



บทที่ 2

## พื้นฐานของข้อมูล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Nuclear Fuel) เป็นแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดหนึ่ง เช่นเดียวกับเชื้อเพลิงฟอสซิลโดยทั่วไป เช่น ถ่านหิน ถ่านไม้ น้ำมัน และ ก๊าซธรรมชาติ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของเชื้อเพลิงทั้งสองชนิดนอกจากจะอยู่ที่วิธีการคายความร้อนออกมา กล่าวคือ เชื้อเพลิงฟอสซิล ให้ความร้อนออกมาจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ในขณะที่เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ให้ความร้อนออกมาจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) แล้วยังแตกต่างกันที่ลักษณะเฉพาะตัวของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ดังต่อไปนี้คือ (5)

1. ปลดปล่อยพลังงานต่อมวล (Energy Content) สูงกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก
2. ในระหว่างที่มีการให้ความร้อนออกมานั้น ยังมีการสร้างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ชนิดใหม่ขึ้นมาได้ด้วย
3. สามารถใช้งานได้นานโดยยังคงคุณสมบัติทางกล (Mechanical properties) ได้ครบถ้วน
4. ได้รับการผลิตให้มีขนาดรูปทรงและองค์ประกอบที่แน่นอนในระดับเดียวกับการผลิตชิ้นส่วนของนาฬิกา
5. ได้รับการผลิตให้มีความบริสุทธิ์ของสารแน่นอนในระดับเดียวกับการผลิตยา

### 2.1 ปฏิกิริยาฟิชชันกับกลไกในการให้ความร้อนของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) หมายถึง การแตกตัวของนิวเคลียสของธาตุหนักออกเป็น 2 สิ่ง ที่เกิดขึ้นต่อเนื้อเอง (Spontaneous) หรือ จากการถูกกลืนนิวตรอนช้า (Slow Neutron) พร้อมทั้งให้นิวตรอนจำนวนหนึ่ง และ พลังงานจำนวนมหาศาล เช่น ยูเรเนียม - 235 1 นิวเคลียส เมื่อเกิดฟิชชัน จะให้พลังงานออกมาประมาณ 200 Mev ซึ่งมีการกระจายออกตามสัดส่วนดังนี้ คือ (5)

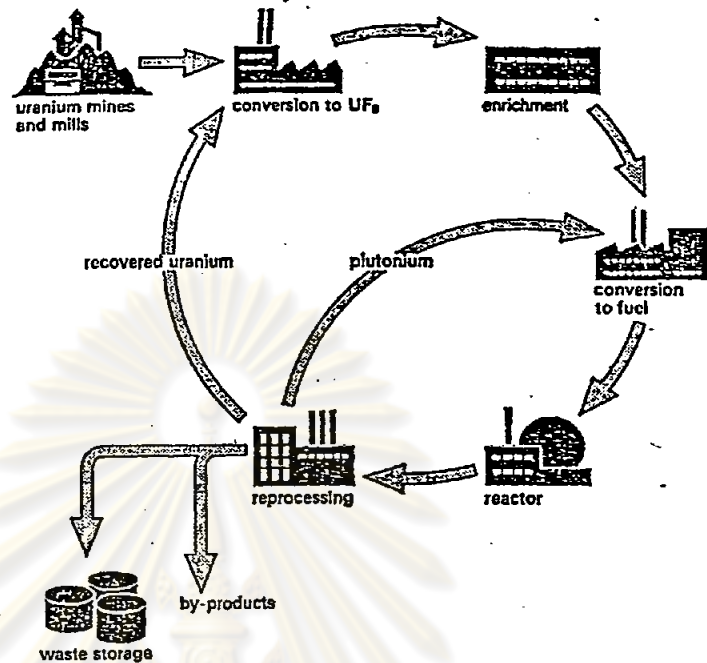
2.1.1	พลังงานจลน์ของผลผลิตฟิชชัน (Fission Products)	168 Mev
2.1.2	พลังงานจลน์ของนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยา	5 Mev
2.1.3	รังสีแกมมา	5 Mev
2.1.4	อนุภาคเบตาจากการสลายตัวของผลผลิตฟิชชัน	7 Mev
2.1.5	รังสีแกมมาจากการสลายตัวของผลผลิตฟิชชัน	6 Mev
2.1.6	นิวตริโนจากการสลายตัวของผลผลิตฟิชชัน	10 Mev

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ให้ความร้อนจากปฏิกิริยาฟิชชันในขณะที่เชื้อเพลิงฟอสซิลให้ความร้อนจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน พลังงานความร้อนที่ได้จากยูเรเนียม 1 ลูกบาศก์ฟุต มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้จากถ่านหิน 1.7 ล้านตัน หรือน้ำมัน 7.2 ล้านบาร์เรล หรือ ก๊าซธรรมชาติถึง  $3.2 \times 10^9$  ลูกบาศก์ฟุต

## 2.2 วัฏจักรของเชื้อเพลิง (Fuel Cycle) (6,7,8)

สารที่นำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์นั้นมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น ยูเรเนียม พลูโทเนียม และทอเรียม เป็นต้น ด้วยเหตุที่ยูเรเนียมเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในสถานะ และองค์ประกอบต่างๆ กัน ดังนั้นในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะยูเรเนียม และสารประกอบของมันเท่านั้น

วัฏจักรของยูเรเนียม หมายถึง วงจรของการนำเอายูเรเนียมมาใช้งาน นับตั้งแต่การทำเหมืองยูเรเนียม การออกแบบและการผลิตเป็นเม็ดเชื้อเพลิง การนำเชื้อเพลิงเข้าไปใช้งาน กระบวนการนำกลับ (Reprocess) เชื้อเพลิงที่ใช้งานแล้ว และการผลิตเม็ดเชื้อเพลิงใหม่ขึ้นจากการ reprocess นั้น ดังรูปที่ 2.1|



รูปที่ 2.1 แสดงวัฏจักรของเชื้อเพลิง (8)

2.2.1 แหล่งของยูเรเนียม (Sources of Uranium) ผู้เชี่ยวชาญได้ประมาณไว้ว่ามียูเรเนียมกระจายอยู่ประมาณ 4 ส่วนในล้านส่วน (4 ppm) ของสสารที่ประกอบเป็นเปลือกโลกทั้งหมด และได้ประมาณไว้ว่า จากผิวโลกถึงระดับลึกลงไป 12 ไมล์ จะมียูเรเนียมอยู่ราว  $10^{14}$  ตัน ซึ่งนับว่าเป็นจำนวนไม่น้อยนั่นก็ยิ่งมากกว่าปริมาณของเงิน พรอท บิสมีธ และ แคลเดียม ที่มีอยู่บนผิวโลกเสียอีก อย่างไรก็ตามตัวเลขดังกล่าวอาจทำให้รู้สึกเกินจริงไปได้ เพราะถึงแม้จะมียูเรเนียมจำนวนมากถึง  $10^{14}$  ตัน แต่ส่วนใหญ่จะอยู่อย่างกระจุกกระจายคือ มีปริมาณของยูเรเนียมเพียง 0.001% หรือต่ำกว่า

ยูเรเนียมในรูปของสารประกอบชนิดต่างๆ มีปะปนอยู่ในสินแร่ต่างๆ กันดังนี้คือ

2.2.1.1 พิตช์เบลนด์ (Pitchblende) หรือ ยูรานินไนต์ (Uraninite) พบมากในคองโกและคานาดา โดยยูเรเนียมจะอยู่ในรูปของออกไซด์ 2 ชนิด ในอัตราส่วนต่างๆ กัน คือ  $x\text{UO}_2 \cdot y\text{U}_3\text{O}_8$  โดยอัตราส่วนของ  $x$  ต่อ  $y$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 2 และมียูเรเนียมในปริมาณ 45 - 85%

2.2.1.2 คาร์โนไทต์ (Carnotite) พบมากในโคโลราโด และ ยูทาห์ ในสหรัฐอเมริกา ยูเรเนียมจะปรากฏอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน (Complex) โดยมีสูตรทางเคมีเป็น  $K_2O \cdot 2UO_3 \cdot V_2O_5 \cdot 3H_2O$  และมียูเรเนียมในปริมาณ 50 %

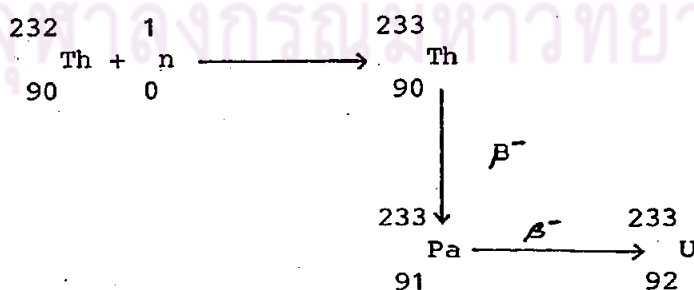
2.2.1.3 ออทูไนต์ (Autunite) พบมากในฝรั่งเศส ยูเรเนียมจะปรากฏอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน โดยมีสูตรทางเคมีเป็น  $CaO \cdot 2UO_3 \cdot P_2O_5 \cdot 8-12H_2O$  และมียูเรเนียมในปริมาณ 50 %

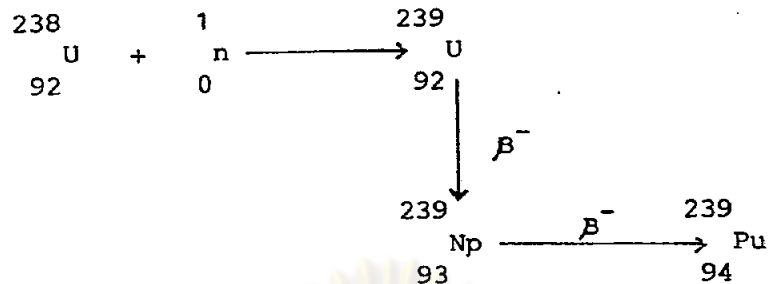
### 2.2.2 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์

โดยทั่วไปเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 2 ส่วน คือ

2.2.2.1 สาร Fissile เป็นสารที่สามารถเกิดปฏิกิริยาฟิชชันได้ เมื่อเกิดปฏิกิริยากับ Thermal Neutron ได้แก่ U-235 ; Pu-239 ; U-233 และมีขีดเคียวเท่านั้นที่เกิดขึ้นเองในธรรมชาติคือ U-235 และมีอยู่ในปริมาณที่ค่อนข้างน้อย คือ 0.711% ของยูเรเนียม

2.2.2.2 สาร Fertile เป็นสารที่มีอยู่ในปริมาณค่อนข้างมาก เช่น ในธรรมชาติ มี U-238 99.289 % ของยูเรเนียมทั้งหมด Fertile อื่นๆ เช่น Th-232 ; Pu-240 ซึ่งสารเหล่านี้สามารถทำให้เกิดสาร Fissile ได้ เมื่อดูดกลืน (Capture) resonance neutron เข้าไป ดังนั้นถึงแม้ว่า Fissile material ในธรรมชาติจะมีน้อย แต่เราก็สามารถเปลี่ยนยูเรเนียมเกือบทั้งหมดในธรรมชาติให้เป็น Fissile ได้หมดในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู นั่นเอง ดังสมการเคมีต่อไปนี้





### 2.3 ชนิดของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Types of Nuclear Fuel) (2,9)

เชื้อเพลิงนิวเคลียร์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ดังนี้คือ

#### 2.3.1 เชื้อเพลิงในรูปออกไซด์ (Oxide Type Fuel)

เชื้อเพลิงชนิดนี้จะอยู่ในรูปของเม็ด (Pellet) ของ  $\text{UO}_2$  ซึ่งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก โดยผ่านการอัดและเผาประสานที่อุณหภูมิสูงมาแล้ว เม็ดเชื้อเพลิงดังกล่าวจะได้รับการบรรจุอยู่ในตัวห่อหุ้ม (Cladding) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) หรือ เซอร์คาลอย (Zircalloy) ด้วยเหตุที่ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำ จึงนิยมใช้กันในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ Pressurized Water แบบ Boiling Water และแบบ Candu เป็นต้น

#### 2.3.2 เชื้อเพลิงในรูปคาร์ไบด์ (Carbide Type Fuel)

เป็นเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูแบบ Breeder เช่น Liquid-Metal Reactor โดยผลิตในรูปของเม็ดเชื้อเพลิงคาร์ไบด์บรรจุในท่อเหล็กกล้าไร้สนิม เชื้อเพลิงชนิดนี้ไม่ใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ที่ใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน เพราะสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำได้ และให้ยูเรเนียมออกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทนออกมา

#### 2.3.3 เชื้อเพลิงในรูปโลหะ (Metallic Type Fuel)

เชื้อเพลิงชนิดนี้ก็เช่นเดียวกับชนิดของ คาร์ไบด์ กล่าวคือเป็นเชื้อเพลิงที่ไม่นิยมใช้กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ที่ใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อน เพราะโลหะยูเรเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับน้ำที่อุณหภูมิสูงได้ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ที่ใช้เชื้อเพลิงชนิดนี้เป็นแบบ MAGNOX

โดยบรรจุแท่งยูเรเนียมในท่อของแมกนีเซียมออกไซด์

2.4 สมรรถนะเชิงปฏิบัติที่พึงมีของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (Performance Requirement of Nuclear Fuel) (9)

2.4.1 มีสภาพนำความร้อนสูง (High Thermal Conductivity)

กล่าวคือสามารถถ่ายเทความร้อนจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วทำให้สามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ Power density สูง (คือจ่ายกำลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของตัวเชื้อเพลิง) และที่ Specific power สูงๆ (คือจ่ายกำลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลของเชื้อเพลิง) ได้

2.4.2 มีสภาพการต้านทานสูงต่อความเสียหายจากการถูกอวบน้ำด้วยรังสีสูง (High Resistance to Irradiation Damage)

กล่าวคือ ตัวเชื้อเพลิงที่คั้นต้องได้รับการออกแบบหรือผลิตให้ผลของกัมมันตรังสีที่มีต่อคุณสมบัติด้านต่างๆของตัวเชื้อเพลิงในระหว่างการใช้งานนั้นมีน้อยลงให้มากที่สุด ในยุคแรกๆ นั้นปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดอายุใช้งานของแท่งเชื้อเพลิง คือ ความเสียหายอันเกิดจากการเล็ดลอดออกมาของสารกัมมันตรังสี นั่นคือแทนที่จะสามารถใช้เชื้อเพลิงไปตลอดจนจำนวน Fissile Material ลดลงถึงต่ำกว่าค่าวิกฤต (Critical Mass) กลับใช้ได้เพียงช่วงที่เชื้อเพลิงยังไม่เสียหายจากผลของการรั่วไหลดังกล่าวเท่านั้น

2.4.3 มีเสถียรภาพทางเคมี (Chemical Stability)

กล่าวคือ ไม่ทำปฏิกิริยาทางเคมี กับสารอื่นใดโดยเฉพาะอย่างยิ่งตัวระบายความร้อน (Coolant) หรือสารห่อหุ้ม (Cladding Material) คุณสมบัติข้อนี้เป็นความจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อไม่ให้มีกัมมันตรังสีรั่วไหลไปกับ coolant หรือถ้ามีก็ให้เป็นจำนวนน้อยที่สุดในกรณีที่สารห่อหุ้มเกิดเสียหายและตัวเชื้อเพลิงต้องสัมผัสกับตัวระบายความร้อนโดยตรง

2.4.4 มีเสถียรภาพทางกายภาพ (Physical Stability)

กล่าวคือในสภาวะต่างๆ ของการใช้งาน ไม่ว่าจะอุณหภูมิจะสูง หรือระดับกัมมันตรังสีจะมาก ตัวเชื้อเพลิงต้องคงคุณสมบัติทางกายภาพไว้ได้เช่นขนาดจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก สภาพการนำความร้อนก็จะต้องไม่เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เช่นเดียวกัน

#### 2.4.5 ความสามารถในการเก็บกักผลผลิตฟิชชัน (Fission Product Retention)

กล่าวคือในกรณีที่ตัวหล่อหุ้ม ของเชื้อเพลิงเกิดเสียหายตัวเชื้อเพลิงเองจะต้องไม่ปล่อยผลผลิตฟิชชันให้หลุดไปกับตัวระบายความร้อนในจำนวนมากเกินไป

#### 2.4.6 สามารถผลิตได้ง่ายในราคาพอสมควร (Economic Fabricability)

กล่าวคือต้องมีคุณสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมที่จะผ่านขั้นตอนหรือกรรมวิธีการผลิตมาตรฐานต่างๆ ได้ในราคาที่เหมาะสม

#### 2.4.7 สามารถตรวจสอบได้ง่าย (Inspectability)

กล่าวคือ สามารถได้รับการตรวจสอบคุณสมบัติสำคัญๆ ได้ด้วยวิธี Non-destructive Testing (NDT)

#### 2.4.8 สามารถผ่านกรรมวิธีทางเคมีได้ (Chemical Processability)

กล่าวคือ เพื่อความสะดวกในการ Re-Process เชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว

### 2.5 เรื่องทั่วไปของยูเรเนียมไดออกไซด์ ( $UO_2$ ) (3, 9, 10, 11, 12)

ก่อนที่จะมีการนำ  $UO_2$  มาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์นั้นได้มีการนำเอา  $UO_2$  ไปใช้เป็นสีสำหรับเครื่องเคลือบดินเผา อย่างไรก็ตามการนำเอา  $UO_2$  มาใช้เป็นเชื้อเพลิงก็เริ่มมานานกว่า 40 ปี แล้ว แม้ Enrico Fermi เองก็ใช้  $UO_2$  ในการทดลองครั้งแรก เพื่อพิสูจน์ว่าปฏิกิริยาฟิชชันนั้นสามารถได้รับการควบคุมได้ นับแต่นั้นมาก็ได้มีการศึกษาคุณสมบัติในแง่ต่างๆ พร้อมทั้งได้พัฒนาวิธีการผลิตเชื้อเพลิงในรูปต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่แน่นอน และดียิ่งๆ ขึ้น

#### 2.5.1 ลักษณะทั่วไปและโครงสร้างของ $UO_2$

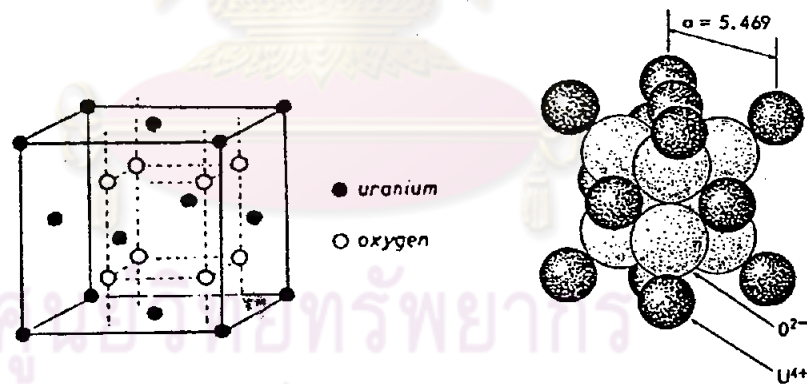
ยูเรเนียมไดออกไซด์ มีลักษณะเป็นผงสีน้ำตาลหรือดำ ขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม และขนาดของผง กล่าวคือ ผง  $UO_2$  ที่เตรียมจากปฏิกิริยารีดักชัน มักจะมีสีน้ำตาล ในขณะที่  $UO_2$  ที่เตรียมจากการออกซิไดซ์ ยูเรเนียมไนโอไนต์จะมีสีดำ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงสีของ  $UO_2$ <sup>(9)</sup>

Color	Particle diameter* (microns)
Black	0.05
Light brown	ca. 0.1
Brown	ca. 0.3
Dark brown	ca. 0.8
Red brown	ca. 1.0
Blood red	ca. 10.0

\*Determined by gas adsorption measurements.

$UO_2$  มีรูปผลึกแบบ Face-Centred Cubic โดยที่ lattice parameter  $a = 5.47 \text{ \AA}$  เมื่อ  $U/O$  มีค่าเท่ากับ 2.00 ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงโครงผลึกของ  $UO_2$  (11, 13)

$UO_2$  มีความหนาแน่นตามทฤษฎีเท่ากับ 10.952 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร

2.5.2 ลักษณะสมบัติทางกายภาพของ  $UO_2$

2.5.2.1 ความหนาแน่นจริง (Real Density) ของ  $UO_2$  นั้นหาได้โดย



การแทนที่  $UO_2$  ด้วย Helium ซึ่งมีขนาดของโมเลกุลเล็กพอที่จะแทรกเข้าไปในโพรงเปิด (Open Pores) ของผง  $UO_2$  ได้ เนื่องจากในแต่ละอนุภาคของ  $UO_2$  อาจจะมีโพรงปิด (Closed Pores) อยู่ภายในซึ่ง Helium แทรกเข้าไปไม่ถึง ทำให้ความหนาแน่นจริง มีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นตามทฤษฎีอยู่บ้าง ดังตารางที่ 2.2।

ตารางที่ 2.2। แสดงความหนาแน่นของ  $UO_2$  (9)

Method of preparation	O/U	Density (g/cc)	
		Helium	$CCl_4$ *
High-pressure steam oxidation of uranium.....	1.97	$10.92 \pm 0.1$	10.75
Controlled low-pressure steam oxidation of uranium.....	2.03	$10.85 \pm 0.1$	10.91
Steam oxidation of uranium from $UH_3$ .....	2.03	$10.98 \pm 0.1$	10.67
Hydrogen reduction of $UO_2 \cdot 2H_2O$ .....	2.01	$10.25 \pm 0.05$	10.25
Hydrogen reduction of $UO_2 \cdot H_2O$ .....	2.01	$10.34 \pm 0.05$	10.37
Air pyrolysis of $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ to $UO_2$ ; hydrogen reduction to $UO_2$ **.....	2.02	$10.16 \pm 0.05$	10.13
Air pyrolysis of $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ to $U_3O_8$ ; hydrogen reduction to $UO_2$ .....	2.02	$10.03 \pm 0.05$	9.96
Hydrogen reduction of uranyl oxalate.....	2.01	$10.61 \pm 0.2$	10.61
Hydrogen reduction of uranium peroxide.....	2.08	$11.00 \pm 0.1$	10.78
Hydrogen reduction of ammonium hydroxide precipitated diuranate.....	2.07	$11.11 \pm 0.2$	10.81
Hydrogen reduction of urea precipitated diuranate.....	2.08	$10.74 \pm 0.2$	10.19

\*Precision:  $\pm 0.2$  percent.  
 \*\*MCW oxide used in PWR Core 1.

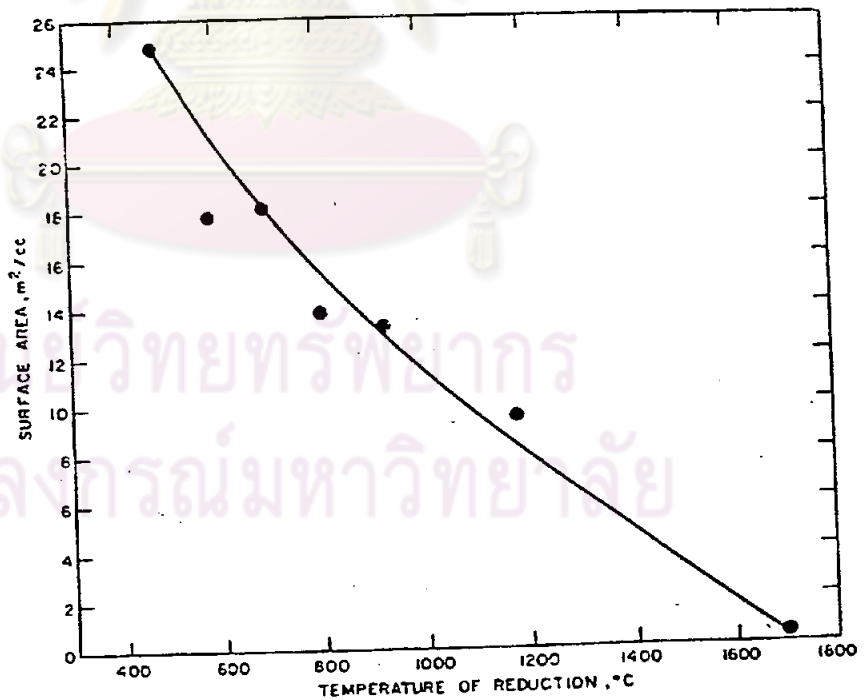
โดยทั่วไปแล้วค่าความหนาแน่นจริงของ  $UO_2$  จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของออกไซด์สูงกว่าที่ใช้เตรียม (Parent Oxide) (เช่น  $UO_2 \cdot 2H_2O$ ,  $UO_3$ ,  $U_3O_8$  เป็นต้น) อย่างไรก็ตามจะไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการรีดิวซ์ ถ้ารีดิวซ์ที่อุณหภูมิไม่เกิน  $1200^\circ C$  และโดยทั่วไปการนำเอาผง  $UO_2$  ที่มีความหนาแน่นต่ำมาบดคั่วจะไม่ทำให้ความหนาแน่นสูงขึ้นได้มากนัก ทั้งนี้เพราะว่าการบดคั่วไม่อาจทำให้โพรงปิดหายไปได้นั่นเอง

2.5.2.2 โครงสร้างไมโคร (Microstructure) รูปร่างของอนุภาคของผง  $UO_2$  มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติหลายประการของ  $UO_2$  เช่นความหนาแน่นของ  $UO_2$  หลังการเผาประสาน (Sintering) flow characteristics เป็นต้น ปัจจัยที่

กำหนดรูปร่างนี้ก็คือ วิธีการทดลองชนิดของสารตั้งต้นและเงื่อนไขในการเตรียมผง  $UO_2$  นั้นเอง

2.5.2.3 คุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับพื้นที่ผิว (Surface Properties)

พื้นที่ผิว (Surface Area) หมายถึงพื้นที่ผิวภายนอกและภายใน เช่นในโพรงเปิด และรอยร้าว ของผง  $UO_2$  พื้นที่ผิวจะเป็นตัวกำหนด ลักษณะหลายประการ เช่น ความต้านทานต่อการไหลของก๊าซ ความหนาแน่น อัตราการตกตะกอน และ การอัดตัว (Packing Properties) ของผง  $UO_2$  นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของ  $UO_2$  ระหว่าง การเผาประสาน (Sintering) อีกด้วย พื้นที่ผิวของผง  $UO_2$  จะมีค่าอยู่ในระหว่าง 0.05 ถึง 25 ตารางเมตรต่อกรัม ( $m^2/gm$ ) ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม และวิธีการวัดโดยทั่วไปแล้ว  $UO_2$  ที่เตรียมจากแอมโมเนียมไดยูเรเนต (ADU) จะมีพื้นที่ผิวมากที่สุด นั้นหมายถึงว่ามีขนาดของอนุภาคเล็กที่สุดด้วย ปัจจัยที่สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนด ขนาดพื้นที่ผิวก็คือพื้นที่ผิวของ Parent oxide และอุณหภูมิของการรีดิวซ์ ถ้าอุณหภูมิของการรีดิวซ์มีค่าสูง พื้นที่ผิวจะมีค่าน้อย และอนุภาคจะมีขนาดใหญ่ ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ของพื้นที่ผิวของ  $UO_2$  กับอุณหภูมิของการรีดิวซ์ (9)

นอกจากนี้  $\text{UO}_2$  ที่มีความหนาแน่นสูงจะมีพื้นที่ผิวน้อย ดังตารางที่ 2.3,

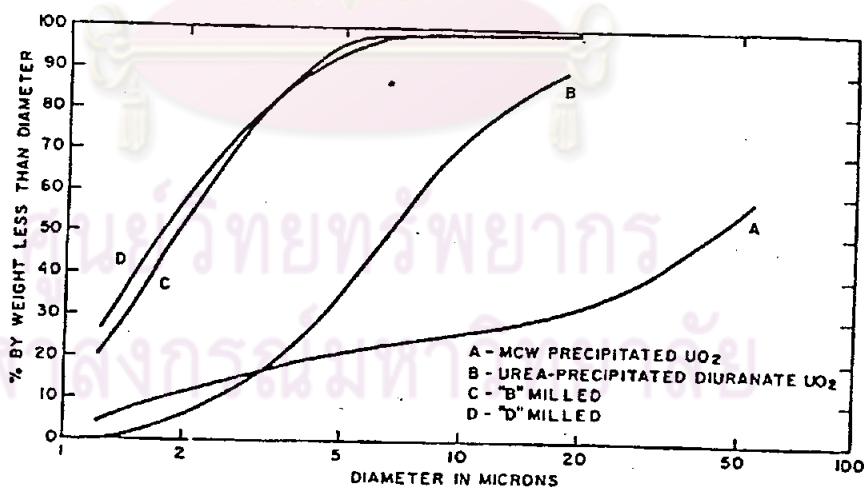
ตารางที่ 2.3 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวกับความหนาแน่นของ  $\text{UO}_2$  หลังการเผาประสาน (9)

Percent theoretical density*	Adsorbate gas	Surface area ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )**	Roughness factor
94.6	Butane	$3.0 \pm 0.7$	3.3
96.7	Ethane	$1.0 \pm 0.5$	1.3
98.0	Butane	$1.9 \pm 0.9$	2.9
98.1	Ethane	$1.5 \pm 0.5$	2.2
98.9	Butane	$1.3 \pm 0.6$	1.9

\*No measurable open porosity by water absorption.

\*\*Limits of error based on scatter of experimental data.

ขนาดของอนุภาค (Particle Size) ผง  $\text{UO}_2$  จะมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วง 0.01  $\mu$  จนกระทั่งเป็นมิลลิเมตร โดยทั่วไปขนาดของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียม อนุหุมิของการรีดิวซ์ และการบด (Milling) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงผลของการบดที่มีต่อการกระจายของขนาดของอนุภาคของ  $\text{UO}_2$  (9)

จากรูปจะเห็นว่า หลังจากการบดแล้ว การกระจายของอนุภาคแทบไม่ต่างกันเลย

#### 2.5.2.4 คุณสมบัติเชิงความร้อน (Thermal Properties)

สภาพนำความร้อน (Thermal Conductivity) ของ  $\text{UO}_2$  ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความหนาแน่น อัตราส่วนของ  $\text{O/U}$  เป็นต้น  $\text{UO}_2$  ก็เช่นเดียวกับเซรามิกโดยทั่วไป จะมีลักษณะพหุ ซึ่งมีผลทำให้สภาพนำความร้อนมีค่าต่ำ ซึ่งนับเป็นข้อเสีย ในการนำเอา  $\text{UO}_2$  มาเป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ เพราะถ้า Operate ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิด Thermal Stress ระหว่างบริเวณใจกลางของเม็ดเชื้อเพลิง กับบริเวณผิวของแท่งเชื้อเพลิง ผลจากการทดลองสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อน อุณหภูมิ และความหนาแน่นของ Sintered  $\text{UO}_2$  ได้ดังต่อไปนี้คือ 
$$K = 0.0130 + \frac{1}{T(0.4848 - 0.4465 D)}$$

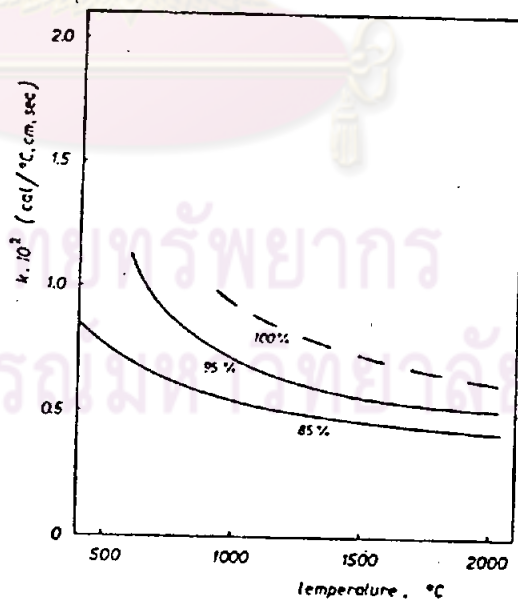
โดย  $K$  = สภาพนำความร้อนของ  $\text{UO}_2$  ที่เผาประสานแล้ว ( $\text{W/cm}^\circ\text{C}$ )

$T$  = อุณหภูมิของ  $\text{UO}_2$  ( $^\circ\text{C}$ )

$D$  = อัตราส่วนของความหนาแน่นของ  $\text{UO}_2$  จริงต่อความหนาแน่นทาง

ทฤษฎี โดย  $D$  จะต้องอยู่ระหว่าง 82 - 95%

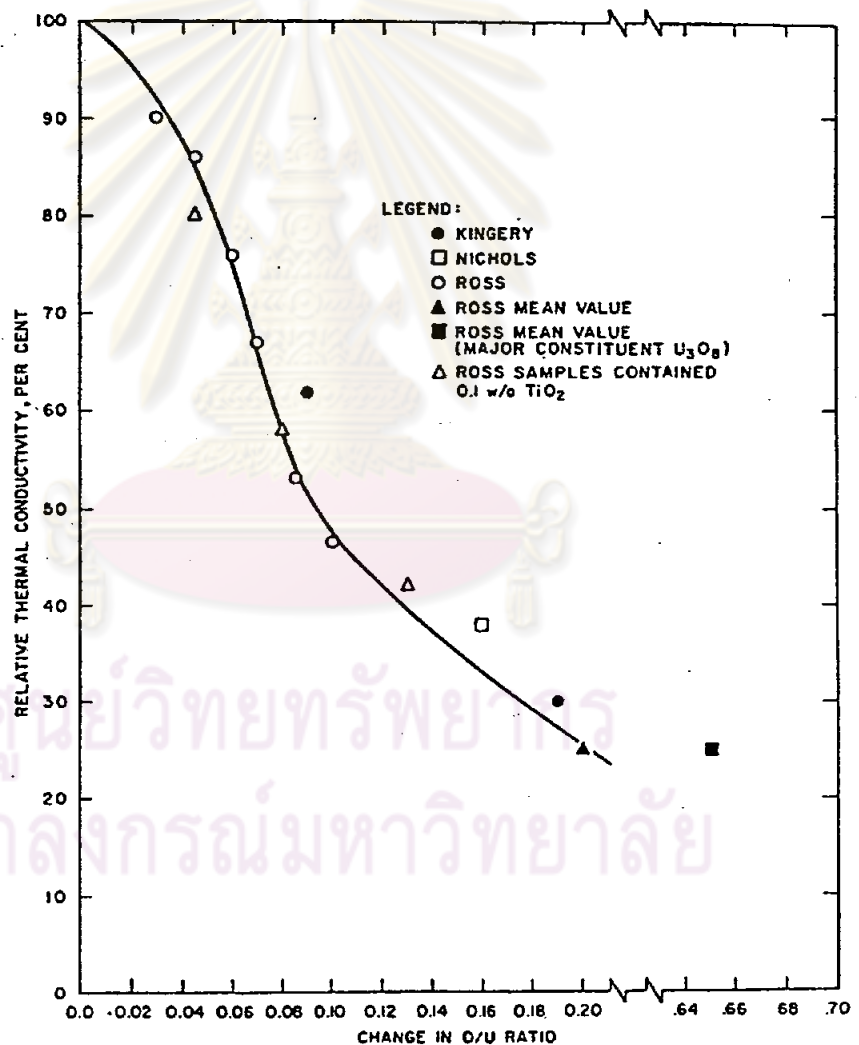
และสามารถแสดงความสัมพันธ์ข้างต้นดังในรูปกราฟ ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพการนำความร้อนกับอุณหภูมิที่มีความหนาแน่น

ต่างๆ (11)

จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า สภาพนำความร้อนของ  $\text{UO}_2$  ที่เผาประสานแล้ว จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อความหนาแน่นสูงขึ้น ทั้งนี้เพราะว่ากลไกของการนำความร้อนของ  $\text{UO}_2$  นั้น ก็คือการสั่นสะเทือนของอะตอมในโครงสร้างผลึกนั่นเอง (มิใช่เกิดจากการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอนในโครงผลึก) และมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ถ้าอัตราส่วนของ  $\text{O/U}$  มีค่ามากกว่า 2.00 สภาพนำความร้อนก็จะมีค่าลดลง ดังรูปที่ 2.6]



รูปที่ 2.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อนกับอัตราส่วน  $\text{O/U}$  ของ  $\text{UO}_2$  <sup>(9)</sup>

นอกจากนั้นเมื่อ  $\text{CO}_2$  ถูกออบด้วยรังสีนิวตรอนนานๆ โดยเฉพาะที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $500^\circ\text{C}$  จะทำให้ค่าสภาพนำความร้อนลดลง และถ้าหาก  $\text{CO}_2$  เกิดการร้าว (Crack) ขึ้นในระหว่างใช้งาน ก็จะมีผลทำให้ค่าดังกล่าวลดลงไปด้วยเช่นกัน

การขยายตัวเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลง (Thermal Expansion) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเชิงเส้น (Linear Thermal Expansion) จะมีค่าเปลี่ยนไปตามช่วงของอุณหภูมิของ  $\text{CO}_2$  แต่เกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับ อัตราส่วนของ  $\text{O}/\text{C}$  หรือความหนาแน่นของ  $\text{CO}_2$  เลยกิ่งตารางที่ 2.4।

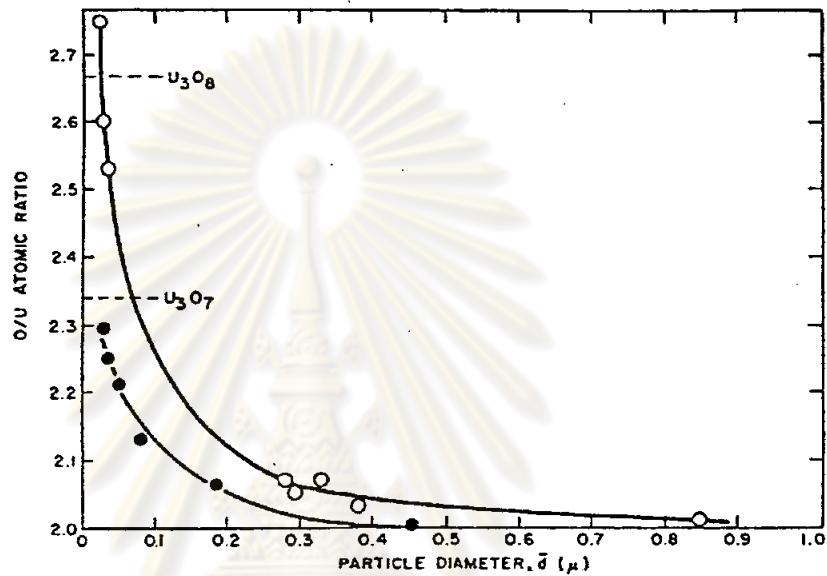
ตารางที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การขยายตัวของ  $\text{CO}_2$  ที่อุณหภูมิต่างๆ (10)

Temp. range ( $^\circ\text{C}$ )	Mean coeff. of linear expansion ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )
20- 720	11.5
20- 946	10.8
27- 400	9.0
400- 800	11.0
800-1,260	13.0
400- 900	10

### 2.5.3 ลักษณะสมบัติทางเคมี (Chemical Characteristics) ของ $\text{CO}_2$ (9, 12)

2.5.3.1 Non-stoichiometry ด้วยเหตุที่ผง  $\text{CO}_2$  ถูกออกซิไดซ์ได้ง่ายในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง ได้เป็น  $\text{CO}_{2+x}$  โดยค่าของ  $x$  นี้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและพื้นที่ผิวที่สัมผัสกับบรรยากาศ จากการศึกษาของ Anderson พบว่าปฏิกิริยาออกซิเดชันในบรรยากาศที่อุณหภูมิห้อง จะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคจนถึงระยะที่ลดลงไปอีก  $50^\circ\text{A}$  โดยจะดึง  $\text{O}_2$  เข้าไปเป็นจำนวน 0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อพื้นที่ผิว 1 ตารางเมตร ที่ STP ( $0^\circ\text{C}$  1 atm)  $\text{CO}_2$  ที่เป็นผงละเอียด (ขนาดของอนุภาค  $0.1 \mu$ ) จะถูกออกซิไดซ์จนมีอัตราส่วนของ  $\text{O}/\text{C}$  เข้าใกล้ 2.25 ถ้าทิ้งไว้ในบรรยากาศนาน 1 เดือน ส่วนผงของ  $\text{CO}_2$  ที่หยาบ

(ขนาดของอนุภาค 1  $\mu$ ) จะเสถียรกว่า กล่าวคือ ในเงื่อนไขเดียวกันจะออกซิไดซ์เป็น  $UO_{2.02}$  เท่านั้น อย่างไรก็ตามเมื่อผ่านการเผาประสานแล้วจะไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับ  $O_2$  จึงทำให้สามารถเก็บรักษา  $UO_2$  ไว้ที่อุณหภูมิห้องได้ ดังรูปที่ 2.7।



รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคกับอัตราส่วน O/U ของ  $UO_2$  (9)

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ขนาด 0.2 - 0.3  $\mu$  นั้น  $UO_2$  จะค่อนข้างเสถียร แต่ที่ขนาด 0.05 - 0.08  $\mu$  แล้ว  $UO_2$  จะถูกออกซิไดซ์มาก

นอกจากนี้อัตราการออกซิไดซ์จะสูงขึ้น ถ้าเพิ่มอุณหภูมิ หรือ นำผงของ  $UO_2$  ไว้ใน

ที่ชื้น

กลไกของการเกิดออกซิเดชันมีต่างกัน ขึ้นอยู่กับช่วงอุณหภูมิดังนี้คือ

(1) ช่วง  $-183^\circ\text{C}$  ถึง  $50^\circ\text{C}$  จะเกิดการออกซิเดชันเฉพาะที่ผิว โดย  $UO_2$  จะ chemisorp โมเลกุลของ  $O_2$  ไว้เกิดเป็น Non-stoichiometric  $UO_{2+x}$  ที่บริเวณผิวของผง  $UO_2$  ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดและพื้นที่ผิวของ  $UO_2$  กล่าวคือ ถ้าขนาดเล็กกว่า  $100^\circ\text{A}$  จะถูกออกซิไดซ์จนเป็น  $UO_{2.33}$  อย่างไรก็ตามก็อาจทำให้ผง  $UO_2$

ที่เตรียมได้มีเสถียรภาพมากขึ้นได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของการรีดิวซ์และใช้ไอน้ำร่วมกับ  $H_2$  ในระหว่างการรีดิวซ์

(2) ช่วงตั้งแต่  $60^\circ C$  ขึ้นไป จะเกิด Bulk oxidation ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเป็น 1 ชั้นตอนหรือ 2 ชั้นตอน ก็ได้ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิว กล่าวคือ ถ้าพื้นที่ผิวมีค่ามากกว่า 1 ตารางเมตรต่อกรัม แล้วการออกซิไดซ์จะเป็น 2 ชั้นตอนด้วยกันคือ

(ก)  $UO_2$  จะถูกออกซิไดซ์เป็น  $U_3O_7$  โดยการแพร่กระจาย (Diffusion) ของ  $O_2$

(ข) ชั้นนี้จะเกิดต่อเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $200^\circ C$  ทำให้ได้  $U_3O_8$  โดยกระบวนการ Nucleation

สำหรับในกรณีที่มีพื้นที่ผิวมีค่าน้อย (คือน้อยกว่า 0.05 ตารางเมตรต่อกรัม) การออกซิไดซ์จะเกิดเพียงแค่ชั้นตอนแรกของที่กล่าวมาแล้วเท่านั้น

2.5.3.2 Chemical Stability  $UO_2$  จะเป็นสารที่มีความเฉื่อยทางเคมีมากเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ ที่มีการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ดังแสดงในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงเสถียรภาพทางเคมีของ  $UO_2$  (12)

*Reaction of  $UO_2$  with Some Coolants*

Coolant	Nature of reaction
$CO_2$	Practically no reaction up to $900^\circ C$
Water	The same up to $300^\circ C$
Hydrogen	The same up to very high temperatures
Sodium	The same up to $600^\circ C$ (for stoichiometric $UO_2$ )

*Reaction of  $UO_2$  with Construction Materials*

Construction material	Nature of reaction
Aluminium	No reaction up to $500^\circ C$
Beryllium	No reaction up to $600^\circ C$
Stainless steel	No reaction above $600^\circ C$
Niobium	Reacts above $1000^\circ C$
Zirconium	Reacts above $800^\circ C$
Nickel	Reacts weakly at $1400^\circ C$
Copper	Does not react up to melting point



## 2.6 ความเหมาะสมของ $UO_2$ ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (6,9,10,12)

ในปัจจุบันเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในรูปเซรามิกของ  $UO_2$  เป็นที่นิยมใช้กันมากในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear Power Reactor) ทั้งนี้เนื่องจากว่า  $UO_2$  มีลักษณะเกือบครบตามที่เชื้อเพลิงควรมี ดังนี้คือ

2.6.1 มีจุดหลอมเหลวสูงถึง  $2800^{\circ}C$  ทำให้สามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่ high power density ได้

2.6.2 ไม่ทำปฏิกิริยากับสารระบายความร้อน (Coolant) และสารห่อหุ้ม (Cladding)

2.6.3 มีเสถียรภาพทางกายภาพ กล่าวคือ ไม่มีการบวม (Swelling) หรือการบิดเบี้ยว ถึงแม้จะถูกอบด้วยรังสีนิวตรอนในระหว่างการปฏิบัติงานเป็นเวลานาน

2.6.4 มีเสถียรภาพทางเคมี กล่าวคือ ทนทานต่อการสึกกร่อน (Corrosion) อันเนื่องมาจาก การสัมผัส กับ ตัวระบายความร้อน (Coolant) ภายใต้สภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง

## 2.7 ข้อจำกัดของ $UO_2$ ในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ พอสรุปได้ดังนี้คือ (6,9,10,12)

2.7.1 มีเปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรน้อย คือจะมีอยู่ราว 51% เท่านั้น

2.7.2 ไม่ทนทานต่อ Thermal shock ในช่วงเริ่มเดินและหยุดเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู

2.7.3 มีคุณสมบัติเปราะ ที่อุณหภูมิห้อง ทำให้ไม่สามารถนำไปขึ้นรูปตามกรรมวิธีที่ใช้ทำกับโลหะโดยทั่วไป

2.7.4 มีสภาพนำความร้อนต่ำ ทำให้การนำความร้อนออกไปจากตัวเชื้อเพลิงเป็นได้ช้า

## 2.8 การผลิตเม็ดเชื้อเพลิง $UO_2$ (Fabrication of $UO_2$ )<sup>(1,9,12,14)</sup>

กรรมวิธีในการผลิต  $UO_2$  นั้นมีหลายวิธีด้วยกัน ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการผลิต  $UO_2$  จาก Ammonium diuranate (ADU) ที่ได้จากการตกตะกอนของ Uranyl nitrate โดย  $NH_4OH$  ที่สภาวะเหมาะสม ตลอดจนขั้นตอนในการทำ  $UO_2$  ในรูป pellet จากผง  $UO_2$  ดังกล่าวด้วย

คุณสมบัติที่พึงมีของเม็ดเชื้อเพลิง  $UO_2$  หลังเผาประสาน (Desirable Characteristics of Sintered  $UO_2$  Pellet) พอสรุปได้ดังนี้คือ

2.8.1 ความหนาแน่น (Density) จะต้องมีค่าสูงใกล้เคียงกับค่าความหนาแน่นทางทฤษฎี ทั้งนี้เพราะจะทำให้ค่าสภาพการนำความร้อนสูง เปอร์เซ็นต์ของยูเรเนียมต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรสูง และยังสามารถเก็บกักผลผลิตฟิชชันที่เป็นก๊าซได้ก็อีกด้วย

2.8.2 อัตราส่วนของ  $O/U$  จะต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 2.00 ให้มาก เพราะจะทำให้มีสภาพนำความร้อนสูง และเก็บกักผลผลิตที่เป็นก๊าซจากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Gas Product) ได้ดี เพราะโมเลกุลของก๊าซดังกล่าวจะสามารถแทรกอยู่ตามช่องว่างใน unit cell ได้

2.8.3 ต้องเผาประสานได้ (Sinterability) คือได้ความหนาแน่นของ  $UO_2$  หลังการเผาประสาน สูง โดยใช้อุณหภูมิในการเผาประสานไม่สูงเกินไปนัก และใช้เวลาพอสมควร

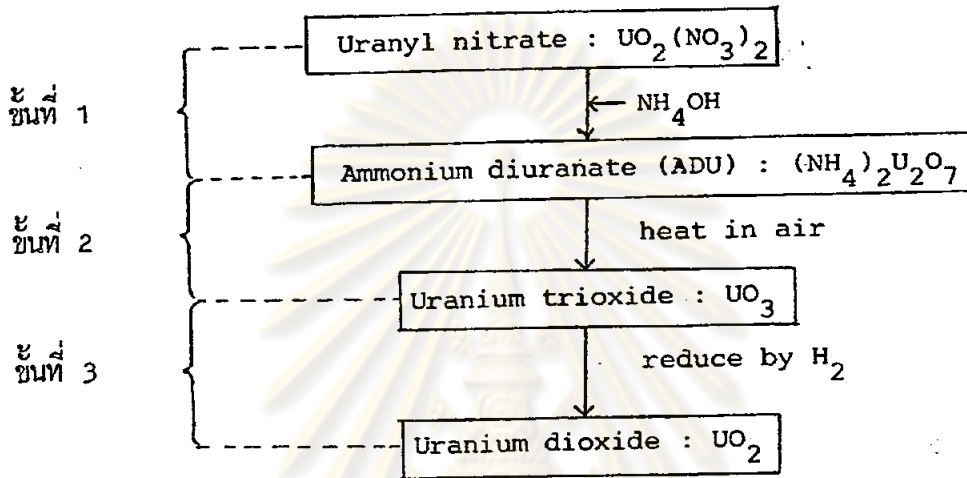
## 2.9 ขั้นตอนในการผลิตและการขึ้นรูปของเม็ดเชื้อเพลิง $UO_2$ จากยูเรนิลไนเตรต<sup>(1,9,12,14)</sup> (Steps in Fabrication and Forming of $UO_2$ Pellet From Uranyl nitrate)

ในการผลิตและการขึ้นรูปของเม็ดเชื้อเพลิง  $UO_2$  ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้คือ

- (1) การเตรียมผง  $UO_2$  (Preparation of  $UO_2$  powder)
- (2) การอัดเย็น (Cold Pressing)
- (3) การเผาประสาน (Sintering)

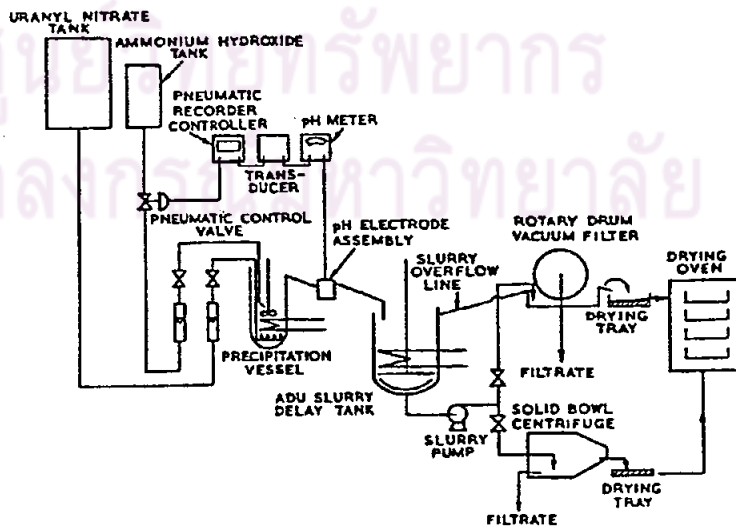
รายละเอียดในการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้คือ

2.9.1 การเตรียมผง  $UO_2$  จากยูเรนิลไนเตรต  
ซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังรูปที่ 2.8!



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงการเตรียมผง  $UO_2$

ขั้นที่ 1 เป็นขั้นตอนการตกตะกอนของแอมโมเนียมไดยูเรเนต (ADU) โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่าง ยูเรนิลไนเตรต กับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และเมื่อได้ตะกอนของ ADU แล้วจึงนำไปอบให้แห้ง ก็จะได้ผงของ ADU ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการเตรียมผง ADU (14)

ปัจจัยที่ควบคุมการเกิดปฏิกิริยาและคุณลักษณะของผง ADU ที่ได้ (ซึ่งจะมีผลต่อผง  $\text{UO}_2$  ในที่สุดด้วย) มีดังนี้คือ

### 2.9.1.1 ความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลาย และตัวทำปฏิกิริยา (Concentration of Reactants)

จากการศึกษาของ Lister และ Gillies<sup>(9)</sup> พบว่า ค่าความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลาย ยูเรนิลในเตรต ในช่วง 6 - 130 g U/1 จะไม่มีผลต่อลักษณะสมบัติของผง ADU ที่ได้เท่าใดนัก อย่างไรก็ตามค่าของความเข้มข้นของยูเรเนียมในสารละลายยูเรนิลในเตรต ที่นักวิจัยทั่วไปลงความเห็นว่า จะทำให้ได้ผง ADU ที่เมื่อนำไปทำเป็น  $\text{UO}_2$  แล้ว จะผ่านการเผาประสานได้ดี (Sinterability) จะอยู่ในช่วง 80 - 250 gm U/1 โดยทำปฏิกิริยาร่วมกับสารละลาย  $\text{NH}_4\text{OH}$  ที่เข้มข้น 13 N หรือ 28% โดยน้ำหนัก

### 2.9.1.2 ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ของปฏิกิริยา

ถ้าการตกตะกอนของ ADU เป็นไปอย่างรวดเร็วในแบบ Batch Process ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของปฏิกิริยาควรมีค่าเท่ากับ 9 อย่างไรก็ตามใน Continuous Process ที่ Reactant ค่อยๆ ถูกปล่อยให้ทำปฏิกิริยากันนั้น พบว่าค่าความเป็นกรดเป็นด่างควรจะอยู่ในช่วง 7 - 8 จึงจะได้ผง ADU ที่เมื่อนำไปทำเป็นเม็ด  $\text{UO}_2$  แล้วได้ความหนาแน่นสูง ค่าความเป็นกรดเป็นด่างนี้มีผลโดยตรงต่ออัตราการตกตะกอนของ ADU กล่าวคือ ถ้าใช้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างสูง อัตราการตกตะกอนจะช้า ผงของตะกอนจะละเอียด ปริมาตรของตะกอน (Settled Volume) จะมากและเปอร์เซ็นต์ของความชื้นของตะกอนจะมากกว่า เมื่อใช้ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง ที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ถ้าใช้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างมากกว่า 8 ผงของตะกอนของ ADU จะละเอียดมาก ทำให้การกรองเอา ADU ออกเป็นไปไต่ยาก ในทางตรงกันข้าม หากค่าความเป็นกรดเป็นด่างมีค่าต่ำกว่า 7.2 การตกตะกอนของ ADU จะเป็นไปอย่างรวดเร็ว ในขณะที่ความสามารถในการละลาย (Solubility) ของยูเรเนียมก็เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นการทำปฏิกิริยาที่ค่าความเป็นกรดเป็นด่างต่ำจะทำให้เกิดการสูญเสีย ยูเรเนียมไปจำนวนหนึ่ง ซึ่งไม่ตกตะกอนเป็น ADU ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 แสดงผลของค่า pH ต่อการตกตะกอน ADU (14)

Temperature of Precipitation 50°C      Stirrer Speed 7.1 Hz  
Residence Time in Precipitator 21 min.

Property of ADU Precipitate	pH 7.2	pH 7.5	pH 8.0
Settling Rate Measured at 40°C (mm s <sup>-1</sup> )	0.09-0.22	0.06-0.11	0.05-0.06
Settled Volume (%)	21-25	23-36	40-49
Filtration Rate (l h <sup>-1</sup> )	48-70	40-45	33-40
Moisture Content of Filter Cake, on Wet Basis (wt %)	36-42	42-47	53-62

2.9.1.3 อุณหภูมิ (Temperature)

การตกตะกอนของ ADU ที่อุณหภูมิต่ำ (50°C) จะเกิดขึ้นในอัตราเร็วกว่าที่อุณหภูมิสูง และ ADU Slurry จะผ่านการกรองได้ง่ายกว่า นอกจากนั้นเปอร์เซ็นต์ความชื้นใน ADU ก็น้อยกว่าด้วย ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 แสดงผลของอุณหภูมิต่อการตกตะกอน ADU (14)

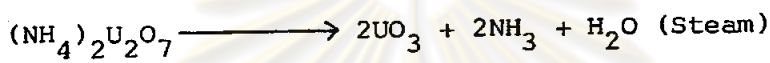
Stirrer Speed 7.1 Hz      Residence Time in Precipitator 21 min.

Property of ADU Precipitate (Averaged values)	Precipitation Conditions		
	pH 7.5 at 50°C	pH 8.0 at 50°C	pH 7.5 at 80°C
Settling Rate (mm s <sup>-1</sup> )	0.09	0.06	0.067
Filtration Rate (l h <sup>-1</sup> )	43	37	38
Moisture Content of Filter Cake, on Wet Basis (wt %)	44	59	50

ADU ที่กรองได้จะมีเปอร์เซ็นต์ความชื้นต่างๆ กันไปตามเงื่อนไขของการตกตะกอน ก่อนจะนำไปออกซิไดซ์ให้เป็น  $UO_3$  ในขั้นต่อไป จะต้องทำ ADU ดังกล่าวให้แห้งเสียก่อน โดยการนำไปอบในเตาอบ (Oven) ที่อุณหภูมิ  $110^\circ\text{C}$  ในเวลา 36 ชั่วโมง

### ขั้นที่ 2 การเตรียม $UO_3$ จากผง ADU

ทำได้โดยการนำเอาผง ADU แห้งที่เตรียมได้จากขั้นที่ 1 มาเผาในเตาเผา (Furnace) ที่อุณหภูมิประมาณ  $300^\circ\text{C}$  ในอากาศ ก็จะได้ผง  $UO_3$  ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นดังนี้



$UO_3$  ที่ได้จะมีลักษณะเป็นผง ที่มีสีต่างกันตั้งแต่สีแสดจนถึงสีน้ำตาล ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปผลึกของ  $UO_3$  ดังตารางที่ 2.8!

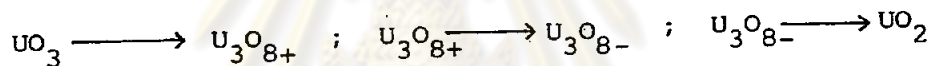
ตารางที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติของ  $UO_3$  <sup>(11)</sup>

	Colour	Structure	Z	Density	$-\Delta H_{298}$ (kcal/mole)	$S^\circ_{298}$ (cal/deg. mole)
$\alpha$ - $UO_3$	brown	orthorhombic, $a = 3.913, b = 6.936 \text{ \AA},$ $c = 4.167 \text{ \AA}$	—	8.4 (X-ray) 7.2 (exp.)	291.8	23.76
$\beta$ - $UO_3$	orange	monoclinic, $a = 10.34 \text{ \AA}, b = 14.33 \text{ \AA},$ $c = 3.91 \text{ \AA}, \beta = 99.03^\circ$	10	8.25	292.6	23.02
$\gamma$ - $UO_3$	yellow	monoclinic, pseudotetragonal, $a = b = 6.89 \text{ \AA}, c = 19.94 \text{ \AA},$ $\gamma = 90.34^\circ$	—	8.01	293.5	22.97
$\delta$ - $UO_3$	red	cubic, $a = 4.15 \text{ \AA}$	—	—	290	—
$\epsilon$ - $UO_3$	brick-red	triclinic, $a = 4.002 \text{ \AA}, b = 3.841 \text{ \AA},$ $c = 4.165 \text{ \AA}, \alpha = 98^\circ 17',$ $\beta = 90^\circ 33', \gamma = 120^\circ 28'$	—	8.73	291.8	—
$\eta$ - $UO_3$	?	orthorhombic, $a = 7.511 \text{ \AA}, b = 5.466 \text{ \AA},$ $c = 5.224 \text{ \AA}$	4	8.85	—	—

### ขั้นที่ 3 การเตรียม $UO_2$ จากผง $UO_3$

ทำได้โดยการนำเอาผง  $UO_3$  ที่เตรียมได้จากขั้นที่ 2 มารีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 600 - 800°C ในบรรยากาศของ  $H_2$  หรือ  $H_2/N_2$  (30%  $H_2$  ; 70%  $N_2$  โดยปริมาตร) นาน 16 ชั่วโมง และทำการ stabilization  $UO_2$  ที่ได้ด้วย  $O_2/N_2$  (2%  $O_2$  ; 98%  $N_2$ ) นาน 16 ชั่วโมง

โดยปกติแล้วการรีดิวซ์  $UO_3$  จะมีความยุ่งยากกว่า  $U_3O_8$  ทั้งนี้เพราะว่า  $UO_3$  ปรากฏในรูปผลึกหลายรูปด้วยกัน และการเปลี่ยนจาก  $UO_3$  เป็น  $UO_2$  นั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างผลึกด้วย จากการศึกษาของ Notz และ Mendel<sup>(9)</sup> พบว่า ขั้นตอนในการรีดิวซ์  $UO_3$  ที่มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 2 - 5 ตารางเมตรต่อกรัม ที่อุณหภูมิ 450 - 550°C เป็นดังนี้คือ



โดยที่  $U_3O_{8+}$  หมายถึง Upper limit ของ  $U_3O_8$  phase

$U_3O_{8-}$  หมายถึง Lower limit ของ  $U_3O_8$  phase

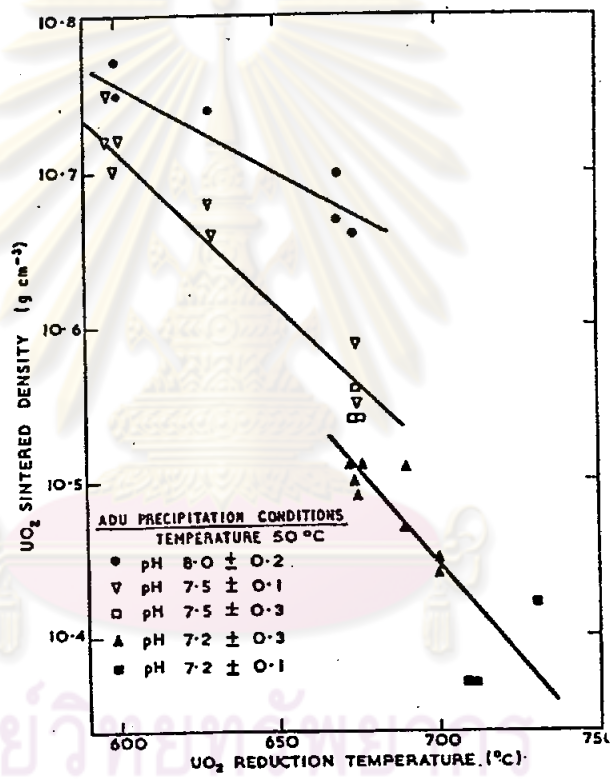
อัตราการรีดิวซ์ในบรรยากาศของ  $H_2$  จะเป็นสัดส่วนกับพื้นที่ผิวของผง  $UO_3$  DeHollander<sup>(9)</sup> ได้วัดการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ผิวของ  $UO_3$  ระหว่างการรีดิวซ์  $UO_3$  ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิวในระหว่างการรีดิวซ์ของ  $UO_3$ <sup>(9)</sup>

Estimated percent reduction	Average area ( $m^2/g$ )
0	0.68
1-2	1.33
15-25	1.84
25-40	2.08
40-60	3.60
100	5.48

จากตาราง ซึ่งแสดงการรีดิวซ์ที่อุณหภูมิ 500 °ซ จะเห็นได้ว่าพื้นที่ผิวจะเพิ่มขึ้นประมาณ 10 เท่า นับแต่เริ่มต้นจนรีดิวซ์หมด สาเหตุหนึ่งก็คือในระหว่างการรีดิวซ์นั้นผง  $UO_3$  จะแตกออกเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเกิดขึ้นนั่นเอง

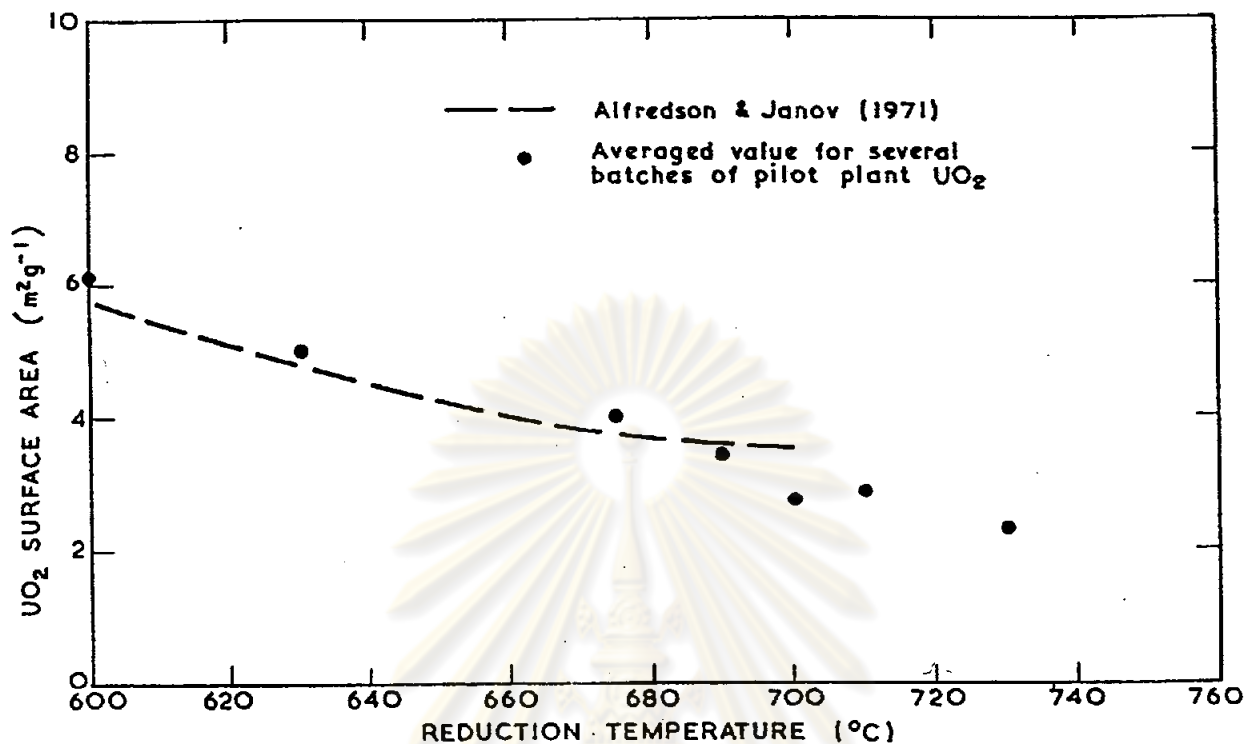
อิทธิพลของอุณหภูมิของการรีดิวซ์ที่มีต่อค่าความหนาแน่นของ  $UO_2$  หลังการเผาประสานแล้ว ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ  $UO_2$  กับอุณหภูมิของการรีดิวซ์ (14)

จากรูปที่ 2.10 จะเห็นได้ว่า การรีดิวซ์ที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้ได้ sintered  $UO_2$  ที่มีความหนาแน่นสูง และได้พื้นที่ผิวสูงขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.11

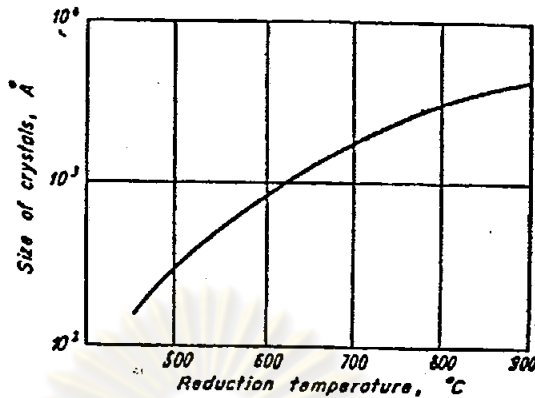




รูปที่ 2.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของ  $UO_2$  กับอุณหภูมิของการรีดิวซ์<sup>(14)</sup>

อย่างไรก็ตาม ถ้าลดอุณหภูมิของการรีดิวซ์ลงมากเกินไป  $UO_2$  ที่ได้จะมีคุณสมบัติ Pyrophoric คือถูกออกซิไดซ์ง่าย และอัตราส่วนของ O/U จะมากกว่า 2.00 พง  $UO_2$  ที่มีขนาดประมาณ 1  $\mu$  ถ้าทิ้งไว้ในอากาศที่อุณหภูมิห้องจะถูกออกซิไดซ์เป็น  $UO_{2.02}$  ภายในเวลาประมาณ 1 เดือน

นอกจากนี้ ขนาดของอนุภาค (Particle size) ของพง  $UO_2$  ที่ได้จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคของ  $UO_3$  และอุณหภูมิของการรีดิวซ์ ยิ่งอุณหภูมิสูง ขนาดของอนุภาคของ  $UO_3$  ยิ่งใหญ่ขึ้นทำให้อนุภาคของพง  $UO_2$  ที่ได้จะยิ่งใหญ่อขึ้นด้วย ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ของอนุภาคของ  $UO_2$  กับอุณหภูมิของการรีดิวซ์<sup>(12)</sup>

### 2.9.2 การอัดเย็น<sup>(1,9,15,16)</sup>

นำเอาผงของ  $UO_2$  ที่ได้มาจาก ข้อ 2.9.1 มาบดให้มีขนาดของอนุภาค -100 Mesh แล้วใส่ลงในเครื่องผสมพร้อมกับเติมตัวประสานอินทรีย์ (Organic Binder) เช่น Paraffine wax, polyethylene glycol ในรูปของแข็งหรือสารละลายก็ได้ และสารเพิ่มความหนาแน่น เช่น  $TiO_2$ ,  $Nb_2O_5$  สาเหตุที่ต้องบดก็คือผง  $UO_2$  ที่ได้จากการรีดิวซ์ มักจะจับกันเป็นก้อน (Aggregate) ส่วนการผสมตัวประสานนั้นนอกจากจะเป็นตัวช่วยยึดอนุภาคของ  $UO_2$  แล้วยังช่วยเพิ่มความแข็งแรง (Strength) ให้กับผง  $UO_2$  ที่ได้รับการอัดแล้ว (Compact  $UO_2$ ) จากนั้นให้เติมน้ำ 5-10 % อย่างช้าๆ จน ผง  $UO_2$  ที่ถูกบดแล้วนั้นจับตัวกันเป็นก้อน (Granule) แต่ต้องไม่ให้ถึงกับเหลวเป็นแป้งเปียก (Pastry) แล้วจึงนำผลที่ได้ไปผ่านที่ร่อนขนาด 6 Mesh แล้วทำให้แห้งที่อุณหภูมิต่ำ จนสามารถผ่านเครื่องร่อนขนาด 20 Mesh ได้ ในขั้นที่ควรจะเติมน้ำและตัวประสานอีกเล็กน้อย จะทำให้  $UO_2$  (Granule) ไม่ติดกัน เนื่องจากเกือบแห้งสนิทและแต่ละ Granule จะถูกเคลือบด้วยตัวประสาน จากนั้นเติม 0.2 % ของสารหล่อลื่น เช่น Stearic acid เพื่อเคลือบผิวของ  $UO_2$  (Granule) โดยต้องระวังไม่เติมให้มากเกินไปเพราะมีผลทำให้ Granule แตกออกเป็นขนาดเล็กๆ ได้

ต่อจากนั้นนำ  $UO_2$  (Granule) ที่ได้มาอัดเย็นโดยใช้เครื่องอัด ด้วยความดันในช่วง 20 - 150 คันท่อตารางนิ้ว ความหนาแน่นของผงอัด  $UO_2$  (Compact  $UO_2$ ) ที่ได้ จะมีค่าประมาณ 50 - 60% ของความหนาแน่นตามทฤษฎี

### 2.9.3 การเผาประสาน (9, 12, 17, 18)

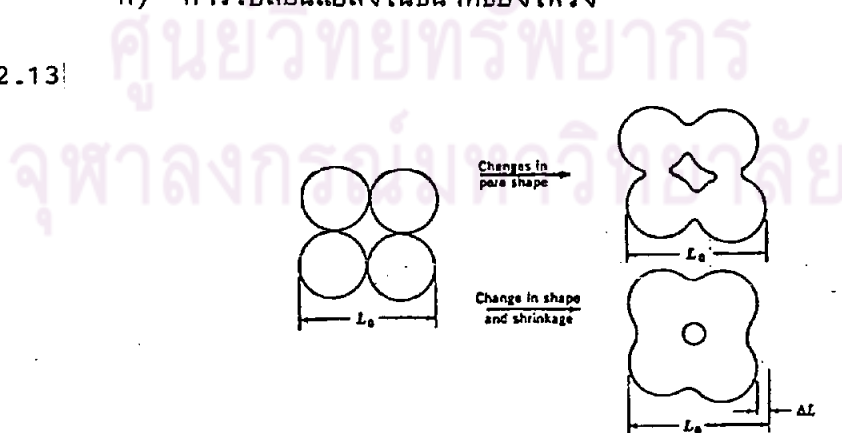
นำเอาผงอัด  $UO_2$  (Compact  $UO_2$ ) ที่ได้จากข้อ 2.9.2 มาเผาในเตาเผา (Furnace) ในเงื่อนไขที่เหมาะสมจะได้เม็ด  $UO_2$  ( $UO_2$  pellet) ที่มีความหนาแน่นสูง และมีโครงสร้างไมโคร (Microstructure) (ซึ่งเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น การนำความร้อน เสถียรภาพ ระหว่างการอบด้วยนิวตรอน เป็นต้น) ที่เหมาะสม

การเผาประสาน (Sintering) หมายถึงกระบวนการที่สาร (โลหะ หรือ เซรามิก) ในสภาพที่เป็นผงเกิดการยุบตัว (Consolidation) เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้มีความหนาแน่นสูงขึ้น เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า จุดหลอมเหลวของสารนั้น

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาประสานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประการ ดังต่อไปนี้คือ

- ก) การเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของ Grain
- ข) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโพรง (Pore) ระหว่าง Grain
- ค) การเปลี่ยนแปลงในขนาดของโพรง

ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แสดงการ เปลี่ยนรูปของโพรงและการหดตัวระหว่างการเผาประสาน (17)

โดยปกติแล้ว ผงอัด  $\text{CO}_2$  ก่อนที่จะนำมาเผาประสานจะมีความพรุน (Porosity) อยู่ราว 25 ถึง 60% ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของผงอัดและวิธีการเตรียม

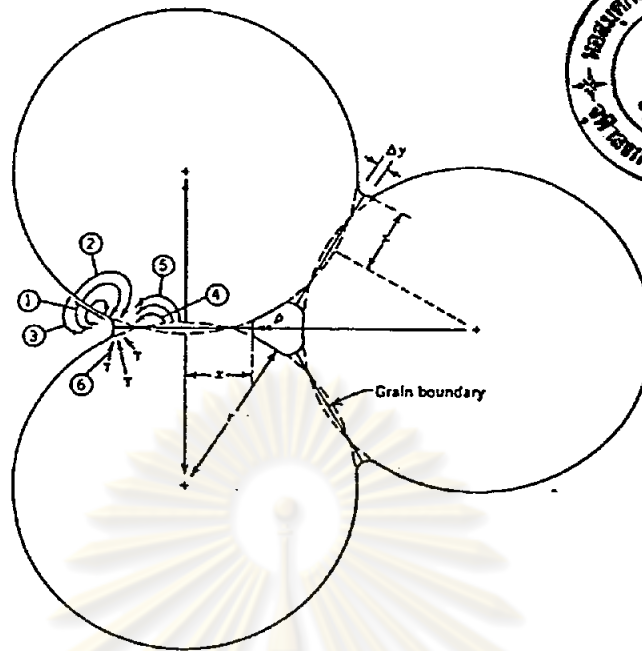
เหตุที่ทำให้สารมีความหนาแน่นสูงขึ้นในขณะที่ทำการเผาประสาน ก็คือ การเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใต้อุณหภูมิสูง (ถึงแม้จะไม่ถึงจุดหลอมเหลว ก็ตาม) เพื่อเข้าสู่ภาวะที่มีการจัดตัวที่เป็นระเบียบ (High crystallinity) | ผงอัดของสารก่อนการเผาประสาน จะมีการจัดตัวของอนุภาคอย่างไม่เป็นระเบียบ (Poorly Crystallinity) |

กลไก (Mechanism) ของการเผาประสานนั้น สันนิษฐานว่ามีอยู่ 5 แบบ ดังนี้คือ

- โครงผลึก
- ก) การแพร่กระจายของอนุภาคเชิงปริมาตร (Volume Diffusion) ผ่าน
  - ข) การแพร่กระจายของอนุภาคไปตามผิว (Surface Diffusion)
  - ค) การเคลื่อนตัวแบบหนืด (Viscous) ภายใต้ความเค้น (Stress)
  - ง) การเคลื่อนตัวแบบ plastic
  - จ) การกลายเป็นไอ (Vaporization) และควบแน่น (Condensation)

ดังรูปที่ 2.14

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Mechanism Number	Transport Path	Source of Matter	Sink of Matter
1	Surface diffusion	Surface	Neck
2	Lattice diffusion	Surface	Neck
3	Vapor transport	Surface	Neck
4	Boundary diffusion	Grain boundary	Neck
5	Lattice diffusion	Grain boundary	Neck
6	Lattice diffusion	Dislocations	Neck

รูปที่ 2.14 แสดงกลไกของการเผาประสาน<sup>(18)</sup>

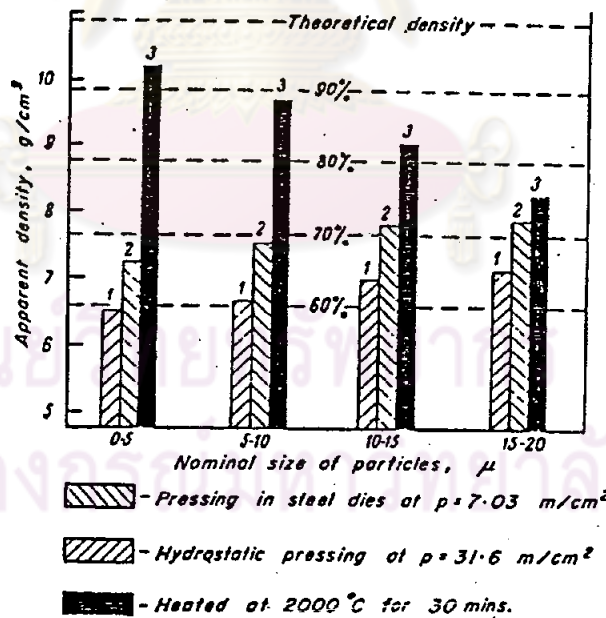
กลไกทั้ง 5 แบบข้างต้นไม่จำเป็นจะต้องเกิดขึ้นพร้อมๆ กันในกรณีของ  $\text{Co}_2$  นั้นพบว่า กลไกแบบ ก) คือแบบ volume diffusion มีบทบาทสำคัญ เมื่อบรรยากาศของการเผาประสานเป็นไอน้ำ และอุณหภูมิของการเผาประสาน เป็น  $1700^{\circ}\text{C}$  และกลไกแบบ ค) และ ง) เป็นสาเหตุสำคัญ เมื่อนำเอา  $\text{Co}_2$  ไปเผาประสานที่อุณหภูมิ  $1700^{\circ}\text{C}$  ในบรรยากาศของก๊าซ ไฮโดรเจน

ได้มีการศึกษาพฤติกรรมของผงอัด  $\text{Co}_2$  ในระหว่างการเผาประสาน พบว่าปัจจัยที่กำหนดความสามารถในการเผาประสานได้ (sinterability) นั้นมีมาก แม้ว่าผง  $\text{Co}_2$  ที่มีลักษณะทางกายภาพ เช่น พื้นที่ผิว ขนาดของอนุภาค ฯลฯ เหมือนกันหมด แต่เตรียมมาจาก

สารตั้งต้นต่างกัน ก็จะมีพฤติกรรมในระหว่างการเผาประสานต่างกัน Moothy และ Rao ได้เสนอว่าความสามารถในการเผาประสาน (Sinterability) คือ อุณหภูมิของการเผาประสานที่ทำให้ได้ความหนาแน่น เท่ากับ 10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร หรือ ประมาณ 92% ของความหนาแน่นตามทฤษฎี

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณสมบัติของ  $UO_2$  หลังการเผาประสานและความสามารถในการเผาประสานได้ มีดังนี้คือ

ก) ลักษณะทางกายภาพ ของผง  $UO_2$  ก่อนเผาประสาน (Physical characteristics of presintered powder) ผง  $UO_2$  ที่มีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวมาก จะเผาประสานได้ดีกว่า นอกจากนั้นรูปร่างของอนุภาค ก็มีผลด้วยเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าอนุภาคเกาะกันได้ดีสนิทกว่า การเผาประสานก็จะเป็นไปได้โดยง่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.15.



รูปที่ 2.15 แสดงผลของขนาดของอนุภาคที่มีต่อความหนาแน่นหลังการเผาประสาน (12)

ข) ลักษณะทางเคมีของผง  $\text{UO}_2$  ก่อนเผาประสาน (Chemical Characteristics of Presintered Powder) อัตราส่วนของ O/U ของผงอัด  $\text{UO}_2$  จะมีผลต่อความสามารถในการเผาประสาน ทั้งนี้เพราะว่ามีการเสียรูป (Defect) ของโครงผลึก อันเนื่องมาจาก ออกซิเจนอะตอมที่เกินมาของ Non-stoichiometric  $\text{UO}_2$  หรือ  $\text{UO}_{2+x}$  นั้น ทำให้การแพร่กระจายของไอออนผ่านโครงผลึก (ซึ่งเป็นกลไกแบบหนึ่งของการเผาประสาน) เป็นไปได้ง่าย ทำให้การเผาประสานเป็นไปเร็วขึ้น นอกจากนี้  $\text{UO}_{2+x}$  ยังมีคุณสมบัติเป็น plasticity มากกว่า  $\text{UO}_2$  โดยทั่วไปผง  $\text{UO}_2$  ที่เตรียมจาก ADU จะมี O/U มากกว่า 2 และมีพื้นที่ผิวมาก ดังนั้นจึงมีความสามารถในการเผาประสานได้ดี (Sinterability)

ค) ผลของบรรยากาศในเตาเผา (Effect of Furnace Atmosphere) โดยปกติ การเผาประสาน อาจทำภายใต้บรรยากาศของก๊าซได้หลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน ก๊าซเฉื่อย ไอน้ำ หรือในสุญญากาศที่อุณหภูมิต่างๆ กัน ความแตกต่างของเงื่อนไขทางด้านบรรยากาศและอุณหภูมิ พอสรุปได้ดังนี้คือ

- 1) การเผาประสานในบรรยากาศของไอน้ำที่อุณหภูมิ  $1400^\circ\text{C}$  และทำให้เย็นลง ถึงอุณหภูมิห้องในบรรยากาศของ  $\text{H}_2$  จะได้ผลผลิตที่มีความหนาแน่นสูง
- 2) การเผาประสานที่อุณหภูมิเดียวกันในบรรยากาศของ  $\text{H}_2$  จะได้ผลผลิตที่มีความหนาแน่นสูงกว่าการเผาประสานในบรรยากาศของ Ar
- 3) การเผาประสานในสุญญากาศที่อุณหภูมิต่ำ ( $1200^\circ\text{C}$ ) จะได้ผลผลิตที่มีความหนาแน่นสูง สำหรับผง  $\text{UO}_2$  ที่มีอัตราส่วนของ O/U มากกว่า 2.00 เท่านั้น

นอกจากนี้การเผาประสานในบรรยากาศต่างๆ กัน จะทำให้ขนาดของผลผลิต (ที่มีความหนาแน่นเท่ากัน) ต่างกันด้วยเป็นต้นว่า

- 1) การเผาประสาน ภายใต้บรรยากาศของไอน้ำ จะให้ขนาดของผลผลิตใหญ่กว่าที่ ทำภายใต้บรรยากาศของ  $\text{H}_2$  แห้งหรือชื้น ที่อุณหภูมิเดียวกัน
- 2) การเผาประสาน ภายใต้บรรยากาศของ  $\text{H}_2$  จะให้ขนาดของผลผลิตเล็กกว่า ที่ทำภายใต้บรรยากาศของ Ar สำหรับผง  $\text{UO}_2$  ดั้งเดิมที่มีพื้นที่ผิวมาก ที่อุณหภูมิเดียว

กัน (1200 °ซ) กล่าวคือ ในบรรยากาศของ Ar จะได้ขนาดของผงประมาณ 5 - 10 $\mu$  ในขณะที่ในบรรยากาศของ H<sub>2</sub> ได้ขนาดของผงประมาณ 1  $\mu$

ง) ผลของสารปรุงแต่ง (Effect of Additives) พบว่าสารแปลกปลอม หรือ สารปรุงแต่งที่ปะปนอยู่ในผง UO<sub>2</sub> (จะโดยตั้งใจหรือไม่ก็ตาม) นั้นจะมีผลต่อความสามารถในการเผาประสานได้ของ UO<sub>2</sub> อย่างไรก็ตามยังพบว่าผง UO<sub>2</sub> ที่เตรียมได้จาก ADU นั้นมีขนาดของ Grain ที่เล็กพอเพียงที่จะทำการเผาประสานให้มีความหนาแน่นสูงได้โดยไม่ต้องเติมสารปรุงแต่งอีก กระนั้นก็ดี การเติมสารปรุงแต่งในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้

- 1) สามารถลดอุณหภูมิของการเผาประสานลงได้
- 2) ช่วยลดความยุ่งยากในการที่จะต้องควบคุมขนาดของผง UO<sub>2</sub> ตั้ง

ต้น

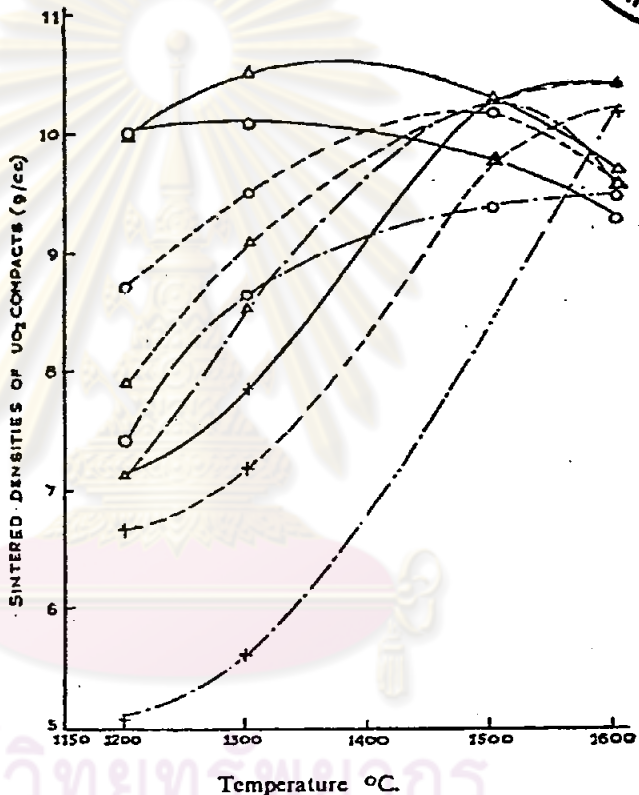
การผสม TiO<sub>2</sub> ลงในผง UO<sub>2</sub> ในอัตรา 0.1 - 0.5 % โดยน้ำหนักจะสามารถลดอุณหภูมิของการเผาประสานในบรรยากาศของ H<sub>2</sub> ได้มาก จากการศึกษาโครงสร้างไมโคร (Microstructure) ของภาคตัดขวางของเม็ด UO<sub>2</sub> ที่ผสมด้วย TiO<sub>2</sub> พบว่า Ti จะแทรกตัวอยู่ระหว่าง Grain ของ UO<sub>2</sub> ในรูปของเหลว

จ) ผลของเวลา (Effect of Time) พบว่า ความหนาแน่นของ UO<sub>2</sub> หลังการเผาประสาน จะไม่ขึ้นกับเวลาในการเผา ถ้าการเผาประสาน ดำเนินการไปแล้วอย่างน้อย 3 - 4 ชั่วโมง

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า พฤติกรรมของผง UO<sub>2</sub> ในการเผาประสานนั้นขึ้นกับปัจจัยมากมาย และความสัมพันธ์ก็ยังไม่แน่นอน อย่างไรก็ตาม Moothy และ Rao<sup>(17)</sup> ได้เสนอให้ใช้ Streaming Potential เป็นเกณฑ์ หรือเป็นพื้นฐานสำหรับการเปรียบเทียบพฤติกรรม หรือความสามารถในการเผาประสานได้ของ UO<sub>2</sub> ความคิดพื้นฐานในเรื่องนี้ มาจากการสังเกตว่า ในการเผาประสาน จะมีอุณหภูมิค่าหนึ่ง (Optimum Temperature) (ดังรูปที่ 2.16) ที่จะทำให้ได้ความหนาแน่นของ UO<sub>2</sub> มีค่ามากที่สุด ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพและที่มาของผง UO<sub>2</sub> หมายความว่า ถ้าเผาที่อุณหภูมิสูงกว่านั้น หรือ ต่ำกว่านั้น ความหนาแน่นของ Product จะได้



น้อยลง นั่นคือการเผาประสานในอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้การเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นไปอย่างรวดเร็วกเกินไป จนทำให้โพรงเปิด (Open Pore) บางส่วน กลายเป็นโพรงปิด (Closed Pore) หรือเกิดการกักโพรง (Entrapment of Pore) ทำให้ ความหนาแน่นไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ดังรูปที่ 2.16।

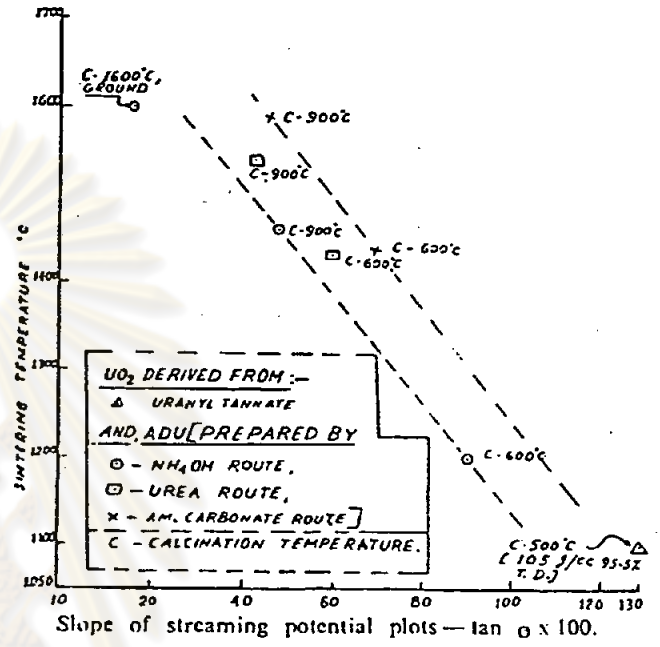
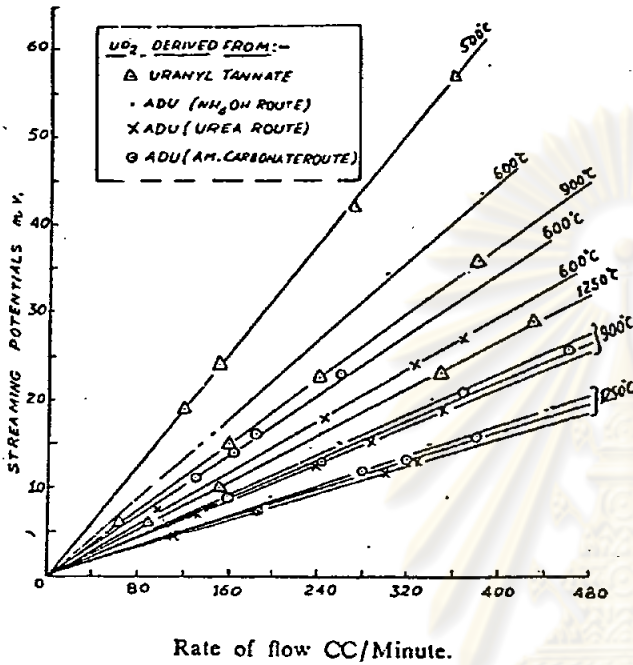


Temperature °C.  
 UO<sub>2</sub> derived from ADU prepared by precipitation with — Ammonium hydroxide solution, ---- Urea solution and -.- Ammonium carbonate solution. Decomposed and reduced at. ○ 400°C. Δ 600°C. and +900°C.  
 [Sintering treatment : 10°C/min. up to sintering temp. ; 2 hours soak.]

รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของ UO<sub>2</sub> หลังเผาประสานกับ (17) อุณหภูมิของการเผาประสาน

Streaming potential เป็นค่าที่บอกปริมาณ (โดยเปรียบเทียบ) ของประจุไฟฟ้า ที่ผิวของอนุภาคของผง  $\text{UO}_2$  และเท่ากับเป็นตัวบอกสมรรถนะ (Activity) ของผง  $\text{UO}_2$  ในแง่การเผาประสานด้วย เพราะว่า ปริมาณประจุที่ผิวสัมพันธ์กับความยากง่ายของการถ่ายเทมวลในระหว่างการเผาประสานโดยตรง Moothy และ Rao (17) วัด Streaming potential โดยการผ่านของเหลว (KCl) ไป บนผง  $\text{UO}_2$  แล้ววัดศักดาไฟฟ้าที่เกิดขึ้น จากการทดลองพบว่า ผง  $\text{UO}_2$  ที่เตรียมได้จากสารตั้งต้นหนึ่งในเงื่อนไขหนึ่ง จะมี Streaming potential เป็นสัดส่วนตรงกับ อัตราการไหลของของเหลวนั้น ดังรูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Streaming potential กับอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านผง  $\text{UO}_2$  ที่เตรียม จาก Uranyl tannate และจาก ADU ซึ่งเตรียมมาด้วยวิธีการต่างๆ กัน 3 วิธี คือ จาก  $\text{NH}_4\text{OH}$  จาก Urea และจาก Ammonium carbonate จากรูปจะเห็นได้ว่า ผง  $\text{UO}_2$  ที่เตรียมจากสารตั้งต้นหนึ่งในเงื่อนไขหนึ่ง (เช่น ADU ที่มาจาก  $\text{NH}_4\text{OH}$  หรือ ADU ที่มาจาก Urea) จะมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันคงที่ของตัวเอง ดังนั้นสำหรับผง  $\text{UO}_2$  ตัวหนึ่งไม่ว่าจะเตรียมมาจากสารตั้งต้นอะไร ด้วยเงื่อนไขแบบใด จะมีค่าความชันของ Streaming potential curve ค่าหนึ่งเสมอ ดังนั้นถ้าเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของการเผาประสานที่ทำให้ได้เม็ด  $\text{UO}_2$  มีความหนาแน่น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กับ ค่าความชันของ Streaming potential ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และ 2.18:

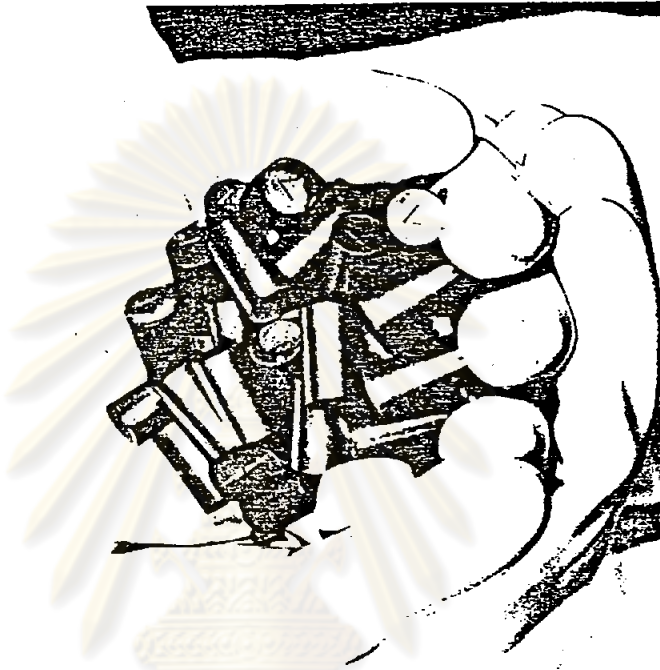
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.17 แสดง Streaming potential ที่ flow rate ต่างๆ ของ  $KCl$  (17)      รูปที่ 2.18 แสดง Sinterability ที่ Streaming potential ต่างๆ (17)

จะพบว่าผง  $UO_2$  ที่เตรียมจากสารตั้งต้นอะไร ในเงื่อนไขแบบใด จึงจะมีความสามารถในการเผาประสานได้ดีกว่า (sinterable) ผง  $UO_2$  ที่มีค่า  $\theta$  อย่างอื่น กล่าวคือ ผง  $UO_2$  ที่มีค่าของอุณหภูมิในการเผาประสานให้ได้ความหนาแน่น 10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ต่ำกว่า จะเรียกว่ามีความสามารถในการเผาประสานได้ดีกว่า ผง  $UO_2$  ที่มีค่าอุณหภูมิในการเผาประสานสูงกว่า

ลักษณะของเม็ท  $\text{CO}_2$  ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะของเม็ท  $\text{CO}_2$  ที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ (19)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย