

การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์  
ในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ – 1600 °ซ



นายฉัตรชัย สัมฤทธิ์สุภผล

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



EVALUATING SILVER DIFFUSION COEFFICIENT IN  
ZIRCONIUM CARBIDE IN THE TEMPERATURE RANGE OF 1400 °C – 1600 °C



Mr. Chatchai Sumritsupapon

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

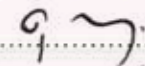
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ - 1600 °ซ
โดย	นายจักรชัย สัมฤทธิ์ศุภผล
สาขาวิชา	นิเวศลิยร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสง
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

 ..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศนिरุญวงศ์)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(..รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทร์ขาว)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสง )

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์ )

 ..... กรรมการ  
( รองศาสตราจารย์ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล )

 ..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
( รองศาสตราจารย์ชยากริต ศิริอุปถัมภ์ )

ฉัตรชัย สัมฤทธิ์สุกผล : การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ - 1600 °ซ (EVALUATING SILVER DIFFUSION COEFFICIENT IN ZIRCONIUM CARBIDE IN THE TEMPERATURE RANGE OF 1400 °C - 1600 °C) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสง, อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: รองศาสตราจารย์. สมยศ ศรีสถิตย์, 52 หน้า

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงิน(Ag)ในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์(ZrC)ในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ - 1600 °ซ ทั้งนี้ในโรงไฟฟ้าแบบ High Temperature Gas Cooled-Reactor (HTGR) ใช้เม็ดเชื้อเพลิงแบบ TRISO fuel microsphere ซึ่ง Ag เป็นธาตุเดียวที่สามารถแพร่ออกมาจากเม็ดเชื้อเพลิงได้จึงสามารถที่จะเข้าสู่ Coolant ได้ โดย  $^{110m}\text{Ag}$  เป็นไอโซโทปรังสีที่เป็นอันตรายมากที่สุดของธาตุเงิน เนื่องจากการที่ปล่อยรังสีแกมมาออกมาในปริมาณสูง จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเงินใน ZrC การวิจัยนี้ได้จัดเตรียม ZrC ซึ่งมีความหนา 1 เซนติเมตร นำไปทำ silver sputtering เพื่อให้มีโลหะเงินเคลือบติดบริเวณผิวของ ZrC นำไปใส่ในภาชนะซึ่งทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม และภาชนะที่เป็นเซรามิกส์ นำเม็ดโลหะเงินประมาณ 30 กรัม เกลบบน ZrC ซึ่งอยู่ในภาชนะ นำตัวอย่าง ZrC ที่ผ่านการอบเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง นำไปทำ Line Scan ด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้ระยะทางการเคลื่อนที่ของเงินเข้าไปในเนื้อของ ZrC แตกต่างกันดังนี้ ที่ 1350 °ซ ได้ระยะทาง 5 ไมโครเมตร ที่ 1500 °ซ ได้ระยะทาง 15 ไมโครเมตร และที่ 1550 °ซ ได้ระยะทาง 20 ไมโครเมตร หลังจากนั้นนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ดังนี้  $D_{1350} = 2.17 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{1500} = 1.95 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  และ  $D_{1550} = 3.47 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  คำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้นของอะตอมโลหะเงินที่แพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (Activation energy) = 74.03 kcal/mol หรือ 309.74 kJ/mol คำนวณหาค่า  $D_0$  ได้  $2.604 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

ภาควิชา... วิศวกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา... วิศวกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา... 2553

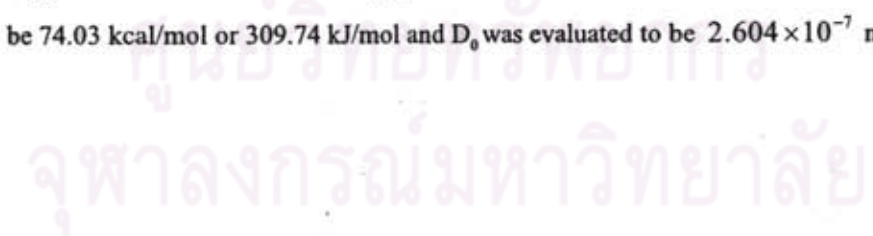
ลายมือชื่อนิสิต... ฉัตรชัย สัมฤทธิ์สุกผล  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก... จิน  
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม... สมยศ ศรีสถิตย์

## 5070249921 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : SILVER / DIFFUSION COEFFICIENT / ZIRCONIUM CARBIDE / TEMPERATURE RANGE OF 1400 °C – 1600 °C

CHATCHAI SUMRITSUPAPON : EVALUATING SILVER DIFFUSION COEFFICIENT IN ZIRCONIUM CARBIDE IN THE TEMPERATURE RANGE OF 1400 °C – 1600 °C. THESIS ADVISOR: ASST.PROF.DOONYAPONG WONGSAWAENG Ph.D. , CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.SOMYOT SRISATTI, 52 pp.

This research work aimed to evaluate the silver diffusivity in zirconium carbide (ZrC) at 1400 °C – 1600 °C. High temperature gas cooled-reactors (HTGR) use TRISO fuel microspheres and Ag is the only element that can diffuse out of the TRISO fuel to the coolant. <sup>110m</sup>Ag is considered to be the most dangerous radioisotope of silver, as it releases high intensity gamma ray to the environment. Therefore, it is essential to study the diffusivity of silver in ZrC. In this research work, ZrC was prepared with a thickness of 1 centimeter and was coated with silver by a sputtering method. Specimens were placed in containers made of stainless steel and ceramic. Thirty grams of silver was poured onto ZrC in the containers, and each container was heated for 20 hours. ZrC specimens were line-scanned by scanning electron microscope. The distances that silver was able to penetrate into ZrC were as follows: 5 microns at 1350 °C, 15 microns at 1500 °C and 20 microns at 1550 °C. Calculated diffusivities were as follows:  $D_{1350} = 2.17 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{1500} = 1.95 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  and  $D_{1550} = 3.47 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ . The activation energy was evaluated to be 74.03 kcal/mol or 309.74 kJ/mol and  $D_0$  was evaluated to be  $2.604 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$



Department : Nuclear Technology.....  
Field of Study : Nuclear Technology.....  
Academic Year : 2010.....

Student's Signature *Chatchai Sumitsupapon*  
Advisor's Signature *Dry 2*  
Co-Advisor's Signature *สมยศ สรียะพันธ์*

## กิตติกรรมประกาศ

ผลงานการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่สำเร็จได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสวง และรองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ให้คำปรึกษาและช่วยแก้ไขปัญหาในทุกๆ ด้าน ให้ผ่านไปด้วยดีเสมอมา

ขอกราบขอบพระคุณ คุณศุภศิลป์ ดาราสุรย์ ที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาฯ คุณวารุณีบวร เกียรติแก้ว ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล คุณชัชวัฒน์ ธานีรัตน์ กรมวิทยาศาสตร์ คุณวารุณี วรรณิชย์ บริษัทดับบลิวเคอินซูเลเตอร์ บริษัทคอมพาวด์เคลย์ จำกัด คุณศรารุช ใจเย็น คุณธีรวัฒน์ อุทาพงษ์ คุณดรณ ชัชวัฒน์ คุณกรกต วีรเชียร และคุณคณินิจ ศรีประเสริฐ ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูล รวมทั้งให้ความช่วยเหลือการวิจัยนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ทุกคนในครอบครัวสัมฤทธิ์สุภผล สำหรับให้ประสบการณ์ชีวิต ความรัก ความอบอุ่นและกำลังใจ ตลอดจนการสนับสนุนในทุกๆ ด้านเป็นอย่างดีจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จ

ความสำเร็จของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	2
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2 ทฤษฎี.....	4
2.1 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR.....	4
2.2 เม็ดเชื้อเพลิง TRISO FUEL MICROSPHERE.....	8
2.3 $^{110m}\text{Ag}$ .....	10
2.4 การแพร่.....	11
2.5 การหาค่าความหนาของแมทริกซ์ Characteristic Diffusion Depth.....	15
2.6 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง.....	15
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	18
3.1 ขอบเขตการวิจัย.....	18
3.2 ขั้นตอนการวิจัย.....	18
3.3 การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็น.....	19
3.4 การดำเนินการวิจัย.....	24
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย.....	29
4.1 ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย.....	29
5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	43
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41

บทที่	หน้า
5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินการทำวิจัย.....	43
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	44
รายการอ้างอิง.....	45
ภาคผนวก .....	46
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	48
ภาคผนวก ค.....	49
ภาคผนวก ง.....	50
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	52



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ค่า erf บางส่วน .....	13
4.1	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในช่วงอุณหภูมิ 1400 <sup>o</sup> ซ – 1600 <sup>o</sup> ซ.	41
ข.1	คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน .....	48
ค.1	คุณลักษณะของ ZrC.....	49



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เม็ดเชื้อเพลิง Triso-Fuel microsphere 1.)แกนกลาง (Fuel Kernel) 2.) ชั้นบัฟเฟอร์ 3.) IPyC (Inner Pyrocarbon) 4.)Siliconcarbide (SiC) 5.) OPyC (Outer Pyrocarbon) .....	4
2.2	ค่าประสิทธิภาพเปรียบเทียบระหว่างระบบ Steam Cycle และ Gas Turbine Cycle .....	5
2.3	Peach Bottom Reactor (ซ้าย) AVR (ขวา) .....	6
2.4	โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Fort St.Vrain .....	6
2.5	การก่อสร้าง THTR ของประเทศเยอรมัน (ซ้าย) หลังจากสร้างสำเร็จ(ขวา) .....	6
2.6	ด้านการสูญเสียพลังงานความร้อน (Thermal Discharge) แบบ HTGR น้อยกว่าแบบ Light Water Reactor (LWR) ถึง 100%/MWe .....	7
2.7	ด้านการผลิตธาตุในคาบแอกทิไนด์ (Actinide Production) แบบ HTGR น้อยกว่าแบบ LWR ถึง 150%/MWe .....	7
2.8	กากกัมมันตภาพรังสีสูง (High Level Waste) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR มีปริมาณของเสียน้อยกว่าแบบ LWR ถึง 50%/ MWe .....	8
2.9	เม็ดเชื้อเพลิง Triso-Fuel microsphere 1.)แกนกลาง (Fuel Kernel) 2.) ชั้นบัฟเฟอร์ 3.) IPyC (Inner Pyrocarbon) 4.)Siliconcarbide (SiC) 5.) OPyC (Outer Pyrocarbon) .....	9
2.10	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปริมาณความเข้มข้น C และความลึกจากพื้นผิวของแข็ง x ตามเวลาของการแพร่ที่เกิดขึ้น .....	14
2.11	การฉาบเงินที่ผิวแห่ง ZrC .....	16
2.12	ค่า concentration ของการแพร่ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่า concentration จะมากตามไปด้วย .....	16
3.1	แห่ง ZrC .....	19
3.2	ขนาดเกรนของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (ZrC) .....	19
3.3	เตาอบและระบบเตาอบ .....	20
3.4	อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตาอบ.....	20
3.5	อุปกรณ์ที่ใช้กับเตาอบและแผ่นอะครีลิกสำหรับทำกล่องครอบ .....	20

รูปที่	หน้า
3.6	เครื่อง Temperature Controller CN9000A ..... 21
3.7	นำแท่ง ZrC หน้า 1 เซนติเมตรมาตัดแบ่งเพื่อนำไปใช้ในการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ 21
3.8	แผ่นเงินที่นำไปใช้ฉาบ ZrC ด้วยวิธีการ Sputtering ..... 22
3.9	แท่ง ZrC ผ่านการฉาบเงิน โดยวิธีการ Sputtering ..... 22
3.10	เทอร์โมคัพเปิด แบบ R ..... 22
3.11	ภาชนะทรงกระบอกแบบเซรามิกส์ที่ใช้ในการวิจัย ..... 23
3.12	ภาชนะทรงกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ..... 23
3.13	แผ่นฝาเซรามิกส์ที่ใช้ปิดลงบนภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ..... 23
3.14	ค่าอุณหภูมิของ Tube Furnace ตามแนวยาวของท่อที่อุณหภูมิ 1400 ° C ที่จุดกึ่งกลางท่อซึ่งควบคุมโดยเครื่อง Temperature Controller CN9000A ..... 24
3.15	ZrC ที่แตกเป็นผงละเอียด ..... 25
3.16	ภาชนะทรงกระบอกเซรามิกส์เมื่อผ่านการอบมาแล้วและนำไปตัด ..... 25
3.17	ภาชนะทรงกระบอกเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ..... 26
3.18	แผ่นฝาเซรามิกส์ที่ใช้ปิดลงบนภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ..... 26
3.19	ตัวอย่างที่อบโดยใช้วิธีเทเม็ดโลหะเงินทับลงบน ZrC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ..... 27
3.20	ตัวอย่างที่อบเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเกิดการบวมและแตกทะลัก ..... 27
3.21	การนำตัวอย่างที่ตัดตามแนวยาวแล้วนำมาเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปเข้าเครื่อง SEM ..... 27
4.1	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ ..... 29
	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน ..... 30
	(ค) ระยะทางของ Zirconium (Zr) ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ ..... 30
4.2	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ ..... 31
	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน ..... 31
	(ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ ..... 32
4.3	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ ..... 33

	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน .....	33
	(ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ .....	34
4.4	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ .....	35
	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน .....	35
	(ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ .....	36
4.5	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1500 °ซ .....	37
	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน .....	37
	(ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1500 °ซ .....	38
4.6	(ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1550 °ซ .....	39
	(ข) การแพร่ของโลหะเงิน .....	39
	(ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1550 °ซ .....	40
4.7	กราฟของอาร์เรเนียส (Arrhenius Plot) จากผลการวิจัย .....	42
ก.1	การยิงพลังงานมากกระตุ้นให้เกิด sputtered atom .....	47
ง.1	Wiring Heater with alarms diagram .....	50
ง.2	ฟังก์ชันควบคุมการเลือกใช้ Thermocouple .....	51

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากในอนาคตจะมีการใช้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled-Reactor หากลำดับตามการพัฒนาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้น ถือเป็นการพัฒนาในรุ่นที่ 4 ซึ่งจะมีใช้ในประมาณปี ค.ศ. 2030 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) มีข้อดีหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพสูง, การออกแบบที่นำโครงสร้างส่วนต่าง ๆ มาประกอบสำเร็จ ทำให้การก่อสร้างรวดเร็วขึ้นและประหยัดค่าใช้จ่ายมากขึ้น และมีระบบการดูแลรักษาความปลอดภัยที่ดีมากขึ้น รวมถึงการมีระบบความปลอดภัยแบบ Passive Safety Features ที่จะทำให้นुकูลากรที่ปฏิบัติหน้าที่ภายในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และสิ่งแวดล้อมมีความปลอดภัยจากการรั่วไหลของกัมมันตรังสีด้วย [1]

เชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้าชนิดนี้เป็นแบบเม็ดกลมและมีขนาดเล็กมาก เรียกว่า TRISO Fuel Microsphere โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแต่ละเม็ดมีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร โดยเม็ดเชื้อเพลิงชนิดนี้แต่ละชั้นมีส่วนประกอบดังต่อไปนี้ แกนกลาง (Fuel Kernel) ใช้ยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) (หรือยูเรเนียมคาร์ไบด์ (UC), ยูเรเนียมออกไซด์คาร์ไบด์ (UCO) ก็ได้), ชั้นบัฟเฟอร์, IPyC (Inner Pyrocarbon), Silicon Carbide (SiC), OPyC (Outer Pyrocarbon) [2]

จากส่วนประกอบต่าง ๆ ของเม็ดเชื้อเพลิงชนิดนี้ พบว่าชั้นซิลิคอนคาร์ไบด์ซึ่งมีความหนาประมาณ 35 ไมโครเมตร ( $\mu m$ ) เป็นชั้นที่มีความสำคัญเป็นพิเศษเนื่องจากเป็นชั้นที่ป้องกันสารกัมมันตรังสีไม่ให้ออกมาจากเม็ดเชื้อเพลิงได้ทั้งหมดยกเว้นเพียงเงิน (Silver, Ag) นอกจากนี้ SiC ยังมีข้อบกพร่องอีกบางประการ อาทิเช่น SiC จะเริ่มย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า  $1700^{\circ}C$  เป็นต้นไป และในระดับอุณหภูมิปกติที่  $1,000^{\circ}C$  SiC จะทำปฏิกิริยากับ แพลเลเดียม (Pd) เกิดเป็น แพลเลเดียมซิลิไซด์ ( $Pd_2Si$ ) ทั้งหมดนี้จึงส่งผลให้ชั้น SiC มีความเปราะสูญเสียความแข็งแรงไป [3]

ดังนั้นจึงได้มีการทดลองนำ เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (ZrC) มาใช้เป็นส่วนประกอบของเม็ดเชื้อเพลิงแบบ TRISO Fuel Microsphere แทนที่ชั้น SiC โดยเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์มีจุดหลอมเหลว  $3532^{\circ}C$  และมีจุดเดือด  $5100^{\circ}C$  ซึ่งสูงกว่าของ SiC มาก

เหตุผลและความสำคัญของการวิจัยการแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ เนื่องจาก Ag เป็นธาตุเดียวที่สามารถแพร่ออกมาจากเม็ดเชื้อเพลิงได้จึงสามารถที่จะเข้าสู่สารหล่อเย็นได้ โดย  $^{110m}Ag$  เป็นไอโซโทปรังสีที่เป็นอันตรายมากที่สุดของเงิน เนื่องจากการที่ปล่อยรังสีแกมมาออกมาในปริมาณสูง และนอกจากนี้ในช่วงอุณหภูมิ  $1400^{\circ}C$  -  $1600^{\circ}C$  ที่ทำการวิจัยนั้น

เป็นช่วงอุณหภูมิสูงที่อาจเกิดการแพร่ของธาตุเงินขึ้นได้ในกรณีอุบัติเหตุรุนแรง จึงจำเป็นต้องมีการวิจัยเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินใน ZrC ในช่วงอุณหภูมิ 1400°ซ - 1600°ซ ทั้งนี้เพื่อเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่าง ZrC และ SiC ด้วย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของโลหะเงินใน ZrC ในสภาวะอุณหภูมิระหว่าง 1400°ซ - 1600°ซ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. วิเคราะห์หาคุณสมบัติของแท่ง ZrC ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ความบริสุทธิ์ ขนาด เกรน ความพรุน ความหนาแน่น
2. ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแท่ง ZrC อย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ที่ฉาบด้วยโลหะเงินที่ผิวหน้า ในแก๊สอาร์กอน คือ 1400°ซ - 1600°ซ

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาแท่ง ZrC ซึ่งมีความหนาแน่นในระดับเดียวกับที่ใช้เป็นชั้นเคลือบของเม็ดเชื้อเพลิง TRISO fuel microsphere
3. จัดวางระบบของเตาเผา (furnace)
4. ตัดแท่ง ZrC ให้ได้ขนาดความยาวโดยมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร จะได้แผ่นกลมหนา 1 เซนติเมตรแล้วจึงตัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนและขัดผิวหน้าให้เรียบ
5. นำ ZrC ไปเคลือบโลหะเงินที่บริเวณผิวด้วยวิธีการ sputtering
6. นำ ZrC ใส่ลงไปในภาชนะทรงกระบอกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม แล้วจึงนำเม็ดเงินประมาณ 30 กรัม เติลงไปใน ZrC แล้วนำเข้าเตาอบ โดยอบในช่วงอุณหภูมิ 1400°ซ - 1600°ซ
7. วัดค่าความเข้มข้นของเงินในระยะต่างๆจากผิวหน้าโดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope
8. สรุปผลและเขียนรายงานการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย

ทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของโลหะเงินใน ZrC ในสภาวะอุณหภูมิระหว่าง 1400°ซ - 1600°ซ ซึ่งมีประโยชน์ในด้านเป็นองค์ความรู้ใหม่สำหรับการสร้างเม็ดเชื้อเพลิง TRISO Fuel Microsphere ในอนาคตเพื่อรองรับแผนการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor ที่จะมีขึ้นภายในปี ค.ศ. 2030

## 1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1.6.1. F.J.Sandalls and Mrs. M.R. Walford (1976)

งานวิจัยนี้ได้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสตรอนเชียมในแกรไฟต์เนื่องจากในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR ได้ใช้แกรไฟต์เป็นตัวกั้นระหว่างเม็ดเชื้อเพลิงและระบบสารหล่อเย็น ซึ่งการวัดนี้จะนำไปใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสตรอนเชียมที่จะทะลุผ่านผนังเม็ดเชื้อเพลิงออกมาภายใต้อุณหภูมิสูง ของ High Temperature Gas Cooled Reactor โดยขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง เริ่มจากทำผงแกรไฟต์อัดเป็นแท่งด้วยการเติม phenol-formaldehyde binder และอบที่ 1200 °ซ ใน Ar และ 1800 °ซ ในสุญญากาศ เพื่อให้ได้แท่งแกรไฟต์บริสุทธิ์ จากนั้นตัดแท่งแกรไฟต์เป็นทรงกระบอก 1 cm × 1 cm ซึ่งการวิจัยนี้ทำการอบในช่วงอุณหภูมิ 1000°ซ

ผลจากการวิจัยได้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสตรอนเชียมในแกรไฟต์ช่วงอุณหภูมิ 1000 °ซ หาได้มีค่าอยู่ระหว่าง  $8.9 \times 10^{-11} - 8.9 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$

### 1.6.2. K. Minato, T. Ogawa, K. Fukuda, H. Sekino, I. Takahashi (1990)

ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการอบ ZrC ที่ใช้เคลือบแทน SiC ในเม็ดเชื้อเพลิงแบบ TRISO Fuel Microsphere ที่ 1600 °ซ เป็นเวลา 4500 ชั่วโมง และที่ 1800 °ซ เป็นเวลา 3000 ชั่วโมง โดยเป็นการศึกษาพฤติกรรมของ Fission Products ในด้านต่าง ๆ ของ ZrC เทียบกับ SiC เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ  $^{137}\text{Cs}$  และ  $^{106}\text{Ru}$  ที่แพร่ผ่านใน ZrC เป็นต้น

### 1.6.3. O. Dogan (2004)

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการวิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเงินใน  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  เพื่อต้องการปรับปรุงประสิทธิภาพของ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  ในการทำเป็นตัวนำยิ่งยวดโดยใช้หลักการ X-Ray Diffraction (XRD) ในการหาค่าความเข้มข้นของเงิน จากนั้นนำค่าความเข้มข้นที่ได้ไปหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเงิน จากสมการ

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \text{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

$$D = D_0 e^{-E/RT}$$

นำค่าความเข้มข้นไปแสดงในกราฟจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเงินใน  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  มีค่าประมาณ  $1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$  ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 750 °ซ – 850 °ซ

## บทที่ 2 ทฤษฎี

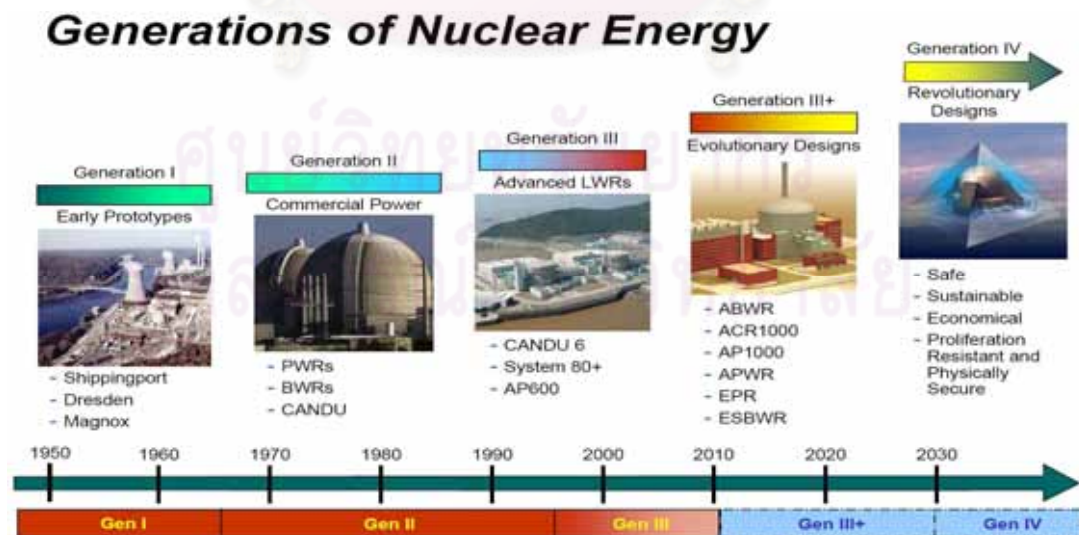
### 2.1 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor

เนื่องจากในอนาคตจะมีการนำโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR) [4] มาใช้งาน ซึ่งจะใช้ก๊าซในการหล่อเย็นระบบ เช่น ก๊าซฮีเลียม (He) เมื่อใช้ก๊าซ จะพบว่า ประสิทธิภาพพลังงานความร้อนที่ได้จาก Gas Turbine Cycle มีค่าประมาณ 50% ขณะที่ ประสิทธิภาพพลังงานความร้อนที่ได้จาก Steam Cycle จะได้ประมาณ 33% เท่านั้น จะเห็นว่าระบบ Gas Turbine Cycle จะมีค่าประสิทธิภาพที่ดีกว่า

ในการก่อสร้างนั้น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR จะมีลักษณะเป็นแบบ Modular Design (แบบสำเร็จรูป) ซึ่งช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้าง ลดค่าใช้จ่าย ลดความเสี่ยงทางเศรษฐกิจ นอกจากนี้ยังมีการปรับปรุงระบบ Passive Safety Features ทำให้มีความปลอดภัยในการปฏิบัติงานยิ่งขึ้น

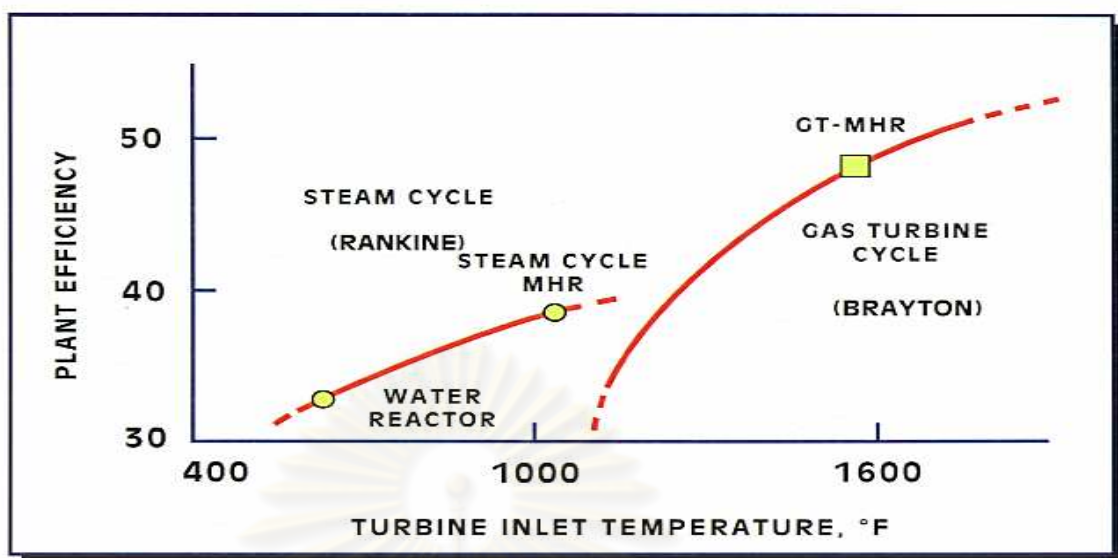
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) นั้นหากลำดับตามการพัฒนาของรุ่นโรงไฟฟ้านิวเคลียร์นั้น ถือเป็นการพัฒนาในรุ่นที่ 4 ซึ่งจะมีใช้ในประมาณปี ค.ศ. 2030 ดังรูปที่ 2.1

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.1 แล้วนั้นจะพบว่าโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่มีใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าและใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ของแต่ละประเทศในปัจจุบันนั้น ถือเป็นรุ่นที่ 2 (Generation II) และ 3 (Generation III) เช่น Light Water Reactor, Heavy Water Reactor [5]



รูปที่ 2.1 การพัฒนาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์





รูปที่ 2.2 ค่าประสิทธิภาพเปรียบเทียบระหว่างระบบ Steam Cycle และ Gas Turbine Cycle

### ประวัติและการพัฒนา (Development History)

การวิจัยและพัฒนาของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High-Temperature Gas-Cooled Reactor นั้น ได้เริ่มต้นในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา (United States) อังกฤษ (Great Britain) เยอรมนี (Federal Republic of Germany) โดยเริ่มในช่วงปลายทศวรรษ 50 [6]

ประเทศอังกฤษได้เริ่มพัฒนาภายใต้โครงการชื่อ “The International Dragon Reactor Project” ส่วนประเทศสหรัฐอเมริกามี Peach Bottom Reactor ซึ่งการพัฒนานี้ได้มีแนวคิดที่รับอิทธิพลจากประเทศอังกฤษ ที่ใช้หลักการระบบโรงไฟฟ้าแบบ Gas-Cooled Reactor แต่ทางสหรัฐอเมริกามีเจตนาจะไปใช้ในทางอุตสาหกรรมมากกว่าทางประเทศอังกฤษ สำหรับประเทศเยอรมันนั้นไม่มีความรู้แลกเปลี่ยนวิชาการกับทางอังกฤษและสหรัฐอเมริกา ดังนั้นรูปแบบการพัฒนาของประเทศเยอรมันจะแตกต่างไปเป็นแบบ Pebble-Bed Reactor แต่เป้าหมายและการพัฒนาของทั้งสามประเทศมีแนวทางเดียวกัน คือ การเพิ่มอุณหภูมิของระบบสารหล่อเย็นภายในเตาปฏิกรณ์ให้สูงมากขึ้นเท่าที่จะทำได้

ปัญหาที่พบในช่วงแรก คือ ยังไม่มีวัสดุเซรามิกส์แบบใดที่จะนำมาเคลือบเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งจะสามารถป้องกันการซึมทะลุผ่านออกมาของ Fission Products ได้ ดังนั้นระบบหล่อเย็น (Coolant Gas) ของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR จึงปนเปื้อนกัมมันตรังสีในระดับสูง



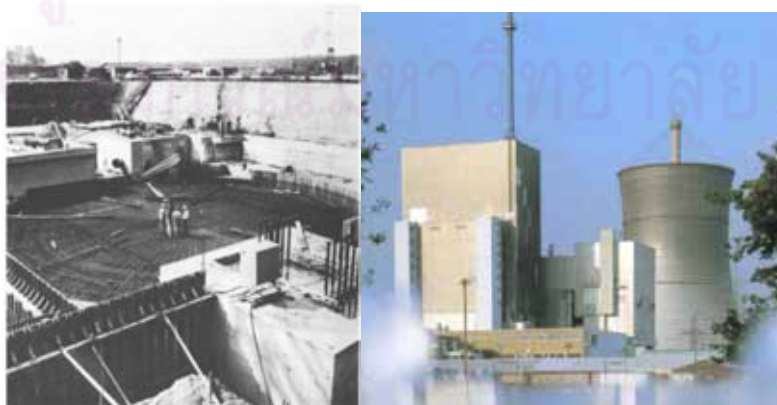
รูปที่ 2.3 Peach Bottom Reactor (ซ้าย) AVR (ขวา)

การพัฒนาโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR ในช่วงแรก ๆ นั้น ผลิตพลังงานได้ไม่มากนัก ส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 30 – 40 MW (e) ช่วงแรกมีเพียง Dragon Reactor เท่านั้นที่ประสบความสำเร็จและสามารถเดินเครื่องอยู่เป็นระยะเวลาหลายปี

ในเวลาต่อมา ได้มีการสร้าง Fort St. Vrain Reactor รัฐโคโลราโด ประเทศสหรัฐอเมริกา (Colorado, United States) ซึ่งสามารถผลิตพลังงานได้สูงมากขึ้นถึง 330 MW (e) และที่เยอรมันได้สร้าง THTR ซึ่งมีพลังงานมากถึง 300 MW (e)



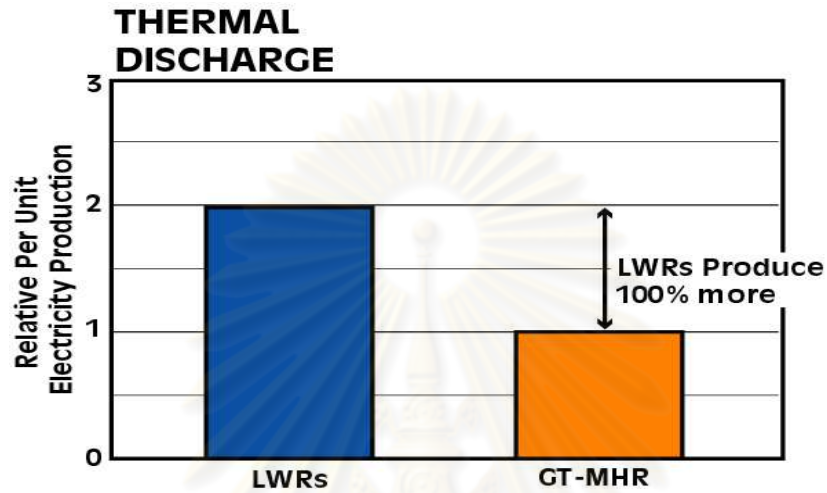
รูปที่ 2.4 โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ Fort St.Vrain



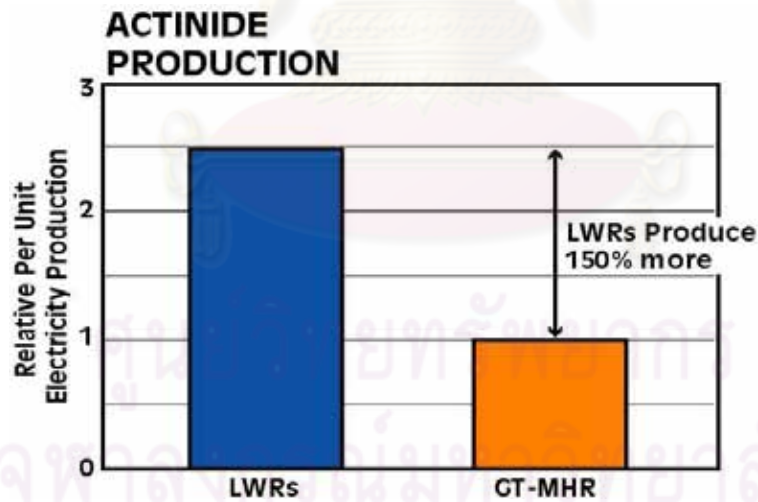
รูปที่ 2.5 การก่อสร้าง THTR ของประเทศเยอรมัน (ซ้าย) หลังจากสร้างสำเร็จ (ขวา)

## ข้อดีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR

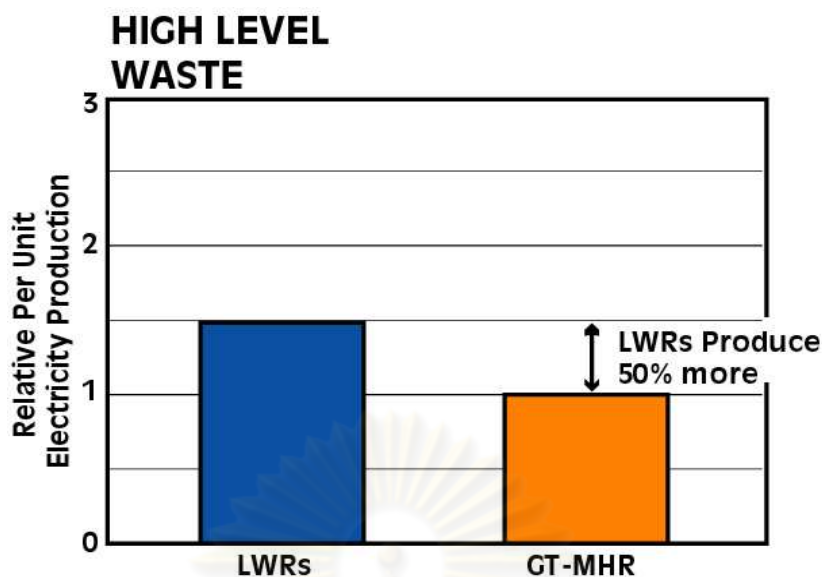
1. มีค่าความจุความร้อนภายในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์สูง
2. สามารถเดินเครื่องโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง
3. ความสามารถในการกักเก็บ Fission Products ไว้ภายในเม็ดเชื้อเพลิงได้สูง
4. การมีระบบสารหล่อเย็นด้วยแก๊สฮีเลียม (He) ซึ่งเป็นแบบ Single-Phase



รูปที่ 2.6 ด้านการสูญเสียพลังงานความร้อน (Thermal Discharge) แบบ HTGR น้อยกว่าแบบ Light Water Reactor (LWR) ถึง 100%/MWe



รูปที่ 2.7 ด้านการผลิตธาตุในคาบแอกทีฟ (Actinide Production) แบบ HTGR น้อยกว่าแบบ LWR ถึง 150%/MWe



รูปที่ 2.8 กากกัมมันตภาพรังสีสูง (High Level Waste) โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR มีปริมาณของเสียน้อยกว่าแบบ LWR ถึง 50%/MWe

## 2.2 เม็ดเชื้อเพลิง TRISO Fuel Microsphere

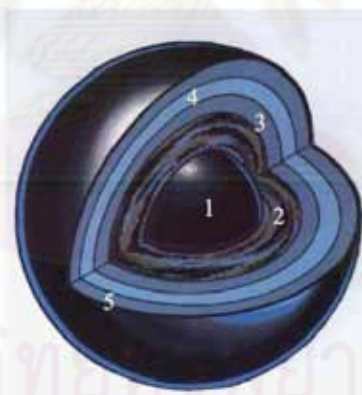
โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR ใช้เชื้อเพลิงเป็นแบบ Ceramics Coated Particle Fuel โดยจะมีชั้น Fuel Kernel ขนาดเล็กมาก มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 500 ไมโครเมตร ( $\mu\text{m}$ ) และถูกเคลือบด้วย ไพโรคาร์บอน (Pyrocarbon, PyC) และ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ชั้นเคลือบเหล่านี้ถูกออกแบบมาเพื่อกักเก็บ Fission Products ที่เกิดขึ้นไว้ใน Fuel Kernel ไม่ให้รั่วไหลออกมาจนเกิดเชื้อเพลิง การใช้เม็ดเชื้อเพลิงแบบนี้ช่วยให้โรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR สามารถเดินเครื่องได้ในช่วงอุณหภูมิที่สูงมากขึ้นกว่าเดิม และยังเพิ่มประสิทธิภาพของงานอีกด้วย

พื้นฐานการออกแบบเม็ดเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ HTGR นั้นจะยึดรูปแบบ TRISO ซึ่งรูปแบบ TRISO นี้จะประกอบด้วย Fuel Kernel และจะเคลือบด้วยชั้นต่าง ๆ เรียงมาดังนี้ คือ ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) ชั้น Inner Pyrocarbon (IPyC) ชั้นซิลิคอนคาร์ไบด์ (Silicon carbide, SiC) ชั้น Outer Pyrocarbon (OPyC) ซึ่งแต่ละชั้นจะมีหน้าที่หลักที่แตกต่างกันไป ดังนี้

1. เม็ดเชื้อเพลิง (Fuel Kernel) โดยปกติ fuel kernel จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง  $200 \mu\text{m} - 600 \mu\text{m}$  เชื้อเพลิงที่นำมาใช้ก็มีหลายชนิด โดยส่วนใหญ่จะใช้  $\text{UO}_2$  และ UCO นอกจากนี้ fission products ที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่จะถูกกักเก็บไว้ในเม็ดเชื้อเพลิงด้วย
2. บัฟเฟอร์ (Buffer) ชั้นบัฟเฟอร์นี้โดยปกติจะมีความหนาของชั้นอยู่ที่ประมาณ  $100 - 150 \mu\text{m}$  และประกอบไปด้วย low-density pyrocarbon ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับ Fission Products โดยเฉพาะ fission gas ที่เกิดมาจาก Fuel Kernel ซึ่ง Fission Products

จะอยู่ภายในช่องว่างของบัฟเฟอร์ (Void) และรองรับการขยายตัวออกมาของ Fuel Kernel ระหว่างเดินเครื่องเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์อยู่ด้วย ซึ่งความหนาแน่นของชั้น Buffer นี้จะมีค่าอยู่ประมาณ  $1 \text{ g/cm}^3$  (ค่าความหนาแน่นของ pyrocarbon อยู่ที่  $2.26 \text{ g/cm}^3$ )

3. Inner Pyrocarbon (IPyC) มีความหนาอยู่ที่ประมาณ  $35 \mu\text{m}$  เป็นชั้นแรกที่จะป้องกันการรั่วไหลของ Fission Products และกักเก็บ Fission Products ที่อยู่ในสถานะแก๊ส เช่น คริปตอน (Krypton), ซีซอน (Xenon) นอกจากนี้ชั้น IPyC ยังป้องกัน Fuel Kernel ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับคลอรีน (ระหว่างกระบวนการเคลือบชั้น SiC ด้วย) นอกจากนี้ในชั้น IPyC นี้จะเกิดการหดตัวขึ้นขณะมีการเดินเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ด้วย
4. ชั้นซิลิคอนคาร์ไบด์ มีความหนาประมาณ  $35 \mu\text{m}$
5. Outer Pyrocarbon (OPyC) มีความหนาประมาณ  $40 \mu\text{m}$  เป็นไพโรคาร์บอนชนิดเดียวกับชั้น IPyC ชั้นนี้จะช่วยในการป้องกันการสึกหรอของชั้น SiC ในระหว่างกระบวนการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงด้วย นอกจากนี้การหดตัวของชั้น IPyC และชั้น OPyC ยังมีผลทำให้ชั้น SiC เกิดการบีบอัดภายในชั้นทำให้เกิดกลไกที่ทำให้เม็ดเชื้อเพลิงมีเสถียรรูปที่ดีมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.9 เม็ดเชื้อเพลิง Triso-Fuel microsphere 1.)แกนกลาง (Fuel Kernel) 2.) ชั้นบัฟเฟอร์ 3.) IPyC (Inner Pyrocarbon) 4.) Silicon carbide (SiC) 5.) OPyC (Outer Pyrocarbon)

## ปัญหาที่พบภายในเม็ดเชื้อเพลิง TRISO Fuel Microsphere

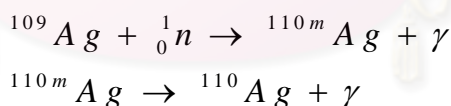
- Kernel Coating Interactions เนื่องมาจากคาร์บอนสามารถเคลื่อนย้ายไปตามการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ จากปัจจัยนี้มีผลทำให้ชั้น Kernel และชั้น Silicon Carbide (SiC) เคลื่อนย้ายมาเจอกัน และยังมีผลทำให้ชั้นเคลือบเกิดการสึกกร่อนอีกด้วย

- Silicon Carbide-Fission Products Interactions เนื่องจาก Fission Products สามารถหลุดร่วออกมาจาก Kernel มาถึงชั้น SiC ได้ เช่น แพลเลเดียม (Pd) เมื่อทำปฏิกิริยากับ SiC แล้วจะส่งผลให้ชั้น SiC สึกกร่อนลงได้

ไอโซโทปต่าง ๆ ของโลหะเงินสามารถที่จะแพร่ผ่านชั้นซิลิคอนคาร์ไบด์ออกมาได้ และได้มีการวิจัยศึกษาในเรื่องนี้มาเป็นระยะเวลากว่าสามทศวรรษแล้ว จึงจำเป็นที่จะต้องศึกษาเรื่องนี้ เพราะเป็นปัจจัยสำคัญในการซ่อมบำรุงดูแลรักษาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ด้วย ซึ่งชาตุนั้นสามารถแพร่ผ่านชั้น SiC มาด้วยการแพร่ผ่านเกรน (Grain Boundary Diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับโครงสร้างของ SiC ด้วย ดังนั้นจึงได้มีการสร้างโครงสร้างของ SiC ให้มีลักษณะที่ซับซ้อนมากขึ้น เพื่อที่จะลดขนาดของเกรนให้เล็กลง โดยใช้โครงสร้างเกรนภายในเป็นแบบ Columnar Grain ซึ่งเป็น Single Grain Boundary ที่เชื่อมต่อระหว่างผิวด้านในและด้านนอกของ SiC ทั้งนี้เพื่อช่วยให้การแพร่ผ่านเกรนนั้นเป็นไปได้ยากขึ้น

### 2.3 $^{110m}\text{Ag}$

$^{110m}\text{Ag}$  เป็นไอโซโทปหลักที่ออกมาจากชั้นเคลือบเม็ดเชื้อเพลิง ซึ่งมีระยะเวลาครึ่งชีวิต (half-life) 253 วัน ไอโซโทปนี้เกิดจากกระบวนการ Neutron capture ของ  $^{109}\text{Ag}$



โดย  $^{109}\text{Ag}$  เกิดมาจาก  $^{109}\text{Pd}$  สลายตัวให้อนุภาค  $\beta$  และสิ่งที่น่าเป็นห่วง คือ เมื่อโลหะเงินแพร่ออกมาจะทำให้ระดับกัมมันตรังสีในระบบเพิ่มสูงมากขึ้น ทำให้การดูแลรักษาซับซ้อนมากขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ปัญหาด้านสุขภาพของบุคลากรที่ดูแลรักษาด้วย

ที่ Dragon Reactor (อังกฤษ) และ AVR Reactor (เยอรมัน) พบว่าเพียง 0.1% ของ  $^{109}\text{Ag}$  ที่เปลี่ยนไปเป็น  $^{110m}\text{Ag}$  นั้นมีค่าแกมมาโดสเรท (Gamma – Ray Dose Rate) มากกว่า  $^{137}\text{Cs}$  ถึงห้าเท่า (Fission Product จาก Uranium-235 จะมี Cesium และ Strontium ที่มีกัมมันตภาพรังสีสูง และเป็นอันตรายมากเมื่อรั่วไหลออกมาสู่สิ่งแวดล้อม ซึ่ง ซีเซียม-137 ปลดปล่อยแกมมา 0.662 MeV) ดังนั้น  $^{110m}\text{Ag}$  จึงถูกพิจารณาให้เป็น Fission Product ตัวสำคัญที่เป็นอันตราย

## 2.4 การแพร่ [7]

### 2.4.1 การแพร่ของอะตอมในของแข็ง (Diffusion)

กลไกการเคลื่อนย้ายอะตอมของธาตุในสสารของแข็ง, ของเหลว และก๊าซ เพื่อขนถ่ายอะตอมของธาตุหนึ่งเข้าไปในธาตุอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า การแพร่ (Diffusion) ถือว่าเป็นปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของอะตอมในโลหะ ในบทนี้จะกล่าวถึง กลไกการแพร่ของอะตอม, หลักการคำนวณอัตราการแพร่ และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่ออัตราการแพร่ อาทิเช่น อุณหภูมิและรูปแบบของการแพร่ เป็นต้น

ตัวอย่างปรากฏการณ์ของการแพร่สามารถแสดงด้วยชิ้นงานโลหะ ซึ่งเป็นแท่งโลหะต่างชนิดที่ถูกรวมต่อกันบริเวณผิวหน้าของโลหะ แสดงชิ้นงานโลหะของทองแดงและนิกเกิล และการจัดเรียงอะตอมภายในแท่งโลหะ โดยชิ้นงานโลหะจะได้รับการกระตุ้นด้วยความร้อน ซึ่งระดับอุณหภูมินี้จะต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของโลหะทั้งสอง หลังจากนั้นจะถูกลดอุณหภูมิลงจนเท่ากับอุณหภูมิห้องเมื่อวิเคราะห์ด้วยหลักการทางเคมีแล้วพบว่า โลหะทั้งสองชนิดจะมีปริมาณความเข้มข้นต่างกันตามระยะห่างจากจุดเชื่อมต่อ นั่นคือ บริเวณพื้นผิวที่ติดกันจะเกิดเป็นโลหะผสมของทองแดงและนิกเกิล และห่างออกมาจะเริ่มมีปริมาณของธาตุนั้น ๆ เพิ่มมากขึ้น อะตอมของทองแดงจะแพร่เข้าสู่นิกเกิล และอะตอมของนิกเกิลจะแพร่เข้าสู่ทองแดงเช่นกัน อาจเรียกกระบวนการนี้ว่า Interdiffusion หรือ Impurity Diffusion การแพร่ในลักษณะ Interdiffusion สามารถใช้กลไกของจุดทรศน์ในการสังเกตปรากฏการณ์ของการแพร่ที่เกิดขึ้นได้ และเมื่อเวลาผ่านไปปริมาณของโลหะที่ผสมเข้าด้วยกันจะเพิ่มตามไปด้วย ดังตัวอย่างของทองแดงและนิกเกิล นั่นคือ อะตอมจะแพร่จากบริเวณที่มีปริมาณความเข้มข้นของธาตุนั้น ๆ สูงไปยังต่ำ สำหรับโลหะบริสุทธิ์นั้น สามารถเกิดการแพร่ของอะตอมได้ในลักษณะเดียวกัน แต่เรียกว่า Self-diffusion แทน

### 2.4.2. กลไกการแพร่ของอะตอม (Diffusion Mechanisms)

เมื่อพิจารณาโครงสร้างระดับอะตอมแล้ว การแพร่จัดเป็นขั้นตอนของการเคลื่อนย้ายอะตอมจากบริเวณแลตทิซหนึ่งไปยังอีกแห่งหนึ่ง แต่ในความเป็นจริง อะตอมภายในวัสดุของแข็งจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ และมีเปลี่ยนตำแหน่งอย่างรวดเร็วภายในผลึก โดยมีเงื่อนไข 2 ประการ คือ ภายในผลึกจะต้องมีพื้นที่ว่างเกิดขึ้น และอะตอมจะต้องมีพลังงานสูงเพียงพอที่จะทำการแตกพันธะอะตอมที่มีอยู่ด้วย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการบิดเบี้ยวระหว่างการแทนที่ของอะตอมนั่นเอง ส่วนพลังงานนี้เกิดขึ้นจากการสั่นสะเทือนของอะตอม ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ อะตอมส่วนหนึ่งจะมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้น ดังนั้น จำนวนอะตอมที่จะเกิดการแพร่ภายในผลึกนั้นจะเพิ่มขึ้นตามระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น สำหรับการเคลื่อนที่ของอะตอมมีหลายรูปแบบด้วยกัน ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในโลหะแบ่งเป็น 2 แบบ ดังนี้

### 2.4.2.1 การแพร่ของอะตอมแบบช่องว่าง (Vacancy Diffusion)

กลไกการแพร่ของอะตอมที่สำคัญแบบหนึ่ง คือ การเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมจากบริเวณแลตทิซหนึ่งไปยังบริเวณช่องว่างที่ติดกันหรือใกล้เคียงกัน เรียกว่า การแพร่ของอะตอมแบบช่องว่าง (Vacancy Diffusion) โดยโครงสร้างผลึกจะต้องมีช่องว่างอยู่แล้ว การแพร่ของอะตอมจึงจะสามารถเกิดขึ้นได้ หรืออาจกล่าวได้ว่าโครงสร้างผลึกเกิดความไม่สมบูรณ์ (Defect) อยู่นั่นเอง และจะเห็นว่าอะตอมจะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณช่องว่าง ซึ่งมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของช่องว่าง ก็คือเกิดการสลับที่ระหว่างอะตอมและช่องว่าง และสามารถสรุปได้ว่าทั้ง Interdiffusion และ Self-diffusion มีลักษณะของกลไกการแพร่ของอะตอมแบบช่องว่างนั่นเอง

### 2.4.2.2 การแพร่ของอะตอมแบบแทรก (Interstitial Diffusion)

การแพร่ของอะตอมอีกแบบหนึ่งมีลักษณะการเปลี่ยนตำแหน่งของอะตอมจากบริเวณช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างอะตอมไปยังช่องว่างใกล้เคียงกัน ส่วนใหญ่กลไกลักษณะนี้เกิดขึ้นในโลหะผสมของธาตุไฮโดรเจน, คาร์บอน, ไนโตรเจน และออกซิเจน ซึ่งมีขนาดของอะตอมเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างอะตอมได้ และเรียกว่าการแพร่ของอะตอมแบบแทรก (Interstitial Diffusion) ส่วนใหญ่โลหะผสมจะเกิดการแพร่ของอะตอมแบบแทรกได้รวดเร็วกว่าแบบช่องว่าง เนื่องจากอะตอมมีขนาดเล็กจึงเคลื่อนที่ไปยังช่องว่างเล็ก ๆ ได้ดีกว่าอะตอมขนาดใหญ่ นอกจากนี้ โครงสร้างผลึกยังมีช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างอะตอมมากกว่าด้วย ดังนั้นอะตอมส่วนใหญ่จึงมีการแพร่แบบแทรกมากกว่าแบบช่องว่าง

### 2.4.3. การแพร่ในสถานะคงตัว (Steady-State Diffusions)

การแพร่ของอะตอมเป็นกระบวนการที่ขึ้นอยู่กับเวลา นั่นคือ ปริมาณของธาตุที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณหนึ่งขึ้นอยู่กับเวลาที่ผ่านไป ดังนั้น จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทราบอัตราการเคลื่อนที่ของอะตอม ซึ่งเรียกว่า Diffusion Flux ( $J$ ) เป็นอัตราการแพร่ของมวลหรืออะตอม ( $M$ ) ที่เคลื่อนที่ไปยังบริเวณหนึ่ง ๆ ต่อเวลา แสดงดังสูตร [8]

$$J = M/At \quad (2.1)$$

เมื่อ  $J$  = อัตราการแพร่ ( $\text{kg/m}^2\text{s}$  หรือ  $\text{atom/m}^2\text{s}$ )  
 $A$  = พื้นที่ที่เกิดการแพร่ของอะตอม  
 $t$  = ระยะเวลาที่เกิดขึ้น

ถ้าค่า Diffusion Flux ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา กระบวนการแพร่จะอยู่ในสถานะคงตัว (Steady-State Diffusions) นั่นคือ การแพร่ของอะตอมในสถานะก๊าซผ่านไปยังแผ่นโลหะทั้ง 2 ด้านในลักษณะเดียวกัน ถ้าการแพร่ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างอะตอมที่เคลื่อนที่เป็นตัวถูกละลาย และอะตอมของโลหะที่เป็นตัวทำละลายแล้ว อัตราการแพร่ ( $J$ ) ของอะตอมจะได้ตามกฎข้อที่หนึ่งของ Fick (Fick's first law)



#### 2.4.4. การแพร่ในสถานะไม่คงตัว (Nonsteady-State Diffusions)

การแพร่ของอะตอมส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะไม่คงตัว คือ ความเข้มข้นของอะตอม ณ บริเวณหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า Diffusion Flux และ Concentration Gradient ขึ้นอยู่ระยะเวลา ซึ่งทราบกันในรูปของกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's second law) กล่าวว่าการแพร่เร็วในการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น ( $dC/dx$ ) จะเท่ากับค่าอนุพันธ์ของผลคูณระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามระยะทาง โดยจะพิจารณาค่าหนึ่งและระยะเวลาของการแพร่ที่เกิดขึ้น มีเงื่อนไขการพิจารณา ดังนี้

- 1) ก่อนกระบวนการแพร่ อะตอมของตัวถูกละลายภายในของแข็งมีการจัดเรียงตัวแบบเป็นระเบียบและมีปริมาณความเข้มข้น  $C_0$
- 2) ระยะทาง  $x$  เป็นศูนย์ที่ตำแหน่งพื้นผิวของแข็ง และจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความลึกจากพื้นผิว
- 3) ระยะเวลาเริ่มต้นจากศูนย์ ก่อนการเกิดขึ้นของกระบวนการแพร่ของอะตอม การแพร่ในสถานะไม่คงตัว สามารถแสดงได้ว่า

$$\begin{array}{lll} \text{สำหรับ} & t = 0, C = C_0 & \text{เมื่อ } 0 \leq x \leq \infty \\ & t > 0, C = C_s & \text{เมื่อ } x = 0 \\ & C = C_0 & \text{เมื่อ } x = \infty \end{array}$$

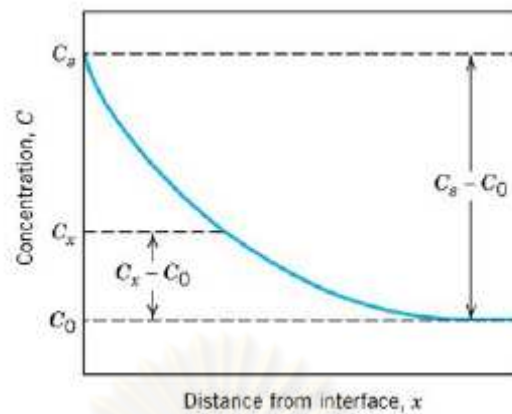
และสามารถเขียนสมการได้ใหม่ ดังนี้

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

เมื่อ  $C_s$  = ปริมาณความเข้มข้นที่ผิวของของแข็ง  
 $C_0$  = ปริมาณความเข้มข้นที่อยู่ในของแข็งก่อนเกิดการแพร่  
 $C_x$  = ปริมาณความเข้มข้นที่ความลึก  $x$  เมื่อเวลาผ่านไป  $t$   
 $\operatorname{erf}(x / 2\sqrt{Dt})$  = Gaussian error function

ตารางที่ 2.1 ค่า erf บางส่วน

$z$	$\operatorname{erf}(z)$	$z$	$\operatorname{erf}(z)$	$z$	$\operatorname{erf}(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรปริมาณความเข้มข้น  $C$  และความลึกจากพื้นผิวของแข็ง  $x$  ตามเวลาของการแพร่ที่เกิดขึ้น

หรือนำสมการ (2.1) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$C(x, t) = \frac{C_0}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (2.2)$$

#### 2.4.5. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแพร่ (Factors That Influence Diffusion)

##### รูปแบบของการแพร่ (Diffusion Species)

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $D$ ) คำนวณหาค่าได้จากอัตราการแพร่ของอะตอม ทั้งการแพร่ในลักษณะ Interdiffusion และ Self-diffusion สำหรับโลหะที่เกิดการแพร่ของอะตอม ซึ่งกลุ่มของธาตุโลหะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ด้วย เช่น ความแตกต่างของค่า  $D$  เมื่อเปรียบเทียบรูปแบบการแพร่ของอะตอมที่แตกต่างกันระหว่าง Self-diffusion และ Interdiffusion ในโลหะ  $\alpha$ -Fe ณ อุณหภูมิ 500 °ซ มีค่า  $3.0 \times 10^{-21}$  และ  $2.4 \times 10^{-12}$   $\text{m}^2/\text{s}$  ตามลำดับ พบว่าการแพร่ของคาร์บอนในโลหะที่มีลักษณะแบบแทรกนั้น มีค่าสัมประสิทธิ์สูงกว่าการแพร่แบบช่องว่างของโลหะผสมชนิดอื่น ๆ

##### อุณหภูมิ (Temperatures)

ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแพร่ที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ อุณหภูมิ ซึ่งมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์และอัตราการแพร่ ตัวอย่างเช่น การแพร่ของเหล็กในลักษณะ Self-diffusion ในโลหะ  $\alpha$ -Fe นั้น ค่าสัมประสิทธิ์จะเพิ่มขึ้น เช่น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เพิ่มจาก  $3.0 \times 10^{-21}$  เป็น  $1.8 \times 10^{-15}$   $\text{m}^2/\text{s}$  เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 500 °ซ เป็น 900 °ซ

มีสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$$D = D_0 e^{-E/RT} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $D$  = ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$D_0$  = ค่าสัดส่วนคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่โดยไม่มีขึ้นกับอุณหภูมิ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

E	=	พลังงานกระตุ้นของอะตอมที่แพร่เข้าไปในของแข็ง , J/mol หรือ cal/mol
R	=	ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 J/(mol·K) หรือ 1.987 cal/(mol·K))
T	=	อุณหภูมิ (K)

#### 2.4.6 การหาค่าความหนาของแมทริกซ์

จากสมการที่ (2.1) เมื่อนำตารางที่ 2.1 มาใช้พบว่าจะได้ค่า Z มีค่าเท่ากับ  $\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$  ซึ่งค่า Z ที่ทำให้ค่า  $\text{erf}(Z)$  มีค่าเข้าใกล้ 1 (สาเหตุที่ต้องเข้าใกล้ 1 เพราะว่าจะได้ทำให้อัตราส่วนระหว่าง  $\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0}$  มีค่าน้อยมากที่สุด ตามรูปที่ 2.10) นั้นจะได้ Z มีค่าประมาณ 2 หมายความว่าสามารถประมาณค่า

$$\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = 2$$

ทำให้สามารถหาค่าความหนาของแมทริกซ์เพื่อที่จะได้หาค่าความหนาที่เหมาะสมของตัวอย่างเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ที่จะนำไปใช้ในการวิจัยได้อย่างเหมาะสม

$$x_d = 4\sqrt{Dt} \quad (2.4)$$

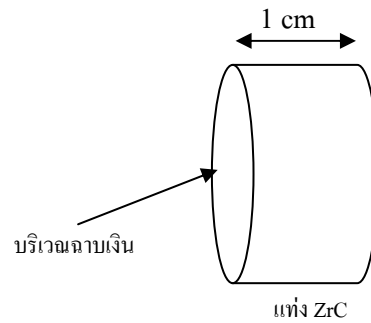
เมื่อ	$x_d$	=	ความหนาของแมทริกซ์ (m)
	D	=	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
	t	=	ระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่ (s)

งานวิจัยนี้ได้ประมาณเวลาที่ใช้ในการอบเป็นระยะเวลา 1 วัน (86400 วินาที) และได้เทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินใน SiC นั้นได้นำมาจากงานวิจัยเรื่อง 'Silver Transport in CVD Silicon Carbide' ซึ่งมีค่าประมาณ  $10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$

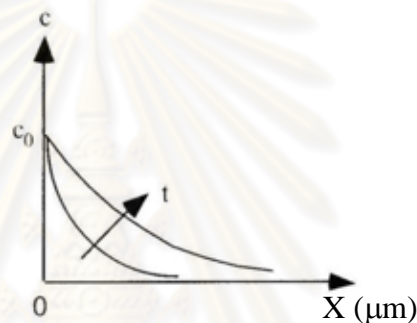
ดังนั้นเมื่อนำไปคำนวณลงในสูตรจะได้ค่าความหนาของ ZrC มีค่าประมาณ  $1.70 \times 10^{-6} \text{ cm}$  ดังนั้นการที่เราเลือกใช้ความหนา 1 cm จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์นี้

#### 2.4.7 การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในของแข็ง

การแพร่ของ species a ใน matrix b ในที่นี้ยกตัวอย่างการแพร่ของเงิน (Ag) ในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (ZrC) โดยบริเวณผิวของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์จะฉาบด้วยโลหะเงินที่จะแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์



รูปที่ 2.11 การฉาบเงินที่ผิวแท่ง ZrC



รูปที่ 2.12 ค่า concentration ของการแพร่ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นค่า concentration จะมากตามไปด้วย โดยเมื่อนำเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ไปผ่านการอบในเตาอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากนั้นนำไปวัดค่า concentration ของการแพร่ของโลหะเงินที่เข้าไปใน ZrC แล้วนำไปเขียนกราฟโดยให้แกน Y เป็นค่า concentration แกน x เป็นค่า x (ระยะทางที่เงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์) จากกราฟพบว่าเมื่อใช้เวลาในการอบในเตาอบมากขึ้นค่า concentration จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

การแพร่ของอะตอมส่วนใหญ่จะอยู่ในสถานะไม่คงตัว (Nonsteady-State Diffusions) ความเข้มข้นของอะตอม ณ บริเวณหนึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่าค่า Diffusion Flux และ Concentration Gradient ขึ้นอยู่กับระยะเวลา ดังรูปที่ 2.12 แสดง Concentration Profile ณ เวลาการแพร่ที่แตกต่างกัน ภายใต้สถานะไม่คงตัว ซึ่งทราบกันในรูปแบบของกฎข้อที่สองของ Fick (Fick's second law)

## 2.4.8 วิธีการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่

### วิธีการหาจากกราฟ concentration profile

จากรูปที่ 2.12 เมื่อได้ค่า concentration profile สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ได้ด้วยการหาค่า D ที่เหมาะสมแทนลงในสมการที่ 2.2 เพื่อให้ได้ลักษณะกราฟที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าค่าที่นำมาใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของตัวอย่างการวิจัยนี้

### วิธีการประมาณโดยพิจารณาจากระยะทางที่เงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์

วิเคราะห์รูปถ่ายที่ได้จากการทำ Line Scan จากเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) เพื่อได้ระยะที่เกิดการแพร่เข้าไปของโลหะเงินในเนื้อของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (ZrC) นำระยะทางที่ได้มาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากสมการที่ (2.4) ซึ่งวิธีนี้เป็นการประมาณ

จากนั้นนำค่า D ที่ได้จากอุณหภูมิต่าง ๆ มาคำนวณหาค่า  $D_0$  และ E จากสมการที่ (2.3)

### การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้ Arrhenius plot

นำค่า D ที่ได้มาสร้างกราฟขึ้น โดยมีแกนตั้งเป็นค่า  $\ln D$  และแกนนอนเป็น  $1/T$  (1/K) ทำให้ได้กราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงเฉียงลงไปทางขวา สามารถเทียบสมการกราฟเส้นตรงกับสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้

$$y = mx + c$$

$$\ln D = \ln D_0 - (E/RT)$$

ดังนั้น  $\ln D_0$  จึงมีค่าเท่ากับ c หรือจุดตัดแกนตั้ง และมีค่าความชันของกราฟเท่ากับ  $-(E/R)$

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

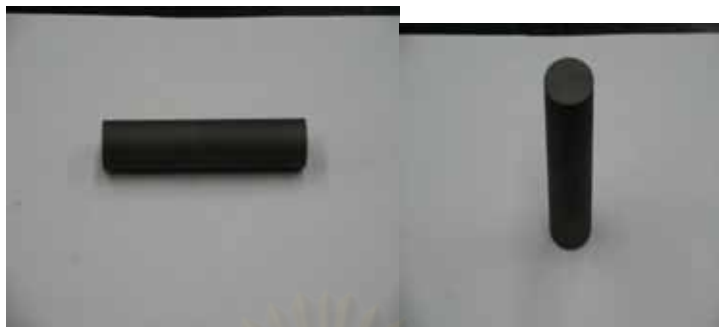
#### 3.1 ขอบเขตการวิจัย

1. วิเคราะห์หาคุณสมบัติของแท่ง ZrC ที่ใช้ในการทดลอง เช่น ความบริสุทธิ์ ขนาด เกรน ความพรุน ความหนาแน่น
2. ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแท่ง ZrC อย่างน้อย 5 ตัวอย่าง ที่ฉาบด้วยโลหะเงินที่ผิวหน้า ในแก๊สอาร์กอน คือ  $1400^{\circ}\text{C}$  -  $1600^{\circ}\text{C}$

#### 3.2 ขั้นตอนการวิจัย

1. ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. จัดหาแท่ง ZrC ซึ่งมีความหนาแน่นในระดับเดียวกับที่ใช้เป็นชั้นเคลือบของเม็ดเชื้อเพลิง TRISO fuel microsphere
3. จัดวางระบบของเตาเผา (furnace)
4. ตัดแท่ง ZrC ให้ได้ขนาดความยาวโดยมีความหนาประมาณ 1 เซนติเมตร จะได้แผ่นกลมหนา 1 เซนติเมตรแล้วจึงตัดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนและขัดผิวหน้าให้เรียบ
5. นำ ZrC ไปเคลือบโลหะเงินที่บริเวณผิวด้วยวิธีการ sputtering
6. นำ ZrC ใส่ลงไปในภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ทรงกระบอกก่อน แล้วจึงนำเม็ดเงินประมาณ 30 กรัม เทลงไปบน ZrC ให้เต็ม แล้วนำเข้าเตาอบ โดยที่อุณหภูมิในการอบจะอยู่ในช่วง  $1400^{\circ}\text{C}$  -  $1600^{\circ}\text{C}$
7. วัดความเข้มข้นของเงินในระยะต่างๆจากผิวหน้าโดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope
8. สรุปผลและเขียนรายงานการวิจัย

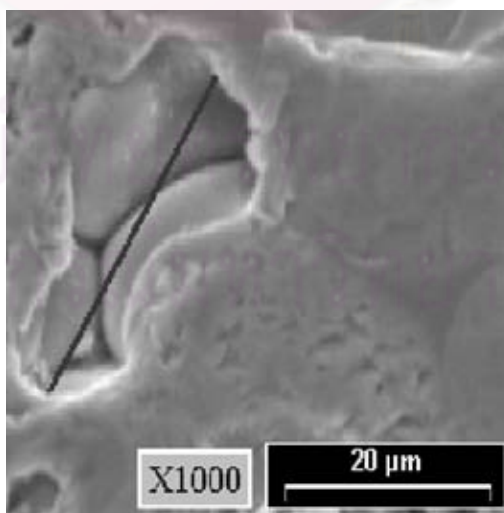
### 3.3 การจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่จำเป็น



รูปที่ 3.1 แท่ง ZrC

#### คุณสมบัติของแท่งเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์

1. ความบริสุทธิ์ (purity) มีค่าความบริสุทธิ์ 99.9 % ค่าจากบริษัท China Rare Metal Material Co., Limited
2. ความหนาแน่น (density) มีค่าความหนาแน่นที่ 6.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ทดสอบด้วยวิธี Bulk Density โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ
3. ค่าความพรุน (porosity) มีค่า 14.3% โดยมวลต่อปริมาตร โดยกรมวิทยาศาสตร์บริการ
4. ขนาดเกรนของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์มีค่าขนาดเฉลี่ยเกรน 11 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.2 ขนาดเกรนของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (ZrC)

$$d = L/n$$

$$d = 33 \mu\text{m}/3$$

$$= 11 \mu\text{m}$$

เมื่อ  $d$  คือความยาวเฉลี่ยของขนาดเกรนของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์  
 $L$  คือความยาวของเส้นที่ลากผ่านจุดตัด  
 $n$  คือ จำนวนจุดตัดเส้น



รูปที่ 3.3 เตอบและระบบเตอบ (ถังแก๊สอาร์กอน)



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้วัดอุณหภูมิในเตอบ



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้กับเตอบและแผ่นอะคริลิกสำหรับทำกล่องครอบ



จากรูปที่ 3.5 รูปซ้ายสุดเป็นอุปกรณ์ที่นำมาครอบปิดหัวท้ายของท่ออุโมงค์ที่ใช้ในการอบใน Tube Furnace รูปกลางเป็นสายขงที่นำมาต่อจากถังก๊าซอาร์กอนในกรณีที่ใช้ก๊าซสำหรับป้องกันไม่ให้ตัวอย่างเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจน



รูปที่ 3.6 เครื่อง Temperature Controller CN9000A

จากรูปที่ 3.6 เครื่องนี้ใช้สำหรับควบคุมค่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบตัวอย่างภายใน Tube Furnace เมื่อนำไปใช้งานกับ Thermocouple Type R จะสามารถควบคุมอุณหภูมิได้สูงถึง 1600 °ซ



รูปที่ 3.7 นำแท่ง ZrC หนา 1 เซนติเมตรมาตัดแบ่งเพื่อนำไปใช้ในการอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ



รูปที่ 3.8 แผ่นเงินที่นำไปใช้ฉาบ ZrC ด้วยวิธีการ Sputtering  
จากรูปที่ 3.8 แสดงแผ่นโลหะเงินที่นำไปใช้ในการทำให้โลหะเงินนั้นเกิดการ sputtering ขึ้นบนเนื้อผิวของ ZrC

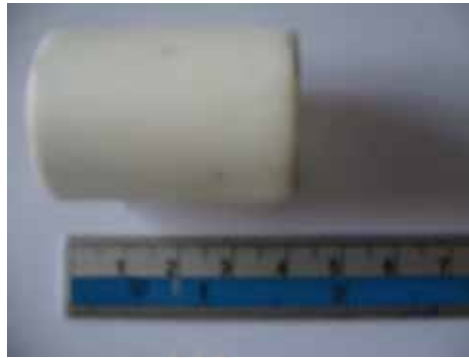


รูปที่ 3.9 แท่ง ZrC ผ่านการฉาบเงินโดยวิธีการ Sputtering



รูปที่ 3.10 เทอร์โมคัพเปิล แบบ R

รูปที่ 3.10 แสดงเทอร์โมคัพเปิล แบบ R ซึ่งทำให้เตาอบ Tube Furnace สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 1600 °ซ



รูปที่ 3.11 ภาชนะทรงกระบอกแบบเซรามิกส์ที่ใช้ในการวิจัย



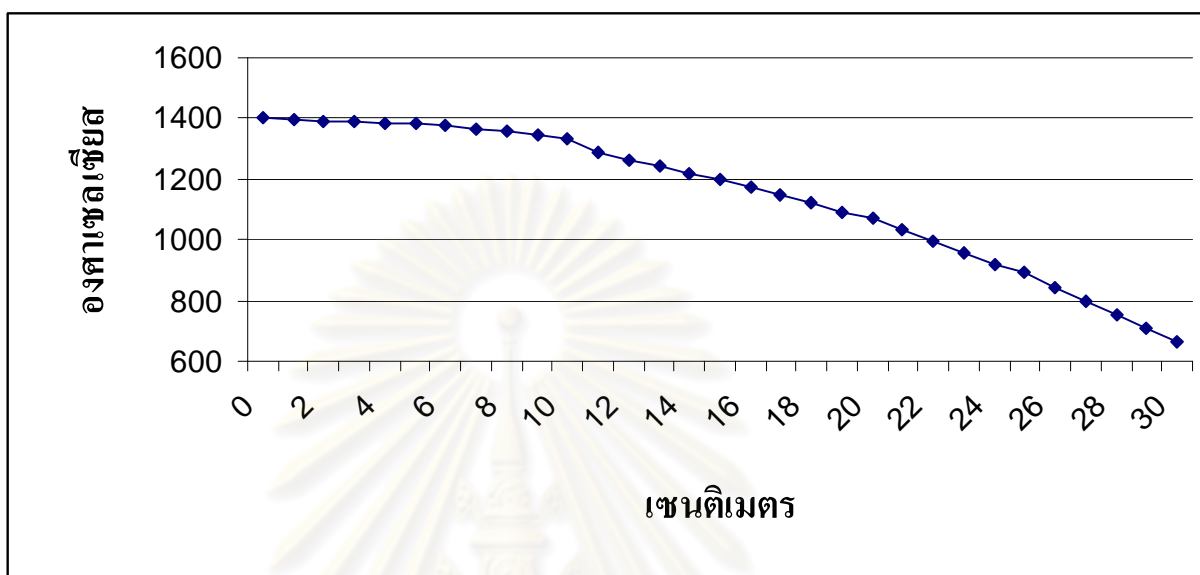
รูปที่ 3.12 ภาชนะทรงกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล)



รูปที่ 3.13 แผ่นฝาเซรามิกส์ที่ใช้ปิดลงบนภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล)

### 3.4 การดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนแรกทดลองหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ ) กับระยะทางของท่อที่อยู่ภายใน Tube Furnace เพื่อไว้ใช้ในการทดลองสำหรับอบตัวอย่างต่าง ๆ



รูปที่ 3.14 ค่าอุณหภูมิของ Tube Furnace ตามแนวยาวของท่อที่อุณหภูมิ  $1400^{\circ}\text{C}$  ที่จุดกึ่งกลางท่อซึ่งควบคุมโดยเครื่อง Temperature Controller CN9000A

จากรูปที่ 3.14 ทำให้สามารถทำการใส่ตัวอย่างได้หลายตัวอย่างมากขึ้น ในการเดินเครื่อง furnace 1 ครั้ง เพื่อไม่ให้เป็นภาระสิ้นเปลืองกระแสไฟฟ้าและเวลาในการทดลอง โดยเลือกใส่ตามตำแหน่งที่มีอุณหภูมิตรงตามที่เราต้องการ เช่น ต้องการที่  $1400^{\circ}\text{C}$  และ  $1600^{\circ}\text{C}$  สามารถใส่ตัวอย่างไปที่ตำแหน่ง จุดกึ่งกลางท่อ (0 cm) และที่ตำแหน่ง 21 cm ห่างจากจุดกึ่งกลางท่อตามลำดับ

นำ ZrC ที่ฉาบเงินเรียบร้อยแล้ว ด้วยวิธี sputtering หรือนำ Silver Paint ซึ่งใช้ทาในการเตรียมตัวอย่างสำหรับทำ SEM มาทาลงบนผิว ZrC แทนวิธีการ Sputtering หรือ จุ่มลงบนเงินเหลวที่อยู่ในเตาอบที่อุณหภูมิประมาณ  $980^{\circ}\text{C}$  เพื่อต้องการให้มีเงินเคลือบที่ผิวหน้าของ ZrC มาอบในเตาเผาที่ระดับอุณหภูมิต่าง ๆ

ผลปรากฏว่า ZrC ที่ฉาบเงินลงบนผิวหน้าเมื่อผ่านการอบในเตาเผา ที่ระยะเวลา 10 หรือ 24 ชั่วโมง ได้เกิดการแตกหัก ยิ่งใช้เวลาอบนานยิ่งทำให้ ZrC แตกละเอียดเป็นผง



รูปที่ 3.15 ZrC ที่แตกเป็นผงละเอียด

ขั้นตอนต่อมาได้ทดลองนำเงินไปอบในเตาอบเพื่อให้กลายเป็นโลหะเงินเหลว แล้วจึงนำมาเทใส่ ZrC ผลปรากฏว่า จากการทดลองพบว่าหากใช้ธาตุที่ใส่ ZrC มีลักษณะแบนยาวจะทำให้ความร้อนจากโลหะเงินเหลวถ่ายเทลงบนธาตุทำให้เกิดการแตกหัก จึงได้เลือกธาตุเป็นลักษณะทรงกระบอก พบว่าเมื่อเทโลหะเงินเหลวลงไป ZrC ยังคงอยู่ในเงินเหลวได้เป็นอย่างดี และเมื่อเงินเหลวยังไม่แข็งตัวได้เทเงินเหลวและ ZrC ออกมาพบสภาพ ZrC ยังอยู่สมบูรณ์ แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 5 วินาที จะเกิดการแตกหักเป็นผงละเอียดของ ZrC อันเป็นผลมาจากการที่ ZrC ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

ลำดับต่อไปได้นำ ZrC ใส่ลงไปในภาชนะเซรามิกส์ทรงกระบอกก่อน แล้วจึงนำเม็ดเงินปริมาณ 30 กรัม เทลงไปบน ZrC ให้เต็ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลปรากฏว่าเงินเหลวได้หลอมตัวอยู่ในภาชนะเซรามิกส์และอยู่บน ZrC เมื่อนำไปตัดออก จึงพบ ZrC อยู่ในสภาพดี



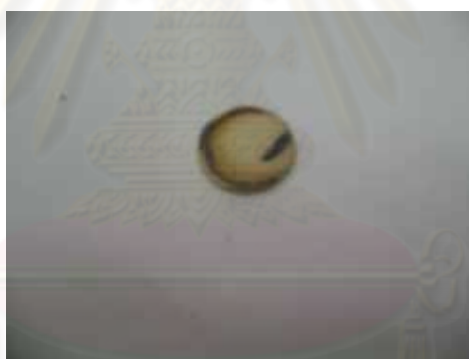
รูปที่ 3.16 ภาชนะทรงกระบอกเซรามิกส์เมื่อผ่านการอบมาแล้วและนำไปตัด

เนื่องจากภาชนะเซรามิกส์ที่ทนความร้อนสูงที่ใช้อยู่มีอยู่น้อยและมีราคาแพงและได้สั่งซื้อมาจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงสั่งทำภาชนะจากเหล็กจำนวน 10 ชิ้น (เลือกใช้เหล็กเพราะจุดหลอมเหลวของเหล็กมีค่า  $1538^{\circ}\text{C}$ )

จากการผ่าตัดตามยาวออกของตัวอย่าง ZrC ที่อยู่ในภาชนะซึ่งทำจากเหล็ก พบว่า ZrC นั้นเกิดการแตกละเอียดเป็นผง จึงได้เปลี่ยนภาชนะที่ใช้ในการวิจัยเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ซึ่งทนการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ดีกว่าเหล็ก พบว่าเมื่อนำภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ไปตัดออกดูพบว่า ZrC อยู่ในสภาพที่สมบูรณ์จึงได้เลือกวิธีนี้ในการทำวิจัยต่อไป



รูปที่ 3.17 ภาชนะทรงกระบอกเหล็กและเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล)

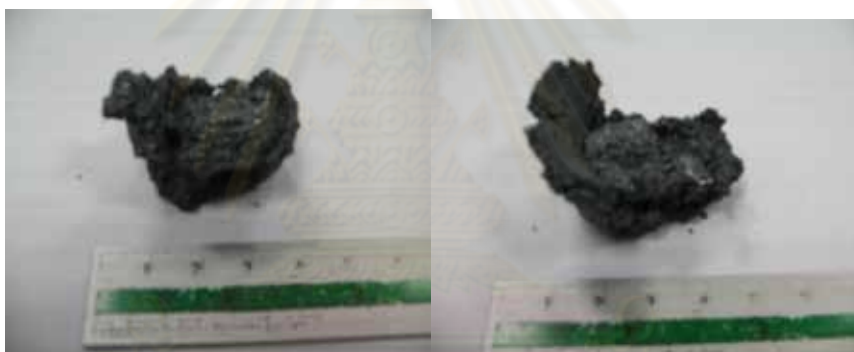


รูปที่ 3.18 แผ่นฝาเซรามิกส์ที่ใช้ปิดลงบนภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล)

นำ ZrC ใส่ลงไปในภาชนะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ทรงกระบอกก่อน แล้วจึงนำเม็ดเงิน เทลงไปบน ZrC ให้เต็ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ทำการอบในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ – 1600 °ซ ภายใต้บรรยากาศอาร์กอน ได้มาจำนวน 5 ตัวอย่าง โดยอบตัวอย่างละ 20 ชั่วโมง



รูปที่ 3.19 ตัวอย่างที่อบโดยใช้วิธีเทเม็ค โลหะเงินทับลงบน ZrC ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากนั้นทดลองอบตัวอย่างที่เตรียมใหม่เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าตัวอย่างเกิดการบวมและบางตัวอย่างได้บวมจนตัวอย่างแตกทะลักออกมา ทำให้ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยการทำ SEM ได้ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงทำการอบเป็นระยะเวลา 20 ชั่วโมง เมื่ออบเรียบร้อยแล้ว นำไปดำเนินการเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ด้วย SEM



รูปที่ 3.20 ตัวอย่างที่อบเป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง แล้วเกิดการบวมและแตกทะลัก



รูปที่ 3.21 การนำตัวอย่างที่ตัดตามแนวยาวแล้วนำมาเตรียมตัวอย่างก่อนนำไปเข้าเครื่อง SEM

นำ ZrC ที่อยู่ในสถานะเหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลสสตีล) ซึ่งผ่านการอบมาแล้วเป็นเวลา 20 ชั่วโมง (72,000 วินาที) ไปทำการตัดออกและเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการดูเนื้อเงินที่ได้แพร่เข้าไปใน ZrC โดยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope ที่สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และที่ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

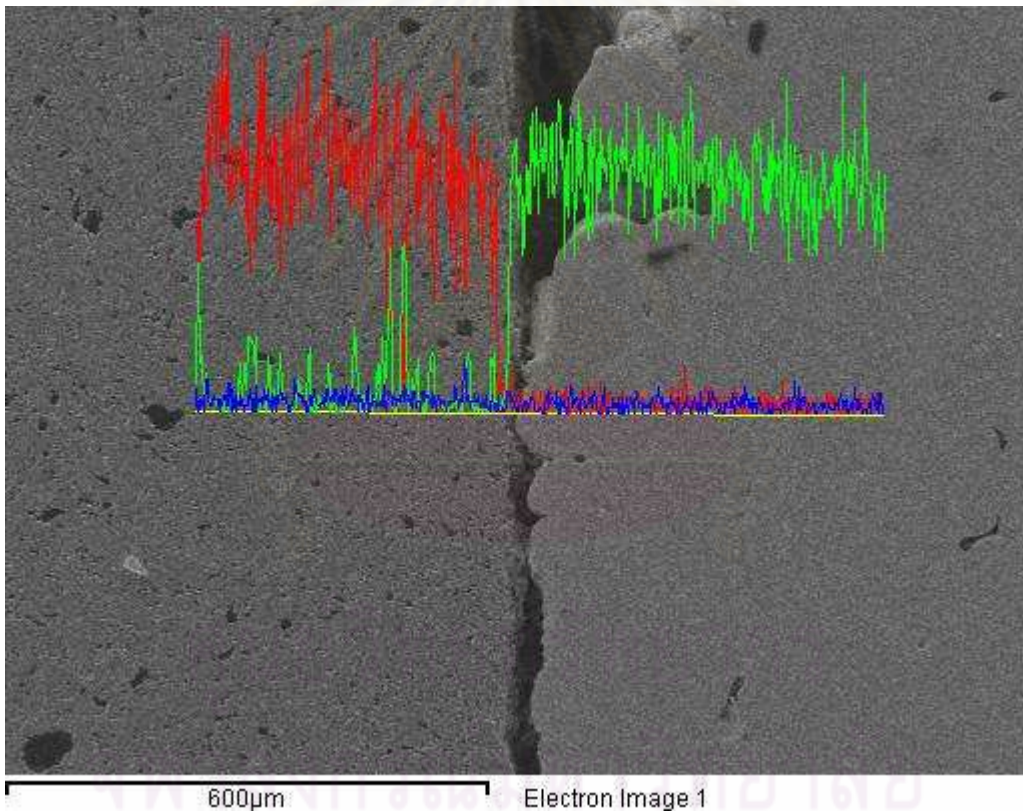


## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

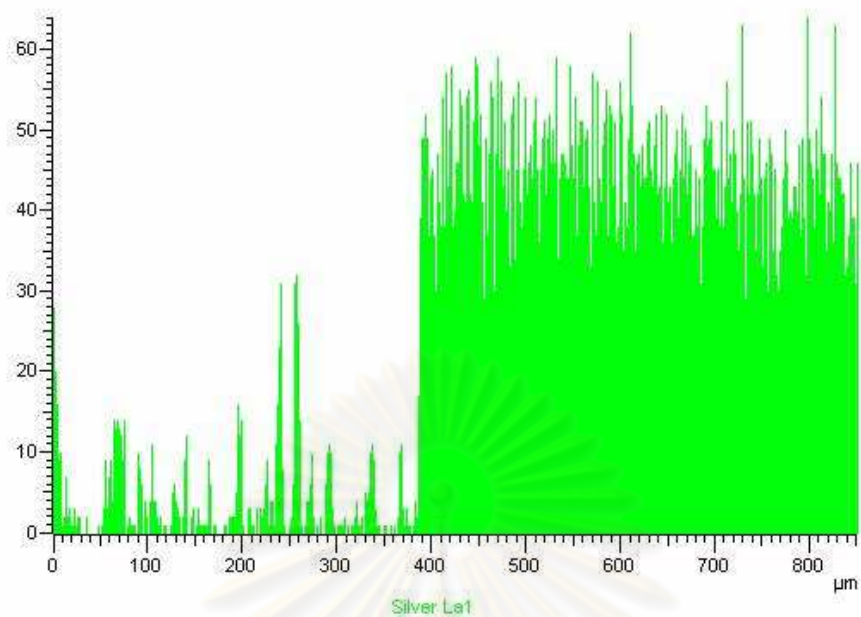
#### 4.1. ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการดำเนินงานพบว่า จากการนำชิ้นงานที่ได้จากการทดลองไปวิเคราะห์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินใน ZrC ด้วยเครื่องมือ Scanning Electron Microscope ด้วยวิธี Line Scan ซึ่งแสดงให้เห็นระะการแพร่ของโลหะเงินใน ZrC

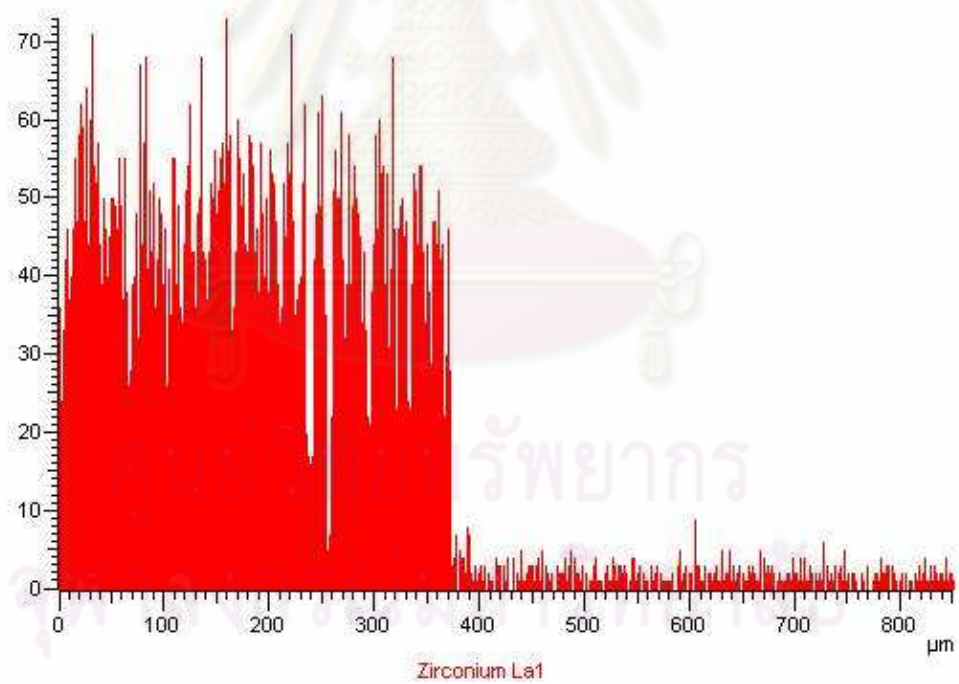


(ก)

รูปที่ 4.1 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เครื่องมือคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย) โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ

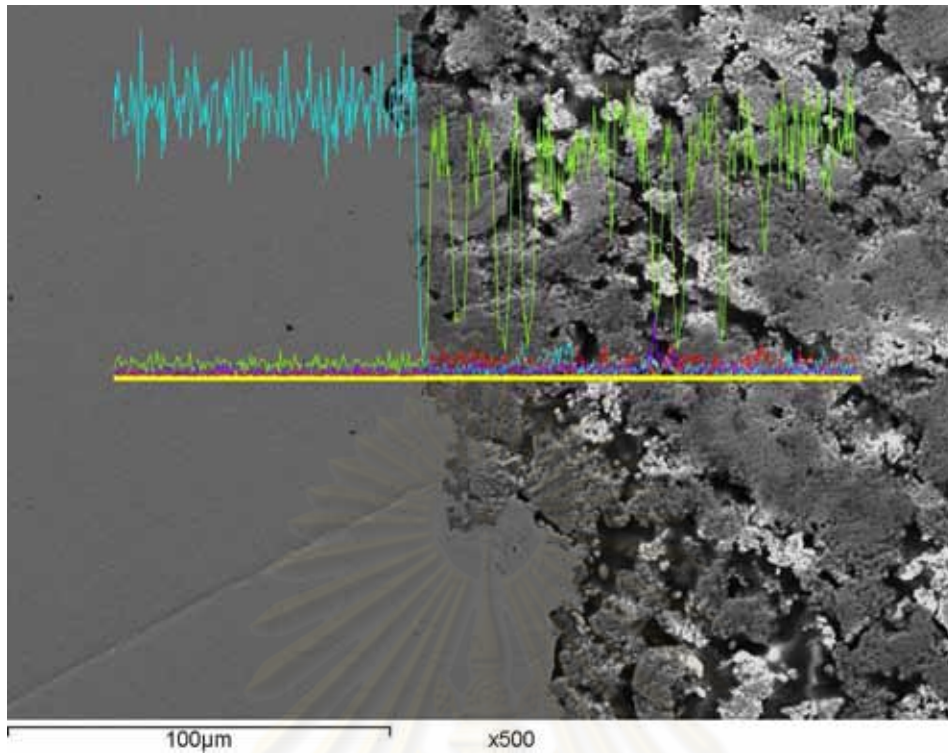


( ข )

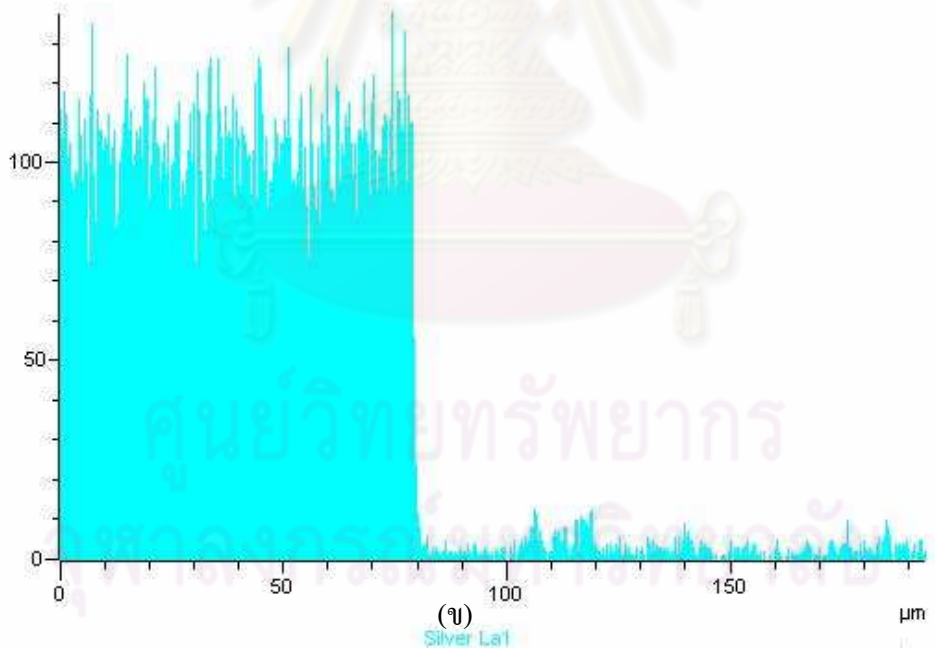


( ค )

รูปที่ 4.1 (ต่อ) (ข) การแพร่ของโลหะเงิน (ค) ระยะทางของ Zirconium (Zr) ที่อุณหภูมิ 1200 °ซ

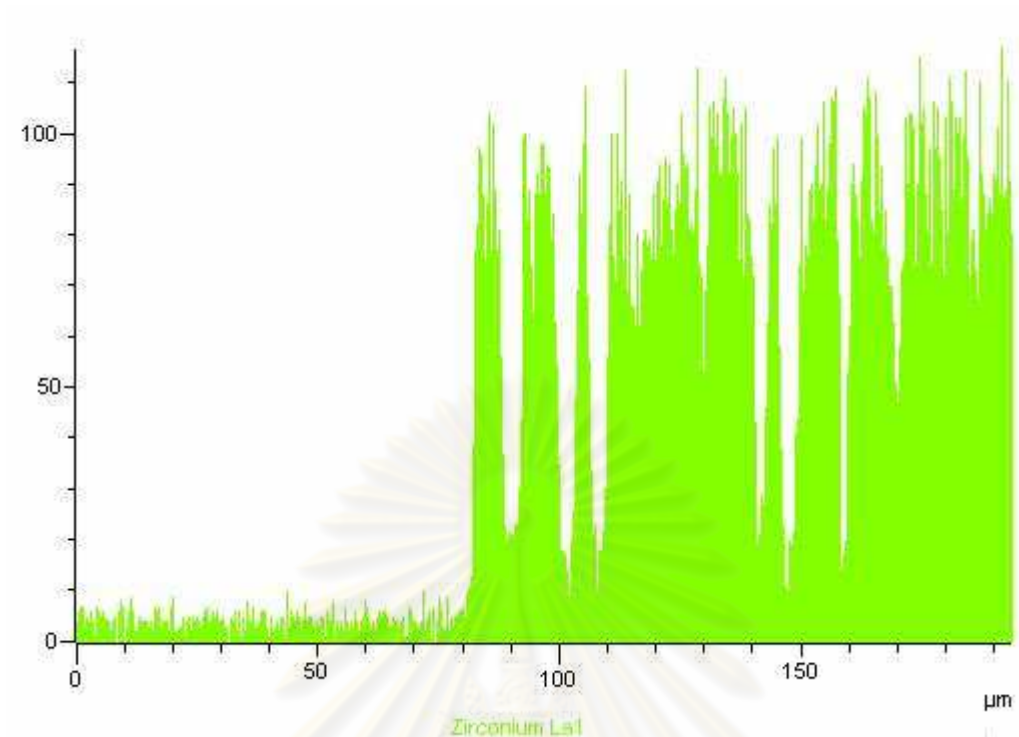


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ (ข) การแพร่ของโลหะเงิน

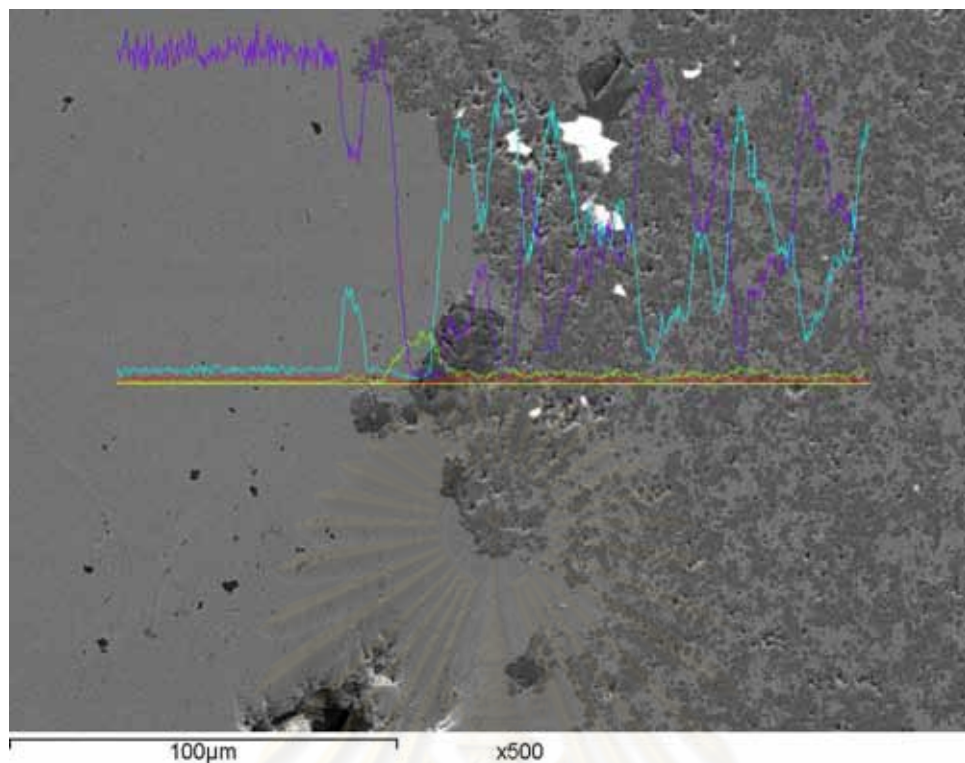


(ค)

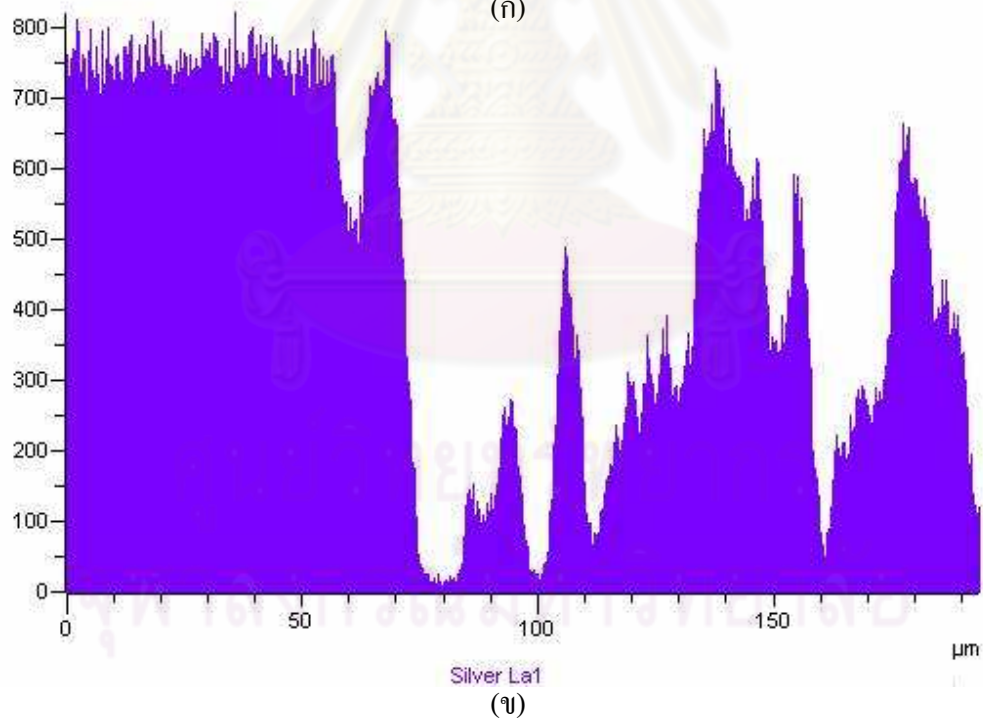
รูปที่ 4.2 (ต่อ) (ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ

จากรูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้แสดงการแพร่ของโลหะเงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ พบว่าระยะทางการแพร่ของธาตุเงินมีค่าประมาณ 5 ไมโครเมตร สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการ (2.4)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

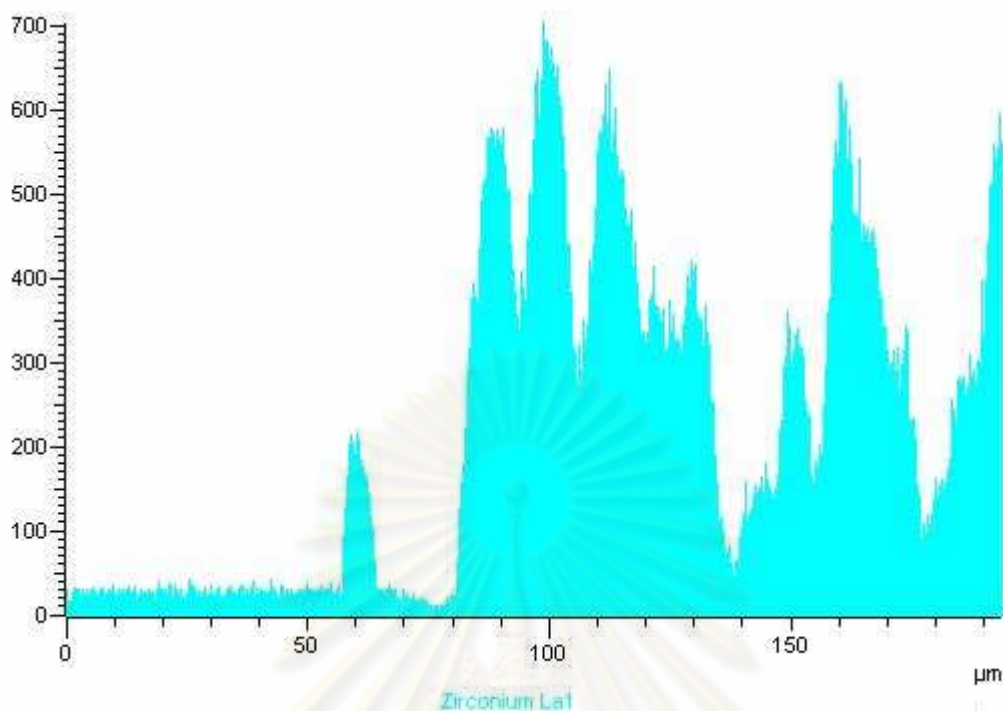


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.3 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ (ข) การแพร่ของโลหะเงิน

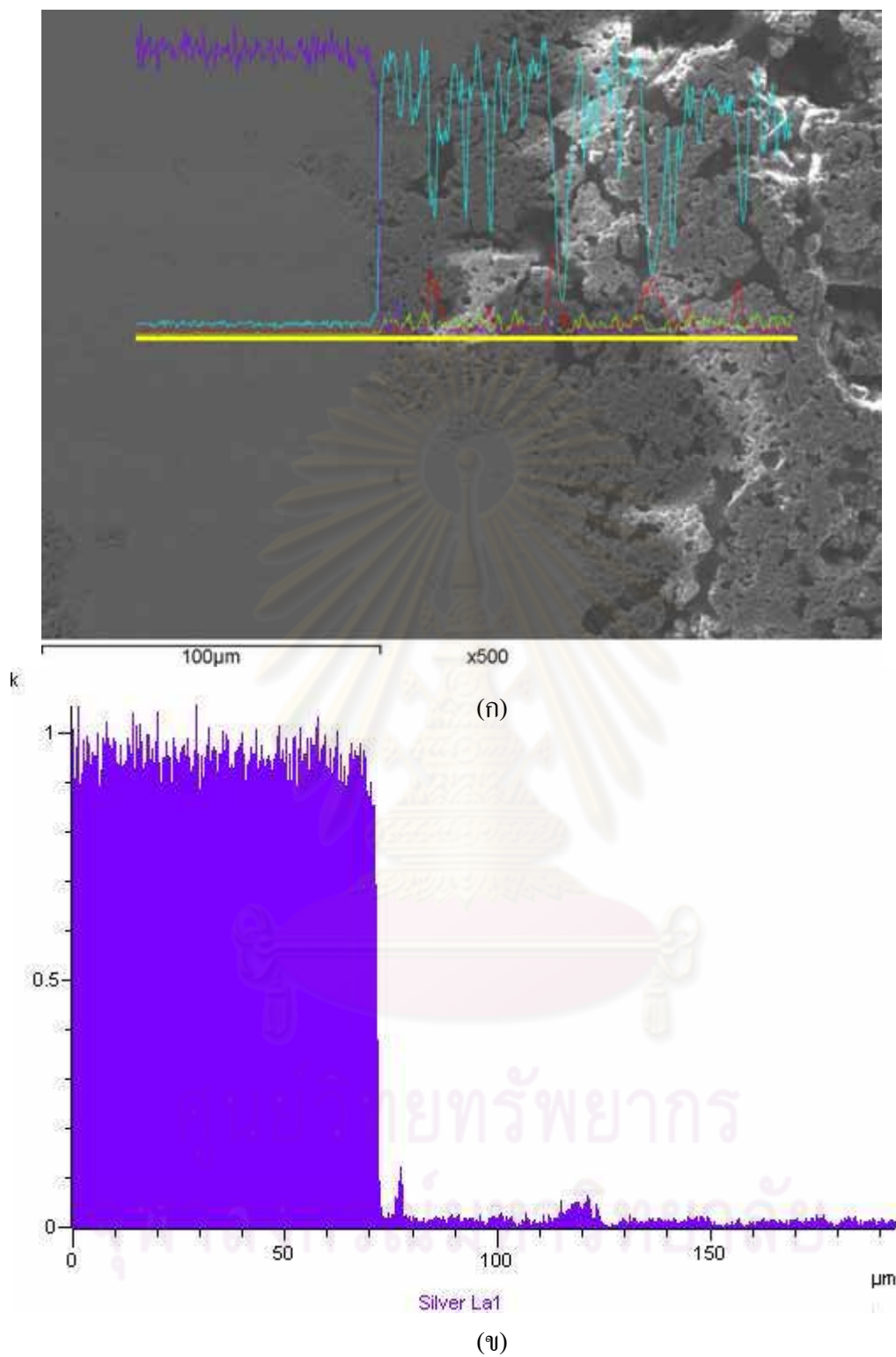


(ค)

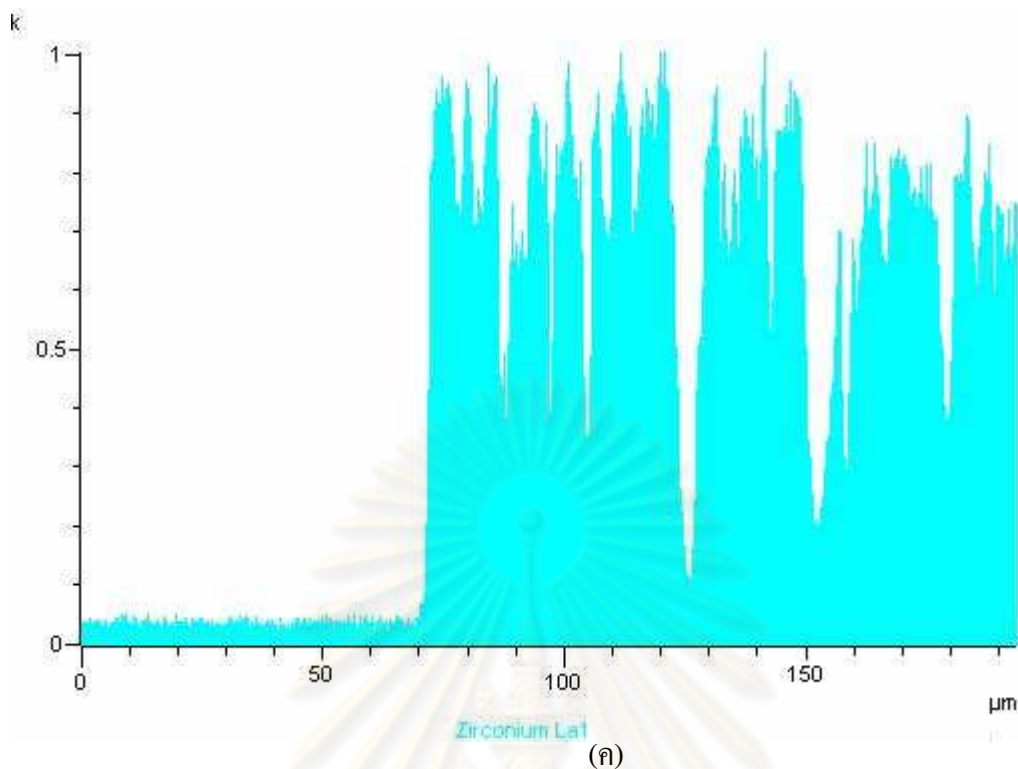
รูปที่ 4.3 (ต่อ) (ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1400 °ซ

จากรูปที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้แสดงการแพร่ของโลหะเงินเข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ พบว่าจากตัวอย่างนี้เกิดความผิดพลาดขึ้นเนื่องจากเกิดธาตุออกซิเจนขึ้นมากขึ้นระยะทางการแพร่ของธาตุเงินที่จะเข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ ทำให้ไม่สามารถวัดค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ (ข) การแพร่ของโลหะเงิน

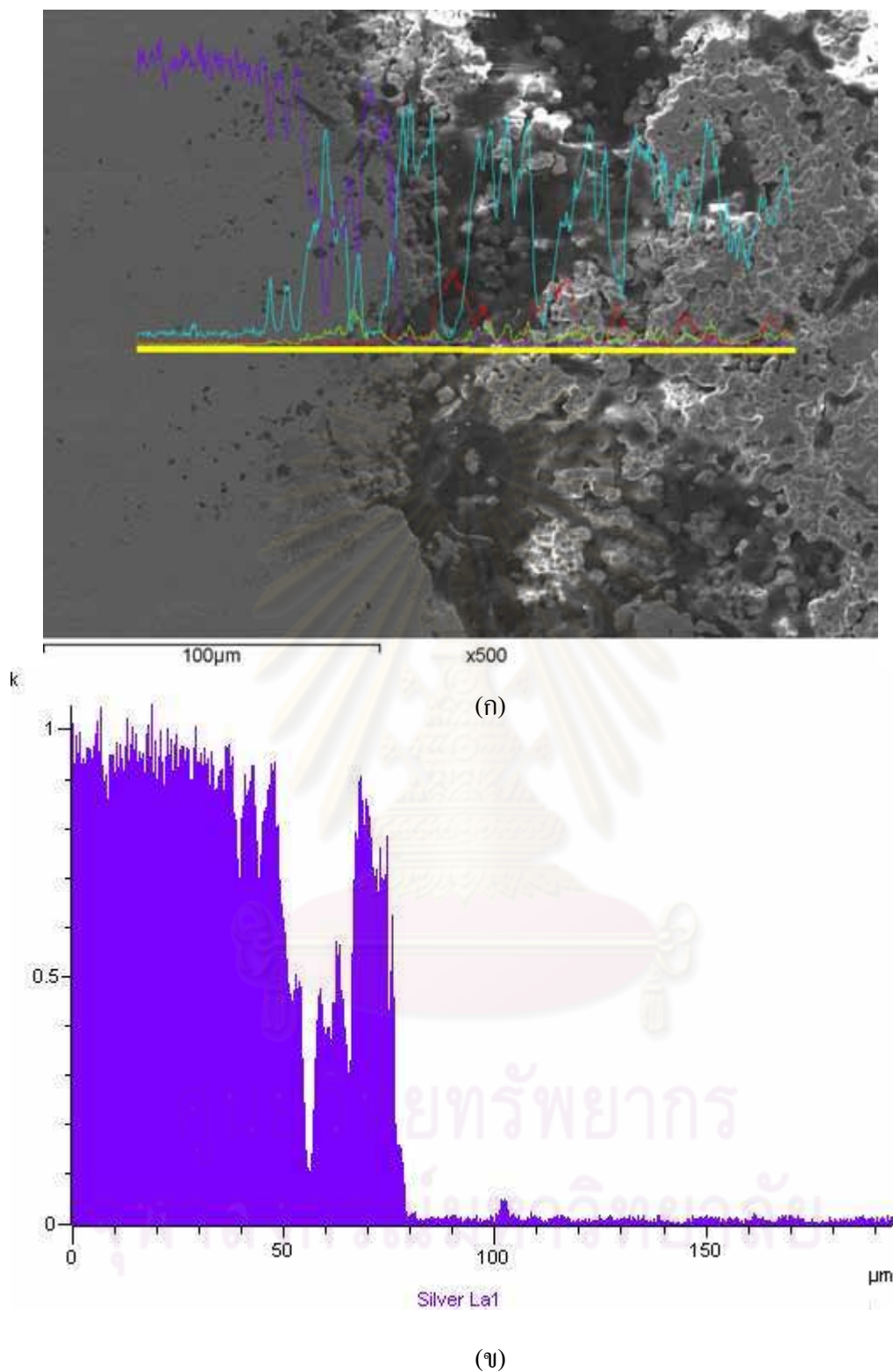


รูปที่ 4.4 (ต่อ) (ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1450 °ซ

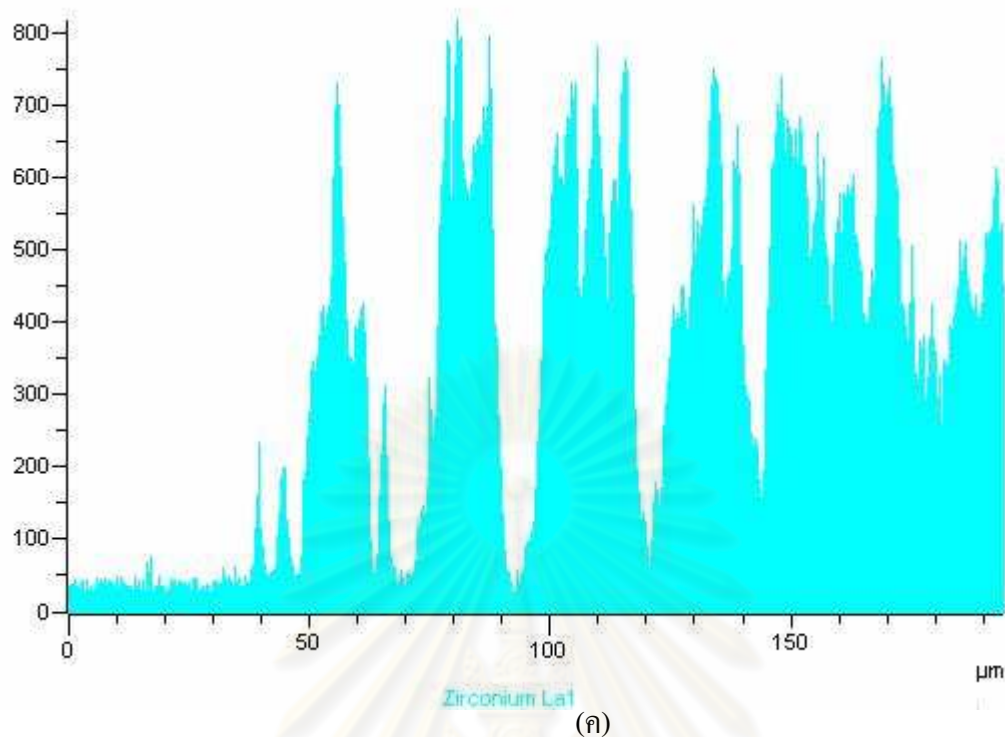
จากรูปที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้แสดงการแพร่ของโลหะเงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ พบว่าไม่เกิดการแพร่ของธาตุเงินเข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ ทำให้ไม่สามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





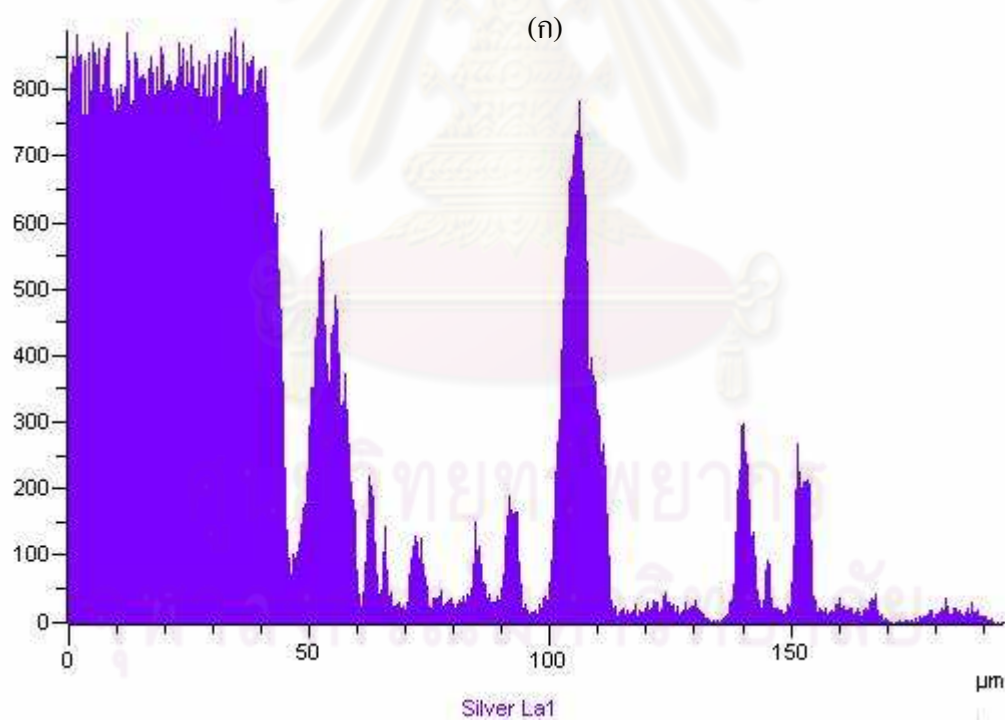
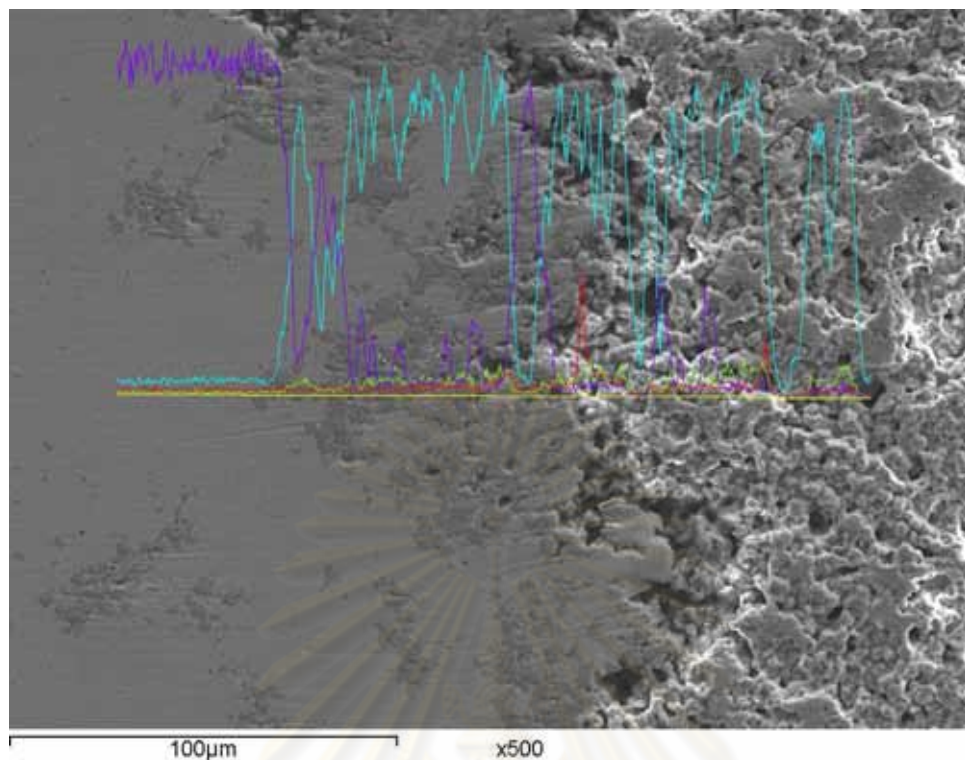
รูปที่ 4.5 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1500 °ซ (ข) การแพร่ของโลหะเงิน



รูปที่ 4.5 (ต่อ) (ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1500 °ซ

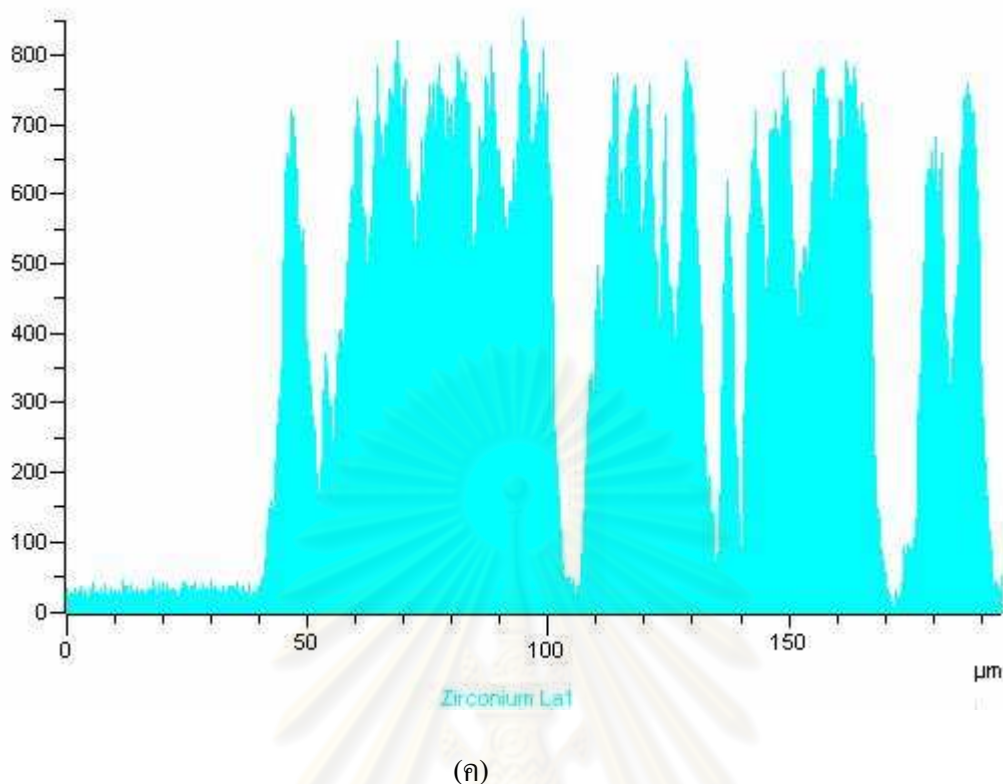
จากรูปที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้แสดงการแพร่ของโลหะเงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ พบว่าระยะทางการแพร่ของธาตุเงินมีค่าประมาณ 15 ไมโครเมตร สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการ (2.4)

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ข)

รูปที่ 4.6 (ก) ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากเครื่อง scanning electron microscope (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ) ที่อุณหภูมิ 1550 °ซ (ข) การแพร่ของโลหะเงิน



รูปที่ 4.6 (ต่อ) (ค) ระยะทางของ Zr โดยใช้วิธี Line Scan ที่อุณหภูมิ 1550 °ซ

จากรูปที่ 4.6 ผลการวิเคราะห์จากเครื่อง Scanning Electron Microscope ได้แสดงการแพร่ของโลหะเงินแพร่เข้าไปในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ที่อุณหภูมิ 1350 °ซ พบว่าระยะทางการแพร่ของธาตุเงินมีค่าประมาณ 20 ไมโครเมตร สามารถนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากสมการ (2.4)

จากการวัดด้วยวิธี Line Scan พบว่าการแพร่ของโลหะเงินเข้าไปในเนื้อของเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์นั้นเห็นได้ชัดเจนที่อุณหภูมิ 1350 °C, 1500 °C และ 1550 °C ได้ค่าการแพร่คิดเป็นระยะทาง 5 ไมโครเมตร, 15 ไมโครเมตร และ 20 ไมโครเมตร ตามลำดับ ทำให้สามารถนำมาคำนวณหาค่า D (สัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ) ค่า  $D_0$  (ค่าสัดส่วนคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ) และค่า E (Activation Energy) (พลังงานกระตุ้นของอะตอมที่แพร่เข้าไปในของแข็ง, J/mol หรือ cal/mol) ได้

สามารถคำนวณหาค่า (สัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ,m<sup>2</sup>/s) ได้จากสมการที่ (2.4)

โดยระยะเวลาที่ใช้ในการอบ คือ 20 ชั่วโมง คิดเป็น 72,000 วินาที สามารถนำมาหาค่า D

- ที่อุณหภูมิ 1350 °C ได้  $2.17 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$

- ที่อุณหภูมิ 1500 °C ได้  $1.95 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$

- ที่อุณหภูมิ 1550 °C ได้  $3.47 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$

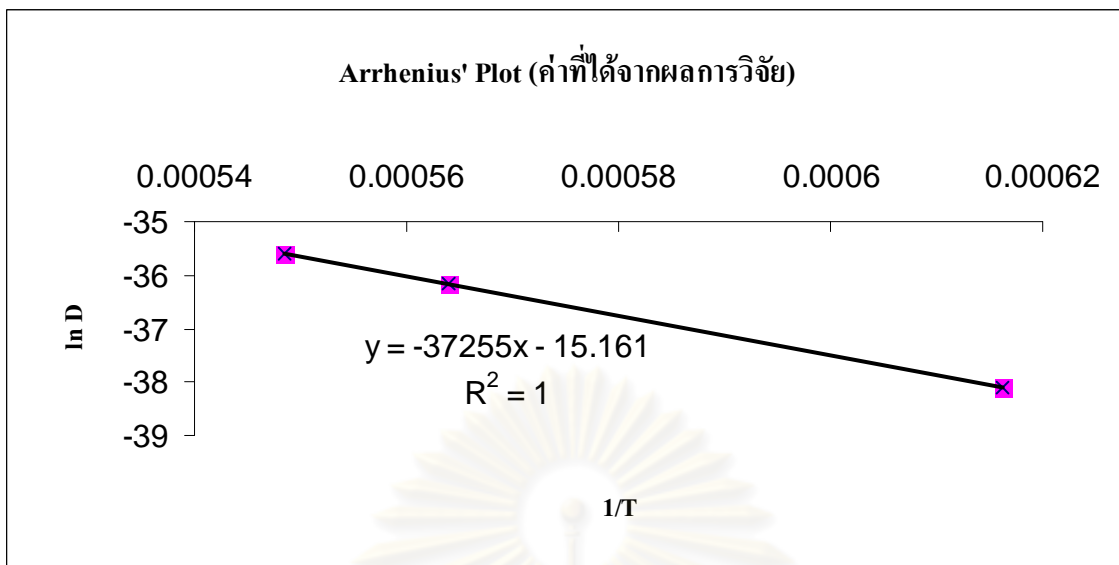
นำมาคำนวณค่า  $D_0$  (ค่าสัดส่วนคงที่ของสัมประสิทธิ์การแพร่โดยไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ) และค่า E (Activation Energy) (พลังงานกระตุ้นของอะตอมที่แพร่เข้าไปในของแข็ง, J/mol หรือ cal/mol) ได้ จากสมการที่ (2.3)

นำค่าจากผลการวิจัยมาบันทึกลงในตารางบันทึกข้อมูล

ตารางที่ 4.1 ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในช่วงอุณหภูมิ 1400 °ซ – 1600 °ซ (จากการวิจัย)

$X_d$ (m)	D (m <sup>2</sup> /s)	T (°C)	1/T (1/K)	ln D
5.00E-06	2.17E-17	1350	0.000616	-38.1158
1.50E-05	1.95E-16	1500	0.000564	-36.1738
2.00E-05	3.47E-16	1550	0.000549	-35.5975

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.7 กราฟของอาร์เรเนียส (Arrhenius Plot) จากผลการวิจัย

จากกราฟของอาร์เรเนียส (Arrhenius Plot) จากผลการวิจัย สามารถนำมาคำนวณหาค่า E และ  $D_0$  ได้

ดังนี้

$$m = -\frac{E}{R}$$

$$\therefore E = (-37255) \times 1.987$$

$$= 74.03 \text{ kcal/mol}$$

$$\therefore E = (-37255) \times 8.314$$

$$= 309.74 \text{ kJ/mol}$$

$$\ln D_0 = -15.161$$

$$\therefore D_0 = 2.604 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

ศูนย์วิจัยทางการแพทย์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลและวิจารณ์การวิจัย

งานวิจัยนี้ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient) ของโลหะเงินใน ZrC ในสภาวะอุณหภูมิระหว่าง  $1400^{\circ}\text{C} - 1600^{\circ}\text{C}$  ซึ่งการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินใน เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ได้ค่า  $D_{1350} = 2.17 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_{1500} = 1.95 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$  และ  $D_{1550} = 3.47 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_0$  ได้  $2.604 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในซิลิคอนคาร์ไบด์ในช่วง  $1500^{\circ}\text{C}$  มีค่าประมาณ  $5 \times 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$  พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของโลหะเงินในเซอร์โคเนียมคาร์ไบด์นั้นมีค่ามากกว่า ซึ่งเมื่อมองในแง่ของการเป็นชั้นเคลือบที่ดีของเม็ดเชื้อเพลิงซึ่งมีไว้ป้องกันการแพร่ออกมาของโลหะเงินที่เป็น fission products ซึ่งออกมาจากชั้น fuel kernel แล้วนั่นถือได้ว่าซิลิคอนคาร์ไบด์มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์

งานวิจัยชิ้นนี้จึงมีประโยชน์ในด้านเป็นองค์ความรู้ใหม่สำหรับการสร้างเม็ดเชื้อเพลิง TRISO fuel microsphere ได้ในอนาคต เพื่อรองรับกับแผนการสร้างโรงไฟฟ้านิวเคลียร์แบบ High Temperature Gas Cooled Reactor ที่จะเกิดขึ้นภายในปี ค.ศ. 2030

#### 5.2 ปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินการวิจัย

1. การจัดวางระบบเตา มีปัญหาที่ระบบไฟของเตาและการศึกษาการใช้เครื่อง Temperature Controller CN9000A วัดอุณหภูมิที่มีอยู่ในเตา
2. ZrC ที่ฉาบเงินลงบนผิวหน้าเมื่อผ่านการอบในเตาเผา ที่ระยะเวลา 10 หรือ 24 ชั่วโมง ได้เกิดการแตกหัก ยิ่งใช้เวลานานยิ่งทำให้ ZrC แตกละเอียดเป็นผุยผง
3. นำ Silver Paint ซึ่งใช้ทาในการเตรียมตัวอย่างมาทาลงบนผิว ZrC แทนวิธีการ Sputtering ผลปรากฏว่าเกิดการแตกหักของ ZrC เช่นเดียวกับวิธีการ Sputtering
4. ทดลองนำเงินไปอบในเตาอบเพื่อให้กลายเป็นเงินเหลว แล้วจึงนำมาทาสี ZrC ผลปรากฏว่า หากใช้ถาดที่ใส่ ZrC มีลักษณะแบนยาวจะทำให้ความร้อนจากเงินเหลว ถ่ายเทลงบนถาดทำให้ถาดเกิดการแตกหัก จึงได้เลือกถาดเป็นลักษณะทรงกระบอก พบว่าเมื่อเทเงินลงไป ZrC ยังคงอยู่ในเงินเหลวได้เป็นอย่างดี และเมื่อเงินเหลวยังไม่แข็งตัวได้เทเงินเหลวและ ZrC ออกมาพบสภาพ ZrC ยังอยู่สมบูรณ์ แต่เมื่อเวลาผ่านไป

ไปประมาณ 5 วินาที จะเกิดการแตกหักเป็นผงละเอียดของ ZrC อันเป็นผลมาจากการที่ ZrC ทำปฏิกิริยากับออกซิเจน

5. นำ ZrC ใต้ลงไปในภาชนะเซรามิกส์ทรงกระบอกก่อน แล้วจึงนำเม็ดเงินปริมาณ 30 กรัม เทลงไปใน ZrC ให้เต็ม แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ผลปรากฏว่าเงินเหลวได้หลอมตัวอยู่ในภาชนะเซรามิกส์และอยู่บน ZrC เมื่อนำไปตัดออก จึงพบ ZrC อยู่ในสภาพดี และเนื่องจากภาชนะเซรามิกส์ที่ทนความร้อนสูงที่ใช้อยู่มีอยู่น้อยและมีราคาแพงและได้สั่งซื้อมาจากเมืองนอก ทำให้ผู้วิจัยจึงสั่งทำภาชนะจากเหล็กจำนวน 10 ชิ้น (เลือกเหล็กเพราะจุดหลอมเหลวของเหล็กอยู่สูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการวิจัย) เมื่อเปลี่ยนภาชนะเป็นเหล็ก ได้ผลปรากฏว่า เมื่อนำไปตัดออกดู ZrC ที่อยู่ข้างในหาไม่เจอ เนื่องจากได้เกิดการแตกเป็นผงอยู่ข้างในทำให้ผู้วิจัยจึงเปลี่ยนภาชนะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมที่ทนกับการทำปฏิกิริยาออกซิเจนได้ดีกว่าเหล็ก)
6. ปัญหาจากการใช้ระยะเวลาในการอบตัวอย่างในเตาอบน้อยเกินไป ทำให้ต้องมาทำการทดลองใหม่โดยเพิ่มระยะเวลาการอบจากเดิมที่ใช้ระยะเวลา 10 ชั่วโมง เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง ซึ่งพบว่าเมื่ออบโดยใช้ระยะเวลา 72 ชั่วโมงแล้ว ตัวอย่างได้เกิดการบวม ขณะที่บางชิ้นแตกทะลักออกมา

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการอบตัวอย่างในหลายช่วงระยะเวลาและให้ได้หลายตัวอย่างมากกว่านี้ หรือใช้ตัวอย่าง ZrC ที่มีคุณสมบัติด้านความหนาแน่นต่างกันมาเปรียบเทียบศึกษาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ หรือศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ Ag ใน ZrC ในช่วงอุณหภูมิที่สูงขึ้น เพื่อประโยชน์ในการนำมาเป็นองค์ความรู้สำหรับการสร้างเม็ดเชื้อเพลิงแบบ TRISO Fuel Microsphere
2. ควรหาสาเหตุเพื่อป้องกันการเกิดอาการบวมที่เกิดขึ้นหลังจากการอบโดยใช้ระยะเวลา นานกว่า 24 ชั่วโมง ( 1 วัน ) ขึ้นไป



## รายการอ้างอิง

- [1] Murty K.L, Charit, I. “Structural Materials For Gen-IV Nuclear Reactors: Challenges And Opportunities” Journal of Nuclear Materials (2008) : 189 - 195
- [2] Mclean, H.J. et al. “The effect of annealing at 1500 °C on migration and release of ion implanted silver in CVD silicon carbide” University of Wisconsin-Madison (2006) : 31 - 47
- [3] Minato, K. et al. “Fission Product Palladium-Silicon Carbide Interaction In HTGR Fuel Particles” Journal of Nuclear Materials (1990) : 184 -196
- [4] Casten, P.R. “The Safety of Modular High Temperature Gas Cooled Reactor” University of Tennessee, Knoxville, Tennessee, USA (1992)
- [5] Olander, D.R. Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements, National technical Information Service, TID-26711-P1 (1976)
- [6] Von der DECKEN, C.B. and SCHULTEN, R. “High-Temperature Gas-Cooled Reactor Development And It’s Mechanical Structural Requirements and Problems” Kernforschungsanlage Jilich GmbH, Jilich, Germany (1972)
- [7] Mehrer, H. Diffusion in Solids, Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes (2007)
- [8] Crank , J. “The Mathematics of Diffusion”, 2d ed, Claredon Press, Oxford, 414 p. (1975)



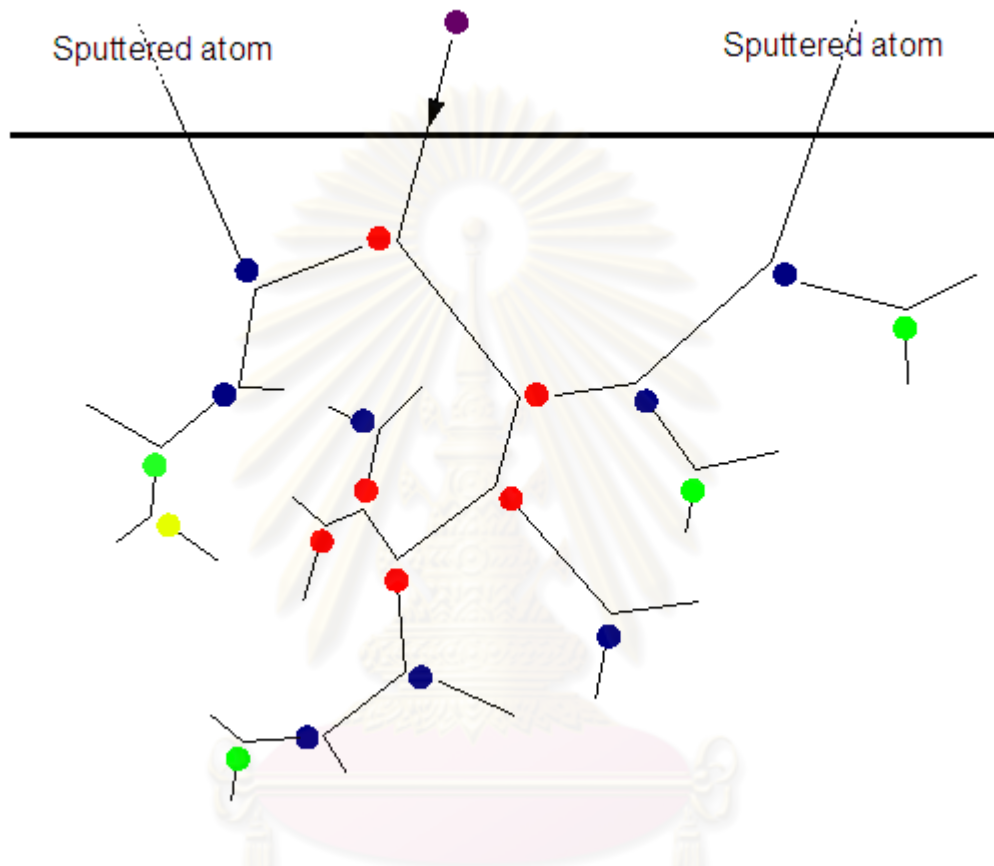
ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### หลักการและวิธีการทำ Sputtering

Sputtering เป็นกระบวนการที่อะตอมถูกยิงออกมาจากโลหะที่เป็นเป้า โดยปกติจะนำมาใช้ในการเคลือบโลหะที่ต้องการเคลือบในลักษณะแผ่นบาง หรือใช้ในการวิเคราะห์ต่าง ๆ เช่น SEM



รูปที่ ก.1 การยิงพลังงานมากกระตุ้นให้เกิด sputtered atom

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### โลหะเงิน (Silver)

เงิน (Silver) คือธาตุที่มีหมายเลขอะตอม 47 และสัญลักษณ์คือ Ag (เป็นตัวย่อมาจากคำในภาษาละตินว่า Argentum) เงินเป็นโลหะทรานซิชันสี ขาวเงิน มีสมบัติการนำความร้อนและไฟฟ้าได้ดีมาก ในธรรมชาติอาจรวมอยู่ในแร่อื่นๆ หรืออยู่อิสระ เงินใช้ประโยชน์ในการทำเหรียญ เครื่องประดับ ภาชนะบนโต๊ะอาหาร และอุตสาหกรรมการถ่ายภาพ

#### คุณสมบัติทางกายภาพ

ตารางที่ ข.1 คุณสมบัติทางกายภาพของโลหะเงิน

สถานะ	ของแข็ง
ความหนาแน่น (ใกล้ r.t.)	10.49 ก./ซม. <sup>3</sup>
ความหนาแน่นของของเหลวที่ m.p.	9.320 ก./ซม. <sup>3</sup>
จุดหลอมเหลว	1234.93 K (961.78 °C)
จุดเดือด	2435 K (2162 °C)
ความร้อนของการหลอมเหลว	11.28 กิโลจูล/โมล
ความร้อนของการกลายเป็นไอ	258 กิโลจูล/โมล
ความร้อนจำเพาะ	(25 °C) 25.350 J/(mol·K)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

## เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ (Zirconium Carbide, ZrC)

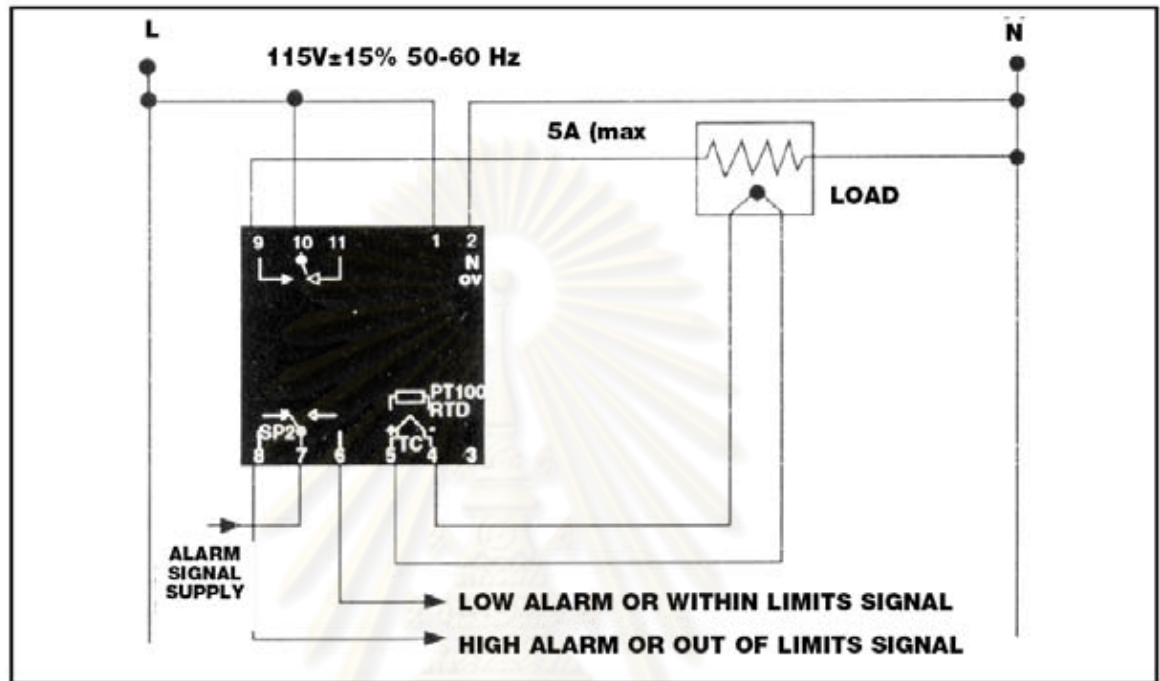
เซอร์โคเนียมคาร์ไบด์ เป็นเซรามิกส์ทนความร้อนได้ยิ่งยวด เป็นวัสดุอุปกรณ์ที่สำคัญใช้ในอุตสาหกรรมการตัด และนิยมใช้ในกระบวนการ sintering

ตารางที่ ค.1 คุณสมบัติของ ZrC

คุณสมบัติของ ZrC	
Molecular formula	ZrC
Molar mass	103.235 g/mol
Appearance	gray refractory solid
Density	6.73 g/cm <sup>3</sup>
Melting point	3532°C
Boiling point	5100°C
Solubility in water	insoluble
Solubility	soluble in concentrated HSO <sub>4</sub> , HF, HNO <sub>3</sub>

## ภาคผนวก ง

## คู่มือการใช้เครื่องควบคุมตาบ (Autotune Temperature Controller)



รูปที่ ง.1 Wiring Heater with alarms diagram

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## .16 INPUT SENSOR SELECT & RANGE TABLE

Selects thermocouple type or RTD. This is the first selection that must be made for the unit to be used. NOTE: If 3-wire RTD configuration is ordered, the Pt-100 (Option 9) must be selected. Option 0 causes the CN9000A to "lock up" (another Option must be selected to "bring the CN9000A back to life").

Op.Fn	Sensor Type	Default Range		Linearized Range	
		°C	°F	°C	°F
1.16	J	0 to 400	32 to 800	0 to 800	32 to 1470
2.16	K	0 to 400	32 to 800	0 to 1200	32 to 1999
3.16	N	0 to 400	32 to 800	0 to 1200	32 to 1999
4.16	R	0 to 1600	32 to 1999	0 to 1600	32 to 1999
5.16	S	0 to 1600	32 to 1999	0 to 1600	32 to 1999
6.16	T	0 to 250	32 to 500	-199 to 250	-199 to 480
7.16	E	0 to 500	32 to 1000	0 to 600	32 to 1110
8.16	J-DIN	0 to 400	32 to 800	0 to 800	32 to 1470
9.16	Pt100	0 to 200	32 to 400	-199 to 400	-199 to 750
10.16	B	0 to 1600	32 to 1999	0 to 1800	32 to 1999

(Options cont'd on next page)

รูปที่ ง.2 ฟังก์ชันควบคุมการเลือกใช้ Thermocouple

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

ชื่อ-นามสกุล นายฉัตรชัย สัมฤทธิ์สุกผล  
วัน เดือน ปีเกิด 5 พฤษภาคม พ.ศ. 2526

### ประวัติทางการศึกษา

ปี พ.ศ. 2544 จบการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนปราจิณราษฎร์อำรุง จังหวัดปราจีนบุรี

ปี พ.ศ. 2548 จบการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขามัธยมศึกษาวิทยาศาสตร์ (ฟิสิกส์) คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปี พ.ศ. 2550 เข้าศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ประวัติการทำงาน

ปี พ.ศ. 2547 ครูฝึกสอน วิชาฟิสิกส์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนสันติราษฎร์วิทยาลัย

ปี พ.ศ. 2548 ครูอัตราจ้างวิชาฟิสิกส์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนสันติราษฎร์วิทยาลัย

ปี พ.ศ. 2551 ข้าราชการครูวิชาฟิสิกส์ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ โรงเรียนสามเสนวิทยาลัย

ศูนย์วิทยพัชกร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย