

เทคนิคการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน

การใช้สมการประมาณการกระโดดของความหนาแน่นนิวตรอนอธิบายการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงระหว่างการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันกับค่าเปลี่ยนวิกฤต ดังสมการที่ 2.10.12 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\rho_o = \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}P}{\lambda} - \frac{(1-\gamma)}{\lambda} \hat{T} \right] + \alpha_2 \hat{T} \left[ \frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{2\lambda} \hat{T} \right] \quad 3.1$$

พบว่าสมการที่ 3.1 อยู่ในเทอมของค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้น ( $\hat{T}$ ) ซึ่งทำการวัดโดยตรงจากการวิจัยได้ยาก จึงกำหนดค่า  $a$  เพื่อหาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตร จากอุณหภูมิที่วัดได้ในแท่งเชื้อเพลิง ดังนั้นจุดสำคัญในการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันจึงอยู่ที่ค่า  $a$  โดยพิจารณาหาค่า  $a$  ออกเป็น 2 วิธี คือวิธีแรกหาค่า  $a$  จากความสัมพันธ์ของส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน ( $\gamma_m$ ) และค่าพิคกิ้งแฟคเตอร์ ( $\zeta$ ) ทำให้สมการที่ 3.1 เขียนได้ดังนี้ (สมการที่ 2.10.20)

$$\rho_o = \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(\gamma_m + \gamma_m)}{\gamma} \frac{\hat{T}_m}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right] + \alpha_2 \frac{(\gamma_m)}{\gamma} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \left[ \frac{\hat{K}P}{\lambda} - \frac{(\gamma_m - \gamma_m)}{2\gamma} \frac{\hat{T}_m}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right] \quad 3.2$$

วิธีที่สอง ประมาณค่า  $a$  จากเครื่องปฏิกรณ์โดยตรง

นอกจากนั้นการพิจารณานิวตรอนล่าในเครื่องปฏิกรณ์ได้พิจารณานิวตรอนล่าเพียงกลุ่มเดียวในกรณีนี้จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวตรอนล่า ( $\lambda$ ) ที่เหมาะสมอีกด้วย

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น จะเห็นว่าการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันจำเป็นต้องมีเทคนิคที่จะวัดและคำนวณค่าต่าง ๆ ที่จำเป็น นั่นคือการคำนวณค่า  $\gamma$ ,  $\gamma_m$ ,  $K$  และ  $\lambda$  ที่อาศัยคุณสมบัติทางกายภาพของแท่งเชื้อเพลิง กำลังของเครื่องปฏิกรณ์และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนใหญ่ เพื่อแทนค่าเหล่านั้นลงในสมการที่ 3.1 และ 3.2 จากนั้น

สิ่งคำนวณหาค่า  $\alpha_1$  และ  $\alpha_2$  ได้ต่อไป ดังนั้นจึงขอกล่าวถึงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 และแท่งเชื้อเพลิงโดยสังเขปก่อน (หัวข้อที่ 3.1-3.5) จากนั้นจึงเป็นการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

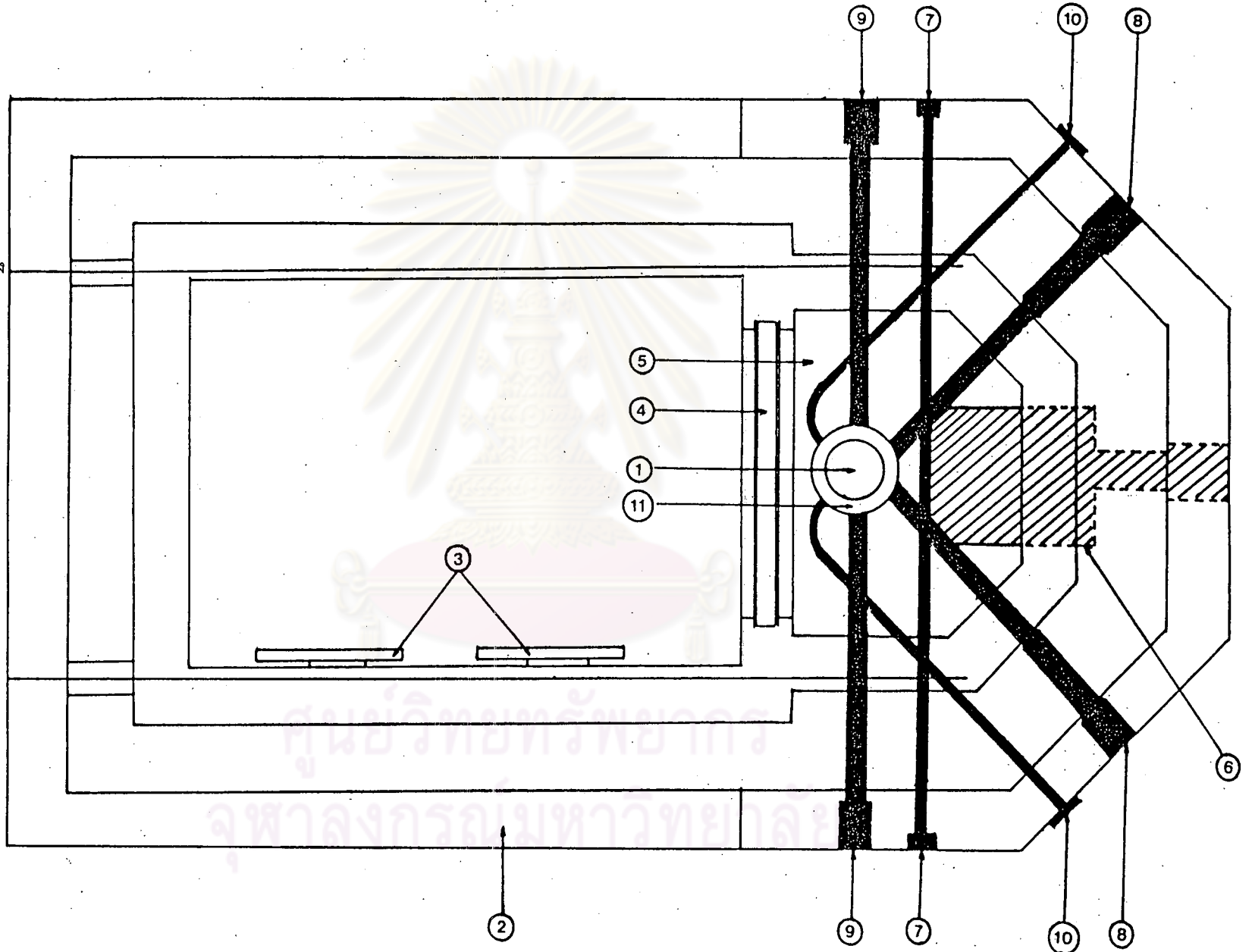
### 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบทริกา มาร์ค III (TRIGA Mark III) ผลิตโดยบริษัทเจเนอรัลอะตอมมิก (General Atomic Company) ประเทศสหรัฐอเมริกา นับเป็นเครื่องปฏิกรณ์เครื่องที่สองของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ได้นำมาปฏิบัติงานทดแทนเครื่องปฏิกรณ์เครื่องแรก ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบ MTR (Material Testing Reactor) เมื่อ พ.ศ.2520 เครื่องปฏิกรณ์เครื่องนี้ได้ดัดแปลงบางส่วนเพื่อใช้ร่วมกับอุปกรณ์ของเครื่องปฏิกรณ์เดิม เช่น ท่อเครื่องปฏิกรณ์ ระบบระบายความร้อน และท่ออาบรังสีบางส่วน เป็นต้น ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน (standard fuel element) และแบบ LEU (Low Enriched Uranium) จำนวน 104 แท่ง โดยมี U-235 เข้มข้น 20% ใช้น้ำบริสุทธิ์ (de-mineralized water) เป็นมอดเดอเรเตอร์ และตัวระบายความร้อน การระบายความร้อนอาศัยการพาความร้อนของน้ำตามธรรมชาติ (national convective cooling) เครื่องปฏิกรณ์เดินเครื่องแบบให้กำลังสม่ำเสมอ (steady-state operation) มีกำลังสูงสุด 2 เมกกะวัตต์ (ความร้อน) ทั้งสามารถเดินเครื่องแบบทริกกำลังชั่วขณะ (pulsing) ได้ถึง 2,000 เมกกะวัตต์ (ความร้อน) นานครั้งละ 0.01 วินาที นอกจากนี้ยังมีความสามารถเดินเครื่องแบบสแควร์เวฟ (square wave) ได้อีกด้วย (23)

### 3.2 แกนเครื่องปฏิกรณ์ (1)

แกนเครื่องปฏิกรณ์แขวนอยู่ที่สะพานเครื่องปฏิกรณ์ (reactor bridge) ที่เลื่อนไปมาได้ ทำให้เครื่องปฏิกรณ์สามารถได้ทำงานได้ทุกตำแหน่งในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ แผนผังส่วนสำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แสดงได้ดังรูปที่ 3.2.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิง และแท่งควบคุมจัดเรียงตัวกันเป็นรูปหกเหลี่ยมภายในแผ่นตะแกรงบน (upper grid plate) และแผ่นตะแกรงล่าง (lower grid plate) แผ่นตะแกรงบนเป็นแผ่นอะลูมิเนียมหนา 2.54 ซม. (1 นิ้ว) เจาะรูมีความยาวเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.81 ซม. (1.5 นิ้ว) จำนวน 121 รู รูที่จุดศูนย์กลางใช้สำหรับใส่ท่ออาบรังสี เพื่อใช้ในการทดลองหรืออาบรังสีในตำแหน่งของแกนเครื่อง

1. แกนเชื้อเพลิง
2. คอนกรีตหนัก
3. ชั้นลําหรับพักแท่งเชื้อเพลิง
4. ประตูฝ้ํา
5. บ่อเครื่องปฏิกรณ์
6. Thermal Column
7. Beam Tube 2"
8. Beam Tube 6"
9. Beam Tube 8"
10. Pneumatic Tube
11. Lazy Susan



รูปที่ 3.2.1 แผนผังของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1

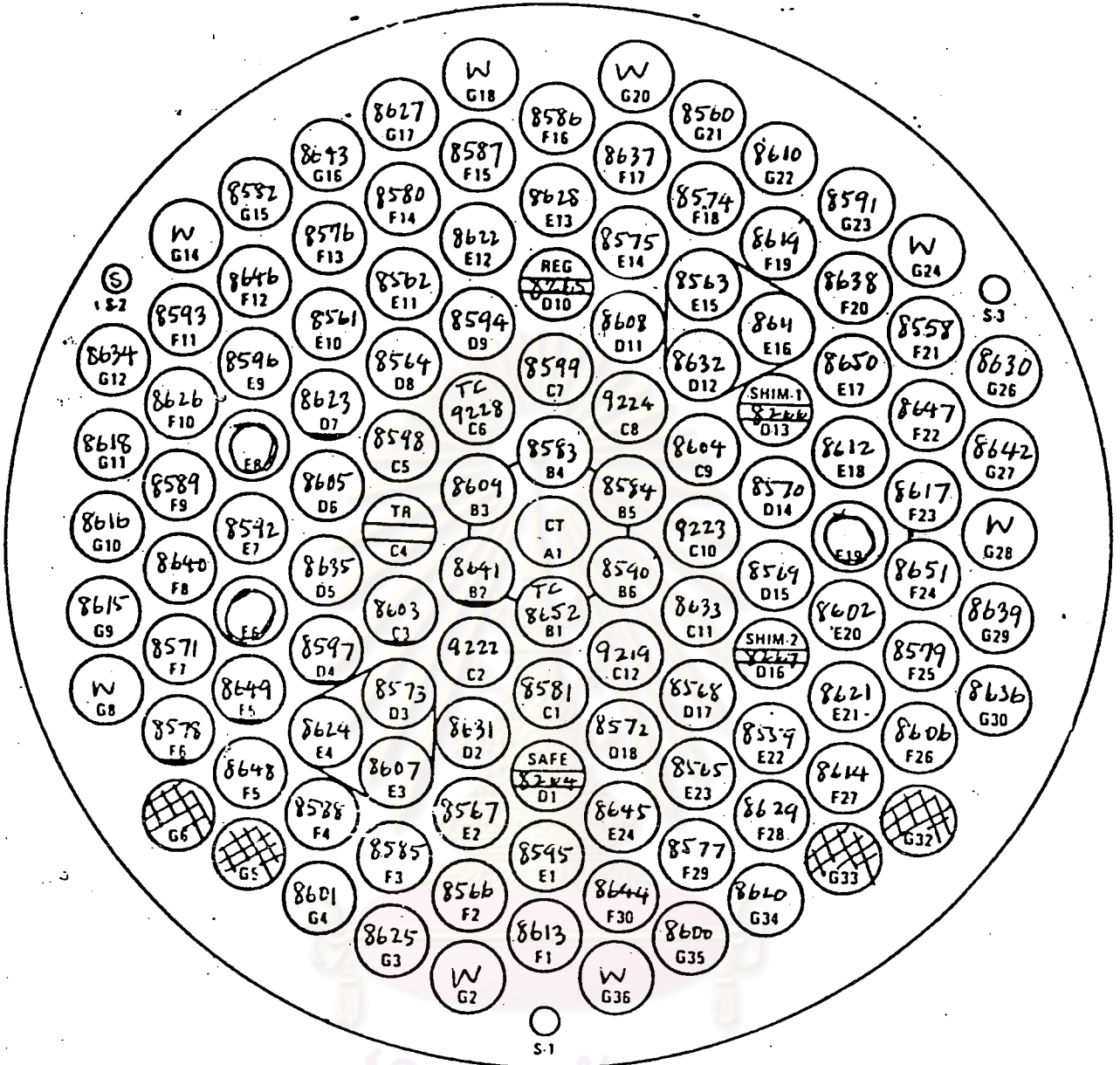
ปฏิกรณ์ที่มีค่านิวตรอนฟลักซ์สูงสุด ตำแหน่งนี้เรียกว่าเซ็นทรัล ทริมเบิล (central thimble, CT) หรือตำแหน่ง A1 อยู่ในแผนผังแกนเครื่องปฏิกรณ์รูปที่ 3.2.2 รูที่เหลื่อจัดเรียงโดยรอบ CT เป็นรูปหกเหลี่ยมจำนวน 6 วง โดยให้สัญลักษณ์ประจำวงตั้งแต่ A ถึง G และมีหมายเลขกำกับแต่ละตำแหน่ง เช่น B3 D2 เป็นต้น รูเหล่านี้ใช้สำหรับสอดและประกอบแท่งเชื้อเพลิง แท่งควบคุม หัววัดรังสี ท่ออบรังสี ให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ นอกจากนี้ยังมีรูขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.27 ซม. (0.5 นิ้ว) อีก 3 รู อยู่รอบนอกเพื่อไว้ใส่แหล่งกำเนิดนิวตรอนภายนอก แผ่นตะแกรงล่างมีลักษณะเช่นเดียวกับแผ่นตะแกรงบน เพียงแต่รูที่เจาะมีขนาดเล็กกว่าคือเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3.18 ซม. (1.25 นิ้ว) ยกเว้นบางรูที่เป็นตำแหน่งของแท่งควบคุมและท่ออบรังสี จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับรูของแผ่นตะแกรงบน ทั้งนี้เพื่อเป็นทางผ่านของแท่งควบคุมและท่ออบรังสีให้อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ แผ่นตะแกรงล่างมีหน้าที่รองรับและยึดแท่งเชื้อเพลิง แหล่งกำเนิดนิวตรอนภายนอก ให้อยู่กับที่ โดยอยู่ต่ำลงไปจากแผ่นตะแกรงบนประมาณ 73.66 ซม. (25 นิ้ว) ใต้แผ่นตะแกรงล่างยังมีแผ่นควบคุมความปลอดภัย (safety plate) ซึ่งเป็นตะแกรงรองรับเพื่อไม่ให้แท่งควบคุมและท่ออบรังสีหลุดออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์

### 3.3 แท่งเชื้อเพลิง

แท่งเชื้อเพลิงแบบ TRIGA ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ

#### 3.3.1 แท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน และแบบ LEU

แกนเครื่องปฏิกรณ์ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานจำนวน 95 แท่ง แท่งควบคุมซึ่งมีเนื้อเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานจำนวน 4 แท่ง และแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU จำนวน 5 แท่ง (8) แท่งเชื้อเพลิงดังกล่าวทั้งสองแบบนี้มีลักษณะภายนอกเหมือนกัน ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.3.1.1 ต่างกันเพียงแต่ส่วนผสมของเนื้อเชื้อเพลิงภายในแท่ง กล่าวคือเนื้อเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานเป็นของผสมเนื้อเดียวกัน (homogeneous mixture) ระหว่างยูเรเนียมกับเซอร์โคเนียมไฮไดรด์อัลลอย (zirconium hydride alloy) ซึ่งมียูเรเนียมผสมอยู่ 8.5% โดยน้ำหนัก และยูเรเนียมนี้มีความเข้มข้นของยูเรเนียม-235 อยู่ 20% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น 1.6 สำหรับแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU เนื้อเชื้อเพลิงเป็นของผสมชนิดเดียวกัน แต่มียูเรเนียมผสมอยู่ 20% และ



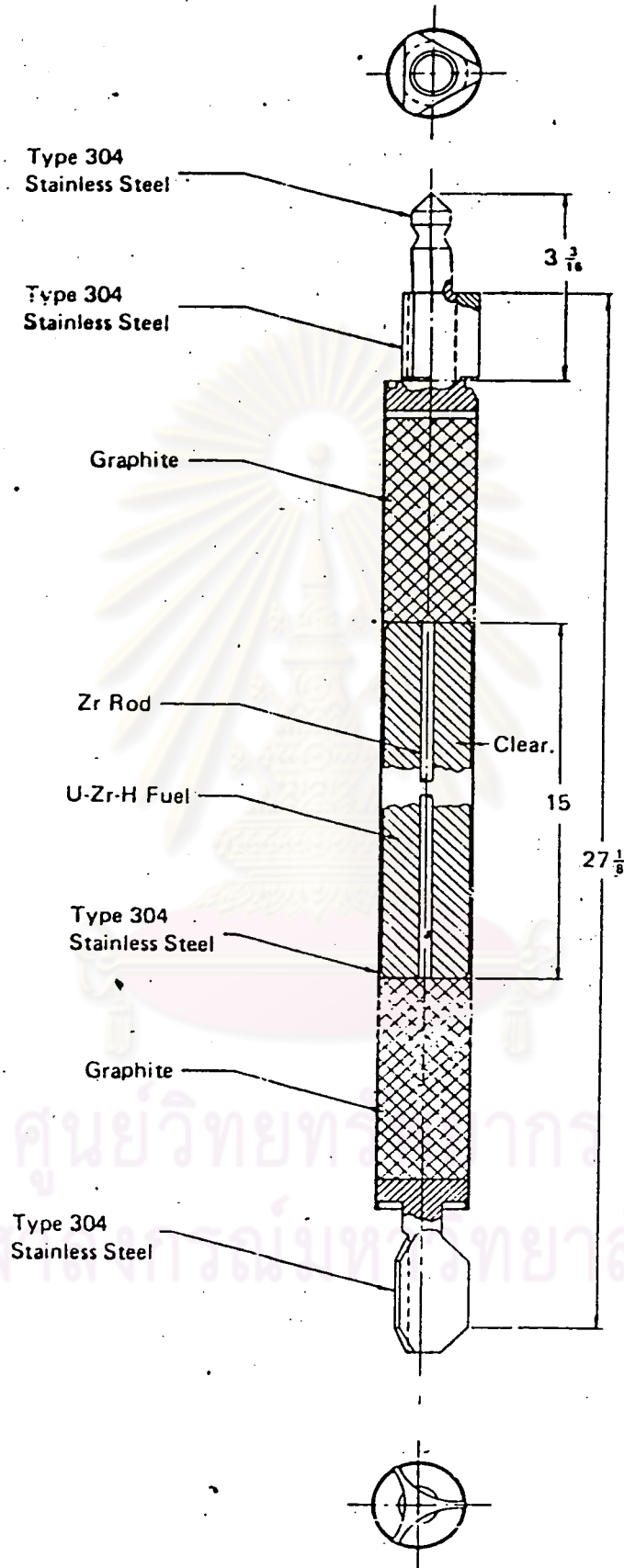
LAZY SUSAN UP  
 BRIDGE POSITION BEAM PORT  
 NUMBER OF FUEL ELEMENTS INCLUDING  
 FFCRS 104  
 CORE EXCESS 6.06  
 DATE 10 JUNE 1982

CONTROL ROD WITH FOLLOWER  
 EMPTY POSITION (WATER FILLED)  
 CENTRAL THIMBLE  
 NEUTRON DETECTOR  
 FUEL ADAPTER POSITION



Incore Irradiation Tube

POSITION OCCUPIED BY SOURCE



รูปที่ 3.3.1.1 แท่งเชื้อเพลิงแบบ TRIGA (5)

เออร์เบียม, Er (erbium) 0.53% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นของ U-235 20% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนจำนวนอะตอมของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น 1.5 (8)

แท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งมีเชื้อเพลิงยาว 38.1 ซม. (15 นิ้ว) เส้นผ่าศูนย์กลาง 3.63 ซม. (1.43 นิ้ว) บรรจุลงในเปลือกของแท่งเชื้อเพลิงเป็นรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (stainless steel) หนา 0.051 ซม. (0.020 นิ้ว) ตรงกลางใส่แท่งเซอร์โคเนียม เส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.635 ซม. (0.25 นิ้ว) (5) ประคบหัวท้ายเนื้อเชื้อเพลิงด้วยกราไฟท์ซึ่งเป็นตัวสะท้อนนิวตรอน ความยาวของแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด 73.15 ซม. (28.8 นิ้ว) มีน้ำหนัก 3.2 กิโลกรัม ข้อมูลทางเทคนิคของแท่งเชื้อเพลิงสรุปได้ดังตารางที่ 3.1.1.1

3.3.2 แท่งเชื้อเพลิงแบบมีเครื่องวัดอุณหภูมิภายใน (instrumented fuel element) (1)

มีจำนวน 2 แท่งคือที่ตำแหน่ง B1 มีลักษณะส่วนประกอบทั้งภายในและภายนอกเหมือนกับแท่งเชื้อเพลิงมาตรฐาน และที่ตำแหน่ง B6 เหมือนกับแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU ทุกประการ แท่งเชื้อเพลิงทั้ง 2 แท่งมีความแตกต่างจากแท่งเชื้อเพลิงธรรมดาคือมีเทอร์โมคัพเปิล (thermocouple) จำนวน 3 ตัว ผูกอยู่ในเนื้อเชื้อเพลิง โดยที่เทอร์โมคัพเปิลตัวกลางอยู่ในระดับกึ่งกลางของเนื้อเชื้อเพลิงซึ่งเป็นระดับกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ ส่วน 2 ตัวที่เหลืออยู่สูงขึ้นไปและต่ำลงมา 2.54 ซม. (1 นิ้ว) รูปที่ 3.3.2.1 สายสัญญาณจากเทอร์โมคัพเปิลจะโผล่ขึ้นด้านบนของแท่งเชื้อเพลิงโดยมีท่อทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมหุ้มกันน้ำจากปลายของแท่งเชื้อเพลิง ถึงสะพานของเครื่องปฏิกรณ์

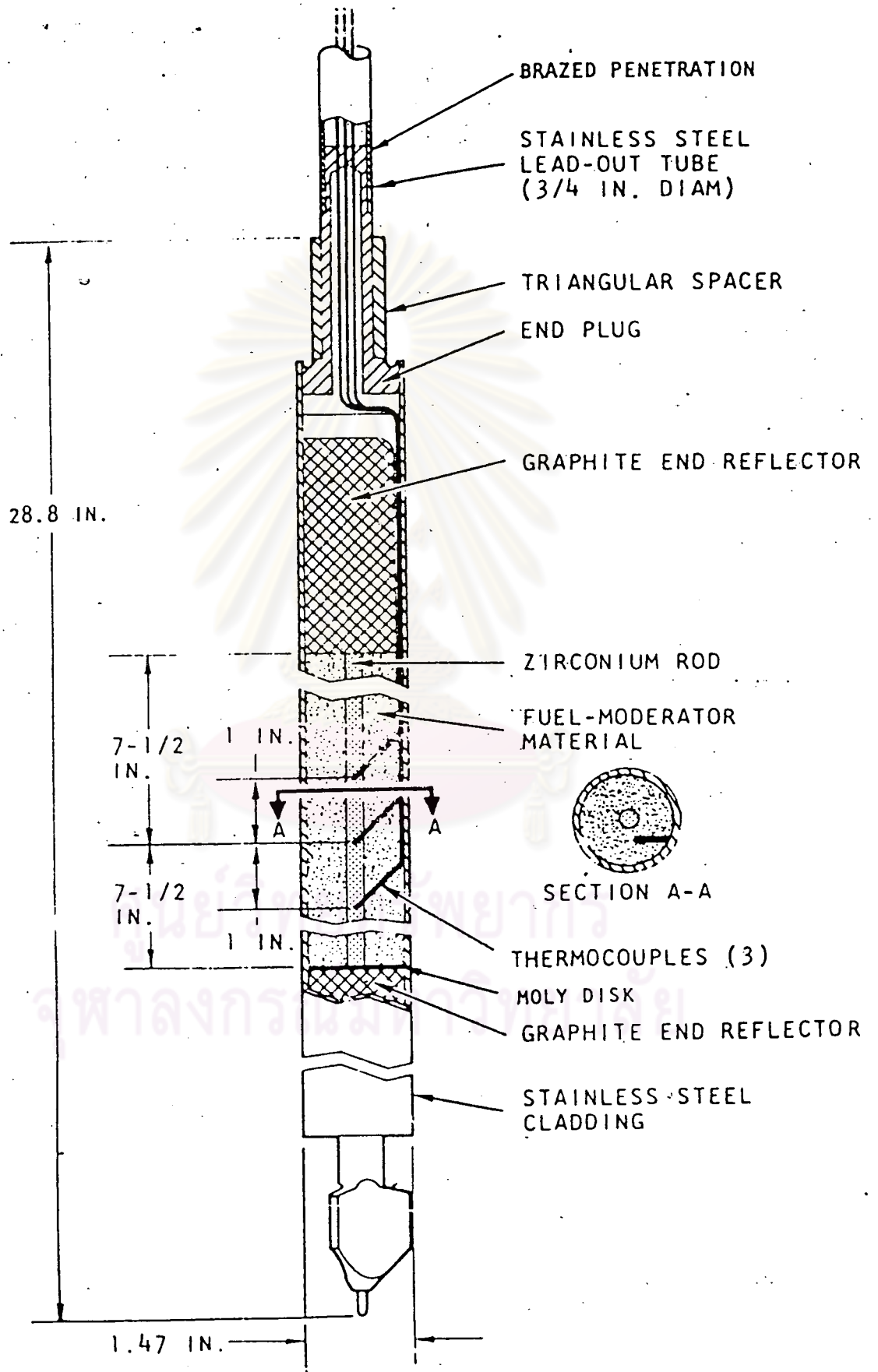
3.4 แท่งควบคุม (1)

เครื่องปฏิกรณ์มีจำนวนแท่งควบคุมทั้งหมด 5 แท่ง แบ่งเป็นแท่งควบคุมถิม (shim) 2 แท่ง อยู่ที่ตำแหน่ง D13 และ D16 แท่งควบคุมเซฟตี (safety) ที่ตำแหน่ง D1 แท่งควบคุมเร็กกูเลติง (regulating) ที่ตำแหน่ง D10 และแท่งควบคุมทรานเซียนท์ (transient) ที่ตำแหน่ง C4 ในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ตารางที่ 3.3.1.1 ข้อมูลทางเทคนิคของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานและแบบ LEU (8)

	แบบมาตรฐาน	แบบ LEU
Overall Length, in.	28.8	28.8
Overall Outside Diameter, in.	1.47	1.47
Fuel Outside Diameter, in.	1.43	1.43
Fuel Length, in.	15.0	15.0
Fuel Composition	U-ZrH <sub>1.6</sub>	U-ZrH <sub>1.5</sub>
Weight U <sup>235</sup> , gm.	~ 38	~ 98
U Content, wt.%	8.5	20
U <sup>235</sup> Enrichment, %	20	20
H/Zr Ratio	~ 1.6	~ 1.5
Graphite Reflector Length, in.	3.4	3.4
Graphite Reflector Dia, in.	1.3	1.3
Cladding Material	304-SS	304-SS
Cladding Thickness, in.	0.020	0.020
Erbium Content, wt.%	0	0.53
Weight, kg.	~ 3.2	~ 3.2





รูปที่ 3.3.2.1 แท่งเชื้อเพลิง TRIGA แบบมีเครื่องวัดอุณหภูมิภายใน

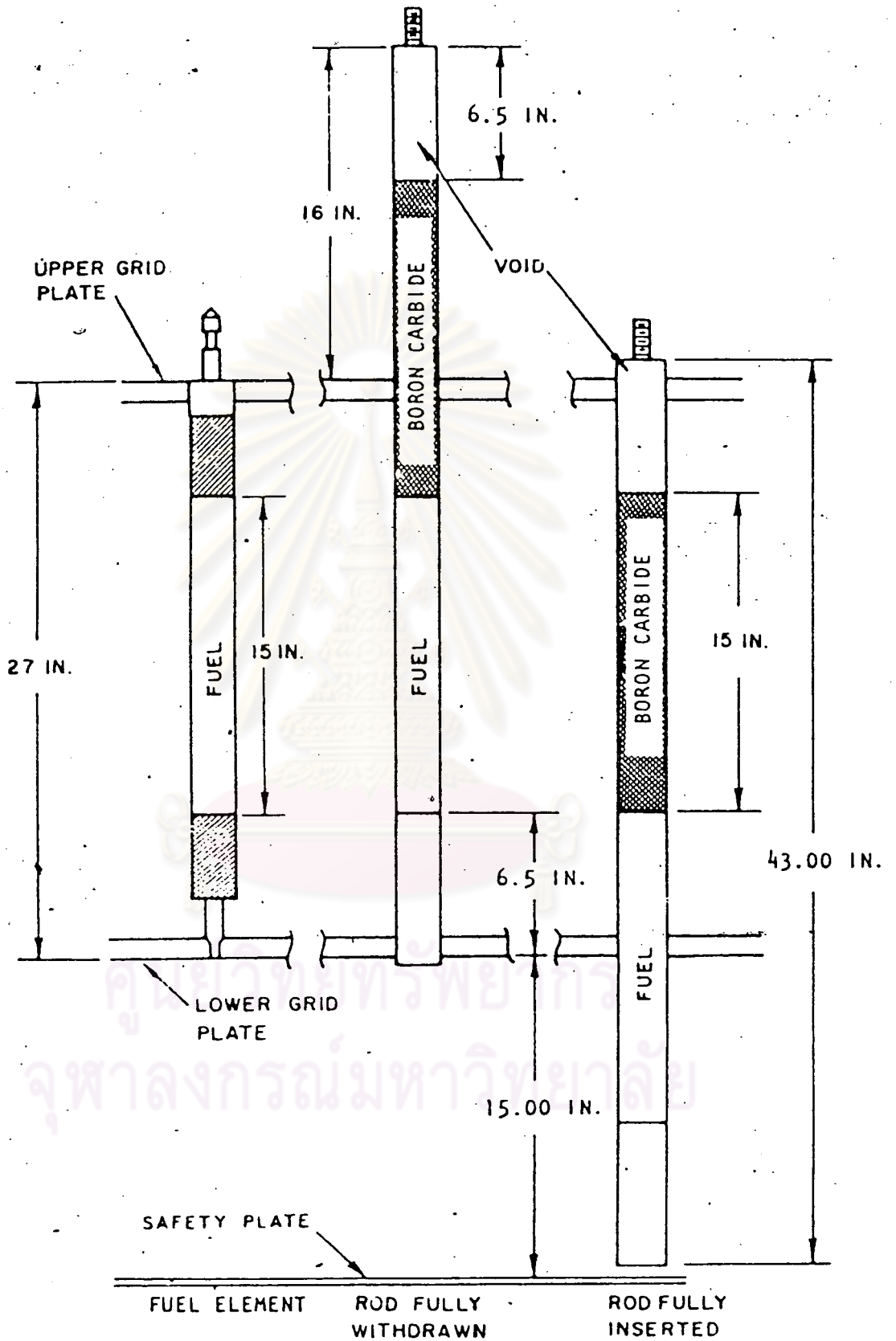
แท่งควบคุมดิม เซฟตี และ เร็กกูเลติง เป็นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมรูปทรงกระบอก ยาว 109 ซม. (43 นิ้ว) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.43 ซม. (1.34 นิ้ว) ภายในแท่งควบคุมเหล่านี้ ตอนบนเป็นช่องว่างของอากาศ (air void) ยาว 16.5 ซม. (6.5 นิ้ว) ฝังลงมาบรรจุด้วย สารตุกกลินนิวตรอนคือโบรอนคาร์ไบด์ (boron carbide) อยู่ในสถานะของแข็ง ยาว 38.1 ซม. (15 นิ้ว) ใต้สารตุกกลินนิวตรอนเป็นเนื้อเชื้อเพลิง ซึ่งมีส่วนประกอบเช่นเดียวกับเนื้อเชื้อเพลิง ของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ยาว 38.1 ซม. (15 นิ้ว) ส่วนตอนล่างสุดเป็นช่องว่างของ อากาศยาว 16.5 ซม. (6.5 นิ้ว) การเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมในแกนเครื่องปฏิกรณ์ แสดงได้ ดังรูปที่ 3.4.1

แท่งควบคุมทรานเซียนท์เป็นอะลูมิเนียมรูปทรงกระบอก ยาว 93.35 ซม. (36.75 นิ้ว) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.18 ซม. (1.25 นิ้ว) บรรจุด้วยโบรอนคาร์ไบด์เป็นสารตุกกลินนิวตรอน เช่นกัน ยาว 38.1 ซม. (15 นิ้ว) จากนั้นตอนล่างเป็นช่องว่างของอากาศยาว 53.02 ซม. (20.88 นิ้ว) แท่งควบคุมทรานเซียนท์เคลื่อนที่ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ โดยเคลื่อนที่ภายในท่อ อะลูมิเนียม ซึ่งสวมเข้ากับรูของแผ่นตะแกรงล่างและตะแกรงบนยาวลงไปจดแผ่นควบคุมความปลอดภัย ส่วนตอนบนสูงจากระดับของแผ่นตะแกรงบนประมาณ 25.4 ซม. (10 นิ้ว) ผนังของท่ออะลูมิเนียม นี้เจาะรูไว้หลายรู เพื่อให้ น้ำภายในท่อไหลเวียนได้อย่างสะดวก ทำให้แท่งควบคุมทรานเซียนท์เคลื่อน ที่ขึ้นลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปลายของแท่งควบคุมทั้ง 5 แท่ง ต่อเข้ากับชุดควบคุมการเคลื่อนที่ (control rod drive assembly) บนสะพานเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งมีชุดควบคุมฯ แยกออกแต่ละแท่ง แท่งควบคุมดิม เซฟตี และ เร็กกูเลติง ควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้มอเตอร์และระบบจักรกล นอกจากนี้แท่งควบคุม เร็กกูเลติงยังมีระบบปรับระดับอัตโนมัติอีกด้วย ส่วนแท่งควบคุมทรานเซียนท์มีการควบคุมการเคลื่อน ที่โดยอาศัยแรงลม (pneumatic) พร้อมทั้งตัวกำหนดระดับซึ่งควบคุมด้วยมอเตอร์ แท่งควบคุมแต่ละ แท่งสามารถดึงขึ้นได้ประมาณ 38.1 ซม. (15 นิ้ว) จากแกนของเครื่องปฏิกรณ์ ตำแหน่งของ แท่งควบคุมจะปรากฏบนแผงควบคุม เริ่มตั้งแต่ตำแหน่ง 100 ซึ่งเป็นระดับแท่งควบคุมอยู่ในแกน เครื่องปฏิกรณ์ จนถึงตำแหน่งที่ 900

### 3.5 แผงควบคุม (reactor console) (1)

นอกจากตัวเลขที่แสดงตำแหน่งของแท่งควบคุมแต่ละแท่งแล้ว แผงควบคุมยังรวมอุปกรณ์



รูปที่ 3.4.1 การเคลื่อนที่ของแท่งควบคุมชนิดที่ประกอบด้วยเชื้อเพลิง ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์

ที่สำคัญในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ ตลอดจนระบบรักษาความปลอดภัย (ดังรูปที่ 3.5.1) เพื่อให้สามารถเดินเครื่องปฏิกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัย อุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วย ปุ่มยกแท่งควบคุม ปุ่มลดระดับแท่งควบคุม ปุ่มปลดแท่งควบคุม มาตรการลดอุณหภูมิของน้ำและอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง เป็นต้น สำหรับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ก็เช่นกัน จะบันทึกลงบนแผนกราฟที่แบ่งควบคุม โดยบันทึกความสัมพันธ์ของระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ต่อเวลาออกเป็น 2 มาตรฐาน คือ มาตรฐานส่วนกำลังเครื่องปฏิกรณ์เชิงเส้น (linear power scale) กับมาตรฐานส่วนกำลังเครื่องปฏิกรณ์เป็นล็อก (log power scale) เพื่อป้องกันการผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในการวัดกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ โดยเฉพาะมาตรฐานส่วนกำลังเครื่องปฏิกรณ์เป็นล็อกสามารถแสดงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ในช่วงที่กว้าง การวัดกำลังของเครื่องปฏิกรณ์โดยวัดความหนาแน่นของนิวตรอนจากหัววัดฟิสชันแชมเบอร์ (fission chamber) อยู่ในตำแหน่ง E8 ของแกนเครื่องปฏิกรณ์ สัญญาณจากหัววัดนี้จะถูกส่งมายังแผงควบคุม ปรับเทียบให้เป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และบันทึกระดับกำลังลงบนแผนกราฟ หมิกสีน้ำเงินแสดงถึงความสัมพันธ์ของระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา ในมาตรฐานส่วนกำลังเครื่องปฏิกรณ์เชิงเส้น ซึ่งมีสวิตช์เพื่อเลือกบันทึกระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีมาตรฐานสูงสุดดังนี้ 0.003 วัตต์, 0.01 วัตต์, 0.03 วัตต์, 0.1 วัตต์, 0.3 วัตต์, 1 วัตต์, 3 วัตต์, 10 วัตต์, 30 วัตต์, 100 วัตต์, 300 วัตต์, 1 กิโลวัตต์, 3 กิโลวัตต์, 10 กิโลวัตต์, 30 กิโลวัตต์, 300 กิโลวัตต์, 1 เมกกะวัตต์ และ 3 เมกกะวัตต์ ส่วนหมิกสีแดงแสดงความสัมพันธ์ของระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์กับเวลา ในมาตรฐานส่วนกำลังเครื่องปฏิกรณ์เป็นล็อก

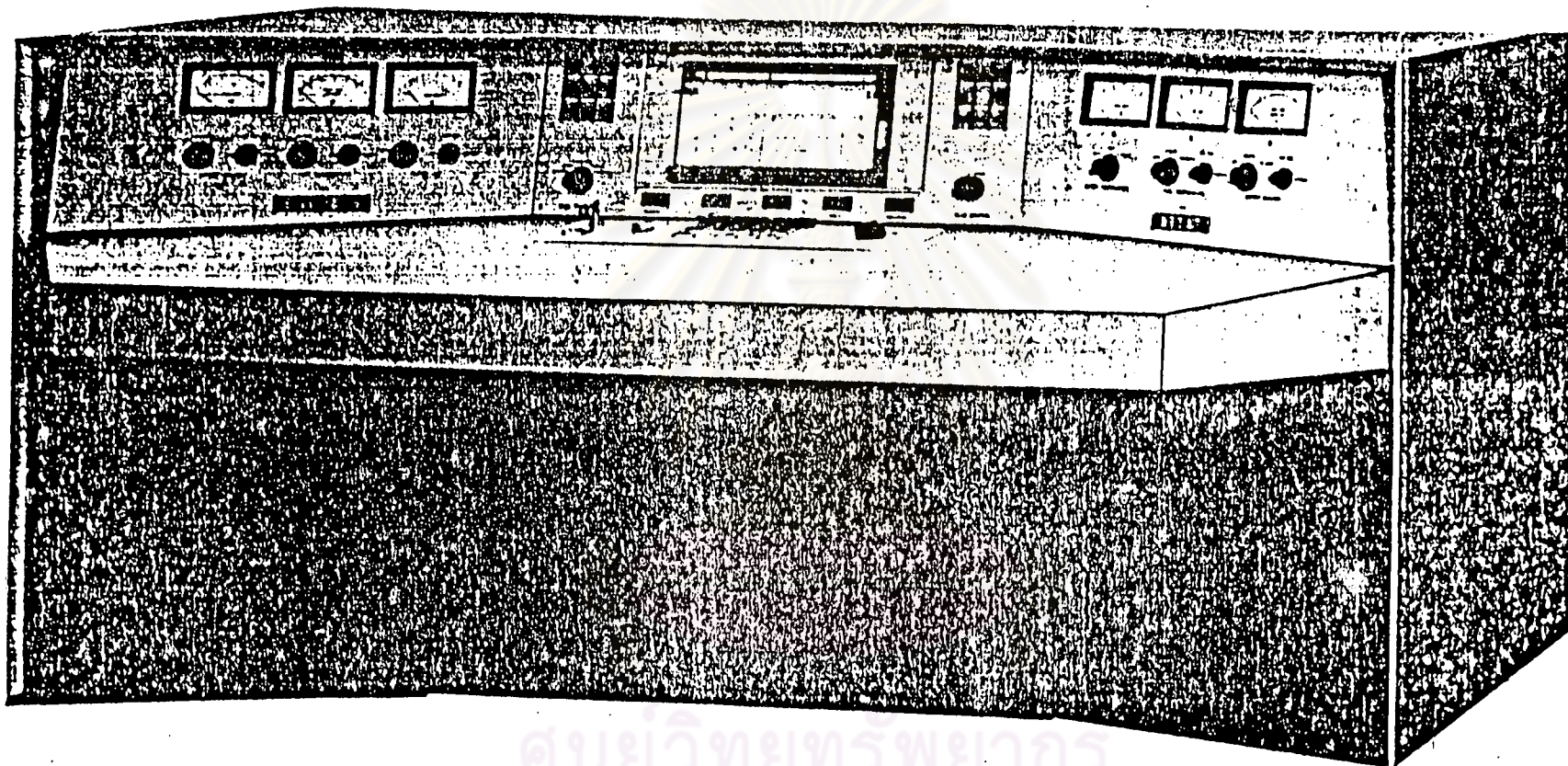
### 3.6 การประมาณค่าฟิคกิ้งแฟคเตอร์ ( $\zeta$ )

ค่าฟิคกิ้งแฟคเตอร์ เป็นค่าที่สำคัญค่าหนึ่งในการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ซึ่งมีความเกี่ยวข้องไปถึงอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงและค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง

ค่าฟิคกิ้งแฟคเตอร์เป็นอัตราส่วนระหว่างค่าฟลักซ์ของความร้อน ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ ต่อค่าฟลักซ์ของความร้อนเฉลี่ยในแกนเครื่องปฏิกรณ์

$$\zeta = \frac{q_p}{q_a}$$

3.6.1



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.5.1 แผงควบคุมของเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA

ในการวิจัย จะทำการวัดอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง B1 ซึ่งเป็นแท่งเชื้อเพลิงแบบมีเครื่องวัดอุณหภูมิอยู่ภายใน โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลตัวกลางที่อยู่ในระดับกึ่งกลางแท่งเชื้อเพลิงเป็นตัววัดอุณหภูมิ ตำแหน่งดังกล่าวนี้เป็นตำแหน่งที่สามารถวัดอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงได้ใกล้เคียงกับจุดกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์มากที่สุด กำหนดให้จุดกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์มีค่าฟลักซ์ของความร้อนสูงสุด ( $q''_{\max}$ ) และ

$$\zeta = \frac{q''_{\max}}{q''} \quad 3.6.2$$

พิจารณากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ที่กำลัง 1 เมกกะวัตต์ (ความร้อน) การเปรียบเทียบกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ได้จากการวัดอุณหภูมิของน้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ที่เพิ่มขึ้นในหนึ่งหน่วยเวลา จากนั้นเทียบกลับไปเป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งทำให้กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่วัดได้ เป็นกำลังเฉลี่ยของแกนเครื่องปฏิกรณ์ (24) เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมดในแกนเครื่องปฏิกรณ์ เท่ากับ 104 แท่ง ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย (average heat transfer rate,  $\bar{q}$ ) ของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง มีค่าดังนี้ (6)

$$\begin{aligned} \bar{q} &= \frac{P}{n} \\ &= \frac{1000}{104} = 9.61538 \quad \text{กิโลวัตต์} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อ } 1 \text{ กิโลวัตต์} = 3,412 \text{ Btu/ชั่วโมง} \quad (25)$$

$$\text{ดังนั้น } \bar{q} = 32,807.67656 \text{ Btu/ชั่วโมง}$$

ค่าฟลักซ์ของความร้อนเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง จึงมีค่าเป็น

$$\bar{q}'' = \frac{\bar{q}}{A_d}$$

เมื่อ  $A_d$  = พื้นที่ผิวของแท่งเชื้อเพลิง (ตร.ฟุต)

$$\text{ดังนั้น } \bar{q}'' = \frac{32,807.67656 \text{ Btu/ชั่วโมง-ตร.ฟุต}}{A_d} \quad 3.6.3$$

บริเวณจุดกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ มีอัตราการผลิตความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (rate of energy production per unit volume) ดังนี้ (26)

$$q''_{\max} = E_d \Sigma_f \phi_{\max} \quad \text{Mev/วินาที-ลบ.ซม.} \quad 3.6.4$$

ให้  $q''_{\max}$  = อัตราการผลิตความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่จุดกึ่งกลางเครื่องปฏิกรณ์

$\phi_{\max}$  = เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ (นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที)

$\Sigma_f$  =  $N\sigma_f$  เป็นค่าภาคตัดขวางมหภาคในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของ U-235 (ซม.<sup>-1</sup>)

$N$  = ความหนาแน่นอะตอมของ U-235 ในเนื้อเชื้อเพลิง (อะตอม/ลบ.ซม.)

$\sigma_f$  = ภาคตัดขวางจุลภาคในการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ของ U-235 (ตร.ซม.)

$E_d$  = พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่หนึ่งครั้ง (Mev)

พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเครื่องปฏิกรณ์ ในการเปลี่ยนแปลงพลังงานทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาลูกโซ่ให้เป็นพลังงานความร้อน อย่างไรก็ตามการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่หนึ่งครั้ง ได้พลังงานความร้อนทั้งหมดในเครื่องปฏิกรณ์ มีค่าเฉลี่ยประมาณ 200 Mev ซึ่ง 90% ของพลังงานความร้อนเกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง 4% จะเกิดขึ้นในมอดเตอร์เรเตอร์ และ 5% อยู่ในรูปพลังงานของนิวตรอน ส่วนที่เหลือ 1% จะอยู่ในส่วนอื่น ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ (27) ดังนั้นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง ( $E_d$ ) มีค่าประมาณ 180 Mev

อาร์รันต์ คอนดววงแก้ว และวันชัย ธรรมวาณิช สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (28) ได้วัดค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่ระดับกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ในท่อ CT ที่กำลังเครื่องปฏิกรณ์ 1 เมกกะวัตต์ มีค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ดังนี้

$$\phi_{\max} = 10.00 \times 10^{12} \text{ นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที}$$

ความหนาแน่นอะตอมของ U-235 ในแท่งเชื้อเพลิงที่จะทำการวัดอุณหภูมิ (N) หาค่าได้  
จากสมการ

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad \text{อะตอม/ลบ.ชม.} \quad 3.6.5$$

ให้  $\rho$  = ความหนาแน่นของ U-235 ในเนื้อเชื้อเพลิง

$$\begin{aligned} N_A &= \text{อโวกาโดร์ นัมเบอร์ (Avogadro's number)} \\ &= 0.6022 \times 10^{24} \text{ โมเลกุล/กรัมโมล (25)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M &= \text{น้ำหนักอะตอมของ U-235} \\ &= 235.0439 \quad (25) \end{aligned}$$

แท่งเชื้อเพลิง B1 มีความหนาแน่นของ  $\text{U-ZrH}_{1.6}$  เท่ากับ 5.9764 กรัม/ลบ.ชม. (5)  
มียูเรเนียมผสมอยู่ 8.5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นเมื่อพิจารณาเนื้อเชื้อเพลิง 1 ลบ.ชม. จะมียูเรเนียม  
เท่ากับ

$$\frac{8.5}{100} \times 5.9768 = 0.508028 \text{ กรัม}$$

จากยูเรเนียม 0.508028 กรัม มีความเข้มข้นของ U-235 20% ดังนั้นมี U-235

$$\frac{20}{100} \times 0.508028 = 0.1016056 \text{ กรัม}$$

กองปฏิบัติการปฏิบัติ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (29) ได้คำนวณการสิ้นเปลือง  
U-235 ของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง จากพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเดินเครื่องปฏิกรณ์  
(กิโวลต์-ชั่วโมง) พบว่าแท่งเชื้อเพลิง B1 มี U-235 ทั้งหมด 37.48 กรัม ภายหลังจากเดิน  
เครื่องปฏิกรณ์ถึงวันที่ 24 ตุลาคม 2526 แท่งเชื้อเพลิงมี U-235 เหลืออยู่ 34.3699 กรัม คิดเป็น  
91.70% จากจำนวน U-235 ทั้งหมดเมื่อเริ่มต้น ดังนั้นเนื้อเชื้อเพลิง 1 ลบ.ชม. จึงมี U-235  
เท่ากับ

$$\frac{91.70}{100} \times 0.1016056 = 0.0931723 \text{ กรัม}$$

คิดเป็นความหนาแน่นของ U-235 ได้

$$\rho = 0.0931723 \text{ กรัม/ลบ.ชม.}$$



แทนค่า  $\rho$  ลงในสมการที่ 3.6.5 ได้

$$N = 2.387144 \times 10^{20} \text{ อะตอม/ลบ. ซม.}$$

เมื่อ  $\sigma_f$  ของ U-235 =  $582.2 \times 10^{-24}$  ตร. ซม. (25)

ดังนั้น  $\Sigma_f = N\sigma_f = 0.13898 \text{ ซม.}^{-1}$

แทนค่า  $E_d$ ,  $\phi_{\max}$  และ  $E_f$  ลงในสมการที่ 3.6.4 ได้

$$q_{\max}''' = 3.502296 \times 10^{14} \text{ Mev/วินาที-ลบ. ซม.}$$

เมื่อ 1 Mev/วินาที-ลบ. ซม. =  $1.548 \times 10^{-18}$  Btu/ชั่วโมง-ลบ. ฟุต (25)

ดังนั้น  $q_{\max}''' = 542,154.208 \text{ Btu/ชั่วโมง-ลบ. ฟุต}$

ค่าพลังของความร้อนหาได้จากอัตราผลิตความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร คูณด้วยอัตราส่วน of ปริมาณเนื้อเชื้อเพลิงต่อพื้นที่ผิวของแท่งเชื้อเพลิง (26) เมื่อ H เป็นความยาวของเนื้อเชื้อเพลิงเท่ากับ 1.25 ฟุต a เป็นรัศมีของแท่งเซอร์โคเนียม เท่ากับ 0.01 ฟุต และ b เป็นความหนาของเนื้อเชื้อเพลิง เท่ากับ 0.049 ฟุต ดังนั้นค่าพลังของความร้อน ณ ตำแหน่งที่วัด อุณหภูมิ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} q_{\max}'' &= \frac{\pi [(a+b)^2 - a^2] H}{A_d} q_{\max}''' \\ &= \frac{73,274.43792}{A_d} \text{ Btu/ชั่วโมง-ตร. ฟุต} \end{aligned} \quad 3.6.6$$

สมการที่ 3.6.6 ทหารด้วยสมการที่ 3.6.3 ได้ค่าฟังก์ชันแฟคเตอร์ ดังนี้

$$\begin{aligned} \zeta &= \frac{q_{\max}''}{\bar{q}''} = \frac{73,274.43792}{32,807.67656} \\ &= 2.23 \end{aligned} \quad 3.6.6$$

นอกจากการประมาณค่าฟังก์ชันแฟคเตอร์ดังกล่าวข้างต้น บริษัท เจเนอรัลอะตอมมิก (1) ได้คำนวณค่าพลังของความร้อนจากการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ TRIGA Mark III ขณะที่มีการสั่งที่ 2 เมกกะวัตต์ ได้ดังนี้

$$q'' = 147,400 \text{ Btu/ชั่วโมง-ตร.ฟุต}$$

$$q''_{\max} = 293,900 \text{ Btu/ชั่วโมง-ตร.ฟุต}$$

$$\text{นั่นคือ } \zeta = \frac{293,900}{147,400} = 1.99 \quad 3.6.8$$

ค่าพิคกิ้งแพคเตอร์ดังสมการที่ 3.6.7 และ 3.6.8 เพียงพอที่ทำให้ทราบถึงขอบเขตของค่าพิคกิ้งแพคเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ตามที่ต้องการ สำหรับการหาค่าพิคกิ้งแพคเตอร์ที่ถูกต้องนั้นมีการคำนวณที่ซับซ้อน กล่าวคือต้องคำนวณหาค่าฟลักซ์ของความร้อนในแท่งเชื้อเพลิง ณ จุดที่ทำการวัดอุณหภูมิจากข้อมูลอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ และอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำโดยรอบแท่งเชื้อเพลิง (bulk temperature) ทั้งนี้ต้องทราบค่าความต้านทานความร้อน (thermal resistance) รวมของแท่งเชื้อเพลิง ตลอดจนที่บริเวณสัมผัสระหว่างผิวแท่งเชื้อเพลิงกับน้ำที่ระบายความร้อน ซึ่งค่าความต้านทานความร้อนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของแท่งเชื้อเพลิงรูปร่างของแท่งเชื้อเพลิง และการระบายความร้อนซึ่งมีความยุ่งยากในการคำนวณมาก (30)

การหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบฉบับพลังของเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA ณ มหาวิทยาลัยอริโซนา โดยอาศัยเทคนิคการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม เมื่อทำการวัดอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่ตำแหน่ง B1 ซึ่งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้เคียงกับตำแหน่ง B1 ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 พบว่า  $\zeta = 1.67$  (3) ดังนั้นนับว่าเป็นค่าพิคกิ้งแพคเตอร์ที่น่าสนใจอีกค่าหนึ่งเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับฯ ที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้

### 3.7 ส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยในการถ่ายเทความร้อนของแกนเครื่องปฏิกรณ์ (core average reciprocal heat transfer time constant, $\gamma$ )

การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแกนเครื่องปฏิกรณ์ สมการที่ 2.10.6 นำมาเขียนใหม่ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} = KP - \gamma T \quad 3.7.1$$

เมื่อ  $K =$  ส่วนกลับของค่าความจุความร้อนรวมในแกนเครื่องปฏิกรณ์

$$= \frac{1}{C_p}$$

$$C_p = 85,649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{C}) + 167.255 T \text{ วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ}$$

(ดูในภาคผนวก ข.)

$$T = \text{อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่ง เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น (°ซ)}$$

$$= \bar{T} - T_0$$

$$\bar{T} = \text{อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่ง เชื้อเพลิง (°ซ)}$$

$$T_0 = \text{อุณหภูมิของแท่ง เชื้อเพลิงขณะ เริ่มต้น (°ซ)}$$

สมการที่ 3.7.1 สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{dT}{dt} = \bar{K}' \frac{P}{n} - \gamma T \quad 3.7.2$$

เมื่อ  $n$  = จำนวนแท่ง เชื้อเพลิงทั้งหมดในแกน เครื่องปฏิกรณ์

$\bar{K}'$  = ส่วนกลับค่าเฉลี่ยความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิง ในแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง

$$= \frac{1}{\bar{C}'_p}$$

$$\bar{C}'_p = 823.55 + 1.61 (T_0 - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 T \quad \text{วัตต์-วินาที/°ซ-แท่ง}$$

(ดูในภาคผนวก ข.)

ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลย์ ( $dT/dt = 0$ )

$$0 = \frac{\bar{K}' P_e}{n} - \gamma T_e$$

$$\gamma = \frac{\bar{K}' P_e}{n T_e}$$

$P_e$  และ  $T_e$  เป็นกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ และอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลย์ ตามลำดับ แทนค่า  $\bar{C}'_p$  และ  $n$  ดังนั้น

$$\gamma = \frac{P_e}{(823.55 + 1.61 (T_0 - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 T_e) 104 T_e} \quad 3.7.3$$

จากการกำหนดค่า  $a$  (ดูในสมการที่ 2.10.13) ที่สภาวะสมดุลย์นี้

$$a = \frac{T_m}{T_m} = \frac{T_e}{T_{me}}$$

$$T_m = \text{อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้จากการวัด}$$

$$= (T_f - T_o)$$

$$T_f = \text{อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้}$$

$$T_{me} = \text{อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นซึ่งได้จากการวัด ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์}$$

$$\text{อยู่ในสภาวะสมดุล}$$

นั่นคือ

$$T_e = a T_{me} \quad 3.7.4$$

แทนลงในสมการที่ 3.7.4 ได้

$$\gamma = \frac{P_e}{(823.55 + 1.61 (T_o - 25^{\circ}\text{C}) + 1.61 a T_{me}) 104 a T_{me}} \quad 3.7.5$$

ดังนั้นขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลที่ระดับกำลังต่าง ๆ กัน จากข้อมูล  $T_{me}$  และ  $P_e$  ที่วัดได้ คำนวณหาค่า  $\gamma$  ดังสมการที่ 3.7.5 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\gamma$  กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ สำหรับการวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบดับพลังไม่สามารถหาค่า  $\gamma$  ได้โดยตรง ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด เนื่องจากที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงสุด อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงยังมีการเพิ่มขึ้น ( $dT/dt \neq 0$ ) จึงต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\gamma$  กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากการคำนวณเมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลนี้ หาค่า  $\gamma$  ที่ระดับกำลังสูงสุดตามที่ต้องการ

จากสมการที่ 3.7.5 กรณีที่ไม่ทราบค่า  $a$  จึงหาค่า  $\gamma$  ที่มีความสัมพันธ์กับค่า  $a$  ในเทอมของ  $\gamma_m$  และ  $\zeta$  กล่าวคือแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานจำนวน 99 แท่ง หรือประมาณ 95% ของจำนวนแท่งเชื้อเพลิงทั้งหมด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแกนเครื่องปฏิกรณ์ สมการที่ 3.7.2 สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dT}{dt} \cong K' \frac{P}{n} - \gamma T$$

เมื่อ  $K' =$  ส่วนกลับของค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงในแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน  
 $= \frac{1}{C'_p}$

$$C'_p = 825 + 1.61 (T_o - 25^{\circ}\text{ซ}) + 1.61 T \quad \text{วัตต์-วินาที/}^{\circ}\text{ซ-แท่ง}$$

(ดูในภาคผนวก ข.)

ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุล ( $\frac{dT}{dt} = 0$ ) ดังนั้น

$$0 \cong K' \frac{P_e}{n} - \gamma T_e$$

$$\gamma = \frac{K' P_e}{n T_e}$$

3.7.6

และที่สภาวะสมดุลนี้เช่นกัน พลักซ์ของความร้อนในแกน เครื่องปฏิกรณ์เขียนอยู่ในเทอม  
 ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ดังนี้

$$\bar{q}'' = \bar{U}_o T_e$$

$$\bar{U}_o = \text{ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่ง}$$

$$= \bar{U} / A_d$$

$$A_d = \text{พื้นที่ผิวของแท่งเชื้อเพลิง}$$

ดังนั้นปริมาณความร้อน

$$\bar{q}'' A_d = \bar{q} = \bar{U} T_e$$

$$\frac{P_e}{n} = \bar{U} T_e$$

เมื่อเทียบกับสมการที่ 3.7.6 ดังนั้น

$$\gamma = K' \bar{U}$$

3.7.7

มีความสัมพันธ์กับค่า  $a$  ในเทอมของ  $\gamma_m$  และ  $\zeta$  (ดูในสมการที่ 2.10.18) ซึ่งจะกล่าวถึงอีกครั้งหนึ่งในหัวข้อที่ 3.9

### 3.8 ส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ณ ตำแหน่งที่วัดอุณหภูมิ

(reciprocal heat transfer time constant at the position of the instrumented fuel element,  $\gamma_m$ )

พิจารณาแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ณ ตำแหน่งที่มีค่าฟังก์ชันแกดเดออร์เป็น  $\zeta$  การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่วัดได้ ณ ตำแหน่งนี้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (30)

$$\frac{dT_m}{dt} = K' \frac{\zeta P}{n} - \gamma_m T_m$$

เมื่อ  $T_m$  = อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้จากการวัดขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลย์ ( $\frac{dT}{dt} = 0$ ) ดังนั้น

$$0 = K' \frac{\zeta P_e}{n} - \gamma_m T_{me}$$

$$\gamma_m = K' \frac{\zeta P_e}{n T_{me}} \quad 3.8.1$$

พิจารณาฟลักซ์ของความร้อน ณ ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ เมื่อเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลย์

$$\zeta q'' = U_o T_{me}$$

เมื่อ  $U_o$  = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการวัดอุณหภูมิ

$$= \frac{U}{A_d}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{\zeta P_e}{n} = U T_{me}$$

เมื่อเทียบกับสมการที่ 3.8.1 ได้

$$\gamma_m = K' U \quad 3.8.2$$

จากสมการที่ 3.8.1 แทนค่า  $C_p$  และ  $n$  ดังนั้น

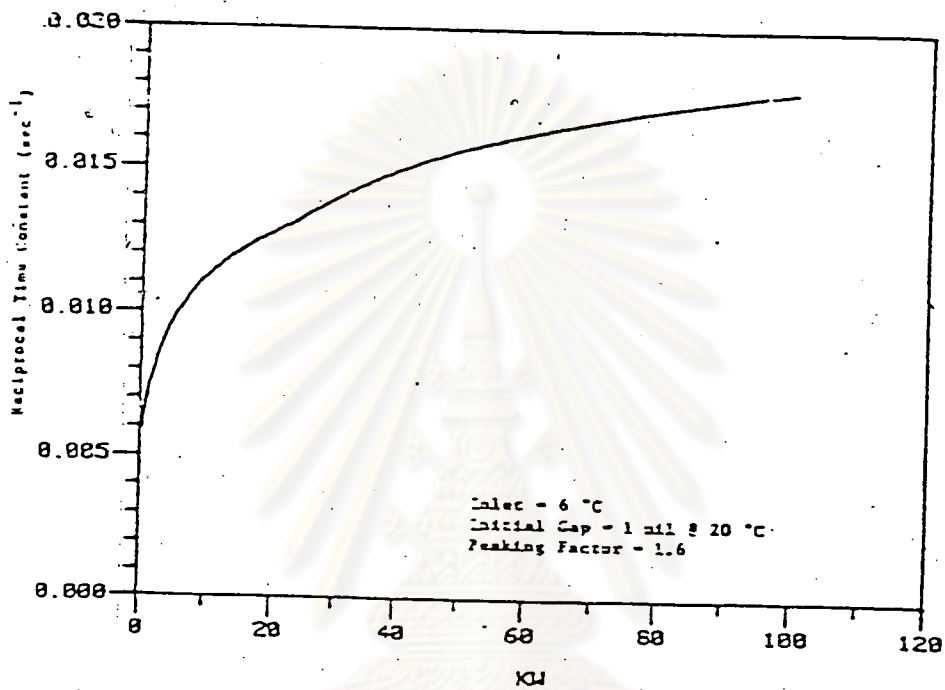
$$\gamma_m = \frac{\zeta P_e}{(825 + 1.61 (T_o - 25^\circ \text{ซ}) + 1.61 T_e) 104 T_{me}} \quad 3.8.3$$

ปล่อยให้เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลชั่วระยะเวลาหนึ่ง ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนออกจากแท่งเชื้อเพลิงอย่างสม่ำเสมอ สามารถกำหนดได้ว่าอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งได้จากการวัดมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรที่เพิ่มขึ้นภายในแท่งเชื้อเพลิง (ตำแหน่ง B1) นั่นคือ  $T_{me} = T_e$  สมการที่ 3.8.3 จึงเขียนได้เป็น

$$\gamma_m = \frac{\zeta P_e}{(825 + 1.61 (T_o - 25^\circ \text{ซ}) + 1.61 T_{me}) 104 T_{me}} \quad 3.8.4$$

ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $\zeta$  ทราบค่า  $P_e$  และ  $T_{me}$  จึงคำนวณหาค่า  $\gamma_m$  ได้ และในทำนองเดียวกับค่า  $\gamma$  ค่า  $\gamma_m$  นี้ ไม่สามารถหาค่าโดยตรงได้ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลที่ระดับกำลังต่าง ๆ กัน ตัวอย่างแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\gamma_m$  กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ของมหาวิทยาลัยอริโซนา ดังรูปที่ 3.8.1 ซึ่ง Spriggs (30) ได้คำนวณค่า  $\gamma_m$  จากค่าความต้านทานความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ณ ตำแหน่งที่มีค่า  $\zeta = 1.6$  โดยอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้าช่วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.8.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน ( $\gamma_m$ ) กับระบับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 3.9 การประมาณค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยในการถ่ายเทความร้อนของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ( $\gamma$ )

ในการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน พบว่าเป็นการยากที่จะวัด  $T$  และค่า  $\gamma$  ได้โดยตรง อย่างไรก็ตาม เมื่อทราบค่า  $T$  หรือค่า  $\gamma$  ค่าใดค่าหนึ่ง ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ได้ เนื่องจากได้กำหนดค่า  $a$  ไว้ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T$  กับค่า  $\gamma$  จากค่า  $T$  และ  $\gamma$  สมการที่ 3.7.7 และ 3.8.2 นำมาเขียนใหม่ดังนี้

$$\gamma = K' \bar{U}$$

$$\gamma_m = K' U$$

ดังนั้นได้ค่า  $a$  ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า  $\gamma$  (ดูในสมการที่ 2.10.13-2.10.18) ดัง

สมการ

$$a = \frac{T}{T_m} = \frac{U_o}{\zeta \bar{U}_o}$$

$$= \frac{\gamma_m}{\zeta \gamma}$$

3.9.1

เห็นว่าเมื่อทราบค่า  $\gamma$  ก็หาค่า  $a$  ได้ ซึ่งทำให้ทราบค่า  $T$  การประมาณค่า  $\gamma$  กระทำได้ โดยการพิจารณาค่า  $\gamma_m$  ซึ่งสามารถหาได้โดยตรงจากการวัดอุณหภูมิในแท่งเชื้อเพลิง ในการประมาณค่า  $\gamma$  ในขั้นนี้ได้กำหนดให้

$$\gamma \cong \gamma_m$$

จากสมการที่ 3.9.1 ดังนั้นทำให้

$$a = \frac{1}{\zeta}$$

จากสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน สมการที่ 3.2 นำมาเขียนใหม่คือ

$$\rho_o = \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + \frac{(\gamma_m - \gamma_m)}{\gamma} \frac{\hat{T}_m}{\lambda} \right] + \alpha_2 \frac{(\gamma_m \hat{T}_m)}{\gamma \zeta} \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + \frac{(\gamma_m - \gamma_m)}{2\gamma} \frac{\hat{T}_m}{\lambda} \right]$$

ดังนั้นเมื่อประมาณค่า  $\gamma$  แล้ว ทำให้หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ได้ดังสมการ

$$\rho_o = \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + (1 - \frac{\gamma_m}{\lambda}) \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right] + \alpha_2 \frac{(\hat{T}_m)}{\zeta} \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + \frac{(\frac{1}{2} - \frac{\gamma_m}{\lambda}) \hat{T}_m}{\zeta} \right]$$

3.9.2

โดยค่า  $\rho_o$ ,  $\hat{P}$  และ  $\hat{T}_m$  วัดได้จากการวิจัย  $\gamma_m$  อ่านค่าได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\gamma_m$  กับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งได้จากการเดินเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในสภาวะสมดุลย์ที่ระดับกำลังต่าง ๆ กัน และคำนวณหาค่า  $\gamma_m$  โดยใช้สมการ 3.8.4

### 3.10 การประมาณค่า a

นอกจากการประมาณค่า  $\gamma$  ดังหัวข้อที่ 3.9 ในทำนองกลับกันสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันอีกทางหนึ่งโดยการประมาณค่า a เพื่อหาค่าอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตร ของแท่งเชื้อเพลิง (T) จากอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ ซึ่งจะนำไปสู่การหาค่า  $\gamma$  ได้ต่อไป

เนื่องจากอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับจำนวนปฏิกิริยาลูกโซ่ที่เกิดขึ้น หรือกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ผลิตขึ้นมาจากแท่งเชื้อเพลิงแต่ละแท่งนั้นเอง (32) การประมาณค่า a จึงกำหนดให้อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในแต่ละแท่ง มีความสัมพันธ์โดยประมาณกับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ดังนี้

$$T_i \propto P_i$$

3.10.1

เมื่อ  $T_i$  = อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง i ที่เพิ่มขึ้น

$P_i$  = กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ผลิตขึ้นโดยแท่งเชื้อเพลิง i

และในทำนองเดียวกัน

$$T \propto P$$

3.10.2

เมื่อ  $T =$  อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่ง เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นในแกนเครื่องปฏิกรณ์

$P =$  กำลังเฉลี่ยของเครื่องปฏิกรณ์

พิจารณาแท่งเชื้อเพลิง B1 สมการที่ 3.10.1 เขียนได้ดังนี้

$$T_{B1} \propto P_{B1}$$

นำไปหารสมการที่ 3.10.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรดังนี้

$$\frac{T}{T_{B1}} = \frac{P}{P_{B1}} \quad 3.10.3$$

จุดที่จะทำการวัดอุณหภูมิอยู่ในบริเวณใกล้เคียงกับกึ่งกลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ ย่อมมีค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงกว่าจุดอื่น ๆ ภายในแท่งเชื้อเพลิง กำลังของเครื่องปฏิกรณ์จากแท่งเชื้อเพลิง B1 นี้จึงผลิตได้ไม่สม่ำเสมอทั่วทั้งแท่ง อย่างไรก็ตามการประมาณการขั้นต่อไป กำหนดให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งได้จากการวัดมีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง B1 ที่เพิ่มขึ้น นั่นคือ

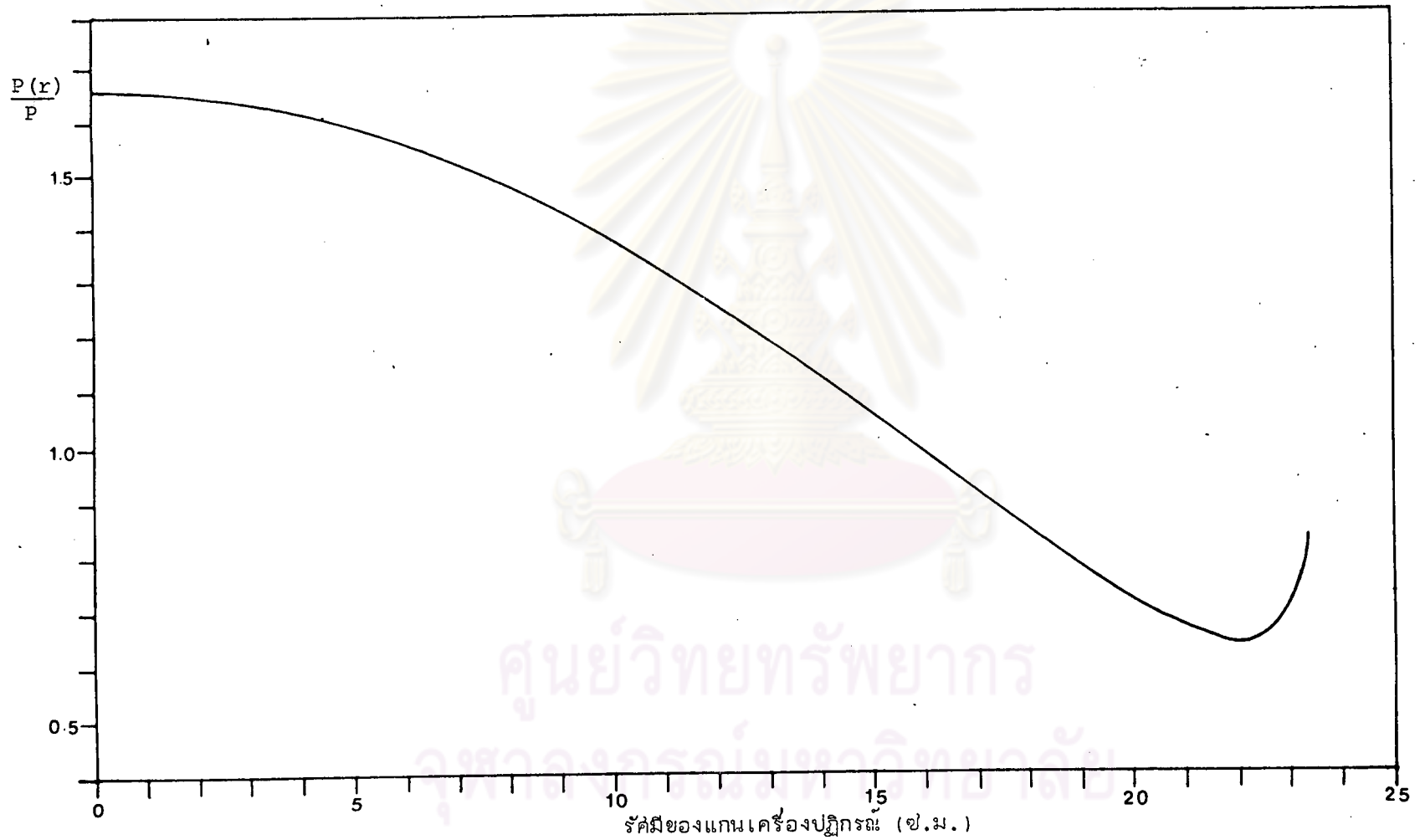
$$T_m \cong T_{B1}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.10.3 a จึงมีค่าดังนี้

$$a = \frac{T}{T_m} \cong \frac{T}{T_{B1}}$$

$$= \frac{P}{P_{B1}} \quad 3.10.4$$

การปฏิกรณ์ปฏิบัติ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ (29) ได้คำนวณปรับปรุงการกระจายกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ในแนวรัศมีของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ( $P(r)$ ) จากค่าที่มีอยู่เดิม ซึ่งได้จากการออกแบบ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมกับปัจจุบัน ตามคำแนะนำของบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิก ได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 3.10.1 พบว่าที่แท่งเชื้อเพลิง B1 ซึ่งมีระยะทางเฉลี่ยจากจุดศูนย์กลางแกนเครื่องปฏิกรณ์ ถึงจุดกึ่งกลางแท่งเชื้อเพลิงมีค่า



รูปที่ 3.10.1 การกระจายของกำลังเครื่องปฏิกรณ์ในแนวรัศมีที่กำลังเครื่องปฏิกรณ์ 1 เมกกะวัตต์ (29)

$$\frac{P_{B1}}{P} = 1.61$$

จากสมการที่ 3.10.4 ได้ค่า  $a$  สำหรับการวิจัยดังนี้

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{1.61} \\ &= 0.62 \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่ง เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิของแท่ง เชื้อเพลิงที่เพิ่มขึ้นซึ่งได้จากการวัด เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (สมการที่ 2.10.13)

$$a = \frac{T}{T_m}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } T &= a T_m \\ &= 0.62 T_m \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } \hat{T} = 0.62 \hat{T}_m \quad 3.10.5$$

จากสมการการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน สมการที่ 3.1 นำมาเขียนใหม่ คือ

$$\rho_o = \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + (1 - \frac{\gamma}{\lambda}) \hat{T} \right] + \alpha_2 \hat{T} \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + \frac{(1 - \gamma)}{2} \frac{\hat{T}}{\lambda} \right]$$

แทนค่า  $\hat{T}$  จากสมการที่ 3.10.5 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันจึงหาได้จากสมการ

$$\begin{aligned} \rho_o &= \alpha_1 \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + (1 - \frac{\gamma}{\lambda}) 0.62 \hat{T}_m \right] + \alpha_2 (0.62 \hat{T}_m) \left[ \frac{\hat{K}\hat{P}}{\lambda} + \right. \\ &\quad \left. \frac{(1 - \gamma)}{2} 0.62 \hat{T}_m \right] \quad 3.10.6 \end{aligned}$$

ทำนองเดียวกับการประมาณค่า  $\gamma$  ค่า  $\rho_o$ ,  $\hat{P}$  และ  $\hat{T}_m$  วัดได้จากการวิจัย ส่วนค่า  $\gamma$  อ่านได้จากกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\gamma$  กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งได้จาก

การเดินเครื่องปฏิกรณ์ ให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่ระดับกำลังต่าง ๆ กัน และคำนวณหาค่า  $\gamma$  โดยแทนค่า  $a$  ลงในสมการที่ 3.7.5 ดังนี้

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{P_e}{(823.55 + 1.61 (T_o - 25^\circ \text{ซ}) + 1.61 a T_{me}) 104 a T_{me}} \\ &= \frac{P_e}{823.55 + 1.61 (T_o - 25^\circ \text{ซ}) + 1.61 (0.62 T_{me}) 104 \times 0.62 T_{me}} \quad (3.10.7) \end{aligned}$$

สมการที่ 3.10.7 จะได้นำไปคำนวณหาค่า  $\gamma$  ในส่วนผลการทดลองต่อไป

### 3.11 ค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวตรอนล่ากลุ่มเดียว ( $\lambda$ )

นอกจากการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบฉบับพลัน จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับความจริงเพียงใด ยังขึ้นอยู่กับ การเลือกใช้ค่าจากการพิจารณานิวตรอนล่าเพียงกลุ่มเดียว (ดูในหัวข้อที่ 2.6) พบว่าเมื่อค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นมีค่าน้อยมาก ถ้าเลือกใช้ค่า  $\lambda = 0.0767$  วินาที<sup>-1</sup> จะให้ผลลัพธ์การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวตรอนใกล้เคียงกับการใช้ค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวตรอนล่าทั้ง 6 กลุ่ม

นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาหาค่า  $\lambda$  ที่เหมาะสม อีกวิธีหนึ่ง กล่าวคือพิจารณาสมการในช่วงโมงสำหรับนิวตรอนล่ากลุ่มเดียว สมการที่ 2.16 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ดังนี้

$$\rho_o = \frac{\lambda \omega + \beta \omega}{\omega + \lambda}$$

$\rho_o$  คือค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นมีค่าคงที่ เมื่อ  $\omega_1$  คือส่วนกลับของค่าคงที่เวลาเสถียร ซึ่งเป็นรากตัวหนึ่งของสมการ ดังนั้น

$$\rho_o = \frac{\lambda \omega_1 + \beta \omega_1}{\omega_1 + \lambda}$$



การประมาณการกระโดดความหนาแน่นของนิวตรอน กำหนดให้  $\ell \rightarrow 0$  ดังนั้น

$$\rho_0 \cong \frac{\beta\omega_1}{\omega_1 + \lambda} \quad 3.11.1$$

จัดรูปสมการที่ 3.11.1 ใหม่ได้  $\lambda$  มีค่าดังนี้

$$\lambda = \frac{\omega_1 (1 - \rho_0)}{\rho_0}$$

เมื่อ  $\rho_0 =$  ค่าเปลี่ยนวิกฤต (ดอลลาร์)

$$\text{หรือ } \lambda = \frac{\omega_1 (100 - \rho_0)}{\rho_0} \quad 3.11.2$$

เมื่อ  $\rho_0 =$  ค่าเปลี่ยนวิกฤต (เซ็นต์)

ค่า  $\lambda$  จากสมการที่ 3.11.2 นี้ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้น ( $\rho_0$ ) ซึ่งเกี่ยวพันไปถึงนิวตรอนล่าช้า 6 กลุ่ม อย่างไรก็ตามค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นมีค่าไม่คงที่ โดยจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น โดยเฉพาะขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด ค่าเปลี่ยนวิกฤตที่คงอยู่ในระบบตัวกลางปฏิกรณ์จะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเริ่มต้น พิจารณาสมการที่ 3.11.1 เมื่อ  $\rho_0$  น้อยลง ทำให้  $\omega_1$  ลดลงตามไปด้วย ซึ่ง  $\omega_1$  จะมีค่าลดลงมากกว่า  $\rho_0$  ดังนั้นที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงสุดนี้  $\lambda$  ที่หาได้จากค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มต้นจึงมีค่ามากกว่าความเป็นจริง