ์ ใช้สำหรับวิเคราะห์รีโซลูชันของภาพ (resolution) ประกอบด้วย แผ่นแคดเมียม หนา 0.5 มิลลิเมตร เจาะเป็นช่องกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆกัน 25 ช่อง เส้นแคดเมียมยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆกัน 7 ชิ้น และเส้นพลาสติกความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆกัน 13 ชิ้น บรรจุอยู่ในกรอบอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.12 รูปร่างภายนอกของ IQIs strip B

3.10 เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม (densitometer)

เครื่องมือนี้มีประโยชน์ ในการอ่านค่าความเข้มบนฟิล์มโดยอาศัย หลักการส่องผ่านของแสง สำหรับงานวิจัยนี้ ใช้เดนซิโตมิเตอร์ รุ่น MacbethTD-932 ผลิตโดยบริษัท คอลมอร์เกน อินสทรูเมนท์(Kollmorgen Instruments Corp.) สามารถอ่านค่าความเข้มได้ตั้งแต่ 0.00-4.00 Dความแม่นยำ ±0.22D ช่องผ่านของลำแสงเท่ากับ 2 มิลลิเมตร

3.11 หัววัดรังสีนิวตรอน พร้อมอุปกรณ์ประกอบการวัดรังสี

หัววัดรังสีนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยคือหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซโบรอนไตรฟลูออไรด์ ($^{10}BF_3$) รุ่น ND-IMC-2022 เป็นหัววัดรังสีชนิดพรอพพอร์ชันนัล ใช้สำหรับวัดเทอร์มัลนิวตรอนโดยอาศัยปฏิกิริยา $^{10}B(n,\alpha)^{7}Li$

3.12 นาฬิกาจับเวลา

ของบริษัท ไซโก้ จับเวลาได้ละเอียดถึง มิลลิวินาที เพื่อใช้จับเวลาขณะถ่ายภาพ