

การหาการกัศร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรายกิริยากับโลหะผสม  
เหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทลอมเหลว



นายศีกษิต แสงแก้ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

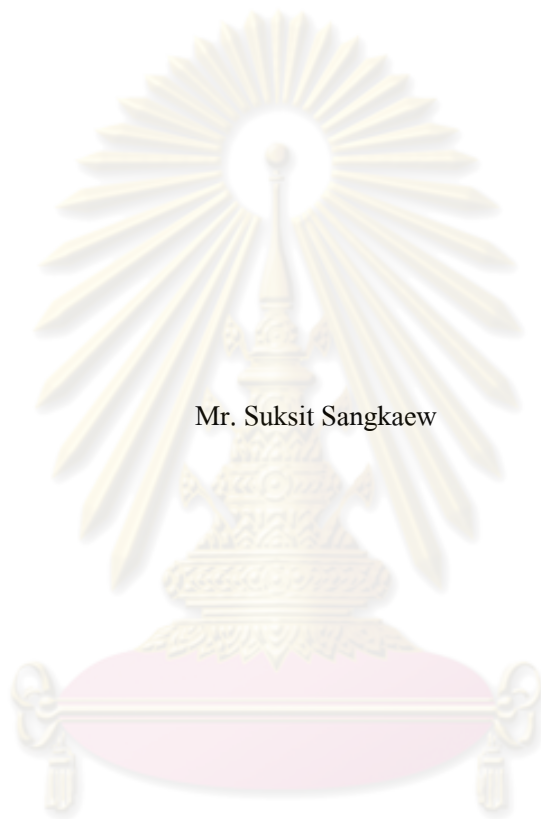
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DETERMINATION OF SURFACE CORROSION OF RADIATION SHIELDING CONCRETE  
DUE TO INTERACTION WITH MOLTEN IRON-LEAD-TIN-BISMUTH ALLOY



Mr. Suksit Sangkaew

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การหาการกักกรองของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจาก  
อันตรายวิทยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทลอมเหลว

โดย

นายศีกษิต แสงแก้ว

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสวง


อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

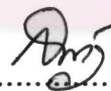
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวัจนวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสวง)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ตัณชัย นิลสุวรรณ ไข่มืด)

  
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

ศึกษิต แสงแก้ว : การหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับ โลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว. (DETERMINATION OF SURFACE CORROSION OF RADIATION SHIELDING CONCRETE DUE TO INTERACTION WITH MOLTEN IRON-LEAD-TIN-BISMUTH ALLOY)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภพงษ์ วงศ์แสง, อ.ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ร่วม : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 123 หน้า.

ได้ทำการศึกษาหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตจากอันตรกิริยากับ โลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก และบิสมัทหลอมเหลวแบบเจือปนกัน เพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ มีตัวแปรหลักในการวิจัย คือ ชนิดของคอนกรีตและอัตราส่วน ผสมระหว่างเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุกและบิสมัทหลอมเหลว (Fe:LM) โดยสร้างคอนกรีตกำบังรังสี 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักจากแร่แบไรท์ มีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ย 417.5 และ 378.4 kg/cm<sup>2</sup> ตามลำดับ มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาที่พลังงาน 0.662, 1.170 และ 1.330 MeV สำหรับคอนกรีตธรรมดาเท่ากับ 0.1916, 0.1518 และ 0.1340 cm<sup>-1</sup> สำหรับคอนกรีตมวลหนักเท่ากับ 0.2382, 0.1787 และ 0.1654 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ ทำการสร้างเตา หลอมโลหะอาร์คพลาสมา (Plasma Arc Furnace, PAF) ขนาดกำลังไฟฟ้า 13 กิโลวัตต์เพื่อใช้ สำหรับหลอมโลหะผสมในงานวิจัย ผลการหาการกัดกร่อนของคอนกรีตโดยวิธีการถ่ายภาพ ด้วยรังสีแกมมาและการผ่าคอนกรีต พบว่า คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกัด กร่อนที่ระดับพื้นผิวเล็กน้อยเมื่อทำอันตรกิริยากับ โลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก และบิสมัท หลอมเหลวปริมาตร 50 ลบ.ซม. ลักษณะการกัดกร่อนเป็นแบบทั่วผิวหน้าของคอนกรีตที่กระทำ อันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว โดยมีการกัดกร่อนมากที่สุดและน้อยที่สุดที่อัตราส่วนผสม โลหะ Fe 100 wt.% และ LM 100 wt.% ตามลำดับ เนื่องจากโลหะผสมหลอมเหลวที่กระทำอันตร กิริยากับคอนกรีตมีปริมาณน้อยและเหล็กหลอมเหลวมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลวสูงกว่า LM จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับคอนกรีตได้นานกว่าทำให้สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนได้ มากกว่า ดังนั้น เหล็กหลอมเหลวจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกัดกร่อนของคอนกรีต ส่วน LM ไม่ปรากฏผลการกัดกร่อนของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ

ภาควิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี ..... ลายมือชื่อนิสิต ..... ศักดิ์ แสงแก้ว .....  
 สาขาวิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ..... ๑๗ .....  
 ปีการศึกษา 2553 ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ..... ศุภพงษ์



# # 5070623921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : PLASMA ARC FURNACE (PAF) / CONCRETE CORROSION / LIQUID METAL

SUKSIT SANGKAEW : DETERMINATION OF SURFACE CORROSION OF RADIATION SHIELDING CONCRETE DUE TO INTERACTION WITH MOLTEN IRON-LEAD-TIN-BISMUTH ALLOY. ADVISOR : ASST.PROF. DOONYAPONG WONGSAWAENG, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST.PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, M.Eng., 123 pp.

The research work studied acute surface corrosion of concrete due to the interaction with molten Fe-Pb-Sn-Bi alloy in order to provide preliminary data for nuclear safety analysis. The main parameters under study were concrete types and ratio between iron and molten Pb-Sn-Bi alloy (Fe:LM). Two types of radiation shielding concrete, ordinary concrete and heavy concrete composing of barite, were fabricated with  $417.5 \text{ kg/cm}^2$  and  $386.5 \text{ kg/cm}^2$  average compressive strengths, respectively. Gamma ray attenuation coefficients at 0.662, 1.170 and 1.330 MeV were  $0.1916$ ,  $0.1518$  and  $0.1340 \text{ cm}^{-1}$  for the ordinary concrete, and  $0.2382$ ,  $0.1787$  and  $0.1654 \text{ cm}^{-1}$  for the heavy concrete. A plasma arc furnace (PAF) with 13 kW of power was constructed for laboratory-scale metal melting. Results of concrete corrosion from gamma radiography and physical sectioning revealed that the fabricated ordinary concrete and heavy concrete exhibited minor surface corrosion when interacting with  $50 \text{ cm}^3$  of molten Fe-Pb-Sn-Bi alloy. The corrosion was uniform throughout the surface of the concrete undergoing interaction with the molten alloy. The maximum corrosion took place with 100 wt.% Fe composition, while the minimum corrosion took place with 100 wt.% LM composition. The small volume of the molten metal alloy interacting with the concrete and the higher latent heat of fusion for iron than LM resulted in more observable corrosion. Therefore, molten iron was an important factor on concrete corrosion, while LM did not exhibit significant concrete corrosion.

Department : Nuclear Technology

Student's Signature *S. Sangkaew*

Field of Study : Nuclear Technology

Advisor's Signature *D. G.*

Academic Year : 2010

Co-advisor's Signature *Suvit Punnachaiya*

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลและหน่วยงานต่าง ๆ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลและหน่วยงานที่ให้ความอนุเคราะห์ดังนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภพงษ์ วงศ์แสวง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมวิทยานิพนธ์ และคุณวราภรณ์ วัชรสุรกุล นักวิจัยสำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ สำหรับข้อเสนอแนะและคำปรึกษาในการดำเนินงานวิจัย

รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ประธานกรรมการสอบ รองศาสตราจารย์ ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณ โฆษิต และรองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ ผู้เป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ได้ตรวจสอบและให้คำแนะนำในการแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ผู้ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา ภายใต้ความร่วมมือทางวิชาการตามโครงการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท-เอกด้านวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ผู้ให้การสนับสนุนทุนดำเนินงานวิจัย ภายใต้โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ดร.วิฑิต ปานสุข อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา และคุณเอกสิทธิ์ วงศ์จิรัง นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุ เครื่องมือ สถานที่ และให้ความช่วยเหลือในการสร้างคอนกรีตและทดสอบคุณสมบัติคอนกรีต

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณแม่ คุณพ่อ คุณตวงพร เอ็งวงษ์ตระกูล และคุณสุนันทา ภัทรชาคร ผู้บังคับบัญชาและอดีตผู้บังคับบัญชาที่ให้การสนับสนุนส่งเสริมการศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา พร้อมกันนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติและจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เป็นกำลังใจและให้คำแนะนำในการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ
<b>บทที่ 1. บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
<b>บทที่ 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์	
2.1.1 ลักษณะทั่วไป.....	5
2.1.2 ความปลอดภัยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์.....	6
2.1.3 ส่วนประกอบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์.....	7
2.1.4 แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์.....	11
2.1.5 คุณสมบัติโลหะเหลว (Liquid Metal; LM).....	13
2.2 คอนกรีต	
2.2.1 ลักษณะทั่วไปของคอนกรีต.....	16
2.2.2 ประเภทคอนกรีต.....	16
2.2.3 ปูนซีเมนต์.....	17
2.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	17
2.2.5 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	18

2.2.6	คุณสมบัติด้านอุณหภูมิ (Thermal Properties).....	19
2.2.7	ปัวซองส์เรโซ (Poisson's Ratio) .....	20
2.2.8	คอนกรีตมวลหนัก (High Density Concrete).....	20
2.2.9	ความทนทานของคอนกรีต.....	22
2.2.10	การทำลายโดยไฟ (fire damage).....	22
2.2.11	รูปแบบการกัดกร่อน.....	24
2.3	อาร์กพลาสมา	
2.3.1	ลักษณะทั่วไปของพลาสมา.....	27
2.3.2	การเกิดอาร์กพลาสมา.....	27
2.3.3	พลาสมาก๊าซ.....	28
2.4	การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT)	
2.4.1	หลักการถ่ายภาพด้วยรังสี.....	32
2.4.2	อันตรกิริยาของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์กับสสาร.....	34
2.4.3	การลดทอนรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์.....	35
2.4.4	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์.....	35
2.4.5	การทะลุผ่านวัตถุของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์.....	35
<b>บทที่ 3. วัสดุอุปกรณ์สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย</b>		
3.1	รายการวัสดุอุปกรณ์	
3.1.1	การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา.....	37
3.1.2	การสร้างคอนกรีตกำบังรังสี.....	37
3.1.3	การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต.....	38
3.1.4	การเตรียมโลหะผสม.....	38
3.1.4	การหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีต.....	38
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย	
3.2.1	การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา	
3.2.1.1	ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	39
3.2.1.2	ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก.....	41

3.2.1.3 ระบบระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา.....	43
3.2.1.4 ระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา.....	44
3.2.1.5 เบ้าหลอมโลหะ.....	47
3.2.1.6 พลาสมาก๊าซที่ใช้ในการทดลอง.....	47
3.2.2 การเตรียมคอนกรีตสำหรับทดลอง	
3.2.2.1 การเตรียมแบบหล่อคอนกรีต.....	48
3.2.2.2 การเตรียมวัสดุส่วนผสมและอัตราส่วนผสมคอนกรีต.....	49
3.2.2.3 การผสมคอนกรีต.....	51
3.2.2.4 การเทคอนกรีตลงแบบหล่อและบ่มคอนกรีต.....	51
3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต	
3.2.3.1 การหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต.....	56
3.2.3.2 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต.....	56
3.2.3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา.....	59
3.2.4 การเตรียมโลหะผสม	
3.2.4.1 การเตรียมโลหะและอัตราส่วนผสมโลหะ.....	61
3.2.5 การศึกษาหาการกัดกร่อนของคอนกรีต	
3.2.5.1 การหลอมโลหะและเทโลหะหลอมเหลว.....	63
3.2.5.2 การตรวจสอบด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	65
3.2.5.3 การตรวจสอบด้วยสายตา.....	68
<b>บทที่ 4. ผลการวิจัย</b>	
4.1 ผลการทดสอบเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา.....	70
4.2 ผลการทดสอบคอนกรีตกำลังรังสีที่เตรียมขึ้น	
4.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต.....	75
4.2.2 ความหนาแน่นของคอนกรีต.....	76
4.2.3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา.....	79
4.3 การหาการกัดกร่อนของคอนกรีต	
4.3.1 ผลการตรวจสอบโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	83
4.3.2 ผลการตรวจสอบโดยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา.....	89



บทที่ 5. วิจัยผลการวิจัย สรุปผลและข้อเสนอแนะ	
5.1 วิจัยผลการวิจัย	
5.1.1 การหาการคัดกรองของคอนกรีต.....	93
5.1.2 การเตรียมคอนกรีต.....	94
5.1.3 การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา.....	95
5.2 สรุปผล.....	96
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	97
รายการอ้างอิง.....	99
ภาคผนวก.....	101
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	123



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยแบ่งเป็นออกไซด์หลักและย่อย	17
2.2	สารประกอบหลัก (Major compounds) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.....	18
2.3	ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมหนัก.....	21
2.4	ต้นกำเนิดรังสีแกมมาบางชนิดที่ใช้ในงานถ่ายภาพด้วยรังสี.....	33
3.1	อัตราส่วนวัสดุผสมคอนกรีต (ปริมาตร 25,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร).....	50
3.2	อัตราส่วนผสมโลหะหลอมเหลว (ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร).....	63
4.1	ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ( $\text{kg/cm}^2$ ).....	75
4.2	ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตธรรมดา (ความหนาแน่นเฉลี่ยรวม $2.60 \text{ g/cm}^3$ ).....	76
4.3	ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนัก (ความหนาแน่นเฉลี่ยรวม $3.43 \text{ g/cm}^3$ ).....	77
4.4	อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ ..... พลังงาน 0.662 MeV.....	79
4.5	อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ ..... พลังงาน 1.170 MeV.....	81
4.6	อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ ..... พลังงาน 1.330 MeV.....	82
5.1	สรุปผลคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักที่สร้างขึ้น.....	97

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์.....	5
2.2	ลักษณะการออกแบบเกราะป้องกันรังสีหลายชั้น.....	6
2.3	ถังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ Pressurized water reactor (PWR) .....	8
2.4	การทดสอบความแข็งแรงอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	9
2.5	องค์ประกอบภายในอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์.....	10
2.6	แท่งเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ประเภทน้ำมวลเบา (Light Water Reactor, .. LWR) .....	11
2.7	ภาคตัดขวางของแท่งเชื้อเพลิงยาว 4 เมตรแสดงวงชั้นโลหะเหลว (Liquid Metal)	13
2.8	กราฟเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ก๊าซฮีเลียมและโลหะเหลว (LM) ในบริเวณ Gap ที่มีต่ออุณหภูมิที่ผิวเม็ดเชื้อเพลิงในช่วงเวลา 1 วินาทีสำหรับกรณีอุบัติเหตุ HZP RIA (Hot Zero Power Reactivity Insertion Accident).....	14
2.9	โลหะเหลว (Liquid Metal, LM) ในรอยแตกของเม็ดเชื้อเพลิง.....	15
2.10	โลหะเหลว (Liquid Metal, LM) ในรอยแตกกว้าง 3 ไมครอนภายในเม็ดเชื้อเพลิง UO <sub>2</sub> .....	15
2.11	ค่าสัมประสิทธิ์การนำอุณหภูมิของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่างกัน.....	20
2.12	แผนภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากอค์คิภัย.....	23
2.13	แผนภาพรวมการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ.....	26
2.14	การเกิดพลาสติกในภาชนะปิด.....	27
2.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง energy content ของพลาสติก้าชกับอุณหภูมิของ..... พลาสติกที่ความดันปกติ.....	29
2.16	ค่าพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวเป็น ไอออนของก๊าซชนิดต่างๆ.....	30
2.17	การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเปลวพลาสติก.....	31
2.18	ลักษณะการตรวจสอบโดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสี.....	36
3.1	แผนภาพระบบการทำงานเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสติก.....	39
3.2	วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	40
3.3	ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง.....	40

ภาพที่	หน้า
3.4	วงจรรระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก..... 41
3.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Duty cycle กับค่ากระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้งาน.... 42
3.6	ลักษณะแรงดันไฟฟ้าระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก..... 42
3.7	การติดตั้งไดโอดกำลังสำหรับวงจรเรียงกระแสบนแผ่นระบายความร้อน..... 43
3.8	ระบบระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา..... 44
3.9	แผนภาพระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา..... 45
3.10	อุปกรณ์ภายในระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา..... 46
3.11	แผงสวิตช์ระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา..... 46
3.12	เบ้าหลอมโลหะกราไฟต์..... 47
3.13	ระบบการทำงานของเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่พัฒนาขึ้น..... 48
3.14	แบบหล่อคอนกรีตที่จัดทำขึ้นในการวิจัย..... 49
3.15	ปูนซีเมนต์และแร่แบไรท์ที่ใช้ในการสร้างคอนกรีต..... 50
3.16	การทาน้ำมันพีชเคลือบไว้ที่ผิวภายในแบบหล่อคอนกรีต..... 51
3.17	อุปกรณ์ในการสร้างคอนกรีต..... 52
3.18	การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อคอนกรีต..... 52
3.19	การใช้เหล็กกระทุ้งเพื่อไล่ฟองอากาศในคอนกรีต..... 53
3.20	การฉีดตัวของคอนกรีตในแบบหล่อ..... 54
3.21	คอนกรีตที่ถอดออกจากแบบหล่อนำไปบ่มในน้ำ..... 54
3.22	การบ่มคอนกรีตในน้ำนาน 28 วัน..... 55
3.23	คอนกรีตที่จัดเตรียมไว้สำหรับการวิจัย..... 55
3.24	การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของคอนกรีต..... 56
3.25	เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต..... 57
3.26	คอนกรีตที่จัดเตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต..... 58
3.27	ลักษณะคอนกรีตภายหลังการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต..... 58
3.28	ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA)..... 59
3.29	การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา..... 60
3.30	แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา.. 60
3.31	การจัดเตรียมโลหะเหล็ก..... 61

ภาพที่	หน้า
3.32 เครื่องรีดแผ่นโลหะ.....	62
3.33 การจัดเตรียมโลหะตะกั่ว บิสมัท และดีบุก.....	62
3.34 การจัดวางคอนกรีตและโลหะเหล็ก.....	64
3.35 การเทโลหะหลอมเหลวลงบนคอนกรีตมวลหนัก.....	64
3.36 การจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	65
3.37 กรอบบรรจุและแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate).....	66
3.38 การถ่ายภาพด้วยรังสีตัวอย่างคอนกรีตในระนาบ YZ และ XZ.....	66
3.39 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ.....	67
3.40 ระบบโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายด้วยรังสี.....	67
3.41 เครื่องตัดคอนกรีต.....	68
3.42 การผ่าตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีต.....	69
3.43 การผ่าตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องตัดโลหะ.....	69
4.1 เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่สร้างขึ้น.....	70
4.2 ระบบไฟฟ้าภายในเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา.....	70
4.3 การจุกอาร์กพลาสมาก๊าซ.....	71
4.4 เบ้าหลอมในตู้กำบังรังสีความร้อนจากการหลอมโลหะ.....	71
4.5 การหลอมโลหะเหล็ก (Fe) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น.....	72
4.6 การหลอมโลหะเซอร์โคเนียม (Zr) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น.....	73
4.7 การหลอมโลหะโมลิบดีนัม (Mo) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น.....	73
4.8 การหลอมโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท (Fe:LM = 50:50 wt%).....	74
4.9 การหลอมโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท (Fe:LM = 75:25 wt%).....	74
4.10 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 0.662 MeV .....	80
4.11 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 1.170 MeV .....	81
4.12 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 1.330 MeV .....	82
4.13 รอยแตกร้าวในคอนกรีตมวลหนักเมื่อกระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว.....	83
4.14 ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะเหล็กหลอมเหลว 100 wt.% .....	84



ภาพที่	หน้า
4.15	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะ..... เหล็กหลอมเหลว 100 wt.% ..... 84
4.16	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม.. LM 100 wt.% ..... 85
4.17	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม LM 100 wt.% ..... 85
4.18	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม.. ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 75:25 wt.% ..... 86
4.19	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 75:25 wt.% ..... 86
4.20	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม.. ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.% ..... 87
4.21	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.% ..... 87
4.22	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดาเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม.. ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 25:75 wt.% ..... 88
4.23	ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม ที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 25:75 wt.% ..... 88
4.24	ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตก่อนและหลังเกิดอันตรกิริยากับ โลหะเหล็กหลอมเหลว.. 100 wt.%..... 89
4.25	ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะเหล็กหลอมเหลว 100 wt.% ..... 90
4.26	ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม LM 100 wt.% ..... 91
4.27	ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสม Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.%.. 92

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ได้มีการศึกษาการเพิ่มการนำความร้อนและความปลอดภัยให้กับแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ด้วยการใส่โลหะเหลว (Liquid Metal, LM) ในแท่งเชื้อเพลิงซึ่งประกอบด้วยธาตุตะกั่ว ดีบุก และบิสมัทปริมาณอัตราส่วนอย่างละ 1/3 โดยน้ำหนัก ซึ่งภายในแท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ทั่วไปจะมีช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กับท่อบรรจุเชื้อเพลิงประมาณ 80 ไมโครเมตรเพื่อป้องกันการขยายตัวของเม็ดเชื้อเพลิงจนทำให้ท่อบรรจุเชื้อเพลิงเกิดรอยแตกร้าวและสารกัมมันตรังสีแพร่กระจายออกมาได้ เนื่องจากในกระบวนการฟิชชันที่เกิดขึ้นระหว่างการเดินเครื่องปฏิกรณ์ส่งผลให้อุณหภูมิ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์ฟิชชันทั้งสถานะของแข็งและสถานะก๊าซภายในเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์เพิ่มสูงขึ้นและเกิดการบวมขยายตัวออก นอกจากนี้ ภายในแท่งเชื้อเพลิงและบริเวณช่องว่างดังกล่าว มีการอัดก๊าซฮีเลียมความดัน 20 บรรยากาศ เนื่องจากก๊าซฮีเลียมมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับก๊าซเฉื่อยชนิดอื่น แต่มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับโลหะ ทำให้อุณหภูมิระหว่างท่อบรรจุเชื้อเพลิงและเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าแตกต่างกันมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า LM สามารถทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น อุณหภูมิเม็ดเชื้อเพลิงมีค่าลดลงทำให้แท่งเชื้อเพลิงมีความปลอดภัยมากขึ้น และลดอัตราการแพร่แปรผันตรงกับอุณหภูมิของเม็ดเชื้อเพลิง (Wongsawaeng and Olander, 2007)

อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาการเกิดอุบัติเหตุทางนิวเคลียร์ในระดับสูงกว่าเกณฑ์การออกแบบ (Beyond Design Basis Accident) ในกรณีใช้แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์บรรจุโลหะเหลวแทนการใช้ก๊าซฮีเลียม กล่าวคือ หากเกิดอุบัติเหตุจนแกนเครื่องปฏิกรณ์หลอมเหลวออกมาจากถังปฏิกรณ์ซึ่งทำจากเหล็ก ส่งผลทำให้เกิดโลหะหลอมเหลวที่มีความร้อนสูงมากหรือที่เรียกโดยทั่วไปว่า Corium ตกลงสู่พื้นคอนกรีตของอาคารปฏิกรณ์ การมีธาตุโลหะตะกั่ว ดีบุกและบิสมัทเป็นส่วนประกอบใน Corium อาจส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาระหว่าง Corium กับคอนกรีตได้ จึงได้ทำการวิจัยเพื่อศึกษาก่อนการก่อตัวของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลวเพื่อเป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ก่อนการใช้แท่งเชื้อเพลิงชนิดใหม่ในเชิงพาณิชย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ในการหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีสำหรับโลหะหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 2,000 องศาเซลเซียส

1.3.2 ทดลองหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีบางชนิดจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว

## 1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาและค้นคว้าทฤษฎีและข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ออกแบบพัฒนาเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา (Plasma Arc Furnace, PAF) สำหรับหลอมเหลวโลหะที่อุณหภูมิ 1,000 ถึง 2,000 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ในการหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสี

1.4.3 ออกแบบสร้างหรือจัดซื้อคอนกรีตกำบังรังสีบางชนิด

1.4.4 ทดลองหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลวโดยเปลี่ยนแปลงชนิดคอนกรีตและอัตราส่วนของโลหะผสมในการทำอันตรกิริยากับคอนกรีต

1.4.5 ตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว

1.4.6 สรุปผลและเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้องค์ความรู้เกี่ยวกับการหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์ความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ (Nuclear Safety Analysis) ก่อนมีการใช้งานแท่งเชื้อเพลิงแบบที่มีโลหะหลอมช่วยนำความร้อนภายในแท่งเชื้อเพลิง

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ดนุพล ตันนโยภาส, วิชัย นกแก้ว และชิตพล เอียดปาน, 2551 ได้ร่วมทำการศึกษาวิจัยเรื่อง คุณสมบัติของคอนกรีตกำบังรังสีแกมมาผสมมวลรวมแบไรต์และหินเพอร์ไลต์ดิบบด โดยประเมินคุณลักษณะของคอนกรีตกำบังรังสีผสมมวลรวมแบไรต์และเพอร์ไลต์ดิบบดเป็นแร่ผสมเพิ่มที่ได้สร้างขึ้น รวมทั้งตรวจสอบสมบัติแบไรต์ที่นำมาที่ใช้ในการวิจัยและได้ศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนเพอร์ไลต์ดิบที่แตกต่างกันร้อยละ 10,20 และ30 โดยปริมาตร บ่ม 28 วัน ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพ เชิงกล และการฉายรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก พบว่า คอนกรีตแบไรต์มีความหนาแน่น 3,375-3,462 กก./ลบ.ม. มีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำต่ำและมีค่ากำลังอัดและกำลังพันธะของคอนกรีตสูง นอกจากนี้ คอนกรีตแบไรต์ช้อนกันหนา 15 มม. สามารถลดทอนรังสีแกมมาส่งผ่านได้มาก

2. วีระชัย บัญชรเทวกุล และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2524 ได้ร่วมทำวิจัย เรื่องการ สร้างเตาอาร์คพลาสมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านโลหกรรมพลาสมา โดยพัฒนาอาร์คพลาสมาแบบนันทรานเฟอร์ (non-Transfer) และแบบทรานเฟอร์ (Transfer) ขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 20 กิโลวัตต์ เพื่อประยุกต์ใช้ในการเชื่อม การหลอม และการถลุงโลหะระดับห้องปฏิบัติการผลการทดสอบการถลุงแร่ดีบุก การหลอมโลหะทองแดง อลูมิเนียม และเหล็ก และการเชื่อมเทอร์โมคัปเปิล พบว่า เตาอาร์คพลาสมาที่สร้างขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานดังกล่าวได้ และพบปัญหาในการวิจัย คือ การกระจายความร้อนไม่ทั่วบริเวณขณะทำการถลุงแร่เนื่องจากการเคลื่อนตัวของคบพลาสมาไม่สะดวก เกิดการฟุ้งกระจายของผงวัสดุที่ถลุงเนื่องจากอัตราการใช้ไหลของพลาสมาก๊าซสูง และเกิดรุพุนและออกไซด์ที่ผิวโลหะหลอมเนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างโลหะหลอมกับออกซิเจนในอากาศ

3. Bechta et al., 2009 ได้ร่วมทำการศึกษาวิจัยเรื่อง VVER vessel steel corrosion at interaction with molten corium in oxidation atmosphere โดยได้ทำการวิจัยลักษณะการกัดกร่อนของถังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ซึ่งทำจากโลหะเหล็ก (Steel) เมื่อกระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว (Corium) เพื่อศึกษาผลกระทบทางเคมีฟิสิกส์จากการมีส่วนประกอบในอากาศและไอน้ำที่แตกต่างกัน พบว่า อัตราการกัดกร่อนของโลหะเหล็กมีความไวต่อส่วนประกอบของโลหะหลอม (Corium) มากกว่าแต่ส่วนประกอบออกซิเดชันที่เกิดจากปฏิกิริยากับไอน้ำและอากาศไม่มีผลกระทบต่ออัตราการกัดกร่อนของโลหะเหล็ก

4. Journeau et.al., 2007 ได้ร่วมทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Oxide-Metal Corium-Concrete Interaction Test in the VULCANO Facility โดยได้ทำการวิจัยผลกระทบของคอนกรีตเมื่อกระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลวออกไซด์ ซึ่งมี  $UO_2$ ,  $ZrO_2$  และ โลหะเหล็ก (steel) เป็นส่วนประกอบโดยใช้เตาหลอมโลหะ VULCANO ที่ออกแบบและพัฒนาขึ้นสำหรับการหลอมโลหะและทดสอบผลกระทบต่อคอนกรีต พบว่า ในชั่วโมงแรกลักษณะชั้นของโลหะหลอมเหลวออกไซด์เมื่อกระทำอันตรกิริยากับคอนกรีตจะมีการเคลื่อนตัวแบบโลหะผสมกัน หลังจากนั้นจึงมีการแยกเป็นชั้นตามองค์ประกอบธาตุของโลหะเหลว โดยชั้นโลหะรวมตัวอยู่ด้านล่างและชั้นออกไซด์รวมตัวอยู่ด้านบน นอกจากนี้ พบว่า สัดส่วนของอากาศเมื่อทำการทดสอบเมื่อมีโลหะเหล็กกับไม่มีโลหะเหล็กแตกต่างกันมากกว่า 50% และพบว่าโลหะเหล็กมากกว่า 10 กิโลกรัมจากทั้งหมด 15 กิโลกรัมเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างการหลอมเหลว

5. Wongsawaeng and Olander, 2003 ได้ร่วมทำการศึกษาวิจัยเรื่อง Liquid-Metal- Bonded for Light Water Reactor Fuel Rods พบว่า โลหะเหลวซึ่งมีส่วนประกอบของตะกั่ว ดีบุก และบิสมัท อัตราส่วนร้อยละ 1/3 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาใช้แทนที่ก๊าสซีเลียมซึ่งอยู่ในช่องว่างระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงและท่อเชื้อเพลิง (Fuel-cladding gap) สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบใช้น้ำ พบว่า สามารถช่วยเพิ่มค่าการนำความร้อน ได้สูงกว่าก๊าสซีเลียม และสามารถรองรับการออกแบบความหนาของช่องว่าง (gap) ระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงกับท่อหุ้มแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มได้ ซึ่งช่วยยืดอายุการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิงจากการบวมของเม็ดเชื้อเพลิงที่ขยายตัวออกมาสัมผัสผิวของแท่งหุ้มเชื้อเพลิง ได้ตลอดอายุการใช้งานของแท่งเชื้อเพลิง นอกจากนี้ยังช่วยป้องกันการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันจากการที่ไอน้ำไหลเข้าไปในบริเวณช่องว่างดังกล่าวในกรณีแท่งเชื้อเพลิงเกิดรอยแตกแล้วได้



## บทที่ 2

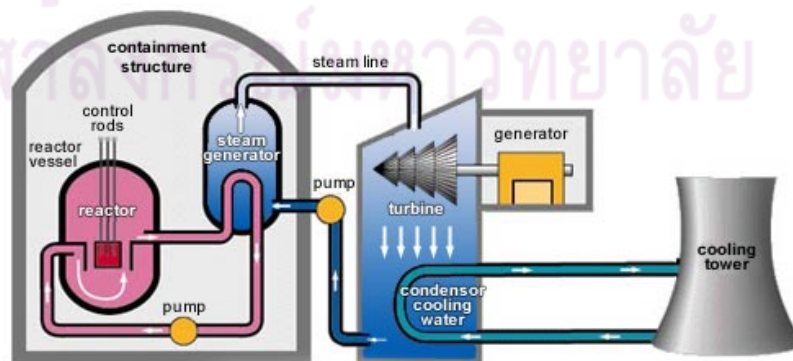
### ทฤษฎี

#### 2.1 เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

##### 2.1.1 ลักษณะทั่วไป

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์มีการสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานหลายจุดประสงค์ เช่น ผลิตไฟฟ้า งานวิจัย การเรียนการสอน การทดสอบทางวิทยาศาสตร์ การผลิตสารไอโซโทปรังสีเพื่อใช้ในทางการแพทย์และอุตสาหกรรม การผลิตอาวุธ การใช้เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนทางกลและการใช้สำหรับกำเนิดความร้อนทางคริวเรือนและอุตสาหกรรม เป็นต้น ทั้งนี้ในส่วนของเครื่องปฏิกรณ์กำลังได้มีการออกแบบและพัฒนาเพื่อผลิตไฟฟ้าหลายชนิด และบางชนิดถูกนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ เช่น Light water reactor (LWR) ซึ่งมีการใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายคิดเป็น 85% พลังงานไฟฟ้าที่ผลิตจากพลังงานนิวเคลียร์ทั่วโลก โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญหลัก ๆ 2 ส่วน คือ ส่วนผลิตความร้อนและไอน้ำ (Nuclear steam supply) ซึ่งมีองค์ประกอบต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับการผลิตไอน้ำความดันสูง และส่วนที่สอง คือ ส่วนผลิตไฟฟ้า (Electrical power supply) โดยผลิตพลังงานไฟฟ้าจากแรงดันไอน้ำที่ออกมาจากส่วนแรก ประกอบด้วยกังหันไอน้ำ (Steam turbine) เครื่องกำเนิดไฟฟ้า (Generator) และเครื่องควบแน่น (Condenser) ซึ่งแปลงไอน้ำ (steam) เป็นน้ำ (water) และส่งกลับเข้าไปยัง Nuclear steam supply เป็นวัฏจักรต่อไป

สำหรับแกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor core) ซึ่งเป็นส่วนที่พลังงานนิวเคลียร์ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนนั้น จะมีทั้งค่าความเค้น ค่าอุณหภูมิ ค่าความเข้มทางรังสีและค่าทางสภาพเคมีที่มีการกักร้อนสูง ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้จึงต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมทนทานต่อสภาพทางกลศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมี และนิวเคลียร์ด้วย ซึ่งวัสดุหลักๆ 3 ชนิดที่อยู่ในแกนปฏิกรณ์ของ LWR ได้แก่ เม็ดเชื้อเพลิง  $UO_2$ , Zirconium alloy (Zry) และน้ำสำหรับระบายความร้อนและหน่วงความเร็วนิวตรอน



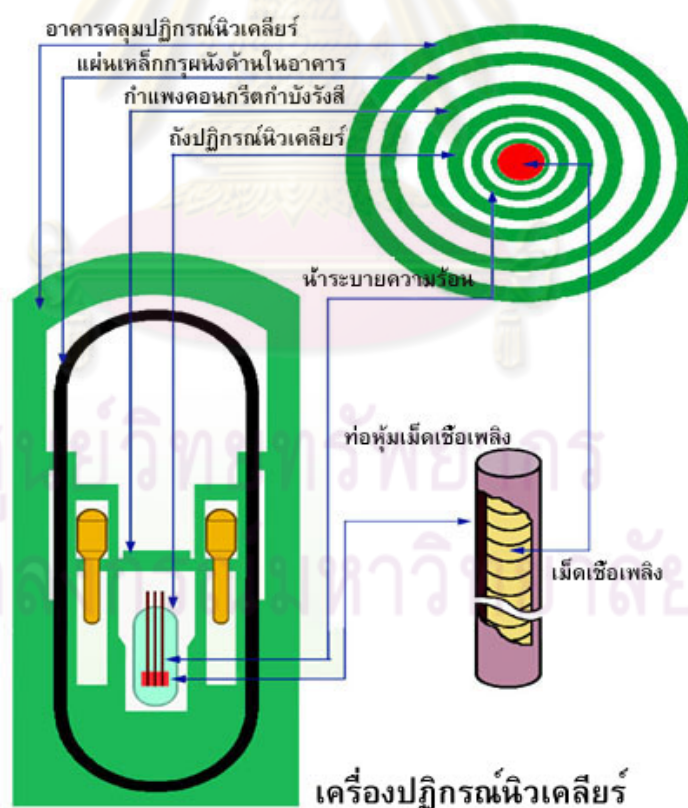
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบหลักของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

แหล่งที่มา: <http://www.nucleartourist.com/type/pwr.htm> [2010,October]

### 2.1.2 ความปลอดภัยโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ (กำธน สินธวานนท์, 2543)

เกราะป้องกันรังสีหลายชั้น คือ วัสดุอุปกรณ์ต่างๆ หลายชั้นที่ออกแบบเพื่อกักกันไม่ให้สารกัมมันตรังสีรั่วไหลหรือแพร่กระจายออกจากเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ไปสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ประกอบด้วย

- เกราะชั้นที่ 1 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (fuel pellet)
- เกราะชั้นที่ 2 ท่อหุ้มเม็ดเชื้อเพลิง นิวเคลียร์ (fuel clad)
- เกราะชั้นที่ 3 น้ำระบายความร้อน (coolant)
- เกราะชั้นที่ 4 ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor vessel)
- เกราะชั้นที่ 5 กำแพงคอนกรีตกำบังรังสี (biological concrete shield)
- เกราะชั้นที่ 6 แผ่นเหล็กกรุผนังด้านในอาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (steel liner)
- เกราะชั้นที่ 7 อาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (reactor containment)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการออกแบบเกราะป้องกันรังสีหลายชั้น

แหล่งที่มา: <http://www2.egat.co.th/ned> [2010,October]

### 2.1.3 ส่วนประกอบโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ มีดังนี้

2.1.3.1 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ วัสดุนิวเคลียร์ที่เป็นต้นกำเนิดความร้อนจะ ออกแบบให้มีขนาดเล็ก เพื่อการระบายความร้อนอย่างรวดเร็ว สามารถทนต่อความร้อนได้สูง ประมาณ 2,800 องศาเซลเซียสก่อนเกิดการหลอมเหลว ด้านทานการกัดกร่อนได้ดี สามารถกักกัน ผลิตผลฟิชชันไม่ให้หลุดลอดออกมาภายนอกเม็ดเชื้อเพลิง และยังสามารถกักกันกัมมันตภาพรังสีที่มีพลังงานต่ำได้บางส่วน

2.1.3.2 ท่อหุ้มเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เป็นท่อทำด้วยโลหะเซอร์คัลลอย (Zircalloy) หรือโลหะผสมเซอร์โคเนียม มีคุณสมบัติในการทนความร้อนได้สูงประมาณ 1,850 องศาเซลเซียส ก่อนเกิดการหลอมเหลว ด้านทานต่อการกัดกร่อนได้ดีและมีผลต่อปฏิกิริยาฟิชชันน้อยมาก ใช้ สำหรับป้องกันไม่ให้เม็ดเชื้อเพลิงสัมผัสกับน้ำระบายความร้อน โดยตรง ทำหน้าที่เป็นตัวกลาง ส่งผ่านความร้อนจากเม็ดเชื้อเพลิงให้แก่ น้ำระบายความร้อน และช่วยป้องกันผลิตผลฟิชชันรั่วไหล ออกจากเม็ดเชื้อเพลิงมาปนเปื้อนกับน้ำในระบบระบายความร้อน

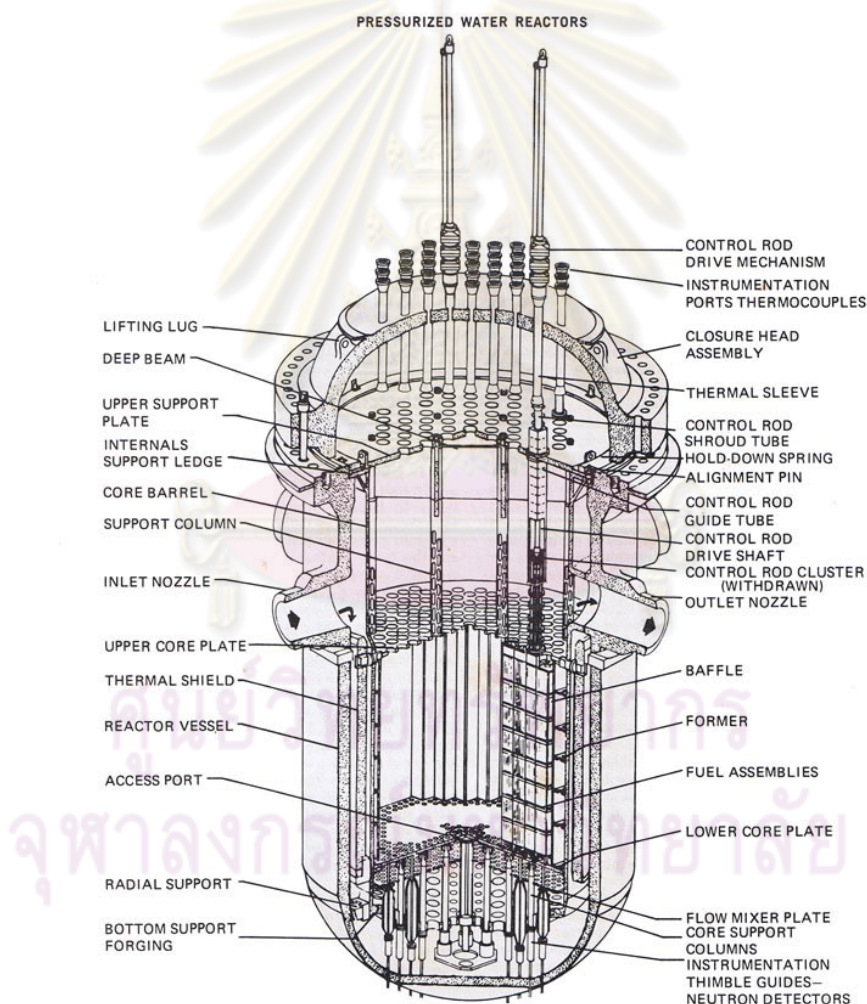
2.1.3.3 สารระบายความร้อน คือ สารที่เป็นตัวรับและพาความร้อนจากเม็ด เชื้อเพลิง ไปถ่ายเทให้แก่กระบวนการผลิตไอน้ำ ส่วนมากนิยมใช้น้ำมวลเบา ( $H_2O$ ) ผสมสารเคมี พิเศษที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อความปลอดภัยของเครื่องปฏิกรณ์ (เครื่องปฏิกรณ์บางประเภทใช้ ก๊าซเป็นสารระบายความร้อน) ซึ่งถ้ามีสารกัมมันตรังสีรั่วไหลผ่านท่อหุ้มเม็ดเชื้อเพลิงออกมา สาร รังสีเหล่านั้นก็จะยังคงอยู่ในระบบน้ำระบายความร้อน และจะถูกกำจัดออกด้วยระบบกรองสารรังสี ต่อไป นอกจากนี้ น้ำในระบบระบายความร้อนยังสามารถช่วยกำบังรังสีได้ระดับหนึ่ง

2.1.3.4 ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ ถังโลหะทรงกระบอกที่ใช้บรรจุเชื้อเพลิง นิวเคลียร์ ชุดแท่งควบคุม และเครื่องมือ/อุปกรณ์วัดทางนิวเคลียร์ต่างๆ มีช่องทางสำหรับสารระบาย ความร้อนไหลผ่านเข้าออกเพื่อการระบายความร้อน ถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์ทำด้วยเหล็กกล้าหนาไม่ ต่ำกว่า 20 เซนติเมตร ภายในบุด้วยแผ่นเหล็กไรสนิม 1-2 ชั้น เพื่อป้องกันถังปฏิกรณ์ถูกกัดกร่อน ทำให้สามารถกักกันสารกัมมันตรังสี และรองรับแรงดันสูงๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.1.3.5 กำแพงคอนกรีตกำบังรังสี คือ คอนกรีตชนิดพิเศษที่ผสมด้วยแร่โลหะและ วัสดุหลายชนิด ซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดาประมาณ 2-3 เท่า ก่อสร้างล้อมรอบถัง ปฏิกรณ์ไว้ มีความหนาประมาณ 2-3 เมตร ใช้กำบังรังสีแกมมา และนิวตรอนพลังงานสูงที่สามารถ วิ่งทะลุผ่านออกมาจากถังปฏิกรณ์ได้ และยังสามารถช่วยรองรับแรงดันสูงๆ ที่อาจเกิดขึ้นจนถึงปฏิกรณ์ไม่ สามารถกักกันหรือหยุดยั้งไว้ได้

2.1.3.6 แผ่นเหล็กบุผนังด้านในอาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ แผ่นเหล็กกล้ามี ความหนาประมาณ 6 มิลลิเมตรซึ่งบุผนังภายในอาคารคลุมปฏิกรณ์ ในภาวะปกติจะช่วยกักอากาศ และลดการรั่วไหลของอากาศจากภายในอาคารคลุมปฏิกรณ์ และยังช่วยเสริมความแข็งแรงให้แก่

อาคารคลุมปฏิกรณ์ ในภาวะไม่ปกติจะช่วยลดความรุนแรงของเหตุการณ์หากเกิดอุบัติเหตุ ทั้งนี้ เพราะอาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะมีระบบหล่อเย็น ทำหน้าที่ให้ความเย็นแก่แผ่นเหล็กบุผนัง ตลอดเวลา ซึ่งถ้าเกิดแรงดันสูงๆ พุ่งออกจากถังปฏิกรณ์ และสามารถทะลุผ่านกำแพงคอนกรีต ออกมาได้ จะทำให้เศษชิ้นส่วนวัสดุ และก๊าซร้อนผสมไอน้ำที่พุ่งออกมากระทบแผ่นเหล็กบุผนัง นั้น กระทบกับความเย็นที่แผ่นเหล็ก ทำให้ก๊าซร้อนและไอน้ำกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ และคายความร้อนอย่างรวดเร็ว ซึ่งเมื่อความร้อนลดลง ย่อมส่งผลให้แรงดันลดลงด้วย ทำให้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น กลับคืนสู่สภาวะปกติอย่างรวดเร็ว เป็นการลดความรุนแรงของเหตุการณ์และช่วยให้เหตุการณ์ไม่ ลุกลามแพร่ขยายออกไปในวงกว้าง

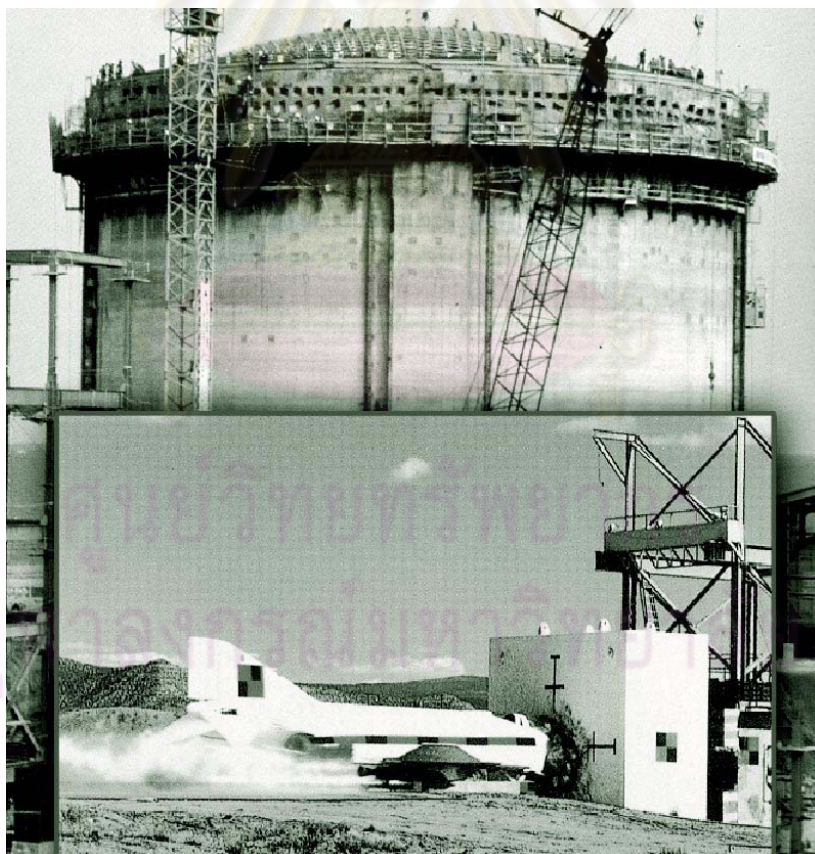


รูปที่ 2.3 ถังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ Pressurized water reactor (PWR)

แหล่งที่มา: <http://www.nucleartourist.com/systems/rv.htm> [2010,October]



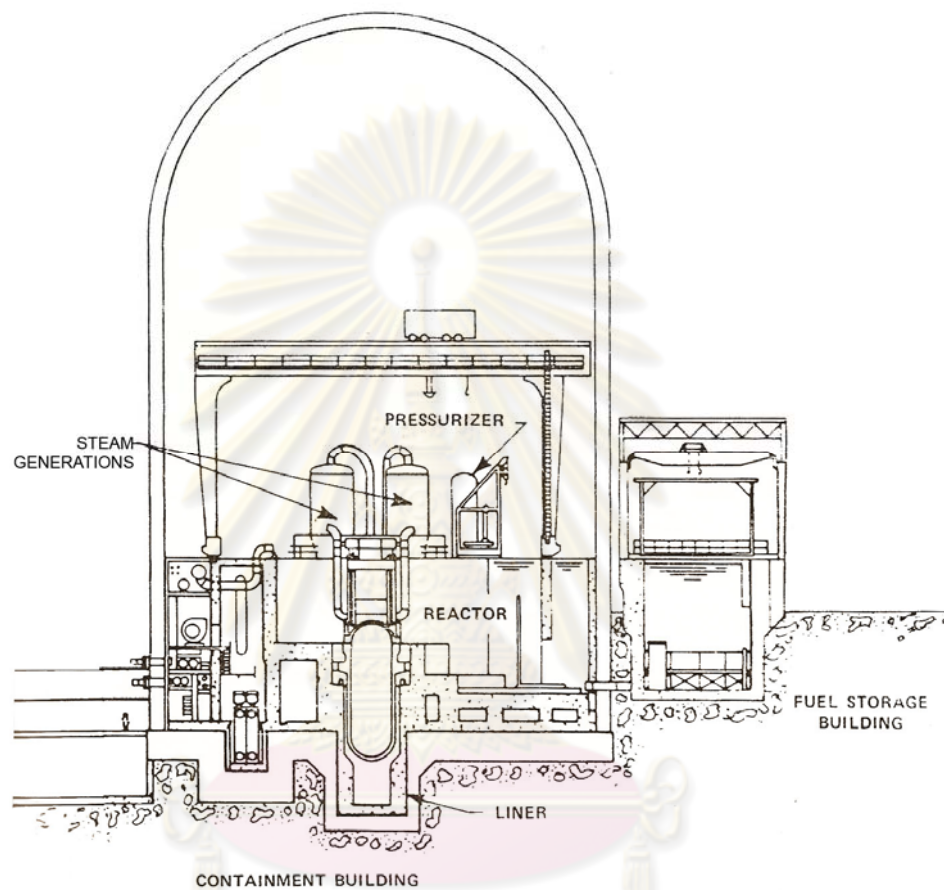
2.1.3.7 อาคารคลุมปฏิกรณ์นิวเคลียร์ คือ อาคารคอนกรีตขนาดใหญ่ที่ก่อสร้างคลุมเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะเป็นทรงกระบอกหลังคาโค้งรูปโดมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50 เมตร สูงประมาณ 70 เมตร ตัวอาคารแบ่งเป็นคอนกรีต 2 ชั้น ชั้นในเป็นคอนกรีตอัดแรง ชั้นนอกเป็นคอนกรีตเสริมเหล็ก มีความหนาทั้งสิ้นไม่ต่ำกว่า 1.30 เมตร พื้นอาคารมีความหนาไม่ต่ำกว่า 3 เมตร ภายในเนื้อคอนกรีตเสริมเหล็กบรรจุด้วยโครงเหล็กข้ออ้อย ขนาดของเหล็กประมาณ 2 นิ้ว (5.08 ซม.) สานไขว้กันเป็นตาข่าย นอกจากนี้ ยังต้องเสริมความแข็งแรง และความยืดหยุ่นให้แก่โครงสร้างของอาคารด้วย เส้นลวดแรงดึงสูงซึ่งรวมกันเป็นมัดใหญ่ประมาณ 6 นิ้ว (15.24 ซม.) ลักษณะคล้ายลวดสลิงที่ใช้ชิงสะพานแขวน โอบรอบตัวอาคารสานไขว้กัน ไปมา ทั้งแนวตั้งและแนวนอน อาคารคลุมปฏิกรณ์ถือเป็นเกราะป้องกันรังสีขั้นสุดท้าย ที่จะต้องรองรับแรงดันสูงๆหากเกิดอุบัติเหตุร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้นในอาคารได้ทั้งหมดอย่างดีเยี่ยม นอกจากนี้ยังต้องรับแรงกระทำต่าง ๆ จากภายนอก เช่น แผ่นดินไหว ลมพายุ ฝนฟ้าคะนอง น้ำท่วมสูง เครื่องบินชนหรือตกใส่ หรือการโจมตีทางอากาศได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.4 การทดสอบความแข็งแรงอาคารคลุมเครื่องปฏิกรณ์

แหล่งที่มา: <http://www2.egat.co.th/ned> [2010,October]





ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

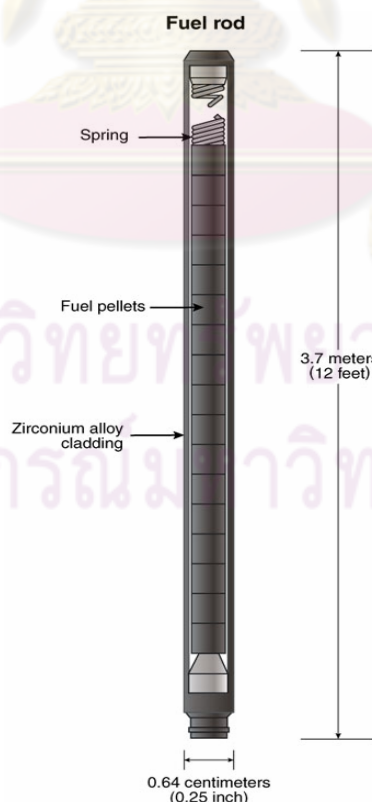
รูปที่ 2.5 องค์ประกอบภายในอาคารเครื่องปฏิกรณ์

แหล่งที่มา: [http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=11263&page=42](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=11263&page=42) [2010,October]

### 2.1.4 แท่งเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Olander, 2005)

แท่งเชื้อเพลิงเป็นหัวใจของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ โดยพลังงานจะเกิดขึ้นจากกระบวนการฟิชชันภายในแท่งเชื้อเพลิงและแปลงเป็นพลังงานความร้อนแล้วส่งผ่านความร้อนต่อมายังน้ำระบายความร้อนซึ่งไหลผ่านแกนปฏิกรณ์ โดยแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งจะถูกสร้างขึ้นมาด้วยการบรรจุเม็ดเชื้อเพลิง ( $\text{UO}_2$  pellets) เข้าไปตามความยาวของปลอกหุ้มเชื้อเพลิง (cladding) ซึ่งจะมีสปริงอยู่ทั้งทางปลายด้านบนของแท่งเพื่อช่วยในการรักษาสภาพสมดุลทางกลศาสตร์ของแท่งเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.6

ทั้งนี้หน้าที่ของแท่งเชื้อเพลิงคือ เป็นที่เก็บวัสดุเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ฟิชชัน (Fissile material) ให้สามารถอยู่ในสภาพเสถียรทางกลศาสตร์, ลักษณะโครงสร้างที่ช่วยระบายความร้อนกักเก็บผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (Fission products) ที่ปล่อยออกมาจากเชื้อเพลิง และป้องกันน้ำจากการสัมผัสโดยตรงกับเม็ดเชื้อเพลิง อย่างไรก็ตามจุดละเอียดอ่อนของการออกแบบแท่งเชื้อเพลิงซึ่งมีผลสำคัญต่อระบบคือ การลดผลกระทบของฟิชชันแก๊ส (Fission gas) เช่น Xenon ที่ปลดปล่อยออกมาจากแท่งเชื้อเพลิงระหว่างเดินเครื่องปฏิกรณ์ ฟิชชันแก๊สจะสะสมอยู่ในช่องว่างในแท่งเชื้อเพลิงหรือที่เรียกว่า radial gap ซึ่งอยู่ระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับแท่งหุ้มเชื้อเพลิงและที่ว่างซึ่งอยู่ด้านบนของเนื้อเชื้อเพลิง หรือที่เรียกว่า plenum



รูปที่ 2.6 แท่งเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ประเภทน้ำมวลเบา (Light water reactor, LWR)

โดยทั่วไป ความหนาของ gap ในแท่งเชื้อเพลิงที่สร้างขึ้นมานั้น จะมีความสำคัญเป็นอันดับแรกที่ต้องพิจารณาในการออกแบบด้วย ซึ่งบริเวณ gap จะบรรจุก๊าซไว้โดยเป็นฉนวนความร้อนที่มีผลกระทบมาก (เมื่อเปรียบเทียบกับเซรามิกออกไซด์) และเพื่อที่จะลดผลกระทบดังกล่าว แท่งเชื้อเพลิงจะถูกเชื่อมเพื่อปิดรอยต่อ (Sealed) ในขณะที่เติมก๊าซฮีเลียม (Helium) ลงไปด้วย ทั้งนี้การเลือกใช้ก๊าซฮีเลียมเนื่องจากเป็นก๊าซเฉื่อยซึ่งมีปฏิกิริยากับสสารในแท่งเชื้อเพลิงน้อย และมีค่าการนำความร้อนที่สูง (Thermal conductivity)

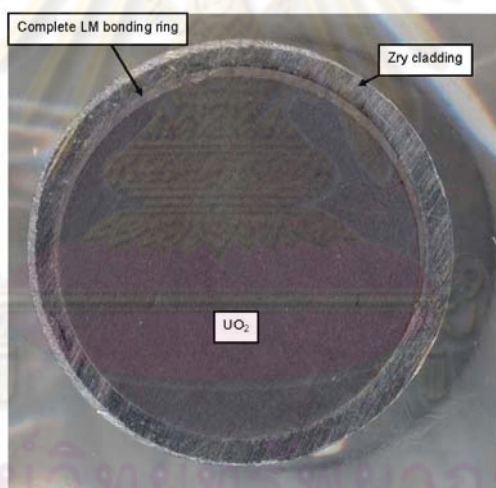
ความหนาของ fuel-cladding gap จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะค่อนข้างซับซ้อนระหว่างการเผาผลาญเชื้อเพลิง กล่าวคือ ครั้งแรกที่นำแท่งเชื้อเพลิงใหม่ซึ่งมีสถานะเย็นตัวอยู่นั้นมาใช้ ในเวลาช่วงแรกของปฏิกิริยาฟิชชันเม็ดเชื้อเพลิงจะเกิดการหดตัวทำให้ช่องว่าง gap เพิ่มมากขึ้น จากนั้นในช่วงที่สองเม็ดเชื้อเพลิงจะเริ่มขยายตัวอันเนื่องมาจากการขยายตัวทางอุณหภูมิของเม็ดเชื้อเพลิงและ Zirconium Alloy tube ทำให้บริเวณช่องว่าง gap มีขนาดลดลงตามการบวม (Swelling) ของแท่งเชื้อเพลิงอันมาจากผลผลิตฟิชชันที่เกิดขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการเกิดการคืบยุบลงของแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Clad creep-down) และเกิดผลกระทบอื่นๆ ตามมาภายหลังเนื่องมาจากความดันของสารระบายความร้อนภายนอกแท่งเชื้อเพลิงสูงกว่าความดันภายในซึ่งอยู่ในส่วนของก๊าซฮีเลียมและส่วนของก๊าซฟิชชันที่ปล่อยออกมา

ในการออกแบบความหนาของ gap เริ่มต้นอยู่ที่ 50-100  $\mu\text{m}$  แต่ผลรวมของกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นทำให้เกิดการปิดกั้นบริเวณ gap ภายหลังจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ 1-2 ปี นอกจากนี้ การคืบยุบลงของแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Clad creep-down) ทำให้ท่อทรงกระบอกกลมเปลี่ยนรูปร่างเป็นวงรีซึ่งมีบางส่วนไปสัมผัสกับเนื้อเชื้อเพลิง ทั้งนี้ การสัมผัสกันระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Cladding) ไม่สามารถขจัดความต้านทานทางอุณหภูมิของบริเวณ gap ได้ทั้งหมด ถึงแม้ว่า ค่าความต้านทานของอุณหภูมิของบริเวณ gap ที่แคบจะมีค่าน้อยกว่าบริเวณ gap ที่กว้างก็ตาม

การลดลงของอุณหภูมิที่คร่อมผ่านบริเวณ gap นั้นขึ้นอยู่กับความหนาและค่าการนำความร้อนของก๊าซด้วย จึงเป็นเหตุผลที่เลือกใช้ก๊าซฮีเลียม (Helium) เดิมลงไป ในบริเวณ gap อย่างไรก็ตาม แทนที่จะปิด (Seal) แท่งเชื้อเพลิงในขณะที่อัดความดันก๊าซฮีเลียมที่ความดัน 1 บรรยากาศ แต่จะอัดความดันสูงขึ้นไปที 20 บรรยากาศแทน และตามทฤษฎีจลศาสตร์ของก๊าซกล่าวว่า ค่าการนำความร้อนไม่ขึ้นอยู่กับความดัน ดังนั้นเหตุผลที่เติมก๊าซฮีเลียมอัดความดันสูงเพื่อลดค่าการนำความร้อนอันเนื่องมาจาก Xenon ที่ปล่อยออกมาจากเนื้อเชื้อเพลิงซึ่งจะไปผสมอยู่รวมกันกับก๊าซฮีเลียมในบริเวณ gap นั้นเอง แต่ถ้าความดันของก๊าซฮีเลียมที่เติมลงไปอยู่ระดับต่ำ (หมายถึง 1 บรรยากาศ) ก๊าซ Xenon ที่ปล่อยออกมาจากเนื้อเชื้อเพลิงจะไปเพิ่มค่า  $\Delta T$  ที่คร่อมระหว่าง gap อย่างมากและจะส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิของเชื้อเพลิงสูงขึ้นตามปริมาณ ซึ่งพบว่าการเพิ่มความดันของก๊าซฮีเลียมที่เติมลงไปในช่วง 10-20 บรรยากาศนั้นจะช่วยขจัดปัญหานี้ โดยช่วยลดผลกระทบจาก Xenon ที่ปล่อยออกมาในการส่งผ่านความร้อนบริเวณ gap ได้

### 2.1.5 คุณสมบัติโลหะเหลว (Liquid Metal, LM)

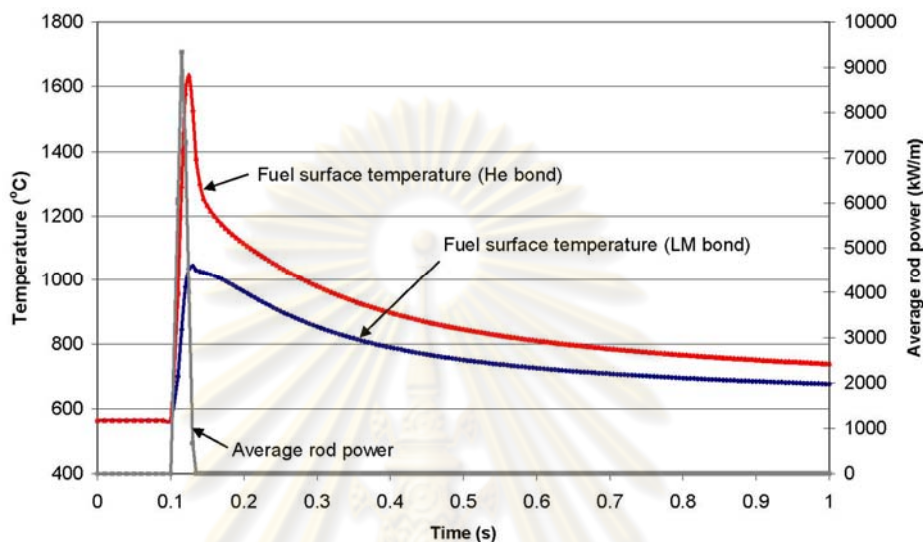
สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบ LWR นั้น gap ที่เติมก๊าซฮีเลียมลงไประหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (cladding) จะช่วยลดการบวมของเนื้อเชื้อเพลิง (Fuel swelling) และการคืบลงของแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Clad creep-down) ได้ อย่างไรก็ตาม ค่าการนำความร้อนที่ต่ำของฮีเลียมส่งผลให้อุณหภูมิลดลงมากในบริเวณก่อนที่เกิดการปิดกั้น gap เพื่อแก้ไขปัญหานี้ Wright et al., 1994 ได้เสนอข้อคิดเห็นเกี่ยวกับ “bonding” บริเวณ gap โดยการใช้โลหะเหลวหรือ LM (Liquid Metal) ซึ่งมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ตะกั่ว (Lead), ดีบุก (Tin) และ บิสมัท (Bismuth) อย่างละ 1/3 เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำ (ประมาณ 96 °C) เกิดปฏิกิริยาทางเคมีกับ  $UO_2$  และน้ำได้น้อย และมีค่าการนำความร้อนที่สูง (ประมาณ 100 เท่าของก๊าซฮีเลียม) นอกจากนี้ความต้านทานอุณหภูมิของโลหะเหลวแทบจะเป็นศูนย์ ทำให้ไม่ต้องคำนึงถึงความหนาของ gap ยิ่งกว่านั้นธาตุตะกั่ว (Lead), ดีบุก (Tin) และ บิสมัท (Bismuth) ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโลหะเหลวแทบจะไม่มีผลต่อการส่งผ่านของนิวตรอนเนื่องจากมีค่า thermal neutron absorption ที่ต่ำมาก



รูปที่ 2.7 ภาคตัดขวางของแท่งเชื้อเพลิงยาว 4 เมตรแสดงวงชั้นโลหะเหลว (Liquid Metal)

ก่อนที่จะเกิดการปิด (Closure) ของ Helium-bonded gap ค่าอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของเม็ดเชื้อเพลิง (Centerline fuel) สามารถสูงถึงระดับมากกว่าหนึ่งพันองศาเซลเซียสและสูงกว่าที่เกิดขึ้นกับกรณีที่ใช้ LM-bonded gap ณ อัตราความร้อนเชิงเส้นเดียวกัน (Linear heat rating) เนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิในแท่งเชื้อเพลิงนั้น LM bond จะยอมให้ความหนาของ gap เริ่มต้นมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้ไม่เกิดอันตรกิริยากันระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับแท่งหุ้มเชื้อเพลิงตลอดอายุของแท่งเชื้อเพลิงได้ สำหรับระยะ LM-bonded gap มีค่าเริ่มต้นที่ 150  $\mu\text{m}$  ซึ่งจะไม่เกิดการปิด

จนกระทั่งถึงประมาณ 60 MWd/kgU โดยเปรียบเทียบแล้ว ความหนาของ gap ซีเลียมโดยทั่วไปใน LWRs จะมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของค่านี้ และการปิดของ gap จะเกิดขึ้นเมื่อสิ้นสุดวัฏจักรแรก (First cycle) นอกจากนี้ การลดลงของอุณหภูมิในเชื้อเพลิงยังช่วยชะลอการปล่อยของ Fission gas ที่มาจากตำแหน่งต่างๆ จาก 1-2 วันไปถึงประมาณ 1 ปีได้

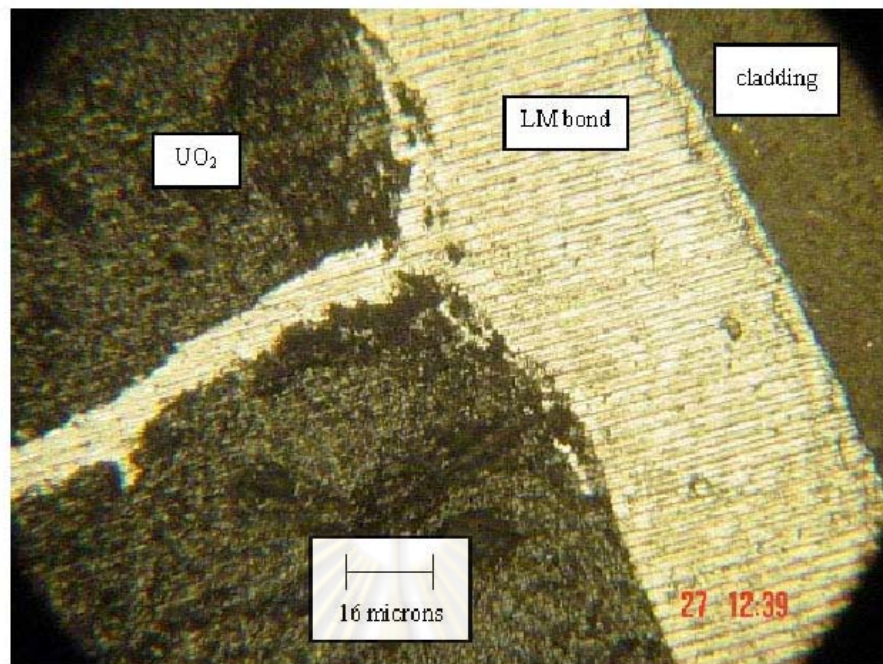


**รูปที่ 2.8** กราฟเปรียบเทียบผลระหว่างการใช้ก๊าซซีเลียมและโลหะเหลว (LM) ในบริเวณ Gap ที่มีต่ออุณหภูมิที่ผิวเม็ดเชื้อเพลิงในช่วงเวลา 1 วินาทีสำหรับกรณีอุบัติเหตุ HZIPRIA (Hot Zero Power Reactivity Insertion Accident)

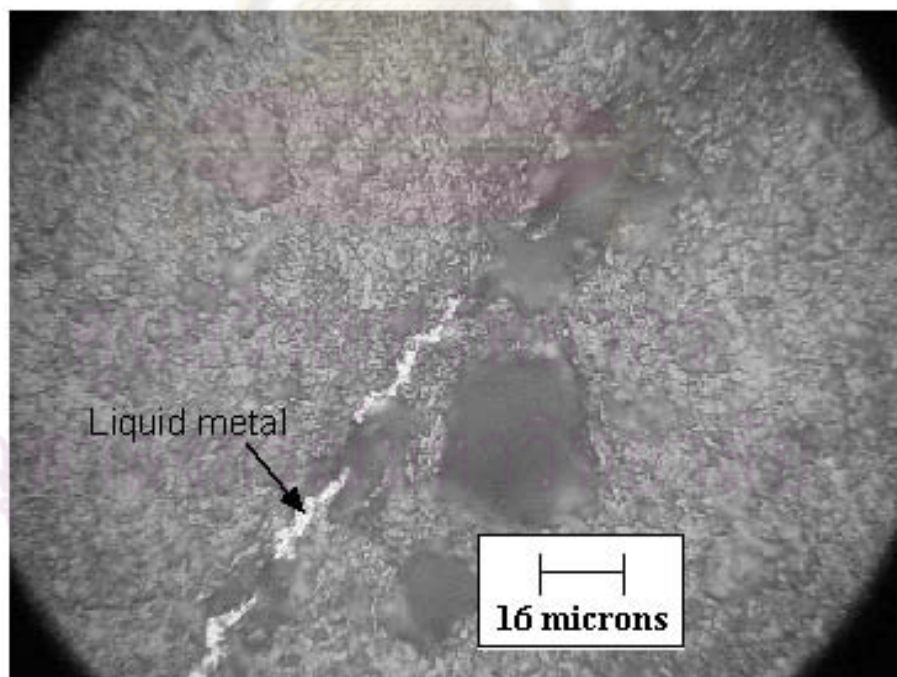
นอกจากนี้ โลหะเหลวใน gap ยังช่วยป้องกันการเกิด Hydriding ทุติยภูมิขนาดใหญ่โดยการขัดขวางไอน้ำที่เข้าไปภายใน gap เนื่องจากแท่งหุ้มเชื้อเพลิงเกิดรอยแตกได้ด้วย อาทิเช่น grid กับแท่งเชื้อเพลิงเกิดการกัดกร่อนเสียดสีกัน เป็นต้น ซึ่งโลหะใน gap ซึ่งอยู่เหนือบริเวณรอยแตกจะไหลเข้าไปข้างใน Plenum โดยการดันเข้ามาของไอน้ำ ส่วนโลหะที่อยู่ด้านล่างรอยแตกก็จะไม่เปลี่ยนแปลงออกไปและยังคงป้องกันส่วนของแท่งหุ้มเชื้อเพลิงจากการเกิด Hydriding ทั้งนี้ LM bond ยังช่วยป้องกัน Fission fragments recoils และผลิตภัณฑ์ฟิชชัน (Fission products) ที่เป็นอันตรายได้ด้วย อาทิเช่น Iodine ที่ไปถึงด้านในของแท่งหุ้มเชื้อเพลิง (Cladding ID)

ทั้งนี้ แท่งเชื้อเพลิงที่มี LM-bonded gap จะมี Plenum ด้านบน คล้าย ๆ กับที่มีในแท่งเชื้อเพลิงทั่วไป นอกจากนี้ บทบาทหน้าที่โดยทั่วไปจะเป็นเสมือนที่กักเก็บ Fission gas ที่ปลดปล่อยออกมา ส่วน Plenum จะช่วยเก็บ LM ซึ่งถูกบีบอัดออกมาจาก gap เนื่องจากการบวมของเม็ดเชื้อเพลิงด้วย





รูปที่ 2.9 โลหะเหลว (Liquid Metal, LM) ในรอยแตกของเม็ดเชื้อเพลิง (Olander, 2005)



รูปที่ 2.10 โลหะเหลว (Liquid Metal, LM) ในรอยแตกกว้าง 3 ไมครอน ภายในเม็ดเชื้อเพลิง UO<sub>2</sub> (Olander, 2005)

## 2.2 คอนกรีต

### 2.2.1 ลักษณะทั่วไปของคอนกรีต (วินิต ช่อวิเชียร, 2529)

คอนกรีตเป็นวัสดุเปรียบเสมือนหินที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้งานเป็นโครงสร้างได้จากการผสมซีเมนต์ซึ่งเป็นวัสดุประสาน กับทราย หินหรือกรวดซึ่งเป็นวัสดุผสมกับน้ำซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยากับซีเมนต์ ทำให้ได้ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวประสานแทรกตามเม็ดทรายและก้อนหิน รวมตัวกันเป็นก้อนคอนกรีตในแบบหล่อ และจะแข็งตัวเมื่ออายุประมาณ 24 ชั่วโมง ทนแรงอัดได้ดีขึ้นเรื่อย ๆ ตามอายุ ในเนื้อคอนกรีตอาจจะแยกเป็นสองส่วนใหญ่ ๆ คือ ซีเมนต์เพสต์ (Cement paste) และวัสดุผสม (Aggregates) ซึ่งซีเมนต์เพสต์หรือที่เรียกว่า เพสต์ ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ น้ำและฟองอากาศ เป็นส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ทำหน้าที่เป็นตัวประสานคล้ายกาว และทำให้คอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีกำลังรับแรงตามต้องการ ความแข็งแรงของคอนกรีตจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของซีเมนต์เพสต์ซึ่งขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์ อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ (Water-cement ratio) ที่ใช้ในส่วนผสมและการทำปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างปูนซีเมนต์กับน้ำ ที่เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration)

สำหรับวัสดุผสม หากแบ่งตามขนาดจะได้สองพวก คือ วัสดุผสมละเอียด และ วัสดุผสมหยาบ ซึ่งวัสดุผสมละเอียด (Fine Aggregates) หมายถึง วัสดุที่มีขนาดเล็กที่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้ ซึ่งได้แก่ ทราย ส่วนวัสดุผสมหยาบ (Coarse Aggregates) หมายถึง วัสดุผสมที่มีก้อนโตไม่สามารถลอดผ่านตะแกรงร่อนมาตรฐานเบอร์ 4 ได้แก่ หินย่อยหรือกรวด

นอกจากนี้ ในเนื้อคอนกรีตอาจมีสารผสมเพิ่ม (Admixture) เช่น สารเคมีผสมเพิ่ม (Chemical admixture) หรือสารผสมเพิ่มแบบแร่ธาตุ (Mineral admixture) ที่ใช้เติมลงในส่วนผสมเพื่อปรับปรุงให้คอนกรีตสดหรือคอนกรีตที่แข็งตัวแล้วมีคุณสมบัติอื่นที่ต้องการ

### 2.2.2 ประเภทคอนกรีต

คอนกรีตที่ใช้เป็นโครงสร้างอาจแบ่งเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.2.2.1 คอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ใช้แต่คอนกรีตล้วนๆ ไม่มีวัสดุอื่นมาเสริมหรือร่วมด้วยเลย ได้แก่ โครงสร้างที่มีแต่แรงอัดกระทำอย่างเดียว เช่น ฐานเครื่องที่หนามาก ๆ หรือเขื่อนกันดินแบบที่ใช้หน้าหนักของตัวเขื่อนต้านแรงดันของดิน (Gravity wall) ที่สูงไม่เกิน 1.00 เมตร เป็นต้น

2.2.2 คอนกรีตเสริมเหล็ก (Reinforced Concrete) ใช้เหล็กเส้นเสริมร่วมกับคอนกรีตโดยหล่ออยู่ในเนื้อคอนกรีต เป็นโครงสร้างที่มีทั้งแรงอัดและแรงดึงกระทำซึ่งเกิดจากโมเมนต์ดัด ส่วนใดของรูปตัดที่ต้องรับแรงอัดก็ให้คอนกรีตทำหน้าที่ต้านทานแรงอัด และส่วนใดที่ต้องรับแรงดึงก็ใช้เหล็กเสริมทำหน้าที่ต้านทานแรงดึง

2.2.2.3 คอนกรีตเสริมเหล็กอัดแรง (Prestressed Concrete) เป็นคอนกรีตที่ถูกอัดแรงไว้ก่อนใช้งาน โดยใช้ลวดเหล็กที่ทนแรงดึงสูง เป็นแบบที่เอาคอนกรีตมาใช้ประโยชน์หมดทั้งรูปตัด ดีกว่าคอนกรีตเสริมเหล็ก ช่วยให้ประหยัดขึ้น ใช้กับงานสะพานและอาคาร เป็นต้น

### 2.2.3 ปูนซีเมนต์

ปูนซีเมนต์ เป็นผลผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบดปูนเม็ด ซึ่งเป็นผลึกที่เกิดจากการเผาส่วนผสมต่าง ๆ (หินปูนหรือดินปูนขาว กับดินเหนียวหรือหินดาน) จนรวมตัวกันผสมสุกพอดี มีส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญคือ คัลเซียมและอลูมิเนียมซิลิเกต ปูนซีเมนต์ที่กล่าวจะหมายถึงปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) ซึ่งเป็นปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก (Hydraulic Cement) ที่เมื่อผสมกับน้ำตามส่วนแล้วสามารถก่อตัวและแข็งตัวในน้ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำกับส่วนประกอบของปูนซีเมนต์นั้น เรียกว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) อัตราการก่อตัวและแข็งตัวตลอดจนปริมาณความร้อนที่เกิด ขึ้นอยู่กับความละเอียดและส่วนประกอบของผงปูน ความแข็งแรงและความทนทานเมื่อแข็งตัวแล้ว ขึ้นอยู่กับสัดส่วนการผสมและการให้ความชื้นในขณะเริ่มแข็งตัว

### 2.2.4 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปิติ สุคนธ์สุขกุล, 2549)

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประกอบด้วย ออกไซด์หลัก 4 ตัว คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกาออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>), อลูมินัมออกไซด์ (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และออกไซด์ย่อยอื่น ๆ เช่น MgO, Na<sub>2</sub>O และ K<sub>2</sub>O ดังแสดงในตารางที่ 2.1 ซึ่งธาตุเหล่านี้ทำปฏิกิริยากัน ในเตาเผาเกิดผลผลิตทางเคมีและสารประกอบขึ้นหลายตัว โดยแยกเป็นสารประกอบหลัก (Major Compounds) ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ โดยแบ่งเป็นออกไซด์หลักและย่อย

ชื่อ	ออกไซด์	ตัวอักษรย่อ
Lime/Quick Lime	CaO	C
Silica	SiO <sub>2</sub>	S
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A
Iron	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F
Soda	Na <sub>2</sub> O	N
Potassa	K <sub>2</sub> O	K
Magnesia	MgO	M



## ตารางที่ 2.2 สารประกอบหลัก (Major compounds) ในซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ชื่อสารประกอบ	องค์ประกอบ	ตัวอักษรย่อ
Tricalcium Silicate	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Dicalcium Silicate	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Tricalcium Aluminate	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Tetracalcium Aluminoferrite	$4\text{CaO}_3\text{Al}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$
Calcium Sulfate Dihydrate	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$

### 2.2.5 ประเภทของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2551)

มาตรฐานการทดสอบวัสดุตาม ASTM C150 และสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (ม.อ.ก.15) ได้แบ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ออกเป็น 5 ประเภท ดังนี้

2.2.5.1 ประเภทที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ใช้กันมากในงานคอนกรีต ประมาณว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ในสหรัฐอเมริกาใช้ปูนซีเมนต์ประเภทนี้ สำหรับใช้ในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่ไม่ต้องการคุณภาพพิเศษกว่าธรรมดา ใช้ในการก่อสร้างทั่วไป เช่น เสา ฐานราก อาคาร ถนน เป็นต้น ปูนซีเมนต์ชนิดนี้ให้กำลังสูงในระยะเวลาไม่รวดเร็วมากนักและให้ความร้อนปานกลาง

2.2.5.2 ประเภทที่ 2 ปูนซีเมนต์ดัดแปลง (Modified Cement) เป็นปูนซีเมนต์ที่ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นน้อยกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แต่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (ประเภทที่ 4) และให้กำลังใกล้เคียงกับประเภทที่ 1 เหมาะในการทำคอนกรีตหรือผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่เกิดความร้อนและทนทานต่อการกัดกร่อนของสารละลายซัลเฟตได้ปานกลาง

2.2.5.3 ประเภทที่ 3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์แข็งตัวเร็ว (Rapid Hardening Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์กำลังสูงในระยะแรก ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันสูงเพราะมีปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  สูง และความละเอียดสูงกว่าปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 มาก เหมาะสำหรับงานที่ต้องการใช้งานเร็ว เช่น การซ่อมแซม หรืองานถอดแบบเร็ว เช่น เสาเข็ม เสาไฟฟ้าคอนกรีต

2.2.5.4 ประเภทที่ 4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ความร้อนต่ำ (Low heat Portland Cement) ปูนชนิดนี้ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันต่ำมากเพราะมีปริมาณ  $\text{C}_3\text{S}$  ต่ำ เฉลี่ยประมาณร้อยละ 25-30 แต่จะมี  $\text{C}_2\text{S}$  สูง เฉลี่ยประมาณร้อยละ 50-60 เหมาะสำหรับใช้งานก่อสร้างคอนกรีตหลาย เช่น เขื่อนคอนกรีตหรือตอม่อขนาดใหญ่เนื่องจากมีคุณสมบัติในการให้อุณหภูมิของคอนกรีตต่ำ

2.2.5.5 ประเภทที่ 5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ทนซัลเฟต (Sulfate Resistance Portland Cement) เป็นปูนซีเมนต์ทนซัลเฟตสูง มีปริมาณ  $C_3A$  ต่ำมากไม่เกินร้อยละ 5 เพราะ  $C_3A$  จะทำให้เกิดการรวมตัวกับ ซัลเฟตได้ง่าย ดังนั้นเมื่อมี  $C_3A$  น้อยจึงทำปฏิกิริยากับซัลเฟตได้น้อยหรือไม่ได้เลย ทำให้การกัดกร่อนเนื่องจากสารละลายซัลเฟตลดลง จึงเหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่สร้างในที่ที่มีเกลือหรือสารละลายซัลเฟต

## 2.2.6 คุณสมบัติด้านอุณหภูมิ (Thermal Properties)

### 2.2.6.1 การขยายตัวภายใต้อุณหภูมิ (Thermal Expansion)

เนื่องจากคอนกรีตมีการขยายตัวหรือหดตัวเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป การเปลี่ยนแปลงบางครั้งอาจมากพอที่จะทำให้คอนกรีตเกิดการวิบัติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีคอนกรีตที่กำลังรับแรงดึงตํานั้น การขยายตัวเพียงเล็กน้อยก็ทำให้เกิดความเค้นดึงเพียงพอต่อการทำให้คอนกรีตเกิดการแตกร้าวและไปสู่ปัญหาความคงทนหรือการวิบัติได้

คุณสมบัติการขยายตัวมักจะแสดงในรูปของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนขนาดภายใต้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Coefficient of Thermal Expansion) ซึ่งจะมีค่าดังนี้

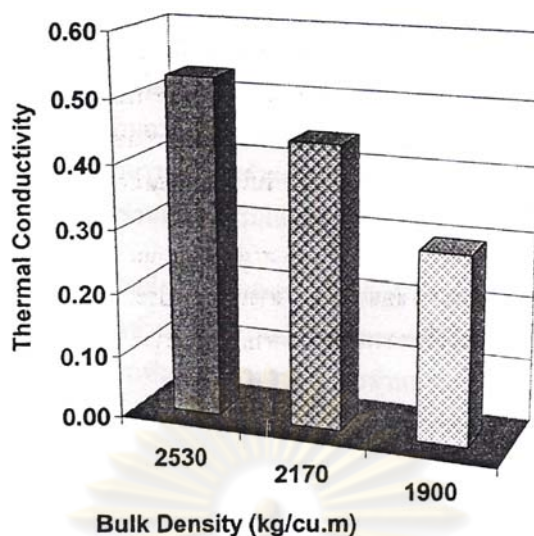
ซีเมนต์เพสต์	ประมาณ	$18-20 \times 10^{-6} / ^\circ C$
คอนกรีต	ประมาณ	$7.5 -13 \times 10^{-6} / ^\circ C$
มวลรวมหยาบ (Granite)	ประมาณ	$7-9 \times 10^{-6} / ^\circ C$
มวลรวมหยาบ (Basalt)	ประมาณ	$6-8 \times 10^{-6} / ^\circ C$
เหล็ก	ประมาณ	$11-12 \times 10^{-6} / ^\circ C$

### 2.2.6.2 การนำความร้อน (Thermal Conductivity)

สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Coefficient of Thermal Conductivity) ตัวย่อ K หมายถึง อัตราการไหลความร้อนอย่างสม่ำเสมอหนึ่งหน่วยผ่านวัสดุที่มีความหนาหนึ่งหน่วยและมีพื้นที่หน้าตัดแต่ละด้านเท่ากับหนึ่งหน่วย ในซีเมนต์เพสต์จะมีค่า K ประมาณ 1-15 W/m.K ในส่วนของมวลรวม หินทั่วไปมีค่า K ประมาณ 3 W/m.K

ค่าสัมประสิทธิ์ K ของวัสดุมักจะขึ้นกับตัวแปรหลายตัว ที่สำคัญคือ ความชื้น โดยความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า K เพิ่มขึ้น นอกจกนี้ ค่า K ยังขึ้นกับความหนาแน่นของคอนกรีต โดยคอนกรีตความหนาแน่นต่ำหรือมวลเบาจะมีค่า K ต่ำเนื่องจากมีรูพรุนหรือฟองอากาศมาก ซึ่งส่งผลให้คอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการกักฟองอากาศหรือใช้มวลรวมพรุนมีความสามารถเป็นฉนวนกันความร้อนที่ดี





รูปที่ 2.11 ค่าสัมประสิทธิ์การนำอุณหภูมิของคอนกรีตที่มีความหนาแน่นต่างกัน

### 2.2.7 ปัวซองส์เรโซ (Poisson's Ratio)

อัตราส่วนระหว่างหน่วยการยืดหดตัวทางด้านข้างต่อหน่วยการยืดหดตัวตามแนวแกนที่รับน้ำหนัก เรียกว่า ปัวซองส์เรโซ (Poisson's Ratio) คอนกรีตธรรมดาที่มีค่าปัวซองส์เรโซอยู่ระหว่าง 0.10-0.30 ส่วนคอนกรีตที่มีความแข็งแรงสูงจะมีค่าปัวซองส์เรโซต่ำ

### 2.2.8 คอนกรีตมวลหนัก (High Density Concrete) (วินิต ซ่อวิเชียร, 2529)

คอนกรีตมวลหนัก คือ คอนกรีตที่มีหน่วยรับน้ำหนักมากกว่า 2,500 กก./ลบ.ม. โดยทั่วไปจะใช้สำหรับงานโครงสร้างที่ต้องป้องกันรังสีหรือกัมมันตภาพรังสี และงานตึมน้ำหนักคอนกรีต ปัจจุบันมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานนิวเคลียร์มากขึ้น เช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย และโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้น ซึ่งอาคารเหล่านี้ต้องเกี่ยวข้องกับรังสีที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ ดังนั้น จึงต้องสร้างอาคารให้มีความสามารถต้านทานรังสีได้ ซึ่งพบว่า คอนกรีตจะต้านทานและดูดกลืนรังสีได้มากถ้าความหนาแน่นของคอนกรีตสูง ซึ่งคอนกรีตความหนาแน่นสูงทำได้โดยผสมวัสดุผสมที่มีน้ำหนักหรือความถ่วงจำเพาะสูง เช่น แบไรท์ (Barite :  $BaSO_4$ ) มีความถ่วงจำเพาะ 4.0-4.6

นอกจากนี้ แร่ธรรมชาติอื่น ๆ ที่ใช้เป็นวัสดุผสมทำคอนกรีตหนัก (หน่วยน้ำหนักต้องไม่น้อยกว่า 2,500 กก. ต่อ ลบ.เมตร) ได้แก่ แร่เฮมาไทท์ (Hematite :  $Fe_2O_3$ ) แมกนีไทท์ (Magnetite :  $Fe_3O_4$ ) ลิโมนิท์ (Limonite : Impure  $Fe_2O_3$ ) และจีโอไทท์ (Geothite :  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ) โดยใช้อิลมิไนท์ (Ilmenite :  $FeTiO_3$ ) เป็นวัสดุผสมละเอียด

คอนกรีตที่ทำจากแบไรท์ไม่ค่อยทนต่อสภาพอากาศ แต่คุณสมบัติอื่นดีมาก โดยมีค่าโมดูลัสยืดหยุ่นและปัวส์ซองเรโซพอ ๆ กับคอนกรีตธรรมดา แต่มีการหดตัวน้อยกว่าประมาณ 1/4 ถึง 1/3 เท่า การขยายตัวเมื่ออุณหภูมิอยู่ในช่วง 4-38 °C มีค่าเป็นสองเท่าของคอนกรีตธรรมดา การนำความร้อนน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา

ส่วนผสมของคอนกรีตประเภทนี้ที่สำคัญมีดังนี้ (บริษัทผลิตภัณฑ์และวัสดุก่อสร้างจำกัด [ซีแพค], 2543)

- ใช้ปริมาณซีเมนต์ที่สูง คือ สูงกว่า 350 กก./ลบ.ม.
- ใช้ปริมาณมวลรวมละเอียดในสัดส่วนที่สูง
- ใช้มวลรวมหนัก ได้แก่ Magnetite ( $Fe_3O_4$ ) Barite ( $BaSO_4$ ) หรือก้อนเหล็ก ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2.3 มวลรวมหนักที่ใช้ควรมีรูปร่างเป็นรูปทรงลูกบาศก์ ปราศจากมวลรวมรูปร่างแบนยาว

- อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ที่เหมาะสม คือ 0.50 – 0.65

ตารางที่ 2.3 ประเภทและคุณสมบัติของมวลรวมหนัก

วัสดุ	สูตรทางเคมี	แหล่งกำเนิด	ค่าความถ่วงจำเพาะ	หน่วยน้ำหนักมวลรวมหนัก (กก./ลบ.ม.)	หน่วยน้ำหนักของคอนกรีต (กก./ลบ.ม.)
Goethite	$Fe_2O_3 \cdot H_2O$	ธรรมชาติ	3.5-3.7	2100-2250	2900-3200
Limonite	Impure $Fe_2O_3$	ธรรมชาติ	3.4-4.0	2100-2400	2900-3350
Barite	$BaSO_4$	ธรรมชาติ	4.0-4.6	2300-2550	3350-3700
Illmenite	$FeTiO_3$	ธรรมชาติ	4.3-4.8	2550-2700	3500-3700
Magnetite	$Fe_3O_4$	ธรรมชาติ	4.2-5.2	2400-3050	3350-4150
Hematite	$Fe_2O_3$	ธรรมชาติ	4.9-5.3	2900-3200	3850-4150
Ferrophosphorus	$Fe_2O_3 \cdot P_2O_3$	สังเคราะห์	5.8-6.8	3200-4150	4100-5150
Steal	Fe	สังเคราะห์	6.2-7.8	3700-4650	4650-6100

## 2.2.9 ความทนทานของคอนกรีต

เป็นคุณสมบัติหนึ่งของคอนกรีตที่มีความสำคัญ เพราะมีผลกระทบต่ออายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีต สาเหตุที่ทำให้คอนกรีตเสื่อมความทนทานเกิดจากผลกระทบทั้งจากภายนอกและภายในเนื้อคอนกรีต อาจจำแนกโดยมีสาเหตุ ดังนี้

2.2.9.1 การกัดกร่อนโดยสารเคมีที่มีอยู่ในน้ำ ดิน อากาศ สิ่งแวดล้อมโดยรอบ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต น้ำทะเล กรด ด่าง น้ำเสีย เป็นต้น

2.2.9.2 การสึกกร่อนทางฟิสิกส์ เช่น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การแห้งและเปียกสลับกัน การเย็นแข็งและละลาย ความร้อนและไฟ การเสียดสีและลื่นไถล การกระแทกและการฉีกจากน้ำหนักบรรทุก

2.2.9.3 การใช้วัสดุคอนกรีตที่ไม่เหมาะสม เช่น ปูนซีเมนต์ไม่มีความอยู่ตัว ต่างในปูนทำปฏิกิริยากับหิน ตลอดจนสารเจือปนในหิน ทราช น้ำ เป็นต้น

## 2.2.10 การทำลายโดยไฟ (fire Damage) (สื่บศักดิ์ พรหมบุญ และคณะ, 2551)

ความร้อนจากอัคคีภัยมีผลกระทบต่อโครงสร้างคอนกรีตอย่างมาก โดยมีลำดับเหตุการณ์ดังนี้

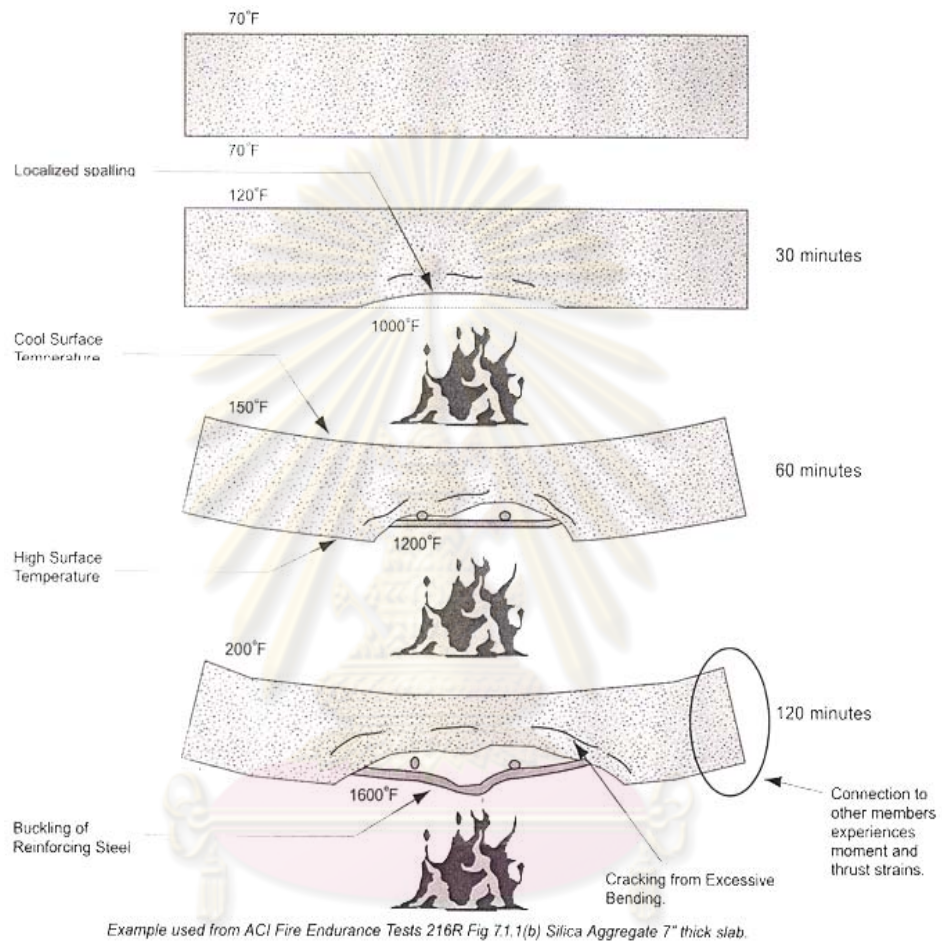
2.2.10.1 ปริมาตรของโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไม่เท่ากัน (Uneven Volume Changes) จะทำให้โครงสร้างเกิดการเปลี่ยนรูป โค้งตัว และเกิดรอยแตก ความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradients) มีสูงมากระหว่างอุณหภูมิอากาศปกติ 70 °F (21 °C) กับอุณหภูมิของแหล่งกำเนิดไฟ และใกล้ผิวคอนกรีตมากกว่า 1,500 °F (800 °C)

2.2.10.2 เกิดการกะเทาะ (Spalling) บริเวณผิวหน้าคอนกรีตเนื่องจากการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เมื่อโครงสร้างได้รับความร้อนสูงมาก มวลรวมบางชนิดขยายตัวจนเกิดการระเบิด ทำให้เนื้อคอนกรีตบริเวณรอบๆ กะเทาะออกมา ความชื้นในคอนกรีตระเหยเป็นไออย่างรวดเร็วทำให้คอนกรีตบริเวณนั้นแตกออก เป็นชิ้น ๆ

2.2.10.3 มอร์ตาร์เปลี่ยนสภาพเป็น Quicklime ที่อุณหภูมิ 750 °F (400 °C) ดังนั้นจึงทำให้คอนกรีตแตกตัว (Disintegration)

2.2.10.4 เหล็กเสริมในคอนกรีตจะสูญเสียความสามารถในการรับแรงดึง (Tensile Capacity) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.2.10.5 เมื่อคอนกรีตกะเทาะออกมา ทำให้เหล็กเสริมในคอนกรีตสัมผัสถูกกับไฟโดยตรง เหล็กเสริมจะขยายตัวเร็วกว่าคอนกรีตที่อยู่บริเวณรอบ ๆ ทำให้เกิดการอ่อนตัวและสูญเสียแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กเสริมและคอนกรีตที่หุ้มอยู่รอบๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.12 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างคอนกรีตเนื่องจากอัคคีภัย

### 2.2.11 รูปแบบการกัดกร่อน (สิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์, 2545)

การจัดแบ่งรูปแบบการกัดกร่อนเป็นประเภทต่างๆ อาจจัดกลุ่มได้แบบต่างๆ ดังนี้

**การกัดกร่อนที่ทำให้โลหะสูญเสียน้ำหนัก หรือความหนาตามค่าอัตราการกัดกร่อน**

**(Corrosion Rate)**

แบบที่ 1 การกัดกร่อนแบบเกิดทั่วผิวน้ำ (General or Uniform Corrosion)

**การกัดกร่อนที่เกิดจากโลหะต่างชนิดกัน (Dissimilar Metal Corrosion) เกิดเซลล์**

**เคมีไฟฟ้ากัลวานิก**

แบบที่ 2 การกัดกร่อนแบบกัลวานิก (Galvanic Corrosion)

**การกัดกร่อนที่เกิดจากเซลล์เคมีไฟฟ้าแบบเซลล์ความเข้มข้น (Concentration Cell)**

แบบที่ 3 การกัดกร่อนแบบรูเข็ม หรือสนิมขุม (Pitting Corrosion)

แบบที่ 4 - การกัดกร่อนแบบใ้รอยซ้อ (Crevice Corrosion)

- การกัดกร่อนภายใต้คราบและกองตะกอนและในรอยประกบ (Deposit and Gasket Corrosion)

- การกัดกร่อนภายใต้ชั้นเคลือบ (Filiform Corrosion)

**การกัดกร่อนที่เกิดเฉพาะที่ (Selective Attack) ที่เป็ความบกพร่องในโครงสร้าง**

**ของโลหะ (Metallurgical Structure Corrosion)**

แบบที่ 5 การกัดกร่อนแบบเกิดตามขอบเกรน (Intergranular Corrosion)

แบบที่ 6 การกัดกร่อนแบบเกิดกับบางธาตุผสม (Dealloying or Selective Leaching)

**การกัดกร่อนแตกหักที่เป็นผลมาจากสิ่งแวดล้อม (Environmentally Induced**

**Cracking)**

แบบที่ 7 - การกัดกร่อนแล้วแตกจากความเค้น (Stress Corrosion Cracking)

- การกัดกร่อนแล้วแตกจากความล้า (Corrosion Fatigue Cracking)

- การกัดกร่อนแล้วแตกจากไฮโดรเจน (Hydrogen Induced Cracking)



**การกัดกร่อนแล้วเสียหายจากไฮโดรเจนและจากการไหล (Corrosion-Related Damage by Hydrogen and Erosion)**

แบบที่ 8 การกัดกร่อนแล้วเกิดความเสียหายจากไฮโดรเจน (Hydrogen Damage)

แบบที่ 9 - การกัดกร่อนแบบสึกกร่อนจากการไหล (Erosion Corrosion)

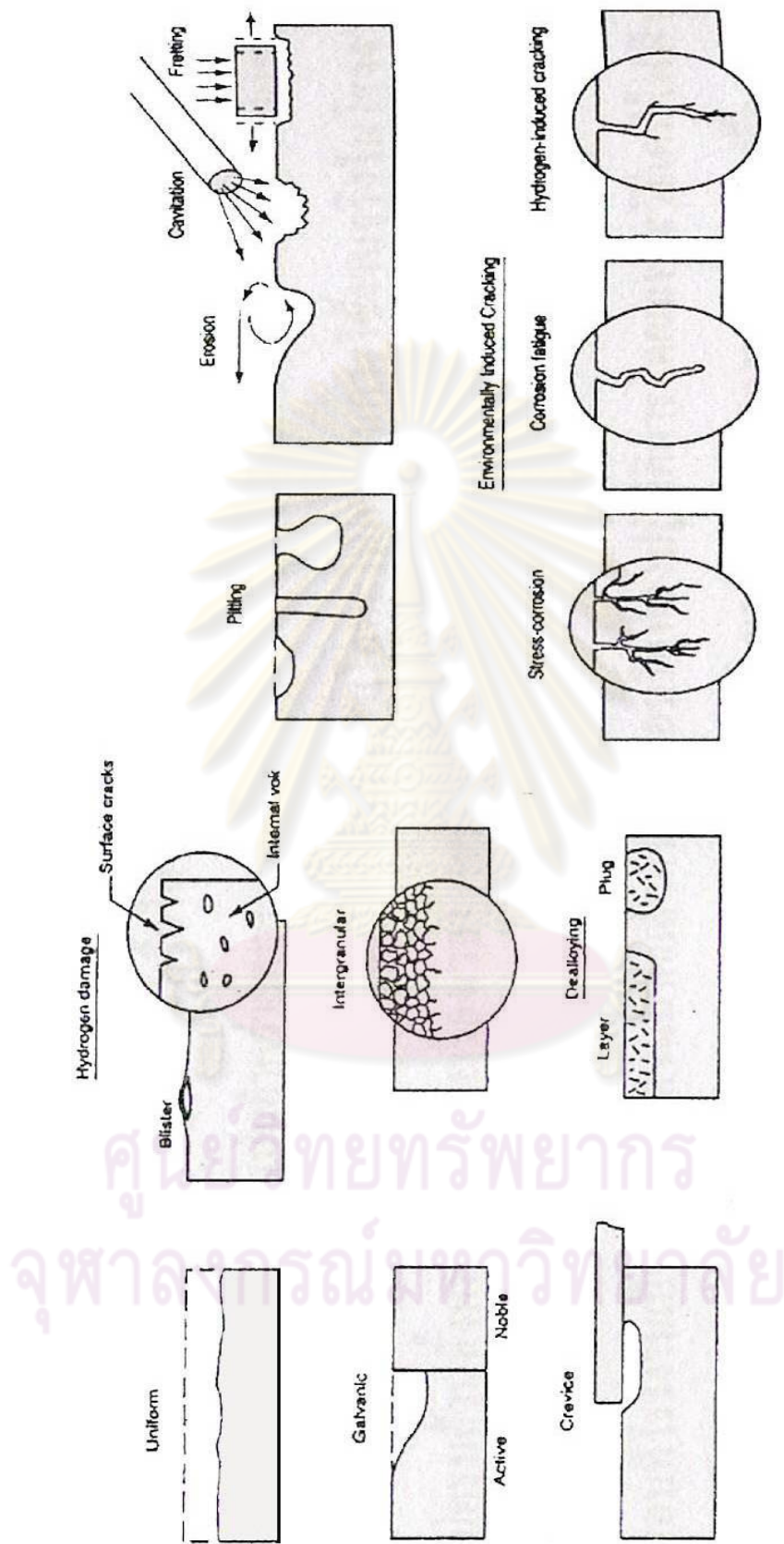
- การกัดกร่อนแบบสึกกร่อนเป็นรูลึก (Cavitation)

- การกัดกร่อนแบบสึกกร่อนจากการกระทบ (Fretting)

โดยการกัดกร่อนประเภทต่างๆ ได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.13



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.13 แผนภาพรวมการกัดกร่อนแบบต่าง ๆ

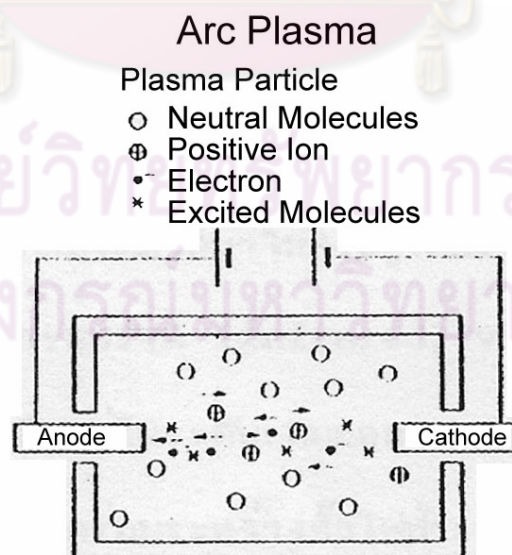
## 2.3 อาร์กพลาสมา (Arc Plasma) (วิรุพห์ มังคะละวิรัช และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2524)

### 2.3.1 ลักษณะทั่วไปของพลาสมา

อาร์กพลาสมาเป็นต้นกำเนิดความร้อนสูงสุดที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ได้ทั้งในงานด้านการวิจัยและด้านผลิตผลในกิจการอุตสาหกรรม การใช้งานทั่วไปของอาร์กพลาสมานั้นได้มีการนำมาใช้ในการตัด (Arc Plasma Cutting) แผ่นโลหะหนาหลายเซนติเมตร ทำให้สามารถเคลื่อนย้ายชิ้นส่วนโลหะต่างๆ ในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่เลิกใช้งานแล้วนำไปเก็บรักษาในสถานที่ที่ปลอดภัย ประโยชน์ที่สำคัญอย่างมากอีกประการหนึ่งของอาร์กพลาสมา คือ การพัฒนาและผลิตวัสดุอุตสาหกรรมซึ่งเป็นทั้งโลหะและอโลหะ ทั้งนี้ เพราะสามารถหลอมละลายโลหะที่มีจุดหลอมเหลวสูงได้ เช่น ทังสเตน ( $3,380^{\circ}\text{C}$ ) โมลิบดีนัม ( $2,620^{\circ}\text{C}$ ) โครเมียม ( $1,890^{\circ}\text{C}$ ) นอกจากนี้ยังใช้หลอมสารที่เป็นอโลหะ เช่น  $\text{BeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ti}_2\text{O}_3$  ฯลฯ ได้อีกด้วย

### 2.3.2 การเกิดอาร์กพลาสมา

พลาสมาเป็นสถานะที่สี่ของสสาร เป็นกลุ่มก๊าซที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอนอิสระ ไอออนบวก อะตอมและโมเลกุลที่เป็นกลางอยู่รวมกัน มีคุณสมบัติเฉพาะตัวซึ่งเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างแรงแม่เหล็กไฟฟ้าและแรงกลประสานกัน พลาสมาเกิดขึ้นเมื่อมีการถ่ายเทพลังงานให้ก๊าซเกิดการแยกตัว (Dissociate) และแตกตัว (Ionization) เป็นไอออนขึ้นบางส่วนซึ่งพลาสมาที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถรักษาสภาพต่อไปได้ที่อุณหภูมิ  $20,000^{\circ}\text{K}$  ขึ้นไป



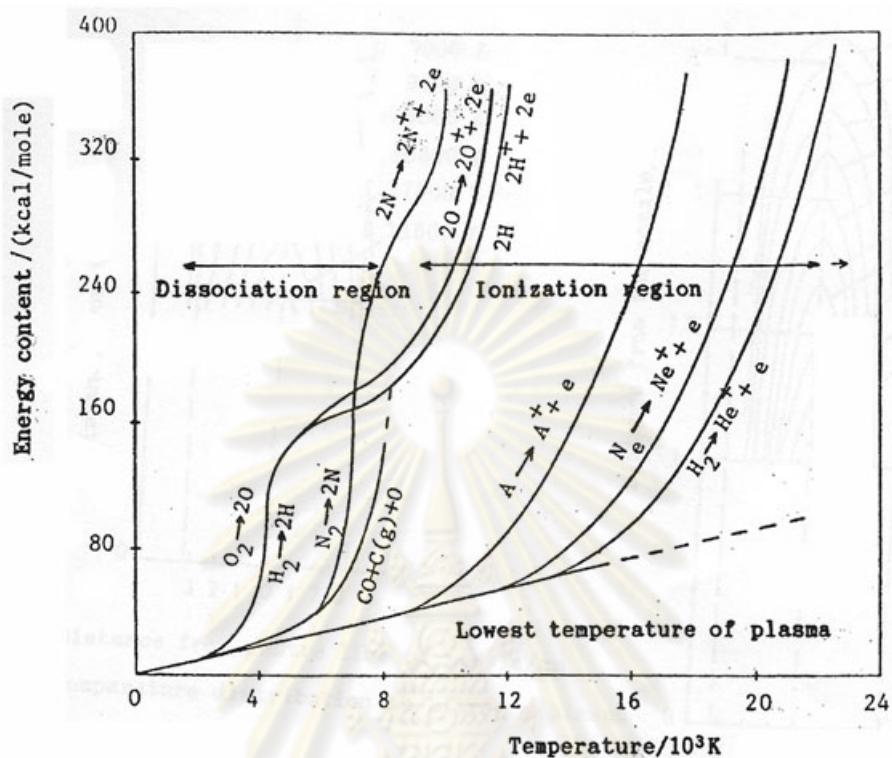
รูปที่ 2.14 การเกิดพลาสมาในภาชนะปิด

จากรูปที่ 2.14 อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากขั้วไฟฟ้าลบ (cathode) ในขณะที่เคลื่อนผ่านพลาสมาก๊าซไปยังขั้วไฟฟ้าบวก (anode) จะชนกับอะตอมและโมเลกุลต่าง ๆ ในก๊าซ เกิดการถ่ายเทพลังงาน ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน หรือการแทนที่อิเล็กตรอนในวงโคจรรอบอะตอม หรืออาจจะทำให้พลังงานจลน์ของอะตอมหรือโมเลกุลเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นใหม่จะถูกเร่งความเร็วให้เคลื่อนไปยังขั้วไฟฟ้าบวกเช่นกัน เป็นผลให้เกิดการชนกัน การถ่ายเทพลังงาน และเกิดเป็นไอออนเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ทั้งนี้ก๊าซจะอยู่ในสภาพที่เป็นตัวนำไฟฟ้า สามารถนำไฟฟ้าได้ในรูปของการเกิดสปาร์คขึ้นระหว่างขั้วไฟฟ้าในช่วงแรกและเกิดอาร์กหลักในช่วงต่อมา ปริมาณของกระแสไฟฟ้าจำนวนมากจะไหลผ่านก๊าซ ทำให้อิเล็กตรอนชนและถ่ายเทพลังงานให้กับอนุภาคที่มีบริเวณกว้างได้มากขึ้นตามไปด้วย เป็นผลให้อุณหภูมิของก๊าซสูงขึ้นเป็นพลาสมาที่ร้อนสูง อุณหภูมิของพลาสมาที่ได้อยู่ในช่วง 7,000-10,000 °K โดยที่อุณหภูมิอิเล็กตรอนอยู่ในระดับ 100,000 °K ส่วนอนุภาคอื่นๆ (ไอออนประจุบวก อะตอม และโมเลกุลก๊าซ) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 10,000 °K

นอกจากนี้ การรักษาเสถียรภาพของอาร์กพลาสมาให้คงที่นั้น จะต้องมีการป้อนพลังงานชดเชยพลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการแผ่รังสี (infrared, visible light, ultra violet) และช่วยในการนำไฟฟ้าให้คงอยู่ระดับเดิมตลอดเวลา โดยการเปลี่ยนแปลงกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขั้วไฟฟ้าจะทำให้แรงดันตกคร่อมขั้วไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งแรงดันตกคร่อมจะมีค่าลดลงเมื่อกระแสไฟฟ้าสูงขึ้น ทั้งนี้ พลาสมาจะมีสถานะเสถียรที่ค่ากระแสไฟฟ้าสูงค่าหนึ่งและค่าแรงดันตกคร่อมระหว่างขั้วไฟฟ้าคงที่ที่ค่าหนึ่ง

### 2.3.3 พลาสมาก๊าซ

พลาสมาก๊าซที่ใช้เป็นต้นกำเนิดอาร์กพลาสมาจะทำหน้าที่ห่อหุ้มขั้วไฟฟ้าและพาความร้อนจากพลาสมาไปใช้ประโยชน์พร้อมทั้งรักษาสภาพของพลาสมาให้อยู่สภาวะสมดุลด้วย โดยการเลือกใช้พลาสมาก๊าซจะพิจารณาถึงค่า energy content ของก๊าซ, ความไวในการเกิดปฏิกิริยา (reactivity) และราคาของก๊าซ พลาสมาก๊าซที่นิยมใช้ได้แก่ ไฮโดรเจน ( $H_2$ ), ไนโตรเจน ( $N_2$ ), ฮีเลียม (He), อาร์กอน (Ar) และอากาศ (air) ทั้งนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า energy content ของก๊าซกับอุณหภูมิของพลาสมาก๊าซดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง energy content ของพลาสมาก๊าซ กับอุณหภูมิของพลาสมาที่ความดันปกติ

จากรูปที่ 2.15 แสดงให้เห็นว่าค่า energy content ในการเกิดพลาสมาของก๊าซไนโตรเจนและไฮโดรเจนมีค่าสูงกว่าของก๊าซอาร์กอนและฮีเลียม เนื่องจากก๊าซไนโตรเจนและไฮโดรเจนเป็นก๊าซไดอะตอม (หนึ่งโมเลกุลมีสองอะตอม) จึงมีการดูดกลืนพลังงานเพื่อใช้ในการแตกตัวจากโมเลกุลเป็นอะตอมจนกระทั่งเป็นไอออนมากกว่าก๊าซอาร์กอนและฮีเลียมที่เป็นก๊าซเฉื่อยและอยู่ในสภาพเป็นอะตอมโดยปกติอยู่แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.16



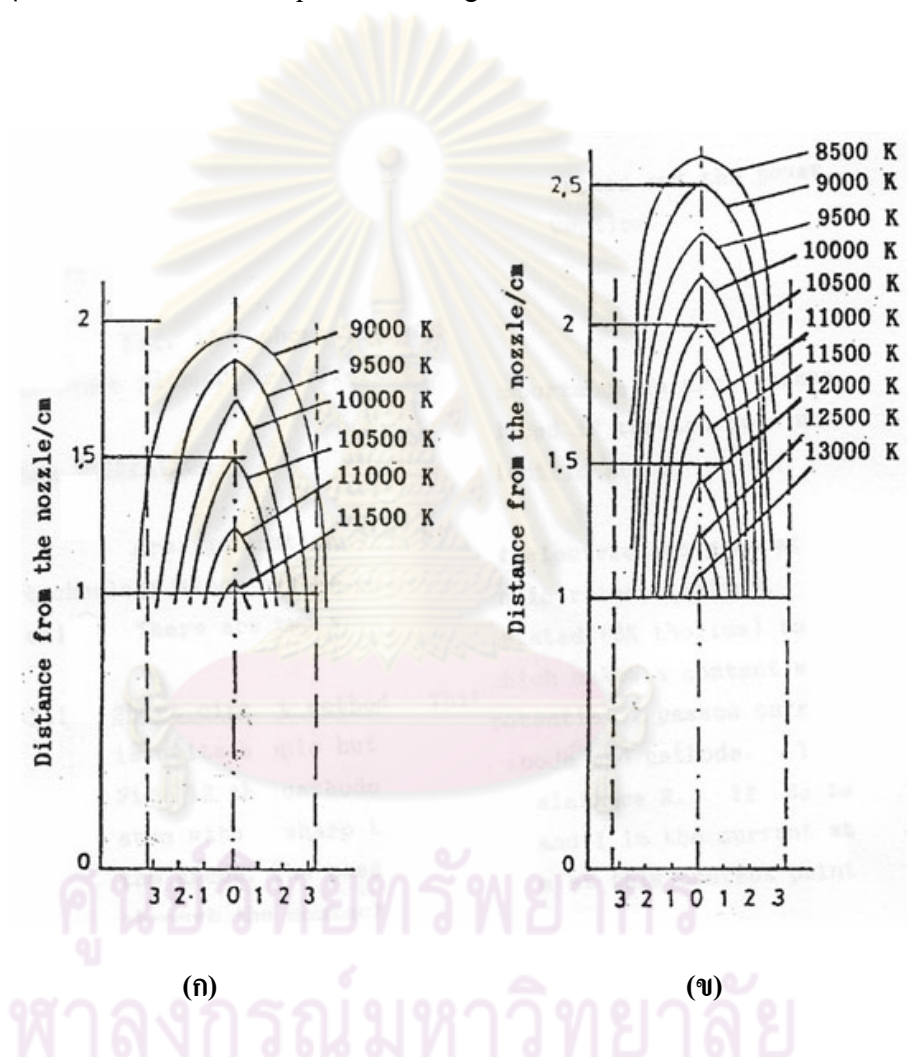
**Hydrogen****Nitrogen****Argon****Helium**

รูปที่ 2.16 ค่าพลังงานที่ใช้ในการแตกตัวเป็นไอออนของก๊าซชนิดต่างๆ

ทั้งนี้ ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซที่หาง่ายและราคาถูก และมีค่า internal energy สูงจึงนิยมใช้เป็นอาร์กก๊าซมากที่สุด ซึ่งเวลาใช้งานจะผสมกับก๊าซไฮโดรเจนประมาณ 10% เพื่อเพิ่มค่า heat content และคุณสมบัติการส่งผ่านความร้อนให้สูงขึ้น นอกจากนี้ก๊าซไฮโดรเจนยังทำหน้าที่เป็นสารรีดิวซ์ (reducing agent) ในพลาสมาด้วย อย่างไรก็ตามข้อเสียของก๊าซไนโตรเจนคือเกิดปฏิกิริยาเคมีกับวัสดุที่รับความร้อนจากการอาร์กพลาสมาเกิดเป็นสารประกอบไนไตรด์ขึ้น

ทำให้ขอบเขตการใช้ก๊าซไนโตรเจนลดลง ในกรณีที่ต้องการควบคุมบรรยากาศของอาร์กพลาสมา ให้เป็นก๊าซเฉื่อยอย่างสมบูรณ์จะนิยมใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นพลาสมาก๊าซ นอกจากนี้ยังสามารถใช้อากาศเป็นพลาสมาก๊าซได้ แต่มีการใช้งานอยู่ในขอบเขตที่จำกัดมากเนื่องจากเกิดการออกซิเดชัน (oxidation) ขึ้นที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสองขั้วอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 2.17 แสดงให้เห็นถึงการกระจายของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ที่ตำแหน่งต่างๆ ของเปลวพลาสมา (Arc plasma discharge)



(ก) ไนโตรเจนพลาสมา (ข) อาร์กอนพลาสมา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.17 การกระจายของอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของเปลวพลาสมา  
(ก) ไนโตรเจนพลาสมา (ข) อาร์กอนพลาสมา

## 2.4 การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing, NDT) (นเรศร์ จันทน์ขาว, 2528)

การตรวจสอบโดยไม่ทำลายหรือ NDT (Non-Destructive Testing) เป็นวิธีการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ต้องทำลายหรือตัดแปลงชิ้นงานที่จะตรวจสอบและภายหลังจากการตรวจสอบแล้ว หากไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ ก็สามารถนำชิ้นงานไปใช้ได้ตามปกติ วิธีการตรวจสอบที่นิยมใช้แพร่หลายได้แก่

- (1) วิธีถ่ายภาพด้วยรังสี หรือ Radiographic Testing (RT)
- (2) วิธีผงแม่เหล็ก หรือ Magnetic particle Testing (MT)
- (3) วิธีใช้คลื่นเสียงความถี่สูงยิ่ง หรือ Ultrasonic Testing (UT)
- (4) วิธีใช้น้ำยาสีซึมแทรก หรือ Liquid Penetrant Testing (PT)
- (5) วิธีกระแสเอ็ดดี้ หรือ Eddy current Testing (ET)
- (6) วิธีตรวจสอบด้วยสายตา หรือ Visual optical Testing (VT)

### 2.4.1 หลักการถ่ายภาพด้วยรังสี (ฐิติกร เห็นทรัพย์ไพบูลย์, 2540)

ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ต้องมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

#### 2.4.1.1 ต้นกำเนิดรังสี

ต้นกำเนิดรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือ เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray Machine) และต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotopic Gamma-Ray Source) เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง โดยเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้ในการตรวจสอบโดยไม่ทำลายจะใช้รังสีเอกซ์ที่มีพลังงานในช่วง 100 kV ถึง 400 kV ส่วนต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ โดยพิจารณาจากพลังงานของรังสีและความเข้มหรือความแรงของรังสีรวมถึงความหนาของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

#### 2.4.1.2 ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ

ชิ้นงานเป็นตัวแปรที่ทำให้ความเข้มของรังสีเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยภายในของตัวชิ้นงาน เช่น ความแตกต่างของความหนา ความหนาแน่น ส่วนประกอบ ความไม่เสมอหรือความไม่ต่อเนื่อง เป็นต้น

### 2.4.1.3 ส่วนแสดงผลและอุปกรณ์วัดความเข้มรังสี

ส่วนแสดงผลและอุปกรณ์วัดความเข้มรังสีเป็นตัวแปลผลความเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มของรังสีหลังผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบได้แก่ ฟิล์ม (Film) ฉากรเรืองแสง (Fluorescent Screen) หัววัดรังสี (Radiation Detector) และแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate, IP)

ตารางที่ 2.4 ต้นกำเนิดรังสีแกมมาบางชนิดที่ใช้ในงานถ่ายภาพด้วยรังสี (นเรศร์ จันทร์ขาว, 2528)

ต้นกำเนิดรังสี	พลังงานรังสีแกมมา (keV)	ครึ่งชีวิต	Exposure Dose ที่ระยะ 1 ฟุต (R / hr-Cu)	Half Value Thickness (นิ้ว)	ความหนาของเหล็กที่ถ่ายภาพได้ (นิ้ว)
Thulium-170, <sup>170</sup> Tu	84	129 วัน	0.03	เหล็ก 0.06	0.25 – 0.50
Iridium-192, <sup>192</sup> Ir	296, 308, 317, 604 และ 612	74 วัน	5.9	เหล็ก 0.3	0.50 – 2.00
Cesium-137, <sup>137</sup> Cs	662	30 ปี	4.2	อะลูมิเนียม 1.7 เหล็ก 0.6 ตะกั่ว 0.3	1.00 - 2.5
Cobalt-60, <sup>60</sup> Co	1170 และ 1330	5.26 ปี	14.4	อะลูมิเนียม 2.6 เหล็ก 0.9 ตะกั่ว 0.5	1.0 – 6.00



#### 2.4.2 อันตรกิริยาของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์กับสสาร (ฐิติกร เห็นทรัพย์ไพบูลย์, 2540)

รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูง ไม่มีมวลและไม่มีประจุ สามารถทะลุทะลวงวัสดุต่างๆ ได้ดี เมื่อรังสีทะลุผ่านเข้าไปในวัตถุหรือสสารใดจะเกิดอันตรกิริยาสำคัญ 3 แบบ คือ

##### 2.4.2.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)

เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอมของวัตถุหรือสสาร จะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอนภายในอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรโดยมีพลังงานจลน์ค่าหนึ่ง เราเรียกปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก และเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรนี้ว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) โดยพลังงานของรังสีแกมมาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้ต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำลายพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นได้ดีในช่วงรังสีพลังงานต่ำ คือในช่วงต่ำกว่า 0.5 MeV

ทั้งนี้ หากปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเกิดกับอิเล็กตรอนวงโคจรชั้นในแล้ว อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกจะเข้ามาแทนที่และปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-Ray) ซึ่งเป็นพลังงานเฉพาะสำหรับธาตุแต่ละธาตุ

##### 2.4.2.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton Scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตันหรือคอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton Effect) เป็นการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) ของโฟตอนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เมื่อโฟตอนชนกับอิเล็กตรอนในวงโคจรซึ่งมีพลังงานยึดเหนี่ยวค่าหนึ่งแล้ว โฟตอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจร และส่งผลให้มีการกระเจิงของรังสีที่มีพลังงานลดลงกลับมา

การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะมีความสำคัญมากเมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงกว่า 0.1 MeV ขึ้นไป และหลังจากเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันแล้ว โฟตอนที่กระเจิงออกมาบางครั้งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกได้ด้วย

##### 2.4.2.3 แพร์โพรดักชัน (Pair Production)

แพร์โพรดักชัน เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนซึ่งมีพลังงานสูงกว่าหรือเท่ากับ 1.022 MeV เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปสู่นิวเคลียสแล้ว โฟตอนหายไปเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งเรียกว่า โพสิตรอน ( $e^+$ ) และ อิเล็กตรอน ( $e^-$ ) โดยอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีมวลเท่ากับ 0.511 MeV และมีพลังงานจลน์รวมเท่ากับพลังงานที่เหลือของโฟตอนจากการเกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระ

เมื่อโพสิตรอนที่เกิดขึ้นเคลื่อนที่ไปชนอะตอมข้างเคียง จะทำให้สูญเสียพลังงานไปจนพลังงานโพสิตรอนมีค่าน้อยลง และเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนตัวหนึ่งเกิดเป็นโฟตอน 2 ตัวเคลื่อนที่ทิศตรงกันข้าม โดยมีพลังงานเท่ากับ 0.511 MeV เรียกกระบวนการนี้ว่า การแผ่รังสีแอนนิฮิเลชัน (Annihilation Radiation)

#### 2.4.3 การลดทอนรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์

เมื่อรังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์ทะลุผ่านวัตถุ ปริมาณหรือความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านวัตถุออกมาจะขึ้นอยู่กับปัจจัยดังนี้ คือ

- พลังงานของรังสีและความเข้มรังสี
- ชนิดและความหนาของวัตถุ

#### 2.4.4 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวม (Total attenuation coefficient,  $\mu$ ) หรือค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear absorption coefficient) เป็นค่าเฉพาะของวัตถุแต่ละชนิด และมีสัดส่วนความเข้มรังสีลดลงเมื่อความหนาของตัวดูดกลืนมากขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมจะมีค่าเท่ากับ ผลรวมของค่าสัมประสิทธิ์ลดทอนของอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในวัตถุที่ดูดกลืน (ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก, การกระเจิงแบบคอมป์ตัน และแฟร์โพรดักชัน)

#### 2.4.5 การทะลุผ่านวัตถุของรังสีแกมมาและรังสีเอกซ์

ถ้าพิจารณารังสีแกมมาหรือรังสีเอกซ์พลังงานเดียว (monoenergetic beam) เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัตถุ รังสีบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกและแฟร์โพรดักชัน บางส่วนกระเจิงออกมาแบบคอมป์ตัน แต่มีบางส่วนผ่านออกมาโดยไม่เกิดอันตรกิริยา ซึ่งความเข้มของรังสีก่อนผ่านเข้าไปในตัวดูดกลืนที่มีความหนา  $x$  และความเข้มของรังสีหลังผ่านตัวดูดกลืนจะมีการลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล ตามสมการ

$$I = I_0 e^{(-\mu x)}$$

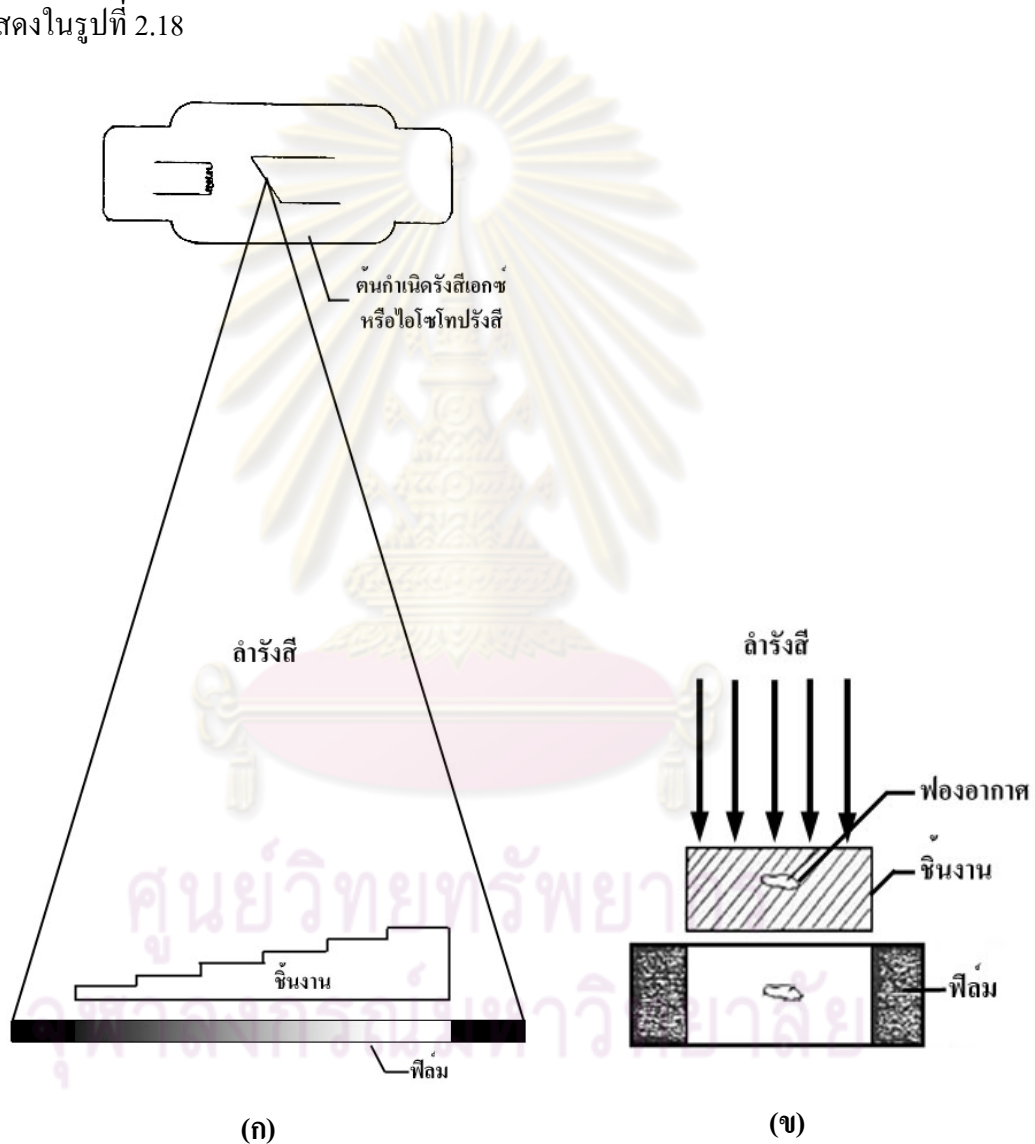
โดย  $I$  = ความเข้มของรังสีก่อนผ่านตัวดูดกลืน

$I_0$  = ความเข้มของรังสีหลังผ่านตัวดูดกลืน

$\mu$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของรังสีในตัวดูดกลืน

$x$  = ความหนาของตัวดูดกลืน

รังสีที่ผ่านทะลุชิ้นงานไปได้จะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ความดำที่ปรากฏให้เห็นบนฟิล์มภายหลังการล้างฟิล์มจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานไปทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ดังนั้น สำหรับกรณีที่ชิ้นงานเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน บริเวณที่หนากว่ารังสีจะทะลุผ่านได้น้อยกว่าฟิล์มจึงดำน้อยกว่า แต่บริเวณที่บางกว่ารังสีสามารถทะลุผ่านได้มากกว่า ฟิล์มจึงดำกว่า นอกจากนี้ ในกรณีที่ชิ้นงานมีฟองอากาศอยู่ภายใน จะทำให้แนวบริเวณที่มีฟองอากาศอยู่มีเนื้อวัสดุบางกว่า ดังนั้นปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านจึงมากกว่า ทำให้เห็นภาพของฟองอากาศเป็นจุดดำบนฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 2.18



**รูปที่ 2.18** ลักษณะการตรวจสอบโดยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสี (เนรศรี จันทน์ขาว, 2528)

- (ก) การถ่ายภาพด้วยรังสีของชิ้นงานชนิดเดียวกันแต่มีความหนาแตกต่างกัน
- (ข) การเกิดภาพของฟองอากาศบนฟิล์มซึ่งสอดคล้องกับตำแหน่งของฟองอากาศในชิ้นงานและทิศทางของลำรังสี

## บทที่ 3

### วัสดุอุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 รายการวัสดุอุปกรณ์

##### 3.1.1 การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา

การผลิตอาร์กพลาสมา มีวัสดุอุปกรณ์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนี้

- (1) ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง
- (2) ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก
- (3) ระบบระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา
- (4) ระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา
- (5) หัวเชื่อมอาร์กพลาสมาและเบ้าหลอมโลหะ
- (6) ระบบจ่ายก๊าซและพลาสมาก๊าซ

##### 3.1.2 การสร้างคอนกรีตกำบังรังสี

วัสดุอุปกรณ์สำหรับการสร้างคอนกรีตกำบังรังสี มีดังนี้

- (1) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1
- (2) ทรายหยาบ
- (3) หินคัดขนาด 1-2 เซนติเมตร
- (4) แร่แบไรท์ขนาด 200 เมช (Mesh) หรือ 74 ไมครอน
- (5) แร่แบไรท์คัดขนาด 1-2 เซนติเมตร
- (6) น้ำ
- (7) เครื่องชั่งน้ำหนักตนิยม 1 ตำแหน่งหน่วยกิโลกรัม (Vibra)
- (8) เครื่องผสมคอนกรีต
- (9) แท่งเหล็กกระทุ้งคอนกรีต
- (10) เครื่องจี้คอนกรีต (Mikasa)
- (11) แบบหล่อคอนกรีต
- (12) เกรียง
- (13) ค้อนยาง
- (14) ที่ตักคอนกรีต
- (15) ถังบ่มคอนกรีต



### 3.1.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

วัสดุอุปกรณ์สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต มีดังนี้

- (1) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 1 ตำแหน่งหน่วยกิโลกรัม
- (2) เครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีต (Amsler)
- (3) เครื่องตัดคอนกรีต (Norton Clipper Major)
- (4) ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA)
- (5) ตะกั่วกำบังรังสี
- (6) ต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 และ โคบอลต์-60

### 3.1.4 การเตรียมโลหะผสม

วัสดุอุปกรณ์สำหรับการเตรียมโลหะผสม มีดังนี้

- (1) แผ่นเหล็กเกรดอุตสาหกรรม SS400 (SS41)
- (2) แท่งตะกั่วเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99%
- (3) แท่งดีบุกเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99%
- (4) แท่งบิสมัทเกรดอุตสาหกรรมความบริสุทธิ์ 99%
- (5) เครื่องตัดเหล็ก (Winner)
- (6) เครื่องเจียรเหล็ก (Black and Decker)
- (7) เครื่องรีดแผ่นโลหะ
- (8) ค้อนเหล็ก
- (9) กรรไกร
- (10) เครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 4 ตำแหน่ง (Pioneer รุ่น Ohaus)

### 3.1.4 การหาการกักร่อนของพื้นผิวคอนกรีต

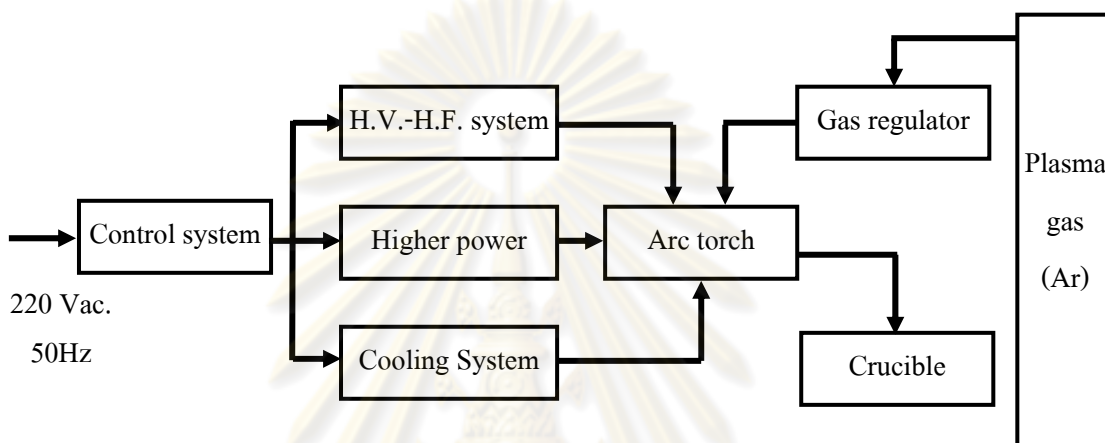
วัสดุอุปกรณ์สำหรับการหาการกักร่อนของพื้นผิวคอนกรีตมีดังนี้

- (1) เครื่องฉายรังสีแกมมา โคบอลต์-60
- (2) แผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) พร้อมกรอบบรรจุสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา (FujiFilm FCR Pb 14"x17")
- (3) เครื่องอ่านแผ่นฟิล์ม (FujiFlm Dynamic HR)
- (4) เครื่องตัดคอนกรีต (Clipper Major)
- (5) เครื่องตัดเหล็ก (Winner)
- (6) กล้องถ่ายภาพดิจิทัลกำลังขยาย 5-10 เท่า (Canon)

### 3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.2.1 การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา

เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาสำหรับงานวิจัยนี้ ออกแบบและพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการทางานและวัสดุอุปกรณ์ที่ได้จากโครงการวิจัย การสร้างเตาอาร์กพลาสมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านโลหะกรรมพลาสมา (วิระชัย บัญชรเทวกุล และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 2525) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักที่สำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



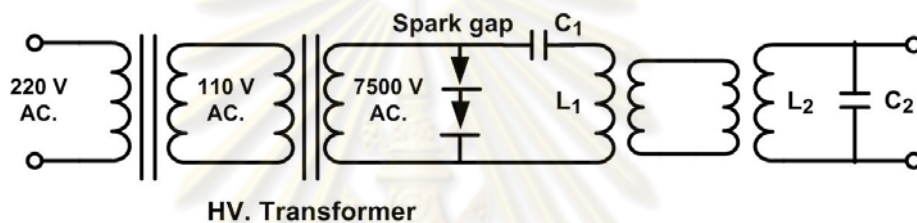
รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบการทำงานเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา

##### 3.2.1.1 ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

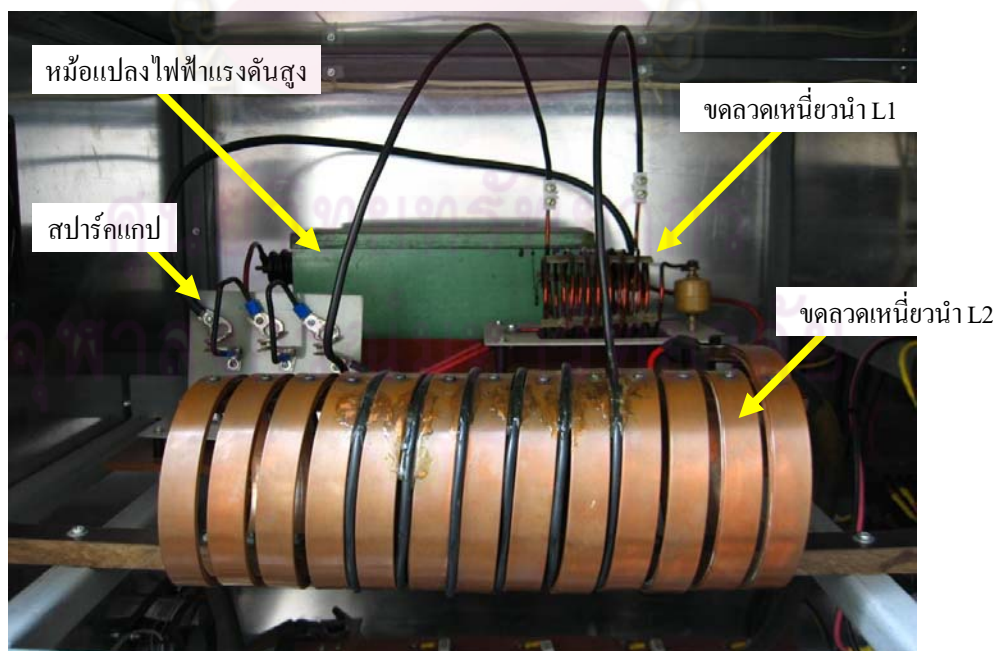
การกำเนิดอาร์กพลาสมาจำเป็นต้องมีการเริ่มต้นอาร์กไฟฟ้าให้เกิดการไอออไนซ์ของก๊าซเพื่อสร้างภาวะนำกระแสของก๊าซ ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้แรงดันไฟฟ้าสูงประมาณ 1-5 กิโลโวลต์ ที่ความถี่สูงมากกว่า 1 เมกะเฮิร์ตซ์ (คุปต์ โพธิ์แก้ว, 2539) การทำให้เกิดอาร์กพลาสมาด้วยวิธีเหนี่ยวนำไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงนี้ นิยมใช้กันมากในกรณีที่ขั้วแอโนดและแคโทดไม่สามารถเคลื่อนที่มาแตะกันเพื่อทำให้เกิดการอาร์กได้ จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงเพื่อให้เกิดอาร์กความถี่สูง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ของก๊าซโดยทั่วไปที่มีโอกาสเกิดการอาร์กคิศาจได้ง่าย (Arc discharge) เมื่อได้รับไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง (สุริยา ชงชัย, 2537)

สำหรับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงที่ออกแบบแสดงวงจรในรูปที่ 3.2 ซึ่งสามารถใช้งานที่แรงดันไฟฟ้าสูงขนาด 7.5 กิโลโวลต์และมีความถี่สูงขนาด 3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยอาศัยหลักการเรโซแนนซ์ความถี่ของขดลวดเหนี่ยวนำ L1 และตัวเก็บประจุ C1 จากการอาร์กของไฟฟ้าแรงดันสูงของสปาร์กแกป (spark gap) และส่งผ่าน (Coupling) ความถี่สูงที่เกิดขึ้นออกมาใช้งาน โดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูงขนาดกำลัง 450 วัตต์ มีแรงดันไฟฟ้าทางด้านปฐมภูมิ 220 โวลต์ และมีแรงดันไฟฟ้าทางด้านทุติยภูมิขนาด 15,000 โวลต์ ส่วนของสปาร์กแกปได้ประยุกต์ใช้น้ำทองขาว

(contact) ของรถจักรยานยนต์มาดัดแปลงเพื่อสร้างอาร์กความถี่ย่านกว้างและคัดเลือกความถี่ที่ปปลิงมายังวงจรของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักด้วยขดลวดเหนี่ยวนำ L2 และตัวเก็บประจุ C2 ซึ่งต่อเป็นวงจรแทงก์ (Tank circuit) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ทั้งนี้ ขดลวดเหนี่ยวนำ L2 ต้องมีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทนต่อกระแสไฟฟ้าสูงขนาด 300 แอมแปร์ที่ไหลผ่านในวงจรของระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักได้ และเนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าสูงไหลผ่านอาจทำให้เกิดความร้อนและความเสียหายแก่อุปกรณ์ จึงได้ติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรมีปริมาตรลม (air flow) 80 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที (2.265 ลูกบาศก์เมตรต่อนาที) จำนวน 2 ตัวเพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน



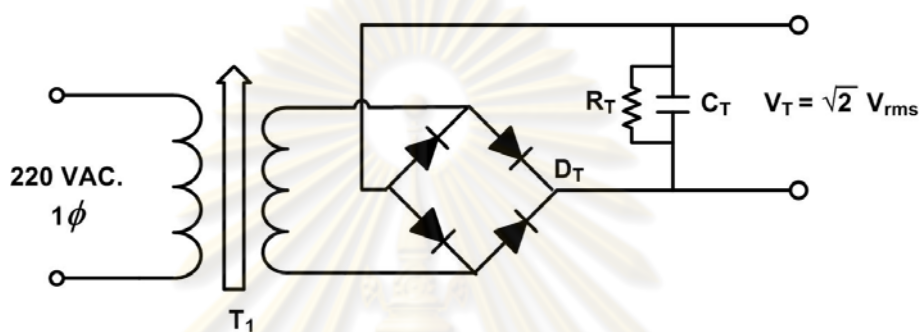
รูปที่ 3.2 วงจรกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง



รูปที่ 3.3 ระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง

### 3.2.1.2 ระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกำลังให้แก่เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาซึ่งทำงานหลังระบบกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง โดยต้องเปลี่ยนกระแสสลับของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักให้เป็นกระแสตรงซึ่งออกแบบให้สามารถใช้กับระบบไฟฟ้าเฟสเดียว และสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าขณะเกิดอาร์กพลาสมาได้สูงสุด 13 กิโลวัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

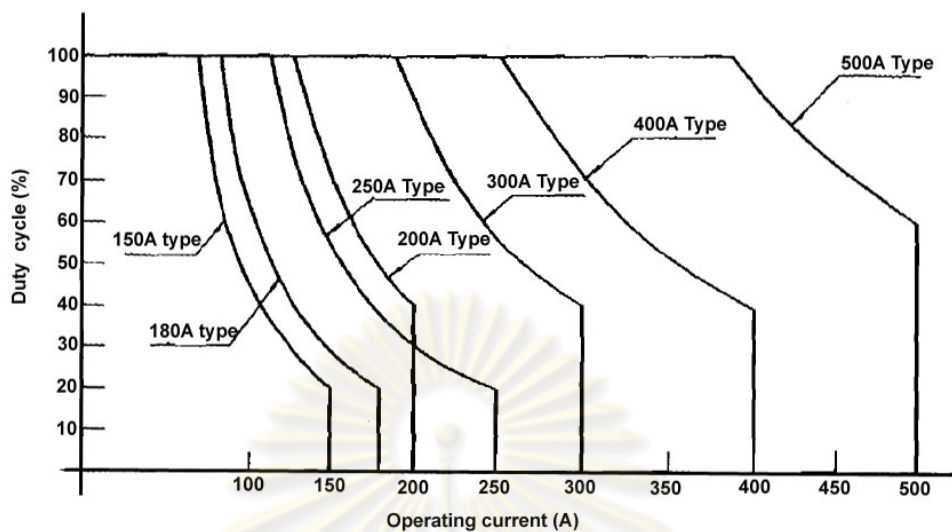


รูปที่ 3.4 วงจรระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก

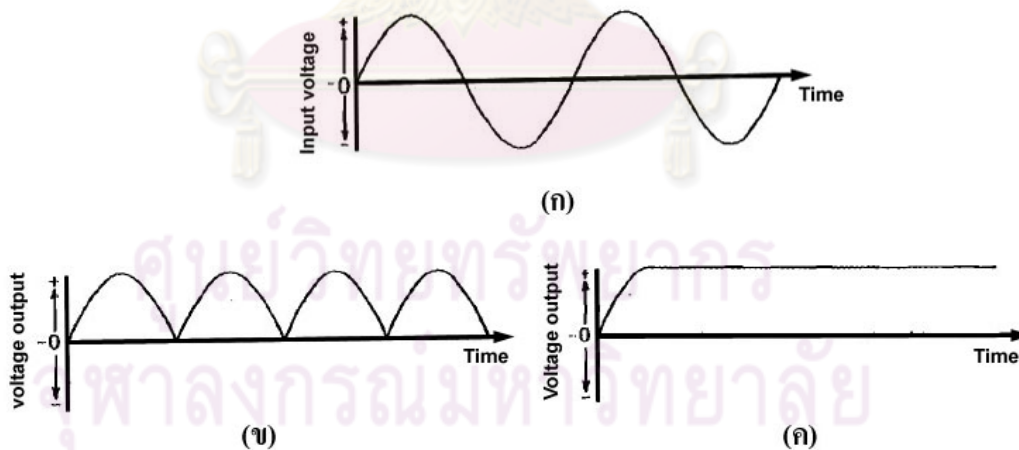
สำหรับหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าหลักประยุกต์ใช้หม้อแปลงของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสสลับขนาดกำลังไฟฟ้า 13 กิโลวัตต์ ชนิดแรงดันไฟฟ้าเฟสเดียวทางด้านปฐมภูมิขนาด 220 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าแรงดันต่ำทางด้านทุติยภูมิโดยมีแรงดันวงจรเปิด 80 โวลต์ สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 45-300 แอมแปร์และมีค่า duty cycle เท่ากับ 40 % ที่ขนาดกระแสสูงสุด 300 แอมแปร์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5

ไฟฟ้ากระแสสลับแรงดันต่ำกระแสสูงที่ได้จะต่อเข้ากับวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์ 1 ชุด ซึ่งประกอบด้วยไดโอดกำลัง (Power diode) จำนวน 4 ตัว ทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีลักษณะพัลส์เต็มคลื่น แต่เนื่องจากในช่วงแรงดันไฟฟ้าตกกลงสู่ 0 โวลต์จะทำให้การอาร์กไม่สามารถรักษาสภาพอยู่ได้ จึงต้องต่อเข้ากับวงจรกรองกระแสเพื่อทำหน้าที่ชดเชยไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้ให้มีค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่เป็น  $\sqrt{2} V_{rms}$  โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 ทำให้สามารถอาร์กได้ต่อเนื่องหลังจุดอาร์กด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูง





รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Duty cycle กับค่ากระแสไฟฟ้าของหม้อแปลงที่ใช้งาน



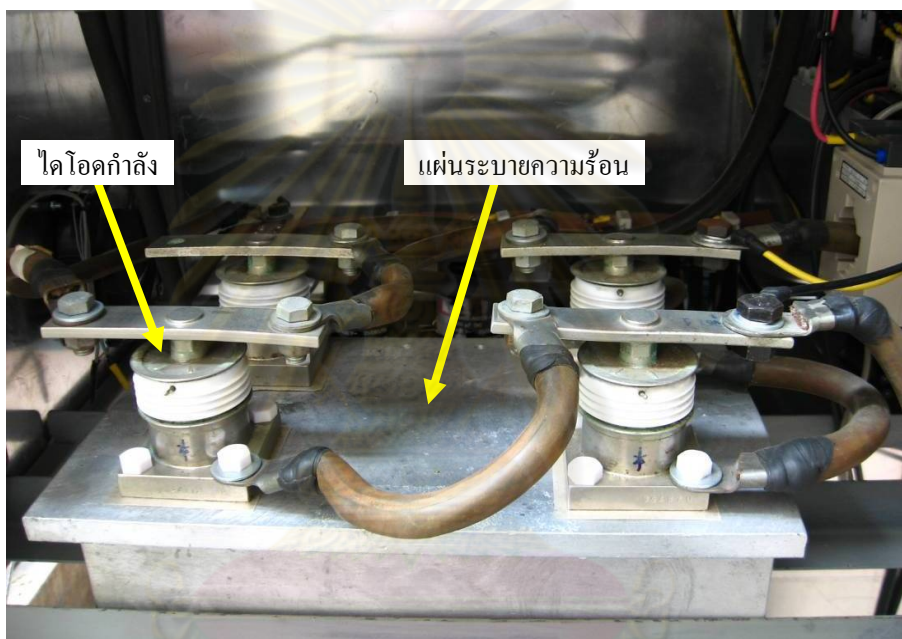
รูปที่ 3.6 ลักษณะแรงดันไฟฟ้าระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก

(ก) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าที่ขดทุติยภูมิ

(ข) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าหลังผ่านวงจรเรียงกระแส

(ค) ลักษณะแรงดันไฟฟ้าหลังผ่านวงจรกรองกระแส

เนื่องจากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอุปกรณ์ขนาดสูงสุด 300 แอมแปร์ ส่งผลให้เกิดความร้อนและอาจสร้างความเสียหายให้แก่อุปกรณ์ได้ จึงต้องมีการระบายความร้อนให้กับวงจร โดยออกแบบติดตั้งวงจรเรียงกระแสแบบบริดจ์บนแผ่นระบายความร้อนซึ่งทำจากแผ่นอลูมิเนียม ขนาดกว้าง 10.0 เซนติเมตร หนา 1.27 เซนติเมตร เชื่อมต่อกันเป็นกริดระบายความร้อน ดังแสดงใน รูปที่ 3.7 และติดตั้งพัดลมระบายอากาศขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรมีปริมาตรลม (air flow) 80 ลูกบาศก์ฟุตต่ออนาที (2.265 ลูกบาศก์เมตรต่ออนาที) จำนวน 4 ตัว เพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อน

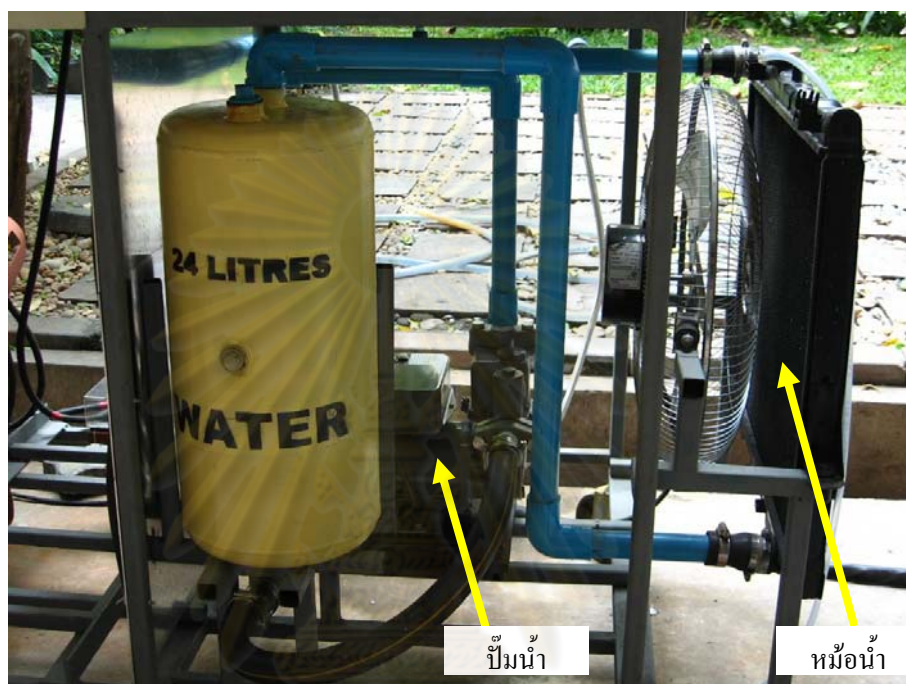


รูปที่ 3.7 การติดตั้งไดโอดกำลังสำหรับวงจรเรียงกระแสบนแผ่นระบายความร้อน

### 3.2.1.3 ระบบระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา

เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายของหัวเชื่อมอาร์กพลาสมาอันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นขณะทำการอาร์ก จึงได้ออกแบบระบบระบายความร้อนด้วยน้ำระบบปิด โดยใช้เครื่องสูบน้ำขนาดกำลังไฟฟ้า 200 วัตต์เฟสเดียว มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อน้ำเข้าและออก 2.54 เซนติเมตร มีอัตราไหลของน้ำ 28 ลิตรต่ออนาที ที่ท่อน้ำออกของปั้มน้ำต่อเข้ากับท่อน้ำชนิด PVC ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.54 เซนติเมตร และลดขนาดของท่อน้ำลงเหลือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.27 เซนติเมตรเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับท่อน้ำของสายหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา ทั้งนี้ขนาดท่อน้ำที่ลดลงสามารถเพิ่มแรงดันน้ำได้อีกทางหนึ่งด้วย

น้ำระบายความร้อนที่ไหลผ่านหัวเชื่อมอาร์กพลาสมาจะไหลเข้าสู่หม้อน้ำ ระบายความร้อนซึ่งติดตั้งพัดลมระบายความร้อนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 45.72 เซนติเมตร ก่อนไหล เข้าสู่ถังพักน้ำ ซึ่งตัดแปลงมาจากถังลมของรถยนต์ขนาดความจุ 24 ลิตร และไหลเข้าสู่ปั้มน้ำเป็น ระบบระบายความร้อนแบบวงจรปิด (closed loop) ต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ระบบระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา

#### 3.2.1.4 ระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา

เพื่อควบคุมการเดินเครื่องให้อยู่ในภาวะปกติและป้องกันความผิดพลาดที่ อาจเกิดขึ้นขณะใช้งาน จึงได้ออกแบบติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และรีเลย์เพื่อควบคุมการทำงาน เตาอาร์กพลาสมาแบบกึ่งอัตโนมัติให้เป็นตามลำดับไม่สามารถข้ามขั้นตอนและสามารถหยุดฉุกเฉิน ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 โดยออกแบบมีลำดับขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

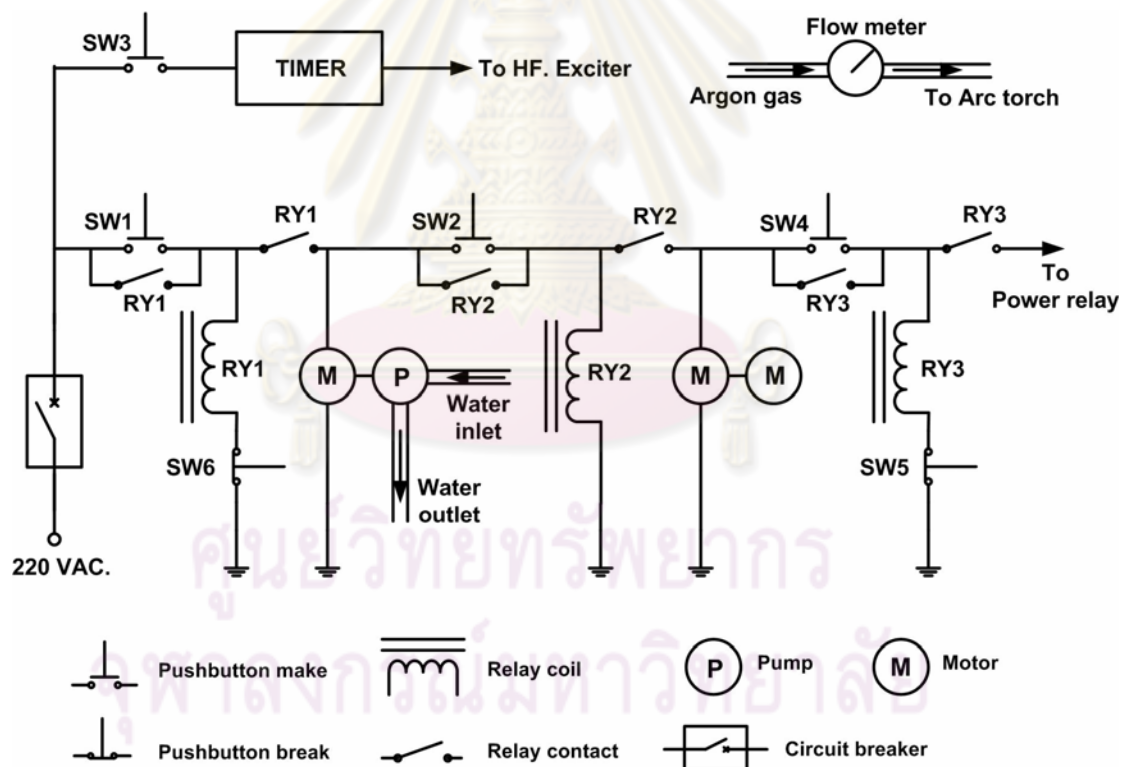
- สวิตซ์หมายเลขหนึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องสูบน้ำในระบบ ระบายความร้อนหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา
- สวิตซ์หมายเลขสองทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของพัดลมระบายความ ร้อนของเตาอาร์กพลาสมาทั้งหมด
- สวิตซ์หมายเลขสามทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบกำเนิดไฟฟ้า แรงดันสูงความถี่สูงเพื่อเหนี่ยวนำให้ก๊าซอาร์กอนเกิดการแตกตัวเป็น ไอออนและมีการสปาร์คขึ้น โดย สามารถตั้งเวลาการทำงานได้ในช่วง 1- 180 วินาที

- สวิตช์หมายเลขสี่ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ส่งผลทำให้เกิดอาร์กหลักขึ้น (Main arc) ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลอมโลหะได้ โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลักและอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอนที่เหมาะสม

- สวิตช์หมายเลขห้าทำหน้าที่ตัดการจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าหลัก ส่งผลทำให้หยุดการอาร์ก แต่พัดลมและปั้มน้ำยังคงทำงานเพื่อทำหน้าที่ระบายความร้อนต่อไป

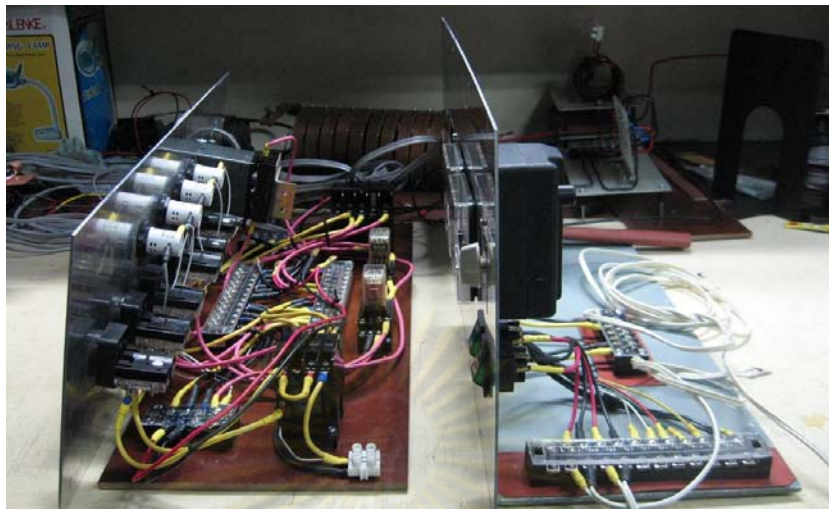
- สวิตช์หมายเลขหกทำหน้าที่หยุดการทำงานของเตาอาร์กพลาสมาทั้งหมด

- วาล์วก๊าซและเกจวัดอัตราการไหล (Flow meter) ทำหน้าที่ควบคุมก๊าซอาร์กอนที่ไหลผ่านหัวเชื่อมอาร์กพลาสมา

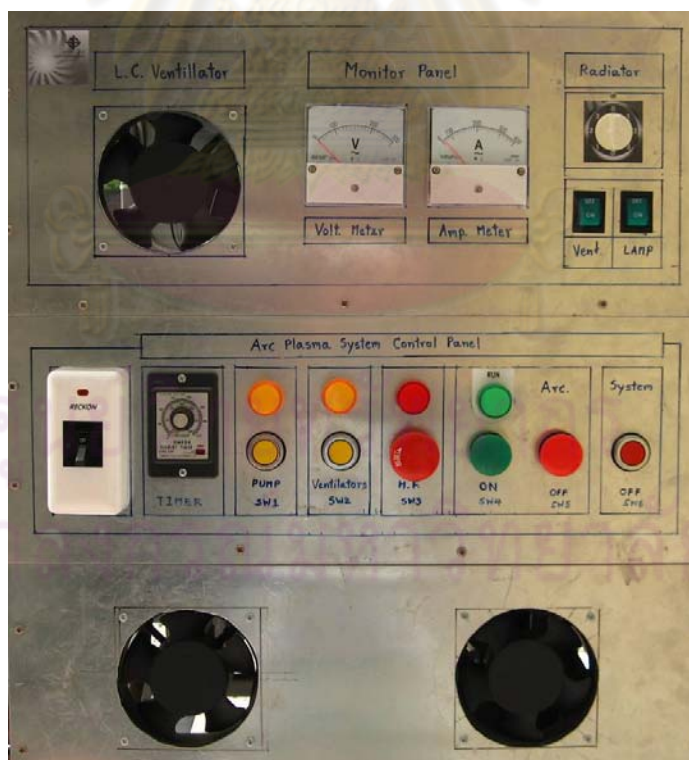


รูปที่ 3.9 แผนภาพระบบควบคุมการทำงานของเตาอาร์กพลาสมา





รูปที่ 3.10 อุปกรณ์ภายในระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา

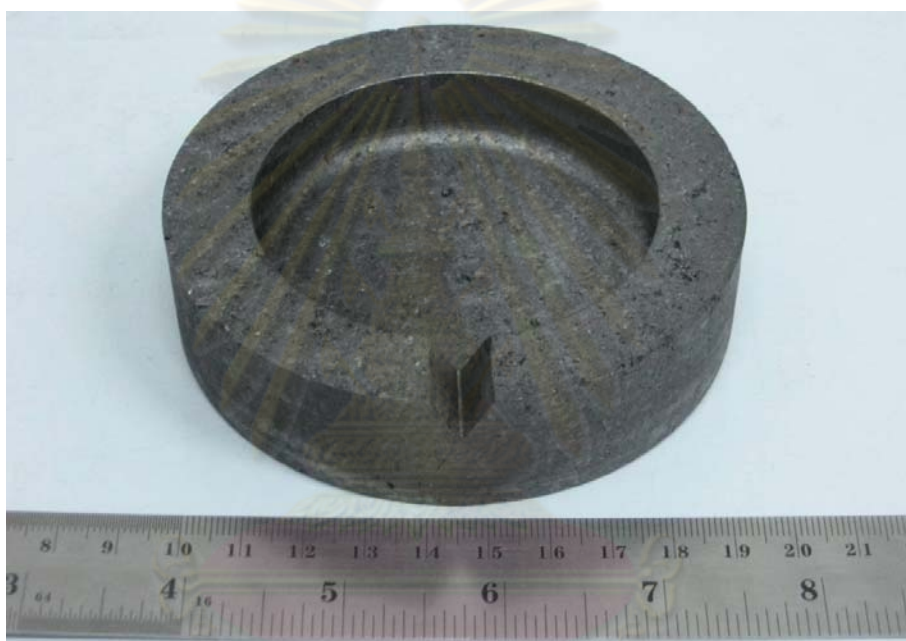


รูปที่ 3.11 แผงสวิตช์ระบบควบคุมการทำงานเตาอาร์กพลาสมา



### 3.2.1.5 เบ้าหลอมโลหะ

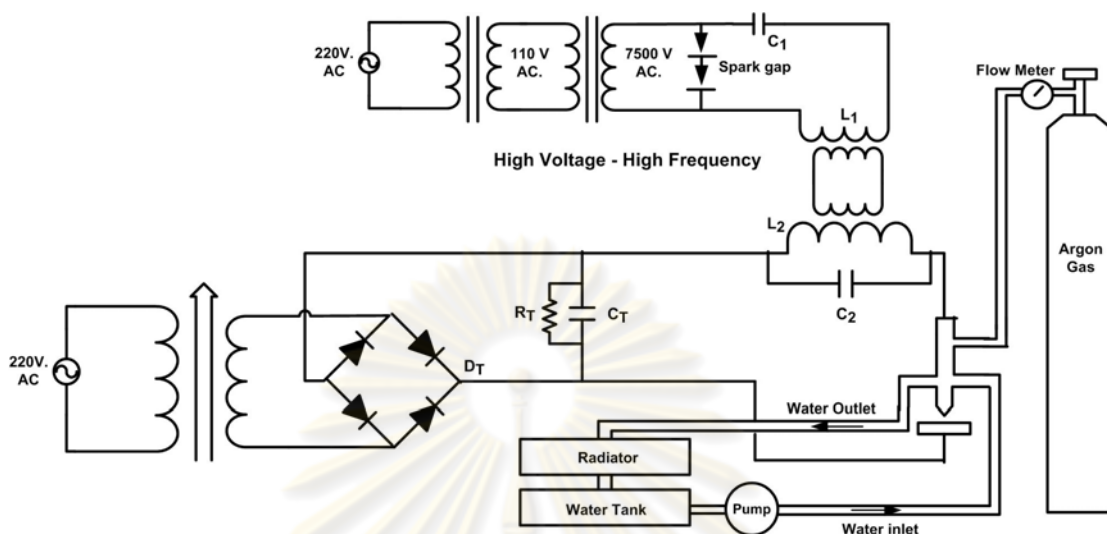
เลือกใช้กราไฟท์เป็นวัสดุในการทำเบ้าหลอมโลหะ และเป็นขั้วไฟฟ้าบวกในการอาร์ก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูง มีคุณสมบัติสามารถนำไฟฟ้าได้ดี ตลอดจนเป็นวัสดุที่มีราคาไม่สูงมาก โดยออกแบบเบ้าหลอมโลหะให้มีลักษณะตันและกว้างเพื่อทำให้สามารถกระจายความร้อนในการหลอมโลหะจากการอาร์กพลาสมาได้ดี โดยนำมาถึงขึ้นรูปด้วยเครื่องกลึงโลหะเป็นเบ้าลึก 1 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร หนา 1 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 เบ้าหลอมโลหะกราไฟท์

### 3.2.1.6 พลาสมาก๊าซที่ใช้ในการทดลอง

เลือกใช้ก๊าซอาร์กอนเป็นพลาสมาก๊าซ เนื่องจากสามารถเกิดอาร์กพลาสมาได้ง่าย ให้อุณหภูมิสูง และเป็นก๊าซเฉื่อย ทำให้สภาพบรรยากาศในเบ้าหลอมโลหะเป็นก๊าซเฉื่อยขณะเกิดการอาร์ก ช่วยลดอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ทั้งนี้ พลาสมาก๊าซนอกจากแตกตัวเป็นพลาสมาขณะเกิดการอาร์กแล้ว ยังทำหน้าที่ห่อหุ้มและช่วยระบายความร้อนบางส่วนจากแท่งโลหะทั้งสแตนซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าลบได้ด้วย



รูปที่ 3.13 ระบบการทำงานของเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่พัฒนาขึ้น

### 3.2.2 การเตรียมคอนกรีตสำหรับทดลอง

คอนกรีตกำบังรังสีที่ใช้ในงานวิจัย แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักซึ่งมีความหนาแน่นสูงกว่า สามารถกำบังรังสีได้ดีกว่า โดยเลือกใช้แร่แบไรท์เป็นวัสดุส่วนผสมคอนกรีตซึ่งมีขั้นตอนการสร้างคอนกรีต ดังนี้

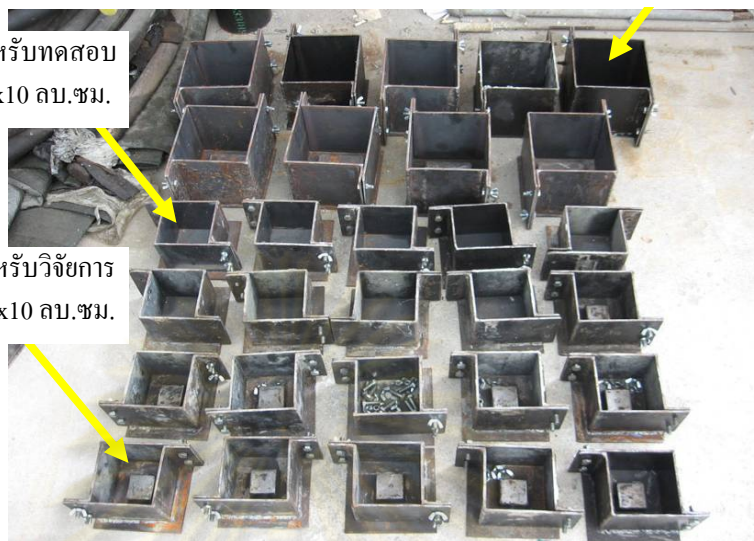
#### 3.2.2.1 การเตรียมแบบหล่อคอนกรีต

เนื่องจากปริมาณโลหะหลอมเหลวที่กระทำอันตรกิริยากับคอนกรีตมีปริมาณน้อยจึงต้องใช้คอนกรีตขนาดเล็ก โดยออกแบบและจัดทำแบบหล่อคอนกรีตจากแผ่นเหล็กหนา 3 มิลลิเมตรเชื่อมติดกันเป็นรูปตัว L จำนวน 2 ชั้น สามารถนำมายึดติดประกบกันหรือถอดแบบออกโดยใช้สกรูเพื่อให้คอนกรีตที่ได้มีลักษณะเป็นรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 10.0 ซม. x 10.0 ซม. x 10.0 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง) ซึ่งเป็นขนาดเล็กที่สุดตามมาตรฐานการทดสอบคอนกรีต โดยแบบหล่อคอนกรีตที่สร้างขึ้นสามารถหล่อคอนกรีตได้ 2 ลักษณะ คือ คอนกรีตทรงลูกบาศก์ก้อนตันเพื่อใช้สำหรับการทดสอบกำลังอัดคอนกรีต และคอนกรีตทรงลูกบาศก์ที่มีหลุมอยู่ตรงกลางของด้านหนึ่งขนาด 5.0 ซม. x 5.0 ซม. x 2.0 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง) เพื่อใช้รองรับโลหะหลอมเหลวสำหรับศึกษาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.14

แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบ  
กำลังอัดขนาด 15x15x15 ลบ.ซม.

แบบหล่อคอนกรีตสำหรับทดสอบ  
กำลังอัดขนาด 10x10x10 ลบ.ซม.

แบบหล่อคอนกรีตสำหรับวิจัยการ  
กัดกร่อนขนาด 10x10x10 ลบ.ซม.



รูปที่ 3.14 แบบหล่อคอนกรีตที่จัดทำขึ้นในการวิจัย

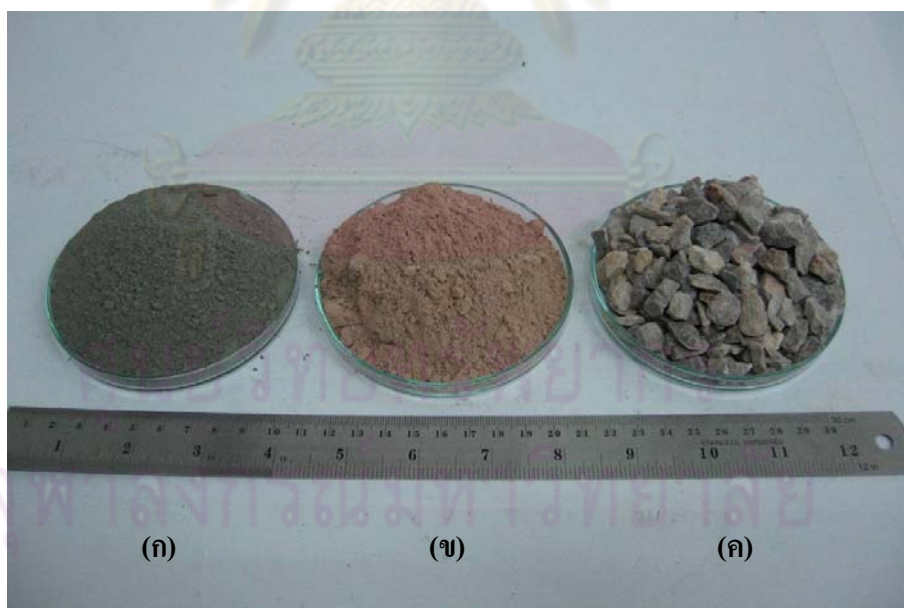
### 3.2.2.2 การเตรียมวัสดุส่วนผสมและอัตราส่วนผสมคอนกรีต

ออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตเพื่อสร้างคอนกรีตปริมาตรครึ่งละประมาณ 25,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรซึ่งเป็นปริมาณที่เหมาะสมกับจำนวนแบบหล่อคอนกรีตที่ใช้ในการวิจัย โดยคอนกรีตที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการวิจัยนี้เป็นคอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ไม่มีเสริมเหล็ก เพื่อใช้ในการศึกษาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตโดยตรง โดยได้คำนวณอัตราส่วนผสมและจัดเตรียมวัสดุสำหรับสร้างคอนกรีตทั้ง 2 ชนิดให้ได้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตประมาณ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตสำหรับพื้นอาคารขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

วัสดุส่วนผสมสำหรับสร้างคอนกรีตธรรมดาประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 หินคัดขนาด 1-2 เซนติเมตรเป็นมวลรวมหยาบ ทรายเป็นมวลรวมละเอียด และน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน และวัสดุส่วนผสมในคอนกรีตมวลหนักประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1 แร่แบไรท์หยาบคัดขนาด 1-2 เซนติเมตรเป็นมวลรวมหยาบ แร่แบไรท์บดละเอียดขนาด 200 เมช (74 ไมครอน) เป็นมวลรวมละเอียด และน้ำสำหรับปฏิกิริยาไฮเดรชัน โดยแร่แบไรท์ที่ใช้ในการวิจัยมีแหล่งที่มาจากจังหวัดนครศรีธรรมราช ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ทั้งนี้ได้นำตัวอย่างปูนซีเมนต์และแร่แบไรท์มาวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF) เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับคอนกรีตที่สร้างขึ้น ดังแสดงในภาคผนวก ก-จ

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนวัสดุผสมคอนกรีต (ปริมาตร 25,000 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

วัสดุผสม	น้ำหนักส่วนผสม (กิโลกรัม)	
	คอนกรีตธรรมดา	คอนกรีตมวลหนัก
- ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1	10.5	11.0
- หิน	27.6	-
- แบริท์หยาบ	-	41.0
- ทราช	17.6	-
- แบริท์บดละเอียด	-	28.2
- น้ำ	4.8	5.5
- W/C (Water/Cement)	0.5	0.5



รูปที่ 3.15 ปูนซีเมนต์และแร่แบริท์ที่ใช้ในการสร้างคอนกรีต  
(ก) ปูนซีเมนต์ (ข) แร่แบริท์บดละเอียด และ(ค) แร่แบริท์หยาบ



### 3.2.2.3 การผสมคอนกรีต

จัดเตรียมวัสดุส่วนผสมคอนกรีตให้ได้น้ำหนักตามอัตราส่วนผสมคอนกรีตในตารางที่ 3.1 และเทวัสดุส่วนผสมลงในเครื่องผสมคอนกรีต โดยในการสร้างคอนกรีตธรรมดา มีลำดับการเทวัสดุส่วนผสมคอนกรีตตามลำดับ คือ ทราย ปูนซีเมนต์ หิน และน้ำ ส่วนคอนกรีตมวลหนัก มีลำดับการเทวัสดุส่วนผสมคอนกรีตตามลำดับ คือ แบริท์บดละเอียด ปูนซีเมนต์ แบริท์หยาบ และน้ำ โดยตั้งเวลาเครื่องผสมคอนกรีตประมาณ 15 นาที เพื่อให้วัสดุส่วนผสมคอนกรีตเข้ากันได้ อย่างสม่ำเสมอ

### 3.2.2.4 การเทคอนกรีตลงแบบหล่อและบ่มคอนกรีต

เมื่อวัสดุส่วนผสมคอนกรีตเข้ากันได้ได้อย่างสม่ำเสมอ นำไปบรรจุลงในแบบหล่อคอนกรีตซึ่งทาน้ำมันพืชเคลือบไว้ที่ผิวภายในแบบหล่อเพื่อช่วยให้สามารถถอดคอนกรีตออกจากแบบหล่อได้ง่าย ดังแสดงในรูปที่ 3.16 โดยมีขั้นตอนการเทคอนกรีตและบ่มคอนกรีต ดังนี้

- ใช้ที่ตักคอนกรีตตักคอนกรีตลงในแบบหล่อที่ละชั้นสูงประมาณ  $\frac{1}{3}$  ของแบบหล่อคอนกรีต ใช้ค้อนยางเคาะข้างแบบหล่อแต่ละด้านเพื่อเป็นการเขย่าให้คอนกรีตกระจายตัวในแบบหล่ออย่างสม่ำเสมอ ใช้เหล็กกระทุ้งในคอนกรีต 30 ครั้งหรือใช้เครื่องจี้เขย่าคอนกรีต เพื่อเป็นการไล่ฟองอากาศในคอนกรีต แล้วจึงตักคอนกรีตลงในแบบหล่อชั้นถัดไป ทำซ้ำเช่นนี้จนเทคอนกรีตเต็มแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.19

- ใช้ค้อนยางเคาะข้างแบบหล่อแต่ละด้านเพื่อเป็นการเขย่าและไล่ฟองอากาศในคอนกรีต และใช้เกรียงปาดแต่งผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบ



รูปที่ 3.16 การทาน้ำมันพืชเคลือบไว้ที่ผิวภายในแบบหล่อคอนกรีต





รูปที่ 3.17 อุปกรณ์ในการสร้างคอนกรีต



รูปที่ 3.18 การเทคอนกรีตลงในแบบหล่อคอนกรีต



รูปที่ 3.19 การใช้เหล็กกระทู้เพื่อไล่ฟองอากาศในคอนกรีต

- ทิ้งให้คอนกรีตเซตตัวในแบบหล่อเป็นระยะเวลา 3 วัน จึงถอดคอนกรีตออกจากแบบหล่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.20 และ 3.21 โดยใช้ค้อนยางเคาะข้างแบบหล่อเพื่อช่วยให้สามารถถอดคอนกรีตออกได้ง่าย และใช้เกรียงขูดทำความสะอาดเนื้อปูนที่อาจติดอยู่บนแบบหล่อออก เพื่อเตรียมแบบหล่อไว้สำหรับการสร้างคอนกรีตครั้งต่อไป

- นำคอนกรีตที่ถอดออกจากแบบหล่อบรรจุในถังน้ำบ่มคอนกรีต เพื่อบ่มคอนกรีตในน้ำนาน 28 วัน โดยบรรจุน้ำในถังให้มีปริมาณน้ำท่วมทั้งก้อนของคอนกรีต เนื่องจากคอนกรีตยังคงเกิดความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน อาจส่งผลทำให้คอนกรีตเกิดรอยแตกร้าวได้ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาบ่มคอนกรีตในน้ำ นำคอนกรีตออกจากถังน้ำบ่มคอนกรีต และตั้งพักไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เพื่อเตรียมสำหรับการนำไปใช้สำหรับการทดสอบคอนกรีต และการศึกษาหาการกัดกร่อนของคอนกรีตต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 3.22 และ 3.23





รูปที่ 3.20 การเซ็ดตัวของคอนกรีตในแบบหล่อ



รูปที่ 3.21 คอนกรีตที่ถอดออกจากแบบหล่อก่อนนำไปบ่มในน้ำ



รูปที่ 3.22 การบ่มคอนกรีตในน้ำนาน 28 วัน



รูปที่ 3.23 คอนกรีตที่จัดเตรียมไว้สำหรับการวิจัย



### 3.2.3 การทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต

คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักที่นำทดสอบคุณสมบัติ เป็นคอนกรีตที่ผ่านการบ่มน้ำเป็นระยะเวลา 28 วัน และพักให้แห้ง ณ อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 วัน โดยมีการทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีต ดังนี้

#### 3.2.3.1 การหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีต

นำคอนกรีตมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยม 1 ตำแหน่ง และคำนวณหาค่าความหนาแน่นของคอนกรีตจากอัตราส่วนน้ำหนักของคอนกรีตต่อปริมาตรของคอนกรีตในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 การชั่งน้ำหนักเพื่อหาความหนาแน่นของคอนกรีต

#### 3.2.3.2 การทดสอบกำลังอัดคอนกรีต

คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักที่ใช้ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต ควรเป็นคอนกรีตที่มีผิวเรียบ เพื่อให้แรงกดจากเครื่องทดสอบกำลังอัดคอนกรีตสามารถกระจายลงบนผิวคอนกรีตได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้ได้ค่ากำลังอัดคอนกรีตที่ถูกต้อง และนำมาคำนวณค่ากำลังอัดเฉลี่ยของคอนกรีตในหน่วยกิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.25





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.25 เครื่องทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต



รูปที่ 3.26 คอนกรีตที่จัดเตรียมไว้สำหรับการทดสอบกำลังคอนกรีต

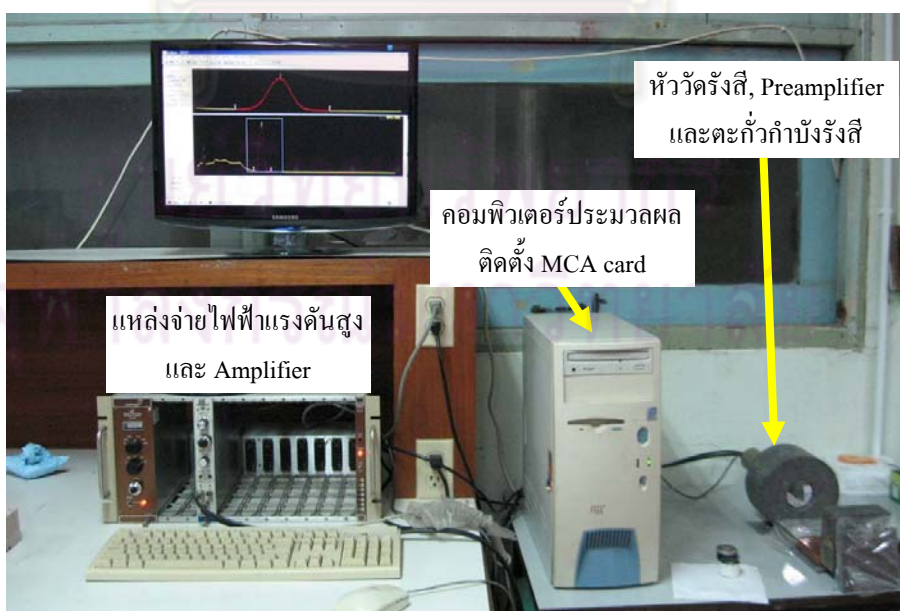


รูปที่ 3.27 ลักษณะคอนกรีตภายหลังการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

### 3.2.3.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

นำคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักตัดเป็นแผ่นหนา 2, 4 และ 6 เซนติเมตรด้วยเครื่องตัดคอนกรีต และนำไปทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 และโคบอลต์-60 ด้วยระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA) ดังแสดงในรูปที่ 3.28 โดยจัดวางต้นกำเนิดรังสีไว้ในตะกั่วกำบังรังสีขนาด 5.0 ซม. x 10.0 ซม. x 10.0 ซม. (กว้าง x ยาว x สูง) ซึ่งเจาะรูตรงกลางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร เพื่อบังคับให้รังสีที่แผ่ออกมาจากต้นกำเนิดรังสีมีลักษณะเป็นลำเส้นตรงและมีทิศทางเข้าสู่หัววัดรังสี ซึ่งหุ้มด้วยตะกั่วกำบังรังสีรูปวงแหวนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางวงใน 6 เซนติเมตร หนา 5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตรเพื่อป้องกันรังสีเข้าสู่หัววัดทางด้านข้าง โดยมีระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดเป็นระยะ 35 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.29 ถึง 3.30 และทำการนับรังสีสำหรับต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ซึ่งมีค่าฟิสิกพลังงานที่ 0.662 MeV เป็นเวลา 120 วินาที จำนวน 3 ครั้ง ส่วนโคบอลต์-60 ซึ่งมีค่าฟิสิกพลังงานที่ 1.170 และ 1.330 MeV ทำการนับรังสีเป็นเวลา 300 วินาที จำนวน 3 ครั้ง เนื่องจากต้นกำเนิดรังสีซีเซียม-137 ที่ใช้ในการวิจัยมีความแรงแรงรังสี (Activity) สูงกว่าโคบอลต์-60

ทั้งนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตแต่ละชนิดสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนค่านับรังสีที่ทะลุผ่านคอนกรีต ( $I_x/I_0$ ) เทียบกับความหนาของคอนกรีต (X) ที่พลังงาน 0.662, 1.17 และ 1.33 MeV ตามลำดับ เมื่อ  $I_x$  คือ ค่านับรังสีที่ความหนาคอนกรีต X และ  $I_0$  คือค่านับรังสีเมื่อไม่มีคอนกรีตกำบังรังสี

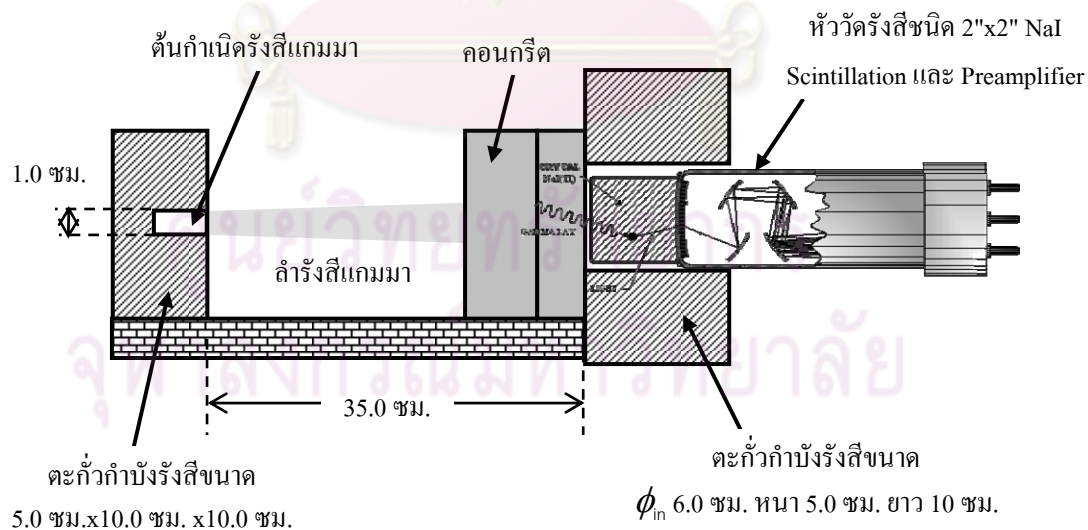


รูปที่ 3.28 ระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมาแบบหลายช่อง (MCA)





รูปที่ 3.29 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

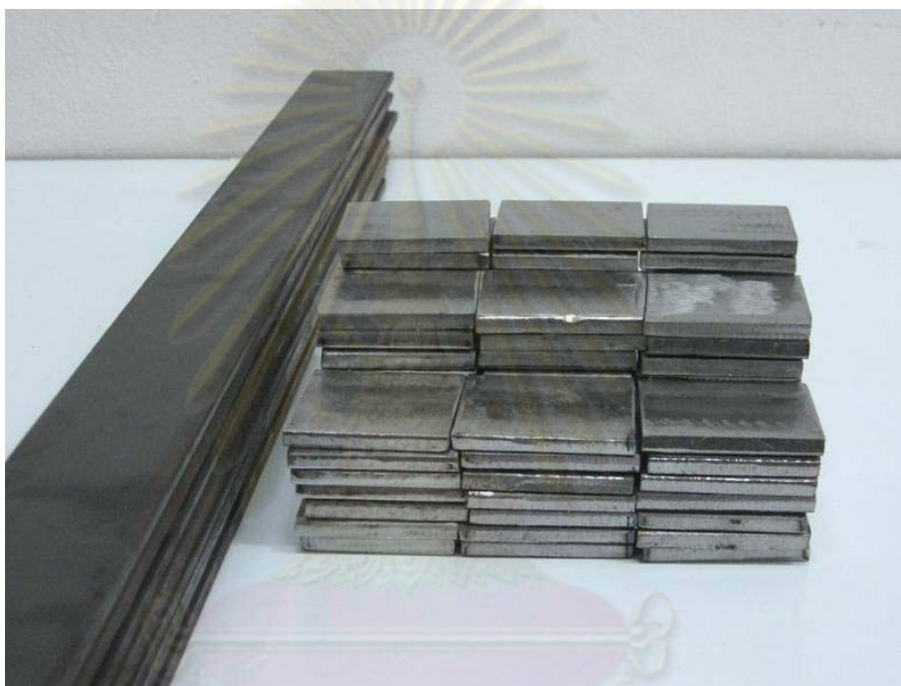


รูปที่ 3.30 แผนภาพการจัดวางอุปกรณ์สำหรับการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

### 3.2.4 การเตรียมโลหะผสม

#### 3.2.4.1 การเตรียมโลหะและอัตราส่วนผสมโลหะ

เลือกใช้แผ่นเหล็กเกรด SS400 (SS41) เป็นวัสดุโลหะเหล็กในการวิจัย โดยนำแผ่นเหล็กมาขัดชั้นน้ำมันที่ผิวแผ่นเหล็กออกด้วยเครื่องเจียรเหล็ก และนำมาตัดด้วยเครื่องตัดเหล็กให้ได้แผ่นเหล็กขนาดประมาณ 4.5 ซม.x 5.0 ซม.x 0.6 ซม. (กว้างxยาวxหนา) ซึ่งจะได้น้ำหนักประมาณ 100 กรัม และขัดแต่งผิวเหล็กให้เรียบด้วยเครื่องเจียรเหล็ก ดังแสดงในรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 การจัดเตรียมโลหะเหล็ก

เลือกใช้แท่งโลหะตะกั่ว ดีบุกและบิสมัทเกรดอุตสาหกรรมมีค่าความบริสุทธิ์ประมาณ 99% เป็นวัสดุในการวิจัย โดยนำมาตัดเป็นก้อนด้วยเครื่องตัดเหล็ก ริดให้เป็นแผ่นหนาประมาณ 0.1 เซนติเมตรด้วยเครื่องริดแผ่นโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.32 และใช้กรรไกรตัดเป็นแผ่นให้ได้น้ำหนักตามต้องการ สำหรับการเตรียมโลหะบิสมัท เนื่องจากโลหะบิสมัทมีลักษณะทางกายภาพที่เปราะซึ่งไม่สามารถริดเป็นแผ่นได้ จึงนำมาบดด้วยก้อนเหล็กให้เป็นก้อนหยาบขนาด 0.5-1.0 เซนติเมตร และนำมาชั่งน้ำหนักตามต้องการด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักทศนิยมสี่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 3.33 ทั้งนี้ อัตราส่วนผสมของโลหะหลอมเหลวแสดงในตารางที่ 3.2





รูปที่ 3.32 เครื่องรีดแผ่นโลหะ



รูปที่ 3.33 การจัดเตรียมโลหะตะกั่ว บิสมัท และดีบุก

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนผสมโลหะหลอมเหลว (ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

อัตราส่วนผสมโลหะ เหล็กต่อตะกั่ว ดีบุก และบิสมีท์ (Fe:LM)	น้ำหนักโลหะ (กรัม)			
	เหล็ก	ตะกั่ว	ดีบุก	บิสมีท์
0 : 100 wt%	0.0	150.0	150.0	150.0
25 : 75 wt%	110.0	110.0	110.0	110.0
50 : 50 wt%	210.0	70.0	70.0	70.0
75 : 25 wt%	300.0	33.3	33.3	33.3
100 : 0 wt%	393.7	0.0	0.0	0.0

### 3.2.5 การศึกษาหาการกัดกร่อนของคอนกรีต

การหาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีทั้ง 2 ชนิดจากอันตรกิริยากับโลหะผสมหลอมเหลวแบบเฉียบพลัน โดยการเทโลหะผสมเหล็กตะกั่ว ดีบุก และบิสมีท์หลอมเหลวที่อัตราส่วนผสมต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.2 และตรวจสอบการกัดกร่อนโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีและการผ่าคอนกรีต โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.2.5.1 การหลอมโลหะและเทโลหะหลอมเหลว

การหลอมโลหะและเทโลหะหลอมเหลวมีขั้นตอนดังนี้

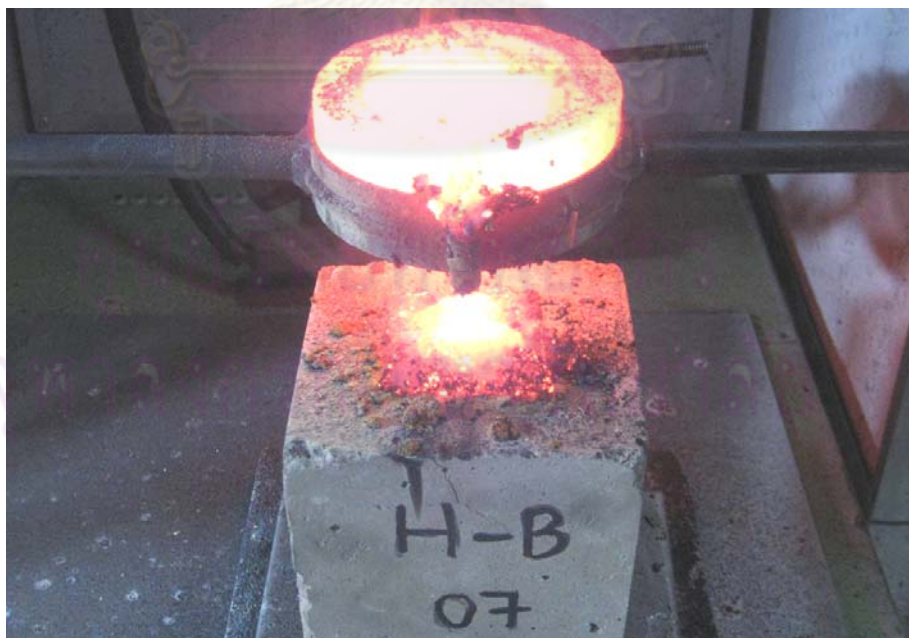
- จัดวางคอนกรีตไว้ด้านล่างเข้าหลอมโลหะให้มีระยะห่างประมาณ 2 ซม. ซึ่งเป็นระยะห่างที่สามารถเทโลหะหลอมเหลวลงตรงกลางหลุมคอนกรีตซึ่งมีขนาด 5.0 ซม. x 5.0 ซม. x 2.0 ซม. (กว้างxยาวxสูง) ได้พอดี ดังแสดงในรูปที่ 3.34

- หลอมโลหะเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก และบิสมีท์ตามอัตราส่วนผสมโลหะเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุก และบิสมีท์ในตารางที่ 3.2 ด้วยเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่สร้างขึ้นโดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ที่ 250 แอมแปร์ และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการหลอมโลหะผสม

- เมื่อโลหะผสมหลอมเหลวเข้ากันสม่ำเสมอแล้ว เทโลหะหลอมเหลวลงบนพื้นผิวคอนกรีตที่จัดวางไว้ สังเกตลักษณะภายนอกของคอนกรีตก่อนและหลังเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสมหลอมเหลว และนำออกมาพักไว้จนอุณหภูมิของโลหะหลอมเหลวและคอนกรีตลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้องและนำไปหาการกัดกร่อนโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีและวิธีการผ่าคอนกรีตดังแสดงในรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.34 การจัดวางคอนกรีตและโลหะเหล็ก

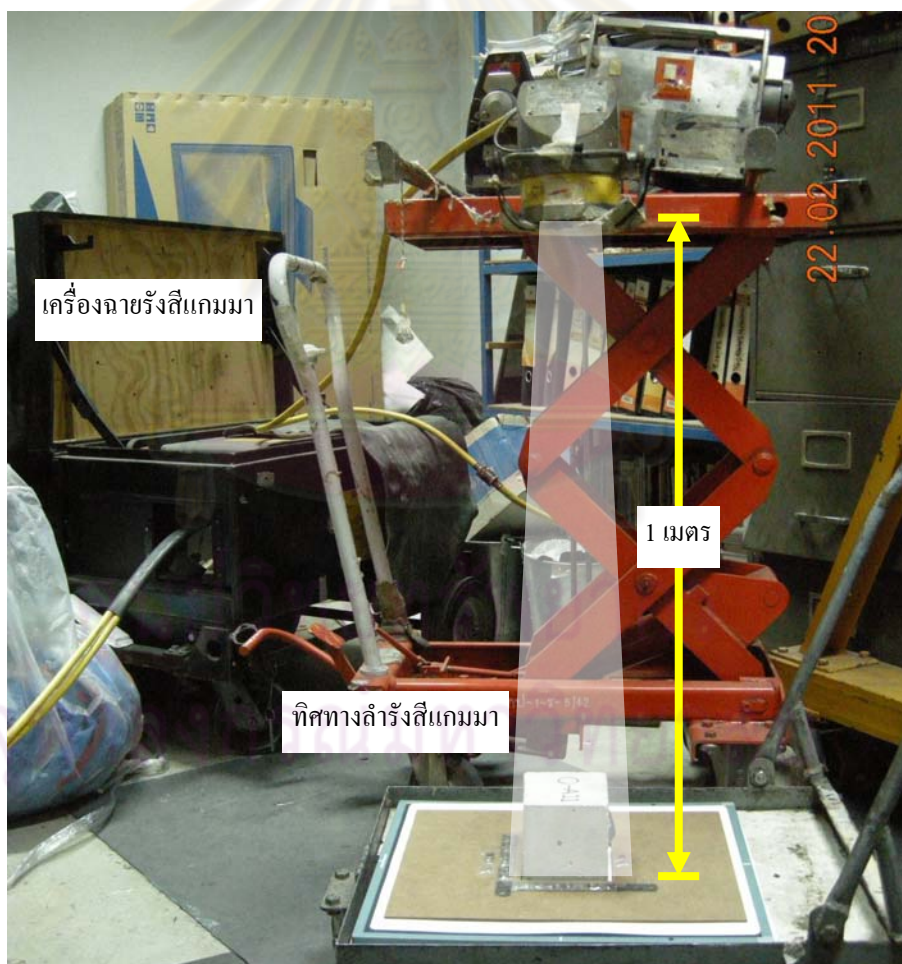


รูปที่ 3.35 การเทโลหะหลอมเหลวลงบนคอนกรีตมวลหนัก



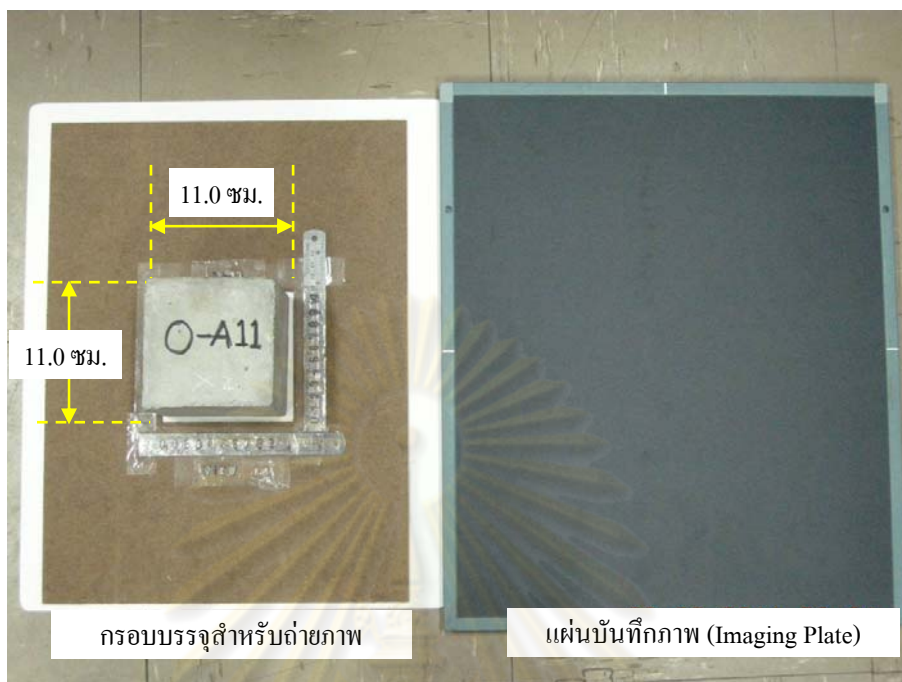
### 3.2.5.2 การตรวจสอบด้วยเทคนิคการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

การหาการกักตร้อนของคอนกรีตด้วยการถ่ายภาพด้วยรังสี เป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่างวิธีหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้ ใช้เครื่องฉายรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ซึ่งมีพลังงานสูงเพียงพอที่สามารถทะลุผ่านตัวอย่างคอนกรีตหนา 10 เซนติเมตรได้ โดยการจัดวางตัวอย่างคอนกรีตในกรอบบรรจุสำหรับถ่ายภาพซึ่งทำจากไม้ขนาด 30.0 ซม.x 40.0 ซม.(กว้างxยาว) เจาะเป็นรูตรงกลางขนาด 11.0 ซม.x11.0 ซม. เพื่อใช้เป็นช่องว่างสำหรับควบคุมตำแหน่งการวางตัวอย่างคอนกรีตบนแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) โดยจัดวางแผ่นบันทึกภาพห่างจากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 เป็นระยะห่างประมาณ 1 เมตร ซึ่งทำให้ได้ภาพที่คมชัด ดังแสดงในรูปที่ 3.36 และทำการถ่ายภาพหาการกักตร้อนของคอนกรีตทางด้านข้าง 2 ด้าน คือ ระนาบแกน YZ และ XZ ดังแสดงในรูปที่ 3.37 และ 3.38

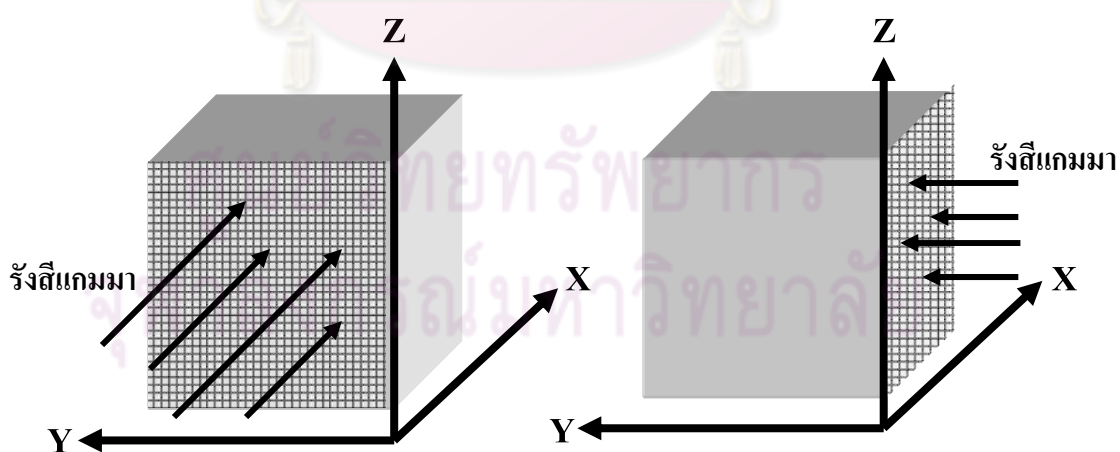


รูปที่ 3.36 การจัดวางอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา





รูปที่ 3.37 กรอบบรรจุและแผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate)



รูปที่ 3.38 การถ่ายภาพด้วยรังสีตัวอย่างคอนกรีตในระนาบ YZ และ XZ



รูปที่ 3.39 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพ



รูปที่ 3.40 ระบบโปรแกรมประมวลผลภาพถ่ายด้วยรังสี

### 3.2.5.3 การตรวจสอบด้วยสายตา

การหาการกัดกร่อนของคอนกรีตด้วยสายตาใช้วิธีการผ่าคอนกรีตเป็นการตรวจสอบคอนกรีตโดยวิธีทำลายตัวอย่างเพื่อศึกษาลักษณะการกัดกร่อนคอนกรีต โดยใช้เครื่องตัดคอนกรีตซึ่งต้องใช้น้ำฉีดบนคอนกรีตขณะทำการตัดตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.41 แต่เนื่องจากเครื่องตัดคอนกรีตที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ไม่สามารถตัดโลหะผสมลอมเหลวที่อยู่ในคอนกรีตได้ จึงต้องนำคอนกรีตมาผ่าครึ่งโดยรอบเฉพาะส่วนที่เป็นเนื้อคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 3.42 และจึงนำมาผ่าครึ่งส่วนที่เป็นโลหะผสมลอมเหลวที่อยู่ในคอนกรีตด้วยเครื่องตัดโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 3.43 ซึ่งขั้นตอนการผ่าคอนกรีตนี้อาจทำให้คอนกรีตเกิดความเสียหายหรือแตกร้าวได้ ดังนั้นตัวอย่างคอนกรีตที่นำมาตรวจสอบโดยการผ่าคอนกรีตนี้เป็นคอนกรีตที่ได้รับการตรวจสอบด้วยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาแล้ว



รูปที่ 3.41 เครื่องตัดคอนกรีต





รูปที่ 3.42 การผ่าตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องตัดคอนกรีต



รูปที่ 3.43 การผ่าตัวอย่างคอนกรีตด้วยเครื่องตัดโลหะ



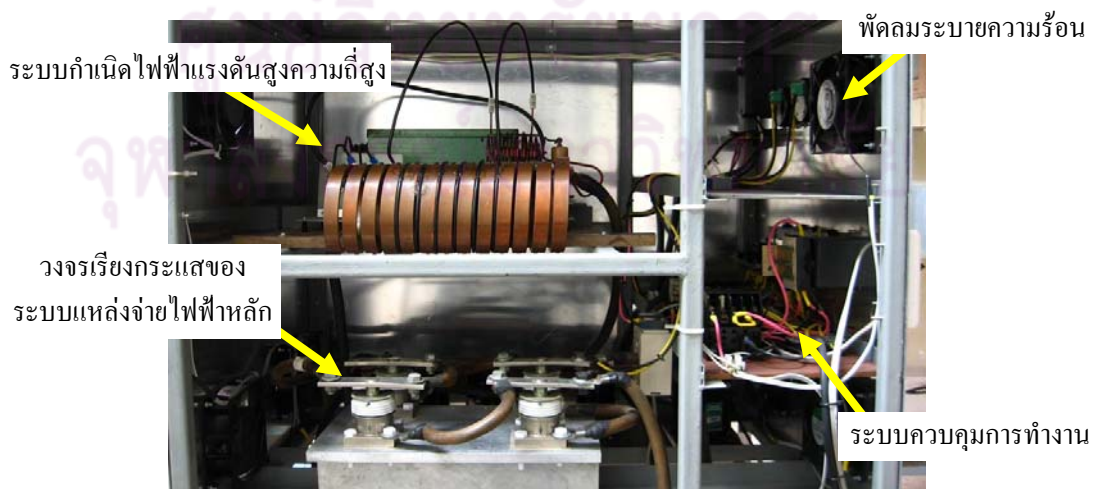
## บทที่ 4 ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการทดสอบเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา

จากการทดสอบ พบว่า เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่สร้างขึ้นมีค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุด 13 กิโลวัตต์ สามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 45-300 แอมแปร์ มีระยะห่างในการอาร์กพลาสมาสูงสุดประมาณ 3 เซนติเมตรเมื่อใช้ต้นกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก และมีระยะลดลงเหลือ 1 เซนติเมตรเมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเพียงอย่างเดียว โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานที่ 250 แอมแปร์ มีแรงดันไฟฟ้าขณะอาร์ก 40 โวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2 ลิตรต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.4



รูปที่ 4.1 เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.2 ระบบไฟฟ้าภายในเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา



รูปที่ 4.3 การจุดอาร์กพลาสมาก๊าซ



รูปที่ 4.4 เบ้าหลอมในตู้กำบังรังสีความร้อนจากการหลอมโลหะ

ในการทดสอบการหลอมโลหะเหล็ก (Fe), เซอร์โคเนียม (Zr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 1538, 1855 และ 2633 องศาเซลเซียสตามลำดับ และทดสอบหลอมโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท พบว่า สามารถหลอมโลหะดังกล่าวได้ แต่พบปัญหาจากการทดลอง คือ โลหะเกิดการเย็นตัวเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากทำการทดลองในสภาพบรรยากาศปกติและมีผลการรบกวนของอากาศและกระแสลม ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างธาตุโลหะกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนส่งผลทำให้สามารถหลอมเหลวโลหะได้ปริมาณไม่เกินครั้งละ 25-30 ลบ.ซม. และต้องป้อนโลหะเข้าไปอย่างต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ถึง 4.9



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
รูปที่ 4.5 การหลอมโลหะเหล็ก (Fe) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น





รูปที่ 4.6 การหลอมโลหะเซอร์โคเนียม (Zr) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 4.7 การหลอมโลหะโมลิบดีนัม (Mo) และออกไซด์ที่เกิดขึ้น





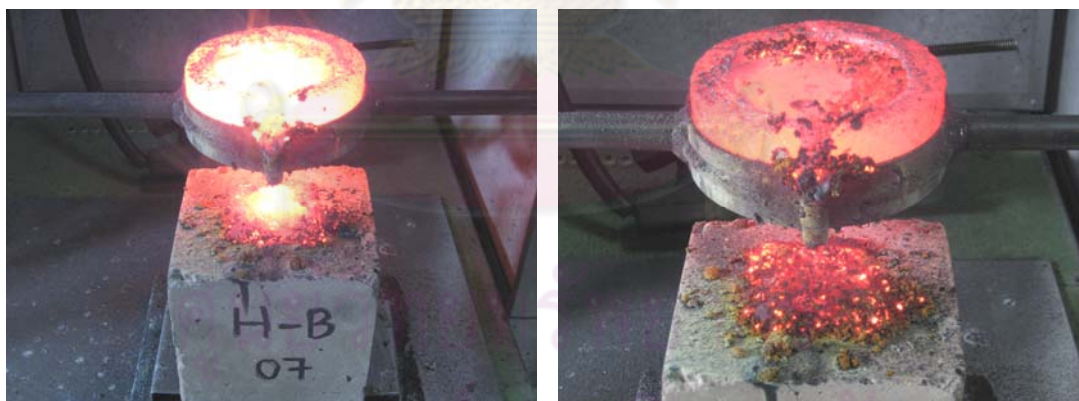
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.8 การหลอมโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท (Fe:LM = 50:50 wt%)

(ก) การเทโลหะผสมหลอมเหลวลงบนคอนกรีต

(ข) ออกไซด์โลหะผสมบนคอนกรีต



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.9 การหลอมโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท (Fe:LM = 75:25 wt%)

(ก) การเทโลหะผสมหลอมเหลวลงบนคอนกรีต

(ข) ออกไซด์โลหะผสมบนคอนกรีต

## 4.2 ผลการทดสอบคอนกรีตกำลังรั้งสี่ที่เตรียมขึ้น

### 4.2.1 กำลังอัดของคอนกรีต

จากการทดสอบ พบว่า คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าที่ออกแบบไว้ 350 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ( $\text{kg/cm}^2$ ) โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาอยู่ในช่วง 350.1-489.3  $\text{kg/cm}^2$  และมีค่าเฉลี่ยรวม 417.5  $\text{kg/cm}^2$  ส่วนคอนกรีตมวลหนักมีค่ากำลังอัดคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อยอยู่ในช่วง 352.3-430.8  $\text{kg/cm}^2$  และมีค่าเฉลี่ยรวม 378.4  $\text{kg/cm}^2$  ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่ากำลังอัดของคอนกรีต ( $\text{kg/cm}^2$ )

ชนิดคอนกรีต	คอนกรีต หมายเลข	ค่ากำลังอัด คอนกรีต ( $\text{kg/cm}^2$ )	ค่ากำลังอัด คอนกรีตเฉลี่ย ( $\text{kg/cm}^2$ )	ค่าเฉลี่ยรวม ( $\text{kg/cm}^2$ )
คอนกรีต ธรรมดา	OA-01	357.3	355.3	417.5
	OA-02	358.6		
	OA-03	350.1		
	OB-01	473.1	414.2	
	OB-02	351.5		
	OB-03	417.9		
	OC-01	481.3	482.9	
	OC-02	478.0		
	OC-03	489.3		
คอนกรีต มวลหนัก	HA-01	404.5	385.6	378.4
	HA-02	358.8		
	HA-03	393.5		
	HB-01	353.8	353.8	
	HB-02	352.3		
	HB-03	355.2		
	HC-01	430.8	395.8	
	HC-02	355.8		
	HC-03	400.8		

#### 4.2.2 ความหนาแน่นของคอนกรีต

จากการทดสอบ พบว่า คอนกรีตมวลหนักมีค่าความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา 1.32 เท่า โดยคอนกรีตธรรมดามีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.52-2.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ( $\text{g/cm}^3$ ) และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยรวม  $2.60 \text{ g/cm}^3$  ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ส่วนคอนกรีตมวลหนักมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง  $3.26\text{-}3.57 \text{ g/cm}^3$  และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยรวม  $3.43 \text{ g/cm}^3$  ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตธรรมดา (ความหนาแน่นเฉลี่ยรวม  $2.60 \text{ g/cm}^3$ )

คอนกรีตหมายเลข	น้ำหนัก (gram)	ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )	ความหนาแน่นเฉลี่ย ( $\text{g/cm}^3$ )	
OA-04	2480	2.62	2.59	
OA-05	2490	2.56		
OA-06	2490	2.54		
OA-07	2430	2.55		
OA-08	2390	2.62		
OA-09	2420	2.65		
OA-10	2430	2.54		
OA-11	2510	2.56		
OA-12	2510	2.65		
OA-13	2530	2.64		
OB-04	2480	2.61		2.60
OB-05	2490	2.62		
OB-06	2490	2.62		
OB-07	2430	2.56		
OB-08	2390	2.52		
OB-09	2420	2.55		
OB-10	2430	2.56		
OB-11	2510	2.64		
OB-12	2510	2.64		
OB-13	2530	2.66		

ตารางที่ 4.2 (ต่อ)

คอนกรีตหมายเลข	น้ำหนัก (gram)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )
OC-04	2490	2.62	2.61
OC-05	2390	2.52	
OC-06	2460	2.59	
OC-07	2470	2.60	
OC-08	2510	2.64	
OC-09	2510	2.64	
OC-10	2520	2.65	
OC-11	2490	2.62	
OC-12	2470	2.60	
OC-13	2510	2.64	

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนัก (ความหนาแน่นเฉลี่ยรวม 3.43 g/cm<sup>3</sup>)

คอนกรีตหมายเลข	น้ำหนัก (gram)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )
HA-04	3390	3.57	3.50
HA-05	3280	3.45	
HA-06	3320	3.49	
HA-07	3390	3.57	
HA-08	3390	3.57	
HA-09	3310	3.48	
HA-10	3330	3.51	
HA-11	3290	3.46	
HA-12	3190	3.36	
HA-13	3380	3.56	



ตารางที่ 4.3 (ต่อ)

คอนกรีตหมายเลข	น้ำหนัก (gram)	ความหนาแน่น (g/cm <sup>3</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	
HB-04	3310	3.48	3.42	
HB-05	3110	3.27		
HB-06	3210	3.38		
HB-07	3290	3.46		
HB-08	3290	3.46		
HB-09	3250	3.42		
HB-10	3250	3.42		
HB-11	3290	3.46		
HB-12	3290	3.46		
HB-13	3210	3.38		
HC-04	3100	3.26		3.38
HC-05	3190	3.36		
HC-06	3220	3.39		
HC-07	3250	3.42		
HC-08	3300	3.47		
HC-09	3120	3.28		
HC-10	3290	3.46		
HC-11	3280	3.45		
HC-12	3110	3.27		
HC-13	n/a	n/a		

หมายเหตุ ปริมาตรคอนกรีตซึ่งมีหลุมอยู่ตรงกลางเท่ากับ 950 ลบ.ซม.

#### 4.2.3 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา

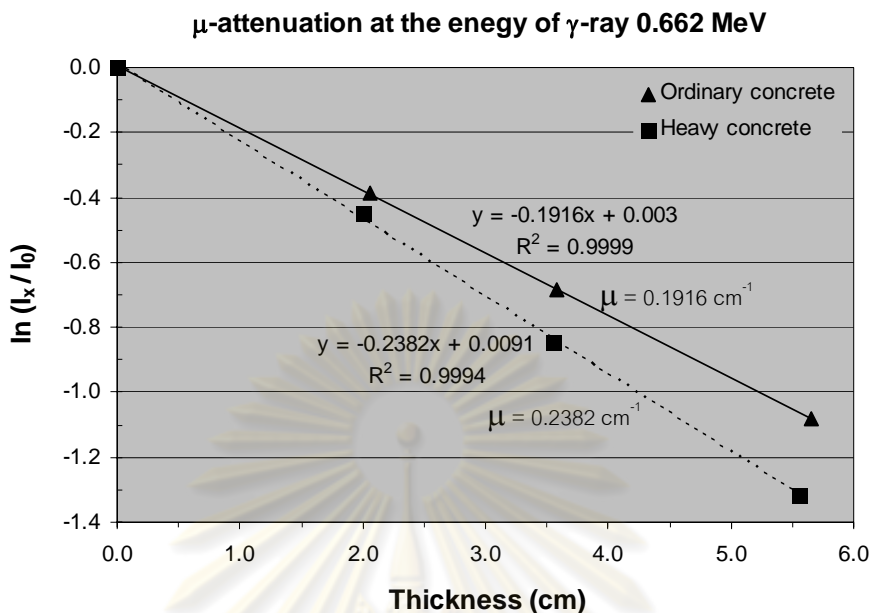
##### 4.2.3.1 พลังงานรังสีแกมมา 0.662 MeV

จากการทดสอบ พบว่า อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 พลังงาน 0.662 MeV ที่ทะลุผ่านคอนกรีตมวลหนักมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยคอนกรีตธรรมดาความหนา 5.650 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีได้ 2.95 เท่า (1103/374) และคอนกรีตมวลหนักความหนา 5.558 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีได้ 3.72 เท่า (1103/296) ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ( $\mu$ ) ของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักเท่ากับ  $0.1916$  และ  $0.2382 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาคอนกรีตเท่ากัน 5.0 เซนติเมตร โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา พบว่า คอนกรีตมวลหนักสามารถลดทอนรังสีได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา 1.26 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.10

ตารางที่ 4.4 อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาซีเซียม-137 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ พลังงาน 0.662 MeV

ชนิดคอนกรีต	ความหนา คอนกรีต (cm)	อัตราการนับ (counts/120 sec) ครั้งที่			อัตราการนับ เฉลี่ย (counts/sec)
		1	2	3	
ไม่มีคอนกรีต	0	329593	330726	332223	1103
คอนกรีตธรรมดา	2.066	224252	224443	224175	748
	3.584	167940	166944	166420	557
	5.650	112727	112546	111248	374
คอนกรีตมวลหนัก	2.002	211539	211692	211179	705
	3.556	141503	141967	141724	472
	5.558	88727	88473	88840	296



รูปที่ 4.10 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 0.662 MeV

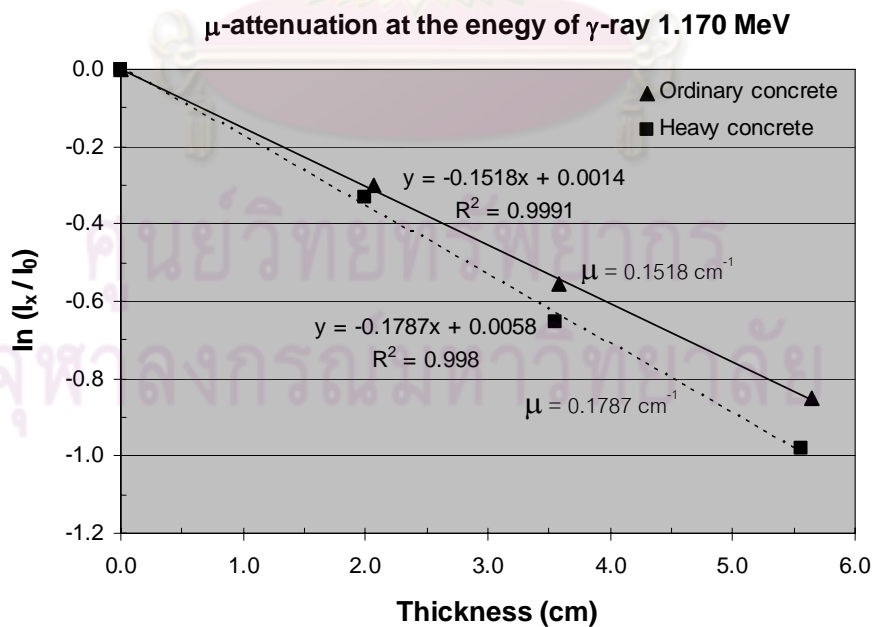
#### 4.2.3.1 พลังงานรังสีแกมมา 1.170 และ 1.330 MeV

จากการทดสอบ พบว่า อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 พลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV ที่ทะลุผ่านคอนกรีตมวลหนักมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาเล็กน้อย เนื่องจากรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นจึงสามารถทะลุผ่านคอนกรีตได้มากขึ้น โดยที่ คอนกรีตธรรมดา ความหนา 5.650 เซนติเมตรสามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV ได้ 2.34 เท่า (96/41) และ 2.14 เท่า (92/43) ตามลำดับ และคอนกรีตมวลหนักความหนา 5.558 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV ได้ 2.67 เท่า (96/36) และ 2.49 เท่า(92/37) ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ( $\mu$ ) ของคอนกรีตธรรมดาที่พลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV เท่ากับ 0.1518 และ 0.1340  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ( $\mu$ ) ของคอนกรีตมวลหนักที่พลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV เท่ากับ 0.1787 และ 0.1654  $\text{cm}^{-1}$  ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาคอนกรีตเท่ากัน 5 เซนติเมตร โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา พบว่า คอนกรีตมวลหนักสามารถลดทอนรังสีได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา 1.14 และ 1.17 เท่า ที่พลังงาน 1.170 และ 1.330 MeV ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และ 4.12

ตารางที่ 4.5 อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ พลังงาน 1.170 MeV

ชนิดคอนกรีต	ความหนา (cm)	อัตราการนับ (counts/300 sec) ครั้งที่			อัตราการนับเฉลี่ย (counts/sec)
		1	2	3	
ไม่มีคอนกรีต	0	28805	28830	28993	96
คอนกรีตธรรมดา	2.066	21168	21223	21251	71
	3.584	16086	16123	17156	55
	5.650	12075	12471	12639	41
คอนกรีตมวลหนัก	2.002	20487	20767	20597	69
	3.556	15038	14817	15228	50
	5.558	10230	11022	10910	36

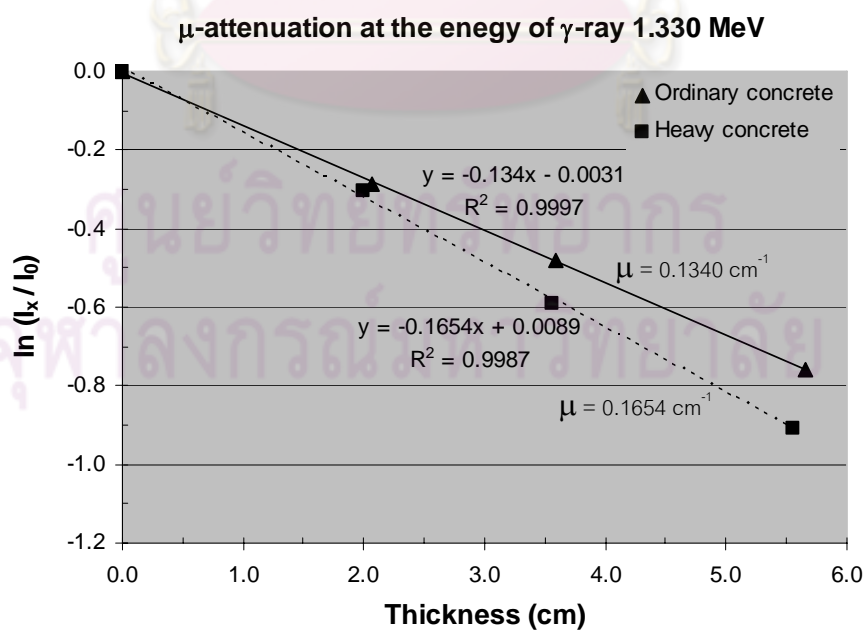


รูปที่ 4.11 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 1.170 MeV



ตารางที่ 4.6 อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ที่ทะลุผ่านคอนกรีต ณ พลังงาน 1.330 MeV

ชนิดคอนกรีต	ความหนา (cm)	อัตราการนับ (counts/300 sec)			อัตราการนับเฉลี่ย (counts/sec)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
-	0	27382	27138	28070	92
คอนกรีตธรรมดา	2.066	20494	20826	20801	69
	3.584	17010	17005	17204	57
	5.650	12829	12848	12898	43
คอนกรีตมวลหนัก	2.002	20353	20365	20074	68
	3.556	15330	15292	15362	51
	5.558	11078	11122	11025	37



รูปที่ 4.12 กราฟการลดทอนรังสีแกมมาของคอนกรีตที่พลังงาน 1.330 MeV

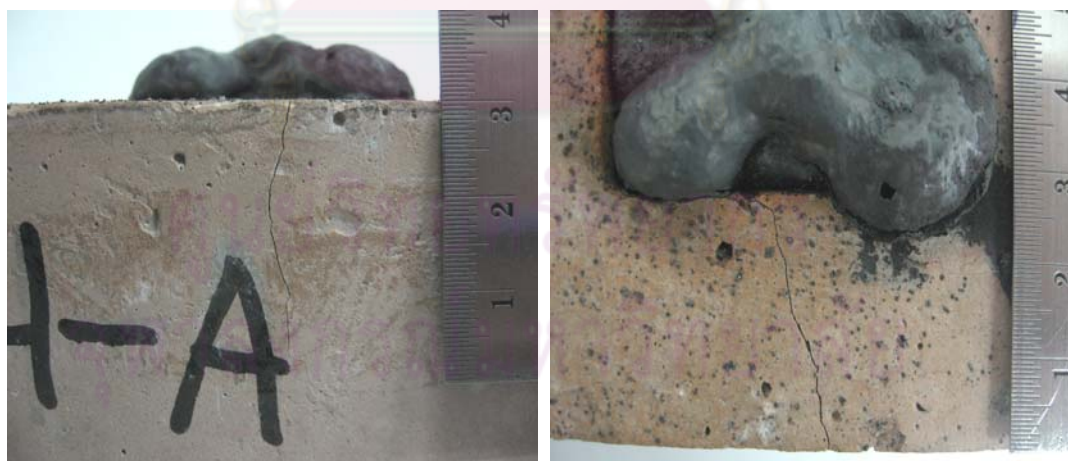
#### 4.1 การหาการกัดกร่อนของคอนกรีต

##### 4.3.1 ผลการตรวจสอบโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

จากการทดลอง พบว่า คอนกรีตมวลหนักเกิดรอยแตกร้าวขึ้นได้เมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว แต่ไม่พบรอยแตกร้าวในคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุก และบิสมัทหลอมเหลว (Fe:LM wt.%) พบว่า คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกัดกร่อนลงไปเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญ และคอนกรีตทั้งสองชนิดมีการกัดกร่อนมากที่สุดเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะที่อัตราส่วนผสม Fe 100 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะที่อัตราส่วนผสม LM 100 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ถึง 4.17

เมื่อพิจารณาลักษณะของโลหะผสมหลอมเหลวบนคอนกรีต พบว่า โลหะหลอมเหลวมีการกระจายบนพื้นผิวคอนกรีตไม่สม่ำเสมอเนื่องจากมีโพรงอากาศอยู่ในโลหะผสมหลอมเหลว โดยมีโพรงอากาศกระจายอยู่มากที่อัตราส่วนโลหะผสม Fe :LM เท่ากับ 75 : 25 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 และพบว่ามีลักษณะแยกเป็นชั้นมากขึ้นเมื่อมีปริมาณโลหะ LM มากขึ้นที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50 :50 และ 25 :75 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.23 แต่ไม่พบโพรงอากาศที่อัตราส่วนโลหะผสม LM 100 wt.%

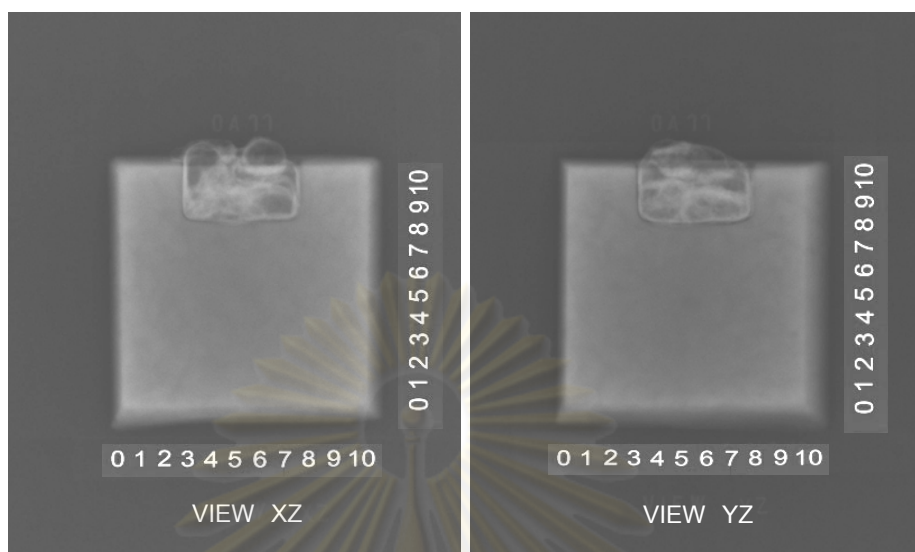


(ก)

(ข)

รูปที่ 4.13 รอยแตกร้าวในคอนกรีตมวลหนักเมื่อกระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว

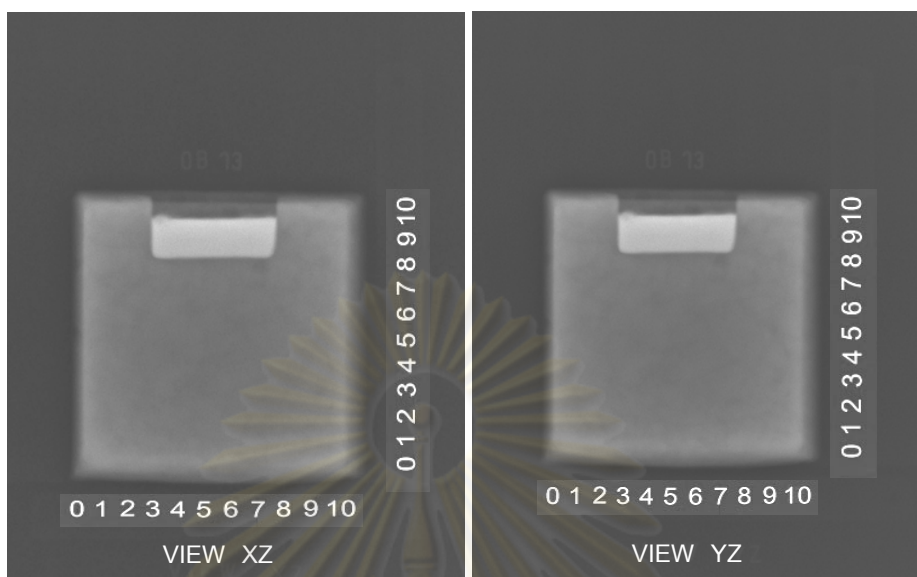
(ก) มองด้านข้าง และ (ข) มองด้านบน



รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดา  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะหนักหลอมเหลว 100 wt.%



รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะหนักหลอมเหลว 100 wt.%

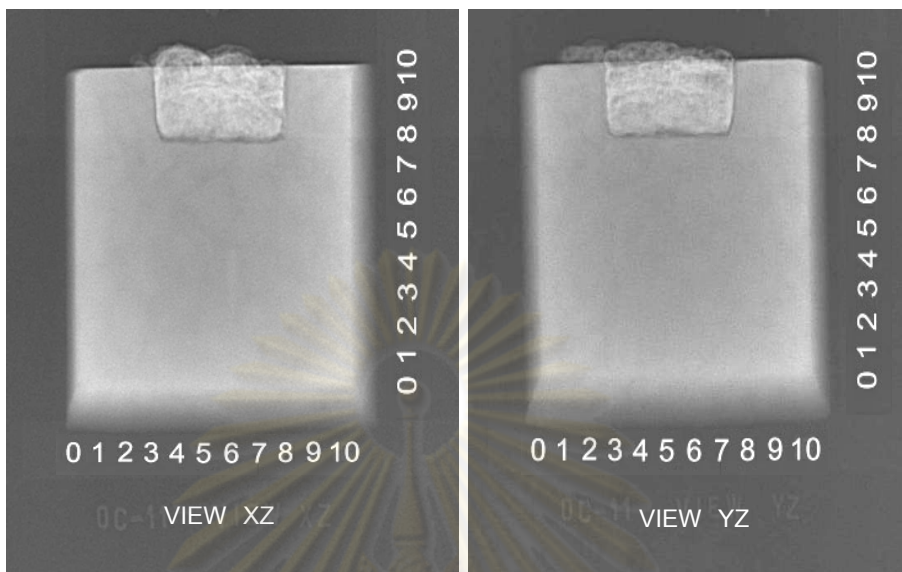


**รูปที่ 4.16** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดา  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสม LM 100 wt.%



**รูปที่ 4.17** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสม LM 100 wt.%

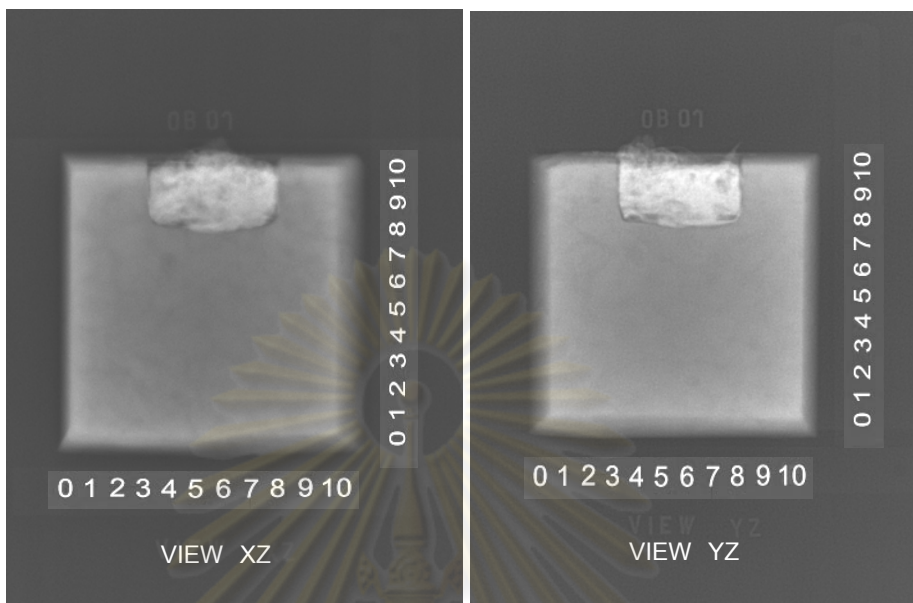




**รูปที่ 4.18** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดา  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 75:25 wt.%



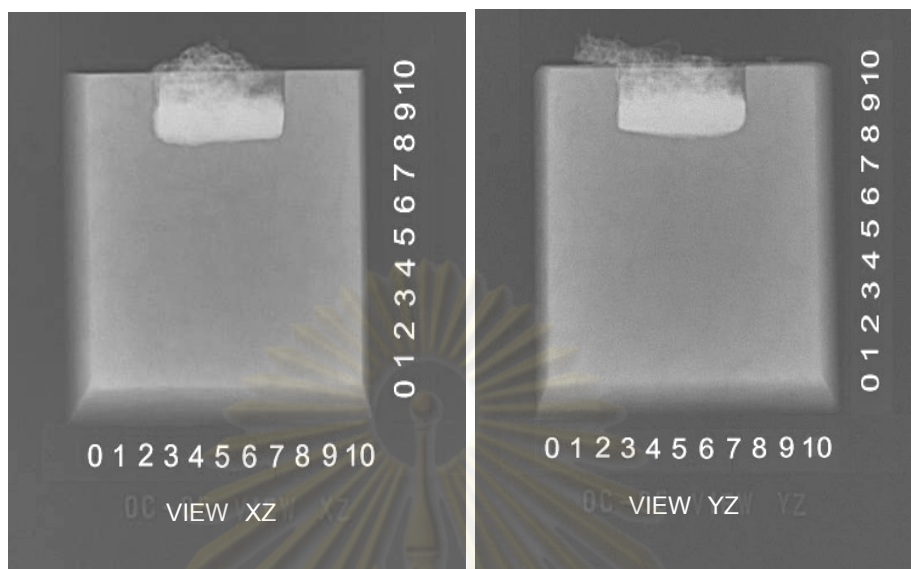
**รูปที่ 4.19** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 75:25 wt.%



**รูปที่ 4.20** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดา  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.%



**รูปที่ 4.21** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.%



**รูปที่ 4.22** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตธรรมดา  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 25:75 wt.%

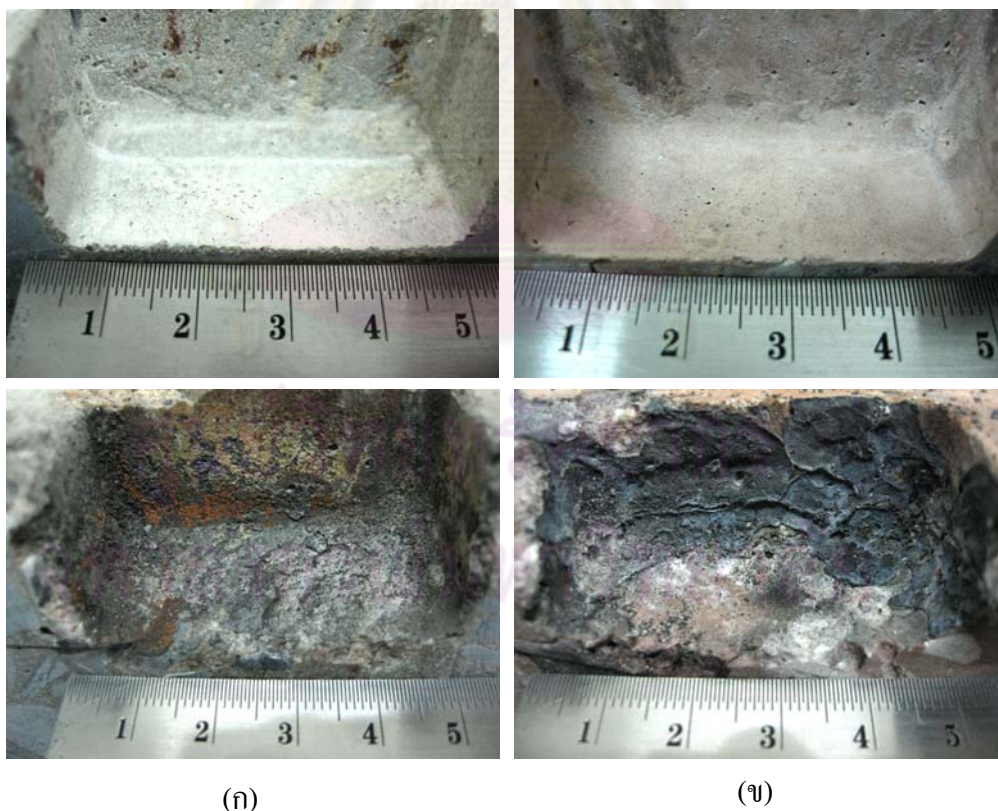


**รูปที่ 4.23** ภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของคอนกรีตมวลหนัก  
เมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะผสมที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 25:75 wt.%

#### 4.3.2 ผลการตรวจสอบโดยวิธีการตรวจสอบด้วยสายตา

จากการผ่าคอนกรีต พบว่า เมื่อคอนกรีตเกิดอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกัดกร่อนที่ระดับพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ลักษณะการกัดกร่อนของคอนกรีตเป็นแบบการกัดกร่อนทั่วผิวหน้าของคอนกรีตที่กระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว โดยการกัดกร่อนบนพื้นผิวคอนกรีตมวลหนักมีลักษณะเป็นแผ่นหนากว่าคอนกรีตธรรมดาดังแสดงในรูปที่ 4.24 และคอนกรีตมีการกัดกร่อนน้อยที่สุดที่อัตราส่วนผสมโลหะ Fe: LM เท่ากับ 0:100 wt.% ดังแสดงในรูปที่ 4.25 และ 4.26

เมื่อพิจารณาลักษณะโลหะผสมหลอมเหลวบนคอนกรีตทั้ง 2 ชนิด พบว่า มีโพรงอากาศอยู่ในโลหะผสมหลอมเหลวเนื่องจากโลหะหลอมเหลวเย็นตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดออกไซด์โลหะระหว่างการเทโลหะหลอมเหลวบนคอนกรีต โดยมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่มากที่อัตราส่วนโลหะผสม Fe :LM เท่ากับ 50 : 50 wt.% แต่ไม่พบโพรงอากาศที่อัตราส่วนโลหะผสม LM 100 wt.% นอกจากนี้ พบรอยแตกร้าวในคอนกรีตมวลหนักแต่ไม่พบในคอนกรีตธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.24 ลักษณะพื้นผิวคอนกรีตก่อนและหลังเกิดอันตรกิริยากับโลหะเหล็กหลอมเหลว 100 wt.%

(ก) คอนกรีตธรรมดา และ(ข) คอนกรีตมวลหนัก





(ก)

(ข)

รูปที่ 4.25 ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับ โลหะเหล็กหลอมเหลว 100 wt.%

(ก) คอนกรีตธรรมดา และ (ข) คอนกรีตมวลหนัก



(ก)

(ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.26 ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสม LM 100 wt.%

(ก) คอนกรีตธรรมดา และ (ข) คอนกรีตมวลหนัก



(ก)

(ข)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4.27 ผลการผ่าคอนกรีตเมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะผสม Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.%

(ก) คอนกรีตธรรมดา และ (ข) คอนกรีตมวลหนัก



## บทที่ 5

### วิจารณ์ผลการวิจัย สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 วิจารณ์ผลการวิจัย

##### 5.1.1 การหาการกัดกร่อนของคอนกรีต

จากการหาการกัดกร่อนของคอนกรีตโดยหลอมโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุกและบิสมัทหลอมเหลวด้วยเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่ค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 250 แอมแปร์ มีแรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ อัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2 ลิตรต่อนาที และทำการศึกษาการกัดกร่อนของพื้นผิวคอนกรีตจากอันตรกิริยากับโลหะผสมหลอมเหลวปริมาตร 50 ลบ.ซม. แบบเฉียบพลัน พบว่า จากการตรวจสอบโดยวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสี คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกัดกร่อนลงไปเล็กน้อย แต่ไม่มีผลต่อการกัดกร่อนอย่างมีนัยสำคัญเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็กต่อตะกั่ว ดีบุก และบิสมัทหลอมเหลว และคอนกรีตทั้งสองชนิดมีการกัดกร่อนมากที่สุดเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะที่อัตราส่วนผสม Fe 100 wt.% แต่ไม่สามารถสังเกตเห็นการกัดกร่อนเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะที่อัตราส่วนผสม LM 100 wt.% เมื่อพิจารณาลักษณะของโลหะผสมหลอมเหลวบนคอนกรีต พบว่า โลหะหลอมเหลวมีการกระจายบนพื้นผิวคอนกรีตไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากมีโพรงอากาศอยู่ในโลหะผสมหลอมเหลว โดยมีโพรงอากาศกระจายอยู่มากที่อัตราส่วนโลหะผสม Fe:LM เท่ากับ 75:25 wt.% และมีลักษณะแยกเป็นชั้นมากขึ้นเมื่อมีปริมาณโลหะ LM มากขึ้นที่อัตราส่วน Fe:LM เท่ากับ 50:50 และ 25:75 wt.% แต่ไม่พบโพรงอากาศที่อัตราส่วนโลหะผสม LM 100 wt.% ซึ่งอาจเป็นผลมาจากโลหะ LM มีคุณสมบัติความหนืดน้อยกว่าจึงสามารถไหลไปรวมตัวกันได้เร็วกว่าเหล็กหลอมเหลว

จากการผ่าคอนกรีตและตรวจสอบด้วยสายตา พบว่า เมื่อคอนกรีตเกิดอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกัดกร่อนที่ระดับพื้นผิวเพียงเล็กน้อย ลักษณะการกัดกร่อนของคอนกรีตเป็นแบบการกัดกร่อนทั่วผิวน้ำของคอนกรีตที่กระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว โดยการกัดกร่อนบนพื้นผิวคอนกรีตมวลหนักมีลักษณะเป็นแผ่นหนากว่าคอนกรีตธรรมดาซึ่งอาจเป็นผลมาจากลักษณะโครงสร้างการผสานกันระหว่างวัสดุส่วนผสมของคอนกรีตมวลหนักน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา ดังนั้น พื้นผิวคอนกรีตมวลหนักเมื่อเกิดอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลวที่มีความร้อนสูงจึงแตกออกเป็นแผ่นมากกว่าคอนกรีตธรรมดา และพบว่า คอนกรีตทั้งสองชนิดมีการกัดกร่อนน้อยที่สุดที่อัตราส่วนโลหะผสม LM 100 wt.% เมื่อพิจารณาลักษณะโลหะผสมหลอมเหลวบนคอนกรีต พบว่า มีโพรงอากาศอยู่ในโลหะผสมหลอมเหลว



เนื่องจากโลหะหลอมเหลวเย็นตัวไม่สม่ำเสมอและเกิดออกไซด์โลหะระหว่างเทโลหะหลอมเหลวบนคอนกรีต โดยมีโพรงอากาศขนาดเล็กกระจายอยู่มากที่อัตราส่วนโลหะผสม Fe:LM เท่ากับ 50:50 wt.% แต่ไม่พบโพรงอากาศที่อัตราส่วนโลหะผสม LM 100 wt.% และพบรอยแตกร้าวในคอนกรีตมวลหนักแต่ไม่พบในคอนกรีตธรรมดา

อย่างไรก็ตาม การกักความร้อนของคอนกรีตเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะที่อัตราส่วนผสม Fe 100 wt.% มีค่ามากกว่าอัตราส่วนผสม LM 100 wt.% อาจเป็นผลมาจากปริมาณโลหะหลอมเหลวที่กระทำอันตรกิริยากับคอนกรีตมีปริมาณน้อยและหลุมคอนกรีตที่ใช้รองรับโลหะหลอมเหลวมีขนาดกว้างและตื้น โลหะเหล็กหลอมเหลวที่มีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) สูงกว่า LM จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับคอนกรีตได้นานกว่า ทำให้สังเกตเห็นการกักความร้อนของพื้นผิวคอนกรีตได้มากกว่า LM ซึ่งหากเพิ่มปริมาณโลหะหลอมเหลวที่กระทำอันตรกิริยากับคอนกรีตมากขึ้นและออกแบบหลุมคอนกรีตที่ใช้รองรับโลหะหลอมเหลวให้มีความกว้างน้อยลงแต่มีความลึกมากขึ้นอาจทำให้สามารถสังเกตเห็นการกักความร้อนของพื้นผิวคอนกรีตได้มากขึ้น

ปัญหาสำคัญที่พบในการทดลอง คือ โลหะหลอมเหลวเย็นตัวและเปลี่ยนสถานะเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว รวมทั้งเกิดการรวมตัวระหว่างสารประกอบในธาตุโลหะกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นโลหะออกไซด์ที่มีลักษณะเป็นจนวนความร้อน เนื่องจากดำเนินการวิจัยภายใต้สภาพบรรยากาศปกติ ประกอบกับเตาหลอมโลหะระดับห้องปฏิบัติการที่สร้างขึ้นไม่สามารถหลอมโลหะเป็นระยะเวลานานได้ทำให้ไม่สามารถศึกษาผลกระทบของพื้นผิวคอนกรีตจากอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลวอย่างเฉียบพลันในปริมาณมากได้ ส่งผลให้สังเกตเห็นการกักความร้อนของพื้นผิวคอนกรีตอยู่ในระดับตื้นเท่านั้น

### 5.1.2 การเตรียมคอนกรีต

จากการสร้างคอนกรีตกำบังรังสี 2 ชนิด คือ คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนัก ซึ่งเป็นคอนกรีตล้วน (Plain Concrete) ไม่มีการเสริมเหล็ก โดยออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตให้ได้ค่ากำลังอัดของคอนกรีตประมาณ  $350 \text{ kg/cm}^2$  พบว่า คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีค่ากำลังอัดคอนกรีตสูงกว่าที่ออกแบบไว้ โดยค่ากำลังอัดของคอนกรีตธรรมดาอยู่ในช่วง  $350.1\text{-}489.3 \text{ kg/cm}^2$  และมีค่าเฉลี่ยรวม  $417.5 \text{ kg/cm}^2$  ส่วนคอนกรีตมวลหนักมีค่ากำลังอัดคอนกรีตอยู่ในช่วง  $352.3\text{-}430.8 \text{ kg/cm}^2$  และมีค่าเฉลี่ยรวม  $378.4 \text{ kg/cm}^2$  น้อยกว่าคอนกรีตธรรมดาล็กน้อย ซึ่งสามารถเกิดขึ้นจากปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราส่วนผสมคอนกรีต ระยะเวลาการบ่มคอนกรีต ช่องว่างอากาศและความชื้นภายในคอนกรีต เป็นต้น

จากการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต พบว่า คอนกรีตมวลหนักมีความหนาแน่นสูงกว่าคอนกรีตธรรมดา 1.32 เท่า โดยคอนกรีตธรรมดามีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.52-2.66 g/cm<sup>3</sup> และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 2.60 g/cm<sup>3</sup> ส่วนคอนกรีตมวลหนักมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 3.26-3.57 g/cm<sup>3</sup> และมีค่าความหนาแน่นเฉลี่ย 3.43 g/cm<sup>3</sup>

จากการหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา พบว่า อัตราการนับรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 0.662, 1.170 และ 1.330 MeV ที่ทะลุผ่านคอนกรีตมวลหนักมีค่าน้อยกว่าคอนกรีตธรรมดา โดยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ( $\mu$ ) ของคอนกรีตธรรมดาที่พลังงาน 0.662, 1.170 และ 1.330 MeV เท่ากับ 0.1916, 0.1518 และ 0.1340 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา ( $\mu$ ) ของคอนกรีตมวลหนักที่พลังงาน 0.662, 1.170 และ 1.330 MeV เท่ากับ 0.2382, 0.1787 และ 0.1654 cm<sup>-1</sup> ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบที่ความหนาแน่นคอนกรีตเท่ากัน 5.0 เซนติเมตรโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา พบว่า คอนกรีตมวลหนักสามารถลดทอนรังสีได้มากกว่าคอนกรีตธรรมดา 1.26, 1.14 และ 1.17 เท่า ที่พลังงาน 0.662, 1.170 และ 1.330 MeV ตามลำดับ นอกจากนี้ พบว่า คอนกรีตแบไรต์มีลักษณะเปราะแตกหักง่ายมากกว่าคอนกรีตธรรมดา เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและขนาดของแร่แบไรต์ซึ่งนำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียดแทนทราย มีขนาดแตกต่างกันมากทำให้มีการดูดซึมน้ำได้มากกว่าจึงต้องใช้น้ำในส่วนผสมคอนกรีตมวลหนักมากกว่าคอนกรีตธรรมดา และการผสมกันระหว่างแร่แบไรต์กับปูนซีเมนต์ยังไม่เหมาะสมอาจต้องใช้วัสดุส่วนผสมพิเศษช่วยผสมคอนกรีต

### 5.1.3 การสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมา

จากการสร้างเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาขนาดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 13 กิโลวัตต์ ซึ่งสามารถปรับค่ากระแสไฟฟ้าได้ในช่วง 45-300 แอมแปร์ มีแรงดันวงจรเปิด 80 โวลต์ มีแหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงขนาดแรงดันไฟฟ้า 7.5 กิโลโวลต์ ความถี่ 3 เมกะเฮิรตซ์ และมีระบบระบายความร้อนหัวอาร์กพลาสมาโดยใช้ปั๊มน้ำขนาด 200 วัตต์ หม้อน้ำรถยนต์และพัดลมไฟฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45.72 ซม. พบว่า ระยะห่างในการอาร์กพลาสมาสูงสุดเมื่อใช้แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงร่วมกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักมีระยะห่างประมาณ 3 ซม. และมีระยะลดลงเหลือ 1 ซม.เมื่อใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักเพียงอย่างเดียว เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลักมีค่าน้อยกว่าทำให้มีระยะอาร์กลดลง เมื่อทดสอบการหลอมโลหะเหล็ก (Fe), เซอร์โคเนียม (Zr) และ โมลิบดีนัม (Mo) ซึ่งมีจุดหลอมเหลว 1538, 1855 และ 2633 องศาเซลเซียสตามลำดับ และทดสอบหลอมโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุกและบิสมัท โดยปรับค่ากระแสไฟฟ้าใช้งานที่ 250 แอมแปร์ แรงดันไฟฟ้าขนาด 40 โวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซอาร์กอน 2 ลิตรต่อ

นาที่ ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน พบว่า สามารถหลอม โลหะดังกล่าวได้ แต่พบปัญหาในการทดลอง คือ โลหะเกิดการเย็นตัวเปลี่ยนแปลงสถานะเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการทดลองในสภาพบรรยากาศปกติและมีการผันผวนของอากาศจากลมทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างธาตุโลหะกับออกซิเจนในอากาศเกิดเป็นโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนส่งผลทำให้สามารถหลอมเหลวโลหะได้ปริมาณไม่เกินครั้งละ 25-30 ลบ.ซม. และต้องป้อนโลหะเข้าไปอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เบ้าหลอมโลหะกราฟไฟต์ที่เหมาะสมควรมีลักษณะเป็นเบ้าตื้นและปากกว้างเพื่อให้มีการกระจายความร้อนได้ดีขณะทำการกวนหัวอาร์ก แต่พบว่า เบ้าหลอมกราฟไฟต์มีการกักความร้อนเป็นรูปวงมากขึ้นเมื่อทำการอาร์กจึงต้องเปลี่ยนเบ้าหลอมบ่อย นอกจากนี้พบว่า หัวอาร์กเกิดความร้อนสูงเมื่อทำการอาร์กนานกว่า 3 นาทีเนื่องจากได้รับรังสีความร้อนที่แผ่ออกมาจากพลาสมาก๊าซและโลหะหลอมเหลว จึงทำให้ไม่สามารถอาร์กได้อย่างต่อเนื่องและต้องมีการติดตั้งตู้กำบังรังสีความร้อนเพื่อป้องกันอันตรายแก่ผู้ใช้งาน

## 5.2 สรุปผล

คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักมีการกักความร้อนที่ระดับพื้นผิวเล็กน้อยเมื่อทำอันตรกิริยากับโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก และบิสมีทหลอมเหลว ลักษณะการกักความร้อนเป็นแบบทิวผิวหน้าของคอนกรีตที่กระทำอันตรกิริยากับโลหะหลอมเหลว โดยพื้นผิวคอนกรีตทั้งสองชนิดมีการกักความร้อนมากที่สุดที่อัตราส่วนผสมโลหะ Fe 100 wt.% และมีการกักความร้อนน้อยที่สุดที่อัตราส่วนผสม LM 100 wt.% นั่นคือ ปริมาณเหล็กในโลหะหลอมเหลวเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อการกักความร้อนของคอนกรีต ส่วนโลหะตะกั่ว ดีบุก และบิสมีทหลอมเหลวไม่มีผลต่อการกักความร้อนของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปริมาณโลหะหลอมเหลวที่กระทำอันตรกิริยากับคอนกรีตมีปริมาณน้อยและโลหะเหล็กหลอมเหลวมีค่าความร้อนแฝงในการหลอมเหลว (Latent heat of fusion) สูงกว่า LM จึงสามารถเกิดอันตรกิริยากับคอนกรีตได้นานกว่าทำให้สังเกตเห็นการกักความร้อนของพื้นผิวคอนกรีตได้มากกว่า LM

คอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักที่สร้างขึ้นมีค่ากำลังอัดคอนกรีตเฉลี่ยสูงกว่าที่ออกแบบไว้ที่  $350 \text{ kg/cm}^2$  และพบว่าคอนกรีตมวลหนักจากแบไรต์มีลักษณะเปราะแตกหักง่ายกว่าคอนกรีตธรรมดาเนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพของแร่แบไรต์และการผสมกันระหว่างแร่แบไรต์กับปูนซีเมนต์ยังไม่เหมาะสม โดยสรุปผลคุณสมบัติของคอนกรีตทั้งสองชนิดแสดงไว้ในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลคุณสมบัติของคอนกรีตธรรมดาและคอนกรีตมวลหนักที่สร้างขึ้น

ชนิด คอนกรีต	กำลังอัดเฉลี่ย (kg/cm <sup>2</sup> )	ความหนาแน่นเฉลี่ย (g/cm <sup>3</sup> )	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมา (cm <sup>-1</sup> ) ณ พลังงาน		
			0.662 MeV	1.170 MeV	1.330 MeV
ธรรมดา	417.5	2.60	0.1916	0.1518	0.1340
มวลหนัก	378.4	3.43	0.2382	0.1787	0.1654

เตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาที่สร้างขึ้นขนาดกำลังไฟฟ้า 13 กิโลวัตต์ สามารถนำมาประยุกต์ใช้หลอมโลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุกและบิสมัทได้ปริมาตรสูงสุด 25-30 ลบ.ซม. โดยการปรับค่ากระแสไฟฟ้าคงที่ 250 แอมแปร์ มีแรงดันไฟฟ้า 40 โวลต์ และอัตราการไหลของก๊าซ 2 ลิตรต่อนาที ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งาน นอกจากนี้ สามารถนำมาใช้ในการหลอมเหลวโลหะเซอร์โคเนียมและโมลิบดีนัมซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง 1855 และ 2633 องศาเซลเซียส ตามลำดับได้ในปริมาณน้อยเนื่องจากข้อจำกัดของเตาหลอมโลหะและสภาพบรรยากาศปกติที่มีออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับโลหะขณะหลอมเหลวทำให้เกิดเป็นโลหะออกไซด์ซึ่งเป็นฉนวนความร้อนทำให้ยากต่อการหลอมเหลว

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

(1) ควรมีการศึกษาการกักความร้อนของคอนกรีตจากอันตรกิริยาโลหะผสมในปริมาณของโลหะที่มากขึ้นและสามารถควบคุมอุณหภูมิให้โลหะสามารถหลอมเหลวอยู่บนผิวคอนกรีตได้นานมากขึ้น เพื่อให้สามารถศึกษาผลการกักความร้อนของคอนกรีตเปรียบเทียบกับเวลาที่สัมผัสกับโลหะผสมหลอมเหลว

(2) ควรออกแบบหลุมคอนกรีตที่ใช้รองรับโลหะหลอมเหลวให้มีขนาดความกว้างของหลุมน้อยลงแต่มีความลึกมากขึ้น เพื่อให้โลหะหลอมเหลวสูญเสียความร้อนช้าลงและสามารถหลอมเหลวอยู่ในคอนกรีตได้นานขึ้นทำให้สามารถสังเกตเห็นการกักความร้อนได้มากขึ้น

(3) ควรมีการศึกษาผลกระทบของสารประกอบคาร์ไบด์จากการรวมตัวของธาตุคาร์บอนในเตาหลอมกราไฟท์กับโลหะผสมขณะทำการหลอมเหลวซึ่งอาจมีผลกระทบต่อการกักความร้อนของคอนกรีต



(4) ควรมีการศึกษาและทดสอบคุณสมบัติของคอนกรีตมวลหนักจากแร่แบไรท์ โดยปรับเปลี่ยนอัตราส่วนและวัสดุผสมคอนกรีตให้มีความเหมาะสม และควรมีการศึกษาการสร้าคอนกรีตจากแร่อื่นๆ ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมเพื่อเปรียบเทียบและนำมาประยุกต์ใช้งานทางด้านนิวเคลียร์ได้มากขึ้น

(5) ควรพัฒนาระบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าหลัก ระบบระบายความร้อน และหัวอาร์กพลาสมาของเตาหลอมโลหะอาร์กพลาสมาให้สามารถหลอมโลหะได้ในปริมาณมากขึ้นและมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น

(6) ควรพัฒนาระบบเตาหลอมโลหะภายใต้สภาวะก๊าซเฉื่อยเพื่อป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันระหว่างธาตุโลหะกับออกซิเจนในอากาศและพัฒนาวิธีการวัดอุณหภูมิของโลหะผสมหลอมเหลวขณะทำการอาร์กพลาสมา



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

กำธน สินธวานนท์. โรงไฟฟ้านิวเคลียร์. วารสารรัฐศาสตร์ 43 (2543): 39-41.

คุปต์ โพธิ์แก้ว. การพัฒนาเครื่องไมโครอาร์คพลาสมาเพื่อประยุกต์ใช้ในงานด้านวัสดุนิวเคลียร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

จิตติกร เห็นทรัพย์ไพบูลย์. การพัฒนากระบวนการผลิตด้วยการส่งผ่านรังสีแกมมาเพื่อแสดงภาพสองมิติของคอนกรีตเสริมเหล็ก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

นเรศร์ จันทน์ขาว. เอกสารประกอบการอบรมทางวิชาการ เรื่อง การตรวจสอบโดยวิธีถ่ายภาพด้วยรังสี. กรุงเทพมหานคร: ชมรมการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย, 2528.

ปริญญา จินดาประเสริฐ และชัย จาตุรพิทักษ์กุล. ปูนซีเมนต์ ปอซโซลาน และคอนกรีต. กรุงเทพมหานคร: สมาคมคอนกรีตไทย, 2551.

ปิติ สุขนรสุขกุล. คอนกรีตขั้นพื้นฐาน. กรุงเทพมหานคร: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2549.

ผลิตภัณฑ์และวัตถุดิบก่อสร้างจำกัด(ซีแพค), บริษัท. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร, 2543.

โยธาธิการ, กรม. มาตรฐานคอนกรีตอัดแรง. กรุงเทพมหานคร, 2533.

วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2529.

วิรุพห์ มังคละวิรัช และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ. รายงานการวิจัยการพัฒนาอาร์คพลาสมา. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2524.

วีระชัย บัญชรเทวกุล และสุวิทย์ ปุณณชัยยะ. การสร้างเตาอาร์คพลาสมาเพื่อนำมาประยุกต์ใช้งานด้านโลหะกรรมพลาสมา. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2525.

ศิริลักษณ์ นิวิฐจรรยงค์. การกัดกร่อนและการเลือกใช้วัสดุ. กรุงเทพมหานคร: กองบริการการศึกษา สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2545.

สืบศักดิ์ พรหมบุญ และคณะ. การซ่อมแซมคอนกรีตและการบำรุงรักษา. กรุงเทพมหานคร: SIAM Cement Group (SCG), 2551.

สุริยา ธงชัย. แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงของเครื่องตัดโลหะแบบพลาสมา, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.

## ภาษาอังกฤษ

- Lamarsh, John R. Introduction to nuclear engineering. 2<sup>nd</sup> edition. Polytechnic Institute of New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
- Olander, D.,and Wongsawaeng, D. Re-solution of fission gas – A review: Part I. Intragranular bubbles. J. Nucl. Mater. 354 (2006): 94-109.
- Olander, D. Liquid Metal Bond for improved Heat Transfer in LWR fuel rods, Berkeley: University of California, 2005.
- Wongsawaeng, D.,and Olander, D. Effect of Replacing Helium with a Liquid Metal in the Fuel-Cladding Gap on Fission Gas Release. Nucl. Tech. 146 (2004): 211-220.
- Wongsawaeng, D.,and Olander, D. Liquid-Metal Bond for LWR Fuel Rods. Nucl. Tech. 159 (2007): 279-291.
- Wongsawaeng, D.,and Olander, D. Liquid-Metal-Bonded Gap for Light Water Reactor Fuel Rods. American Nuclear Society 91 (November 2004): 906-907.
- Wongsawaeng, D.,and Olander, D. Liquid-Metal-Bonded Gap for Light Water Reactor Fuel Rods. Proc. Intl. Conf. GLOBAL'03, pp.1329-1334. November 16-20, 2003. New Orleans, Louisiana: American Nuclear Society, 2003.
- Wongsawaeng, D.,and Olander, D. Liquid-Metal-Bonded Gap for Light Water Reactor Fuel Rods. Proc. Intl. Mtng. LWR Fuel Performance. 2004. pp.69-74. September 19-22, 2004. Orlando, Florida: American Nuclear Society, 2004.
- Wright, R.F., Schoessow, G.J., Tulenko, J.S., Adams, T.,and Connell R.G. Liquid bonded light water reactor fuel: enhanced light water reactor safety and performance. Proc. Int. Topical. Mtg. Light Water Reactor Fuel Performance, pp.659-666. April 17-21, 1994. West Palm Beach, Florida: American Nuclear Society, 1994.



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในตัวอย่างปูนซีเมนต์  
ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


**สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)**

Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

9/9 หมู่ที่ 7 ต.ทรายมูล อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26210 โทรศัพท์ 037-392912 โทรสาร 037-392913 www.tint.or.th

9/9 Moo 7 T.Saimul A.Ongkharag Nakornnayok 26210 Tel: 037-392912 Fax: 037-392913

ที่ วท 5908/847/2554

Attachment Page 1/2

Issued Date : February 10, 2011

**ANALYSIS REPORT**

 Client : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Request No. : 543/54

Date received : February 08, 2011

Date analyzed : February 10, 2011

Objective : Qualitative Composition

Method : XRF Standardless

Client Reference/Code No. : ปูนซีเมนต์

Element	Concentration (%)	Compound	Concentration (%)
Ca	46.58	CaO	65.60
Si	9.72	SiO <sub>2</sub>	20.69
Fe	2.78	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98
Al	1.91	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.60
S	1.60	SO <sub>3</sub>	4.01
Mg	0.83	MgO	1.38
K	0.39	K <sub>2</sub> O	0.47
Mn	0.06	MnO	0.08
Cl	0.04	Cl	0.04
Zn	0.04	ZnO	0.05
Cu	0.03	CuO	0.04
Sr	0.03	SrO	0.04
Zr	0.01	ZrO <sub>2</sub>	0.01
Ba	0.01	BaO	0.02

\*The results are reported based on 100% normalization of oxide compounds.

This report represented our findings basing upon the sample(s) and time as described above only.

Analyzed by

 (Phetcharat Tanphet)  
 Nuclear Scientist

Verified by

 (Ratchai Funklin)  
 Nuclear Scientist

Approved by

 (Yuthapong Prachasitthisak)  
 Service Center Manager

This report shall not be reproduced without the written approval laboratory

FM-NSC-22

Rev. No : 00 EFF. Date : 15/02/2553



ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในตัวอย่างแร่แบไรท์  
ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (XRF)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


**สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)**

Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)

9/9 หมู่ที่ 7 ต.ทรายมูล อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26210 โทรศัพท์ 037-392912 โทรสาร 037-392913 www.tint.or.th

9/9 Moo 7 T.Saimul A.Ongkharag Nakornnayok 26210 Tel: 037-392912 Fax: 037-392913

ที่ วท 5908/847/2554

Attachment Page 2/2

Issued Date : February 10, 2011

**ANALYSIS REPORT**

Client : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์

Request No. : 543/54

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Date received : February 08, 2011

Date analyzed : February 10, 2011

Objective : Qualitative Composition

Method : XRF Standardless

Client Reference/Code No. : แร่แบไรต์

Element	Concentration (%)	Compound	Concentration (%)
Ba	47.78	BaO	58.99
S	11.01	SO <sub>3</sub>	27.54
Si	3.43	SiO <sub>2</sub>	7.29
Fe	2.76	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.94
Sr	0.88	SrO	1.04
Al	0.38	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.72
K	0.13	K <sub>2</sub> O	0.15
Mn	0.12	MnO	0.16
As	0.05	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07
Cu	0.04	CuO	0.05
Zn	0.04	ZnO	0.05

\*The results are reported based on 100% normalization of oxide compounds.

This report represented our findings basing upon the sample(s) and time as described above only.

Analyzed by

(Phetcharat Tanphet)

Nuclear Scientist

Verified by

(Ratchai Funklin)

Nuclear Scientist

Approved by

(Yuthapong Prachasitthisak)

Service Center Manager

This report shall not be reproduced without the written approval laboratory

FM-NSC-22

Rev. No : 00 EFF. Date : 15/02/2553





ภาคผนวก ก

ใบรับรองผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในโลหะตะกั่ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**Certificate of Analysis "3.1.B" conform EN 10204**

Page no. 3 of 6

Date : 21.06.2006  
 Delivery note number : 3284803  
 Vessel/Voyage : ANL EMBLEM /V33N  
 Product Code : 1010  
 Product Description : 99.99% INGOT

ANL



**ZINIFEX METALS  
 PTY LTD**

Lead by difference using named impurities.

Assay No.	101002423721	101002423750	101002423800	101002423850	101002423900	101002423950
Bundle from	2423733	2423739	2423783	2423826	2423876	2423939
Bundle to	2423734	2423744	2423825	2423875	2423920	2423953
Lead	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99	99.99
Bismuth %	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009
Cadmium %	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Copper %	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Nickel %	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Antimony %	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
Tin %	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002
Zinc %	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002
Silver %	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
Arsenic %	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005	< 0.0005

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 ภาควิชาโลหวิทยา

Zinifex Metals Pty Ltd ACN 006 585 284 ABN 9100555284 \* Level 29, 2 Southbank Boulevard Melbourne VIC 3008  
 P.O. BOX 1281K \* Telephone 03 9288 0333 \* Facsimile 03 9288 0408



ภาคผนวก ง

ใบรับรองผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในโลหะดีบุก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



บริษัท ไทยแลนด์สมอลติงแอนด์รีไฟนิง จำกัด  
Thailand Smelting and Refining Co., Ltd.

80 Moo 8 Sakdidej Road,  
T.Vichit, A.Muang, Phuket 83000 THAILAND  
Tel : (66 76) 371111 Facsimile : (66 76) 371121  
E-mail : tsr@thaisarco.com

80 หมู่ 8 ถนนศักดิ์เดช ต.วิชิต อ.เมือง  
จังหวัดภูเก็ต 83000  
โทร. (076) 371111 โทรสาร. (076) 371121

ISO9001:2008	ISO 14001:2004
Certificate No. TH 09000633	Certificate No. TH 05000384
<b>REGISTERED COMPANY</b>	

## Certificate Of Analysis

MATERIAL : Tin Bars	Date : 13-Jul-10
SHAPE : CAST BAR	
SIZE : 0.4 KG/BAR	

Lot No.	B.607	SN100A Specification
Sn	99.928	REMAIN
Pb	0.032	0.050 MAX
As	0.008	0.030 MAX
Bi	0.007	0.030 MAX
Cu	0.004	0.040 MAX
Fe	0.009	0.010 MAX
Ni	0.002	0.010 MAX
Co	<0.001	0.010 MAX
Ag	<0.001	0.010 MAX
Sb	0.005	0.040 MAX
Zn	<0.001	0.001 MAX
Cd	<0.001	0.001 MAX
Al	<0.001	0.001 MAX

ALL concentrations are expressed in % (m/m)

< = Less than

We hereby certify that the chemical composition result is complying LME BS EN 610:1996 and ASTM B339-00

*Hataih J.*

Inspector

*Hataih J.*

Technical Manager

A Member of the AMC Group



**ESCOY**

Bangkok Office : 116/17-18 Sivith Building, Suanthornkosa Road, Klongtoey, Bangkok 10110 TEL : (66 2) 2403878-9 Facsimile : (66 2) 2498335





ภาคผนวก จ

ใบรับรองผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณธาตุในโลหะบิสเมท

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ZHUSHOU APOLLO SPECIAL METALS CO.LTD

株洲阿波罗特种金属有限公司

Sample From 外来样单位	ZhuZhou Apollo Special Metals Co.Ltd 株洲阿波罗特种金属有限公司
Name of Sample 样品名称	Bismuth Metal Ingot 铋 锭
Group No. 样品批号	2010-11-20
Date of Analysis 分析日期	Nov. 20th, 2010
RESULT OF ANALYSIS 分析结果	
Purity: Bi 99.99%min	
Impurities:(% max)	
Ag 0.0008, Cu 0.0001, As 0.0003, Fe 0.0010, Te 0.0003, Pb 0.0003, Zn 0.0005, Sb 0.0005, Cl 0.0012.	
Attention:(注意)	
1、 If you have any question on this report,please advance in a month as soon as you get it. 如对本报告有疑问, 请于报告收到后, 一个月內提出。	
2、 This report is only responsible for samples entrusted. 本报告只对委托之试样负责。	

Director:

主任:

Monitor:

班长:

Analysist:

分析员:



ภาคผนวก ฉ

ตัวอย่างการคำนวณระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นฟิล์ม

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## วิธีการคำนวณระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นฟิล์ม

### 1. คำนวณความหนาของเหล็ก

#### จากสูตร

$$\text{Thick}_{\text{steel}} = (\text{D}_{\text{sample}} / \text{D}_{\text{steel}}) \times \text{Thick}_{\text{sample}}$$

เมื่อ	$\text{Thick}_{\text{steel}}$	คือ	ความหนาของเหล็ก (นิ้ว)
	$\text{Thick}_{\text{sample}}$	คือ	ความหนาของตัวอย่าง (นิ้ว)
	$\text{D}_{\text{sample}}$	คือ	ความหนาแน่นของตัวอย่าง (กรัม/ลบ.ซม.)
	$\text{D}_{\text{steel}}$	คือ	ความหนาแน่นของเหล็ก (กรัม/ลบ.ซม.)

### 2. หาค่าเอกซ์โพสเซอร์แฟคเตอร์ (Exposure Factor) ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาจากกราฟเอกซ์โพสเซอร์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาในภาคผนวก ซ

### 3. คำนวณหาระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา ณ ความแรงรังสีปัจจุบัน โดยใช้ข้อมูลในภาคผนวก ซ

#### จากสูตร

$$\text{Time} = [\text{EF} \times (\text{D}_1/\text{D}_0)^2] / \text{Activity}$$

เมื่อ	EF	คือ	เอกซ์โพสเซอร์แฟคเตอร์
	$\text{D}_1$	คือ	ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับแผ่นฟิล์ม
	$\text{D}_0$	คือ	ระยะ SFD (Source to Film Distance) มีค่าเท่ากับ 12 นิ้ว
	Activity	คือ	ความแรงรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแกมมา ณ ปัจจุบัน (Ci)



### ตัวอย่างการคำนวณระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นฟิล์ม

#### 1. คำนวณความหนาของเหล็ก

ความหนาของคอนกรีตมวลหนัก	3.937	นิ้ว (10.0 เซนติเมตร)
ความหนาแน่นของคอนกรีตมวลหนัก	3.470	กรัมต่อลบ.ซม.
ความหนาแน่นของเหล็ก	7.874	กรัมต่อลบ.ซม.

$$\text{Thick}_{\text{steel}} = (3.470 / 7.874) \times 3.937 = 1.735 \text{ นิ้ว}$$

#### 2. หาค่าเอกซ์โพสเซอร์แฟกเตอร์จากกราฟเอกซ์โพสเซอร์ ภาคผนวก ช

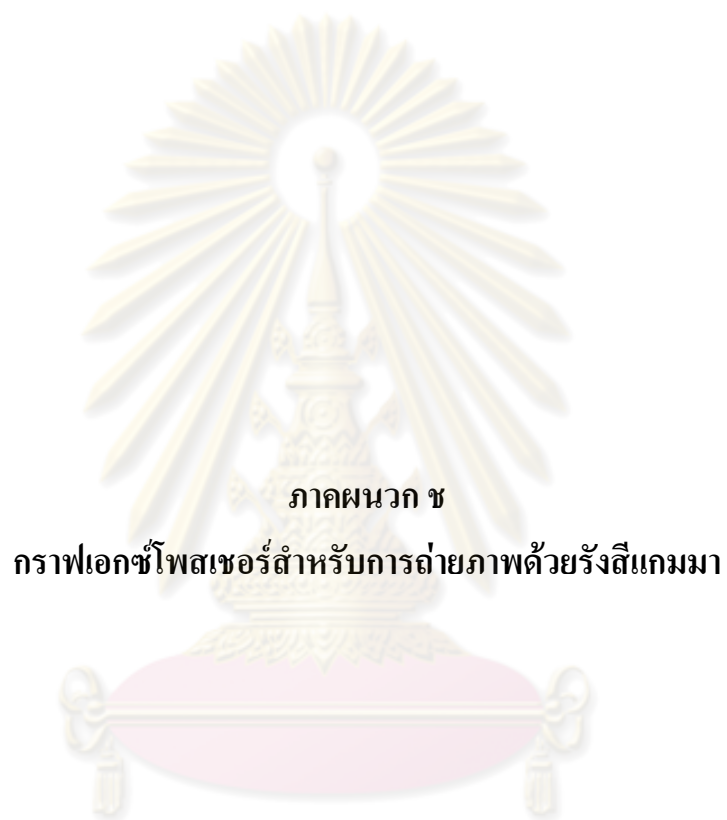
จากกราฟเอกซ์โพสเซอร์ (ภาคผนวก ช) ค่าเอกซ์โพสเซอร์แฟกเตอร์ในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาสำหรับเหล็กความหนา 1.735 นิ้ว มีค่าเท่ากับ 18 คูรี-นาทึ

#### 3. คำนวณหาระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา ณ ความแรงรังสีปัจจุบัน

เอกซ์โพสเซอร์แฟกเตอร์	18	คูรี-นาทึ
ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับแผ่นฟิล์ม	39.37	นิ้ว (100 เซนติเมตร)
ระยะ SFD (Source to Film Distance)	12.0	นิ้ว
ความแรงรังสี ณ วันที่ 15 มกราคม 2554 (ภาคผนวก ช)	14.3	คูรี

$$\begin{aligned} \text{Time} &= [18 \times (39.37 / 12.0)^2] / 14.3 \\ &= 13.55 \text{ นาที} \end{aligned}$$

หมายเหตุ การถ่ายภาพด้วยรังสีในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate, IP) ซึ่งมีความไว (sensitivity) สูงกว่าแผ่นฟิล์มจึงสามารถประหยัดเวลาในการถ่ายภาพมากกว่า



ภาคผนวก ข

กราฟเอกซ์โพสเชอร์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ข

ใบรับรองต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากโคบอลต์-60 ของเครื่องถ่ายภาพด้วยรังสี

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





**AEA Technology**  
**QSA Inc.**

40 North Avenue  
Burlington, MA 01803  
Telephone (781) 272-2000  
Telephone (800) 815-1383  
Facsimile (781) 273-2216

Activity in Curies

# Source Certificate

Radionuclide: *Co60*  
 ISO/ANSI Classification: *C64515*  
 IAEA Special Form Reference Number: *USA/0377/S-2011*  
 Measured Equivalent Activity on *Feb-15-2005* 31.1 Ci 1.2 TBq  
 Source Serial #: 18279B  
 Source Model: 424-14  
 Product Code: CKUDE030  
 Sales Order: 148401 ENTSYS TECHNOLOGIES CO. LTD

Source Physical Size:  
 Diameter (mm) (in)  
 Length 3.175 .125  
 Maximum 2.159 .085  
 3.277 .129

Quality Control Tests *Feb-15-2005*  
 Tensile Test: Passed  
 Wipe Test A: <0.00045 uCi

Decay Data:

Technician: *Greg Blute*

Date		Activity in Curies		Date	
Date	Activity	Date	Activity	Date	Activity
Feb-15-2005	31.1	Jan-20-2010	16.3	Dec-25-2014	8.5
Apr-16-2005	30.5	Mar-21-2010	15.9	Feb-23-2015	8.3
Jun-15-2005	29.8	May-20-2010	15.6	Apr-24-2015	8.2
Aug-14-2005	29.2	Jul-19-2010	15.3	Jun-23-2015	8.0
Oct-13-2005	28.6	Sep-17-2010	14.9	Aug-22-2015	7.8
Dec-12-2005	28.0	Nov-16-2010	14.6	Oct-21-2015	7.6
Feb-10-2006	27.4	Jan-15-2011	14.3	Dec-20-2015	7.5
Apr-11-2006	26.8	Mar-16-2011	14.0	Feb-18-2016	7.3
Jun-10-2006	26.2	May-15-2011	13.7	Apr-18-2016	7.2
Aug-09-2006	25.6	Jul-14-2011	13.4	Jun-17-2016	7.0
Oct-08-2006	25.1	Sep-12-2011	13.1	Aug-16-2016	6.9
Dec-07-2006	24.6	Nov-11-2011	12.8	Oct-15-2016	6.7
Feb-05-2007	24.0	Jan-10-2012	12.6	Dec-14-2016	6.6
Apr-06-2007	23.5	Mar-10-2012	12.3	Feb-12-2017	6.4
Jun-05-2007	23.0	May-09-2012	12.0	Apr-13-2017	6.3
Aug-04-2007	22.5	Jul-08-2012	11.8	Jun-12-2017	6.2
Oct-03-2007	22.0	Sep-06-2012	11.5	Aug-11-2017	6.0
Dec-02-2007	21.6	Nov-05-2012	11.3	Oct-10-2017	5.9
Jan-31-2008	21.1	Jan-04-2013	11.0	Dec-09-2017	5.8
Mar-31-2008	20.7	Mar-05-2013	10.8	Feb-07-2018	5.7
May-30-2008	20.2	May-04-2013	10.6	Apr-08-2018	5.5
Jul-29-2008	19.8	Jul-03-2013	10.3	Jun-07-2018	5.4
Sep-27-2008	19.4	Sep-01-2013	10.1	Aug-06-2018	5.3
Nov-26-2008	18.9	Oct-31-2013	9.9	Oct-05-2018	5.2
Jan-25-2009	18.5	Dec-30-2013	9.7	Dec-04-2018	5.1
Mar-26-2009	18.1	Feb-28-2014	9.5	Feb-02-2019	5.0
May-25-2009	17.8	Apr-29-2014	9.3	Apr-03-2019	4.9
Jul-24-2009	17.4	Jun-28-2014	9.1	Jun-02-2019	4.8
Sep-22-2009	17.0	Aug-27-2014	8.9	Aug-01-2019	4.7
Nov-21-2009	16.6	Oct-26-2014	8.7	Sep-30-2019	4.6

AEA Technology plc registered office:  
 329 Harwell, Didcot, Oxfordshire OX11 0B  
 Registered in England and Wales  
 number 3093002



ภาคผนวก ฅ

ตำปฤษฎิธิการลตทอนรังสีแกมมาเชิงมวลสำหรับวัสดุชนิดต่างๆ ( Lamarsh,1983)

ศูนย์วิทยพัทยาการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

The mass attenuation coefficient ( $\mu/\rho$ ) for several materials, in  $\text{cm}^2/\text{g}^{*\dagger}$ 

Material	Gamma-ray energy, MeV																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0876	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0394	.0313	.0266	.0234	.0211	.0180	.0161
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0444	.0356	.0304	.0270	.0245	.0213	.0194
N	.150	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0309	.0276	.0254	.0224	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0274	.0254	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.102	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0254	.0243
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0301	.0279	.0266	.0248	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0274	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0304	.0295	.0294
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0349	.0344	.0344	.0349	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0394
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0454	.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	10.60	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0484	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0636	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0274	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0354	.0366
H <sub>2</sub> O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.0870	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0363	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

\*From L. T. Templin, editor, *Reactor Physics Constants*, ANL-5800, 2nd ed., 1963; based on G. W. Grodzstein National Bureau of Standards circular 583, 1957.

†Nominal densities of the elements are given in Table II.3. For air at 1 atm and 0°C,  $\rho = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho (\text{NaI}) = 3.67 \text{ g/cm}^3$ ,  $\rho (\text{tissue}) \approx (\text{H}_2\text{O}) = 1 \text{ g/cm}^3$ ;  $\rho (\text{concrete}) = 2.25\text{--}2.40 \text{ g/cm}^3$ .



ภาคผนวก ญ

ตารางคุณสมบัติทางด้านอุณหภูมิต่างๆ  
แหล่งที่มา: <http://physics.info/heat-latent> [2011,May]

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Element	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Latent Heat of Fusion (kJ/kg)	Latent Heat of Vaporization (kJ/kg)
Aluminum	660	2519	397	10,900
Argon	-189	-186	29.5	161
Bismuth	271	1564	54.0	723
Bromine (Br <sub>2</sub> )	-7	59	132	375
Chlorine (Cl <sub>2</sub> )	-102	-34	181	576
Copper	1084	2562	209	4730
Gold	1064	2856	63.7	1645
Helium	n/a	-269	3.45	20.7
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	-259	-253	59.5	445
Iron	1538	2861	247	6090
Krypton	-157	-153	16.3	108
Lead	327	1749	23.0	866
Lithium	181	1342	432	21,200
Mercury	-39	357	11.4	295
Neon	-249	-246	16.8	84.8
Nickel	1455	2913	298	6430
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	-210	-196	25.3	199
Oxygen (O <sub>2</sub> )	-219	-183	13.7	213
Plutonium (ε)	640	3228	11.6	1370
Silicon	1414	3265	1790	12,800
Silver	962	2162	105	2390
Sodium	98	883	113	4240
Sulfur	115	445	53.6	1400
Tin	231	2602	59.2	2490
Titanium	1668	3287	296	8880
Tungsten	3422	5555	285	4390
Uranium	1135	4131	38.4	1750
Zinc	420	907	112	1890

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศีกษิต แสงแก้ว เกิดวันที่ 7 ตุลาคม พ.ศ.2522 ที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เมื่อปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550 ได้รับทุนโครงการผลิตบัณฑิต ระดับปริญญาโท-เอก ด้านวิศวกรรมศาสตร์นิวเคลียร์และเทคโนโลยีนิวเคลียร์ ระหว่างสถาบัน เทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ร่วมกับคณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2550 และทุนโครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้าน วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีงบประมาณ 2552 ผลงานวิจัยที่ตีพิมพ์เผยแพร่ เรื่อง การศึกษาก่อนของพื้นผิวคอนกรีตกำบังรังสีจากอันตรกิริยากับ โลหะผสมเหล็ก ตะกั่ว ดีบุก บิสมัทหลอมเหลว (SURFACE CORROSION OF RADIATION SHIELDING CONCRETE DUE TO INTERACTION WITH MOLTEN IRON-LEAD-TIN-BISMUTH ALLOY) ปัจจุบันรับราชการในตำแหน่ง นักนิวเคลียร์ฟิสิกส์ ระดับปฏิบัติการ กลุ่มประเมินความปลอดภัยและใบอนุญาต สำนักกำกับดูแลความปลอดภัยทางนิวเคลียร์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย