บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA Mark III (Training Research and Isotope Production General Atomic Mark III) 2 เมกกะวัตต์ แท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์เป็นของผสมระหว่างเชื้อเพลิงนิวเคลียร์กับมอดเดอร์เรเตอร์ (moderator) โดยใช้ยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงและไฮโดรเจนอยู่ในรูปสารประกอบเซอร์โคเนียมไฮไดรด์(zirconium hyäride) เป็นมอดเดอร์เรเตอร์ อัดแน่นเป็นแท่งอยู่ภายในภาชนะรูปทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม (stainless steel) เชื้อเพลิงลักษณะนี้ทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีคุณสมบัติพิเศษในการลดกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ลงได้โดยอัตโนมัติ เมื่อแท่งเชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูง ก่อให้เกิดความปลอดภัยจากอุบัติเหตุอันเกิดจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง และสามารถเพิ่มกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ได้จำนวนมากอย่างฉับพลัน โดยไม่เกิดความเสียหายแก่แท่งเชื้อเพลิง (1)

คุณสมบัติข้างต้นเนื่องมาจากพลังงานความร้อนที่ผลิตขึ้นในเนื้อเชื้อเพลิง มีผลต่อเซอร์โคเนียมไฮไดรด์โดยเฉพาะเมื่อความร้อนสูงมาก สามารถทำให้ปฏิกริยาลูกโซ่ (chain reaction) ลดลงได้อย่างรวดเร็ว กำลังของเครื่องปฏิกรณ์จึงลดลง (2) การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์นี้ อธิบายได้โดยค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน (prompt temperature feedback coefficient) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้ในการเดินเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดความปลอดภัย และเป็นค่าสัมประสิทธิ์ในการศึกษาด้านการเคลื่อนไหวของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ (reactor dynamics) (3)

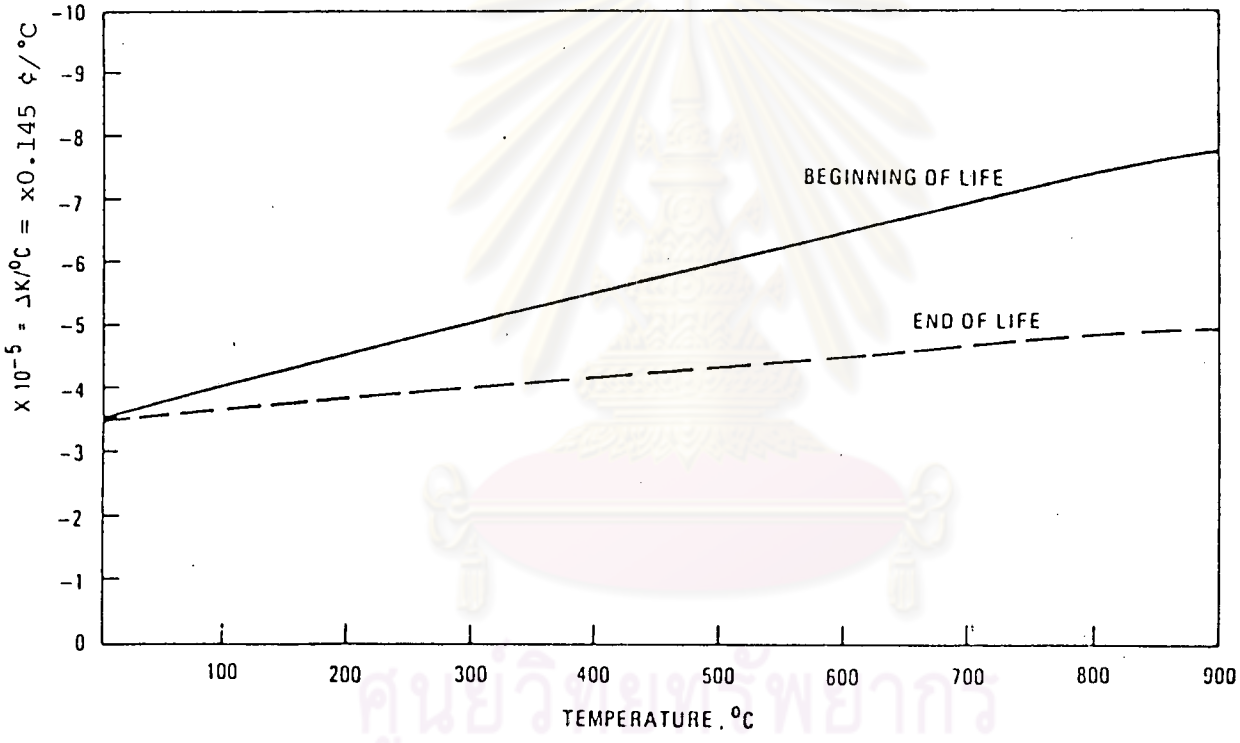
จากการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ที่ใช้ในแท่งเชื้อเพลิงแบบ TRIGA ของบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิค (4) พบว่าขบวนการเกิดสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันนี้ เป็นผลของโครงสร้างอะตอมของไฮโดรเจนจับตัวกับเซอร์โคเนียมกระทำตัวเป็นฮาโมนิค ออสซิลเลเตอร์ (harmonic oscillator) เมื่ออุณหภูมิในแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้นโมเลกุลของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์จะเกิดการสั่นตัวมากขึ้นและจะถ่ายเทพลังงานให้แก่

เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) ที่ผ่านเข้าไปในโมเลกุลนี้ ทำให้นิวตรอนมีพลังงานสูงขึ้น จึงมีโอกาสที่จะหนีออกจากแท่งเชื้อเพลิงมากขึ้นตามไปด้วย ผลก็คือทำให้มีเทอร์มัลนิวตรอนในแท่งเชื้อเพลิงน้อยลง ปฏิกริยาลูกโซ่จึงเกิดขึ้นน้อยลงไปด้วย นอกจากนี้ยังมีผลของดอปเปลอร์ (Doppler effect) คือค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนนิวตรอน (absorption cross section) ของ U-238 ในแท่งเชื้อเพลิงเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้มีการจับนิวตรอนได้มากขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 ต่อไป การถ่ายเทพลังงานให้กับเทอร์มัลนิวตรอนดังที่กล่าวมาแล้ว เกิดการถ่ายเทได้ดีในช่วงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่ำถึง 400 °ซ ดังนั้นในช่วงนี้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในลักษณะที่เกือบเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น (linear) เมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงกว่า 400 °ซ แล้ว สัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ จะมีค่าลดลง

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ (5, 6, 7) จากรูปที่ 1.1.1 แสดงถึงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ TRIGA - LEU (low enriched uranium) 10 เมกกะวัตต์ เมื่อเริ่มต้นเดินเครื่องปฏิกรณ์ (beginning of life) จะมีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ มีค่าเป็นลบมากกว่า ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่เดินเครื่องจนแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (reactor core) จะหมดอายุการใช้งาน (end of life) ทั้งนี้มีสาเหตุที่สำคัญจากการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเชื้อเพลิง เช่น สูญเสียธาตุที่ดูดจับนิวตรอนจากผลของดอปเปลอร์ เนื้อเชื้อเพลิงเกิดการขยายตัวทำให้ช่องว่างระหว่างเนื้อเชื้อเพลิงกับเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิงแคบลง ซึ่งทำให้เชื้อเพลิงสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีขึ้น เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อพัฒนาวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน โดยใช้เทคนิคการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม ให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ มาใช้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณของบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิค และเพื่อใช้เป็นวิธีการในการติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ต่อไป



รูปที่ 1.1.1 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิง

แบบ TRIGA - LEU 10 เมกกะวัตต์ (7)

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน จากการเดินเครื่องปฏิกรณ์โดยใช้เทคนิคการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม (small excursion) ที่ค่าเปลี่ยนวิกฤต (reactivity) ต่าง ๆ กัน โดยมีค่าไม่เกิน 1 ดอลลาร์ คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ขณะที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสูงสุด จากสมการประมาณการกระโดด ความหนาแน่นของนิวตรอน (prompt-jump approximation) สมมูลย์ของค่าเปลี่ยนวิกฤตย้อนกลับเชิงเส้น (linear reactivity feedback model)

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 การเตรียมงานขั้นต้น

ศึกษาค้นคว้าข้อมูลจากเอกสารต่าง ๆ เพื่อเป็นแนวทางในการวิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันและค่าพารามิเตอร์ (parameter) ที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทำการวิจัยหาค่าพารามิเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้ง 1 ดังต่อไปนี้

1.4.2.1 การปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุม (control rod calibration)

1.4.2.2 การทดลองหาค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง (reciprocal heat transfer time constant)

1.4.3 ทำการวิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน

1.4.4 ศึกษาเงื่อนไขต่าง ๆ ในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน

1.4.5 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันที่ได้จากการวิจัยกับค่าที่ได้จากการคำนวณของบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิค และค่าที่มีรายงานไว้

1.4.6 สรุปและรายงานผลการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันกับอุณหภูมิ

แท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 เพื่อใช้ติดตามการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ และเป็นข้อมูลในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ให้มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น

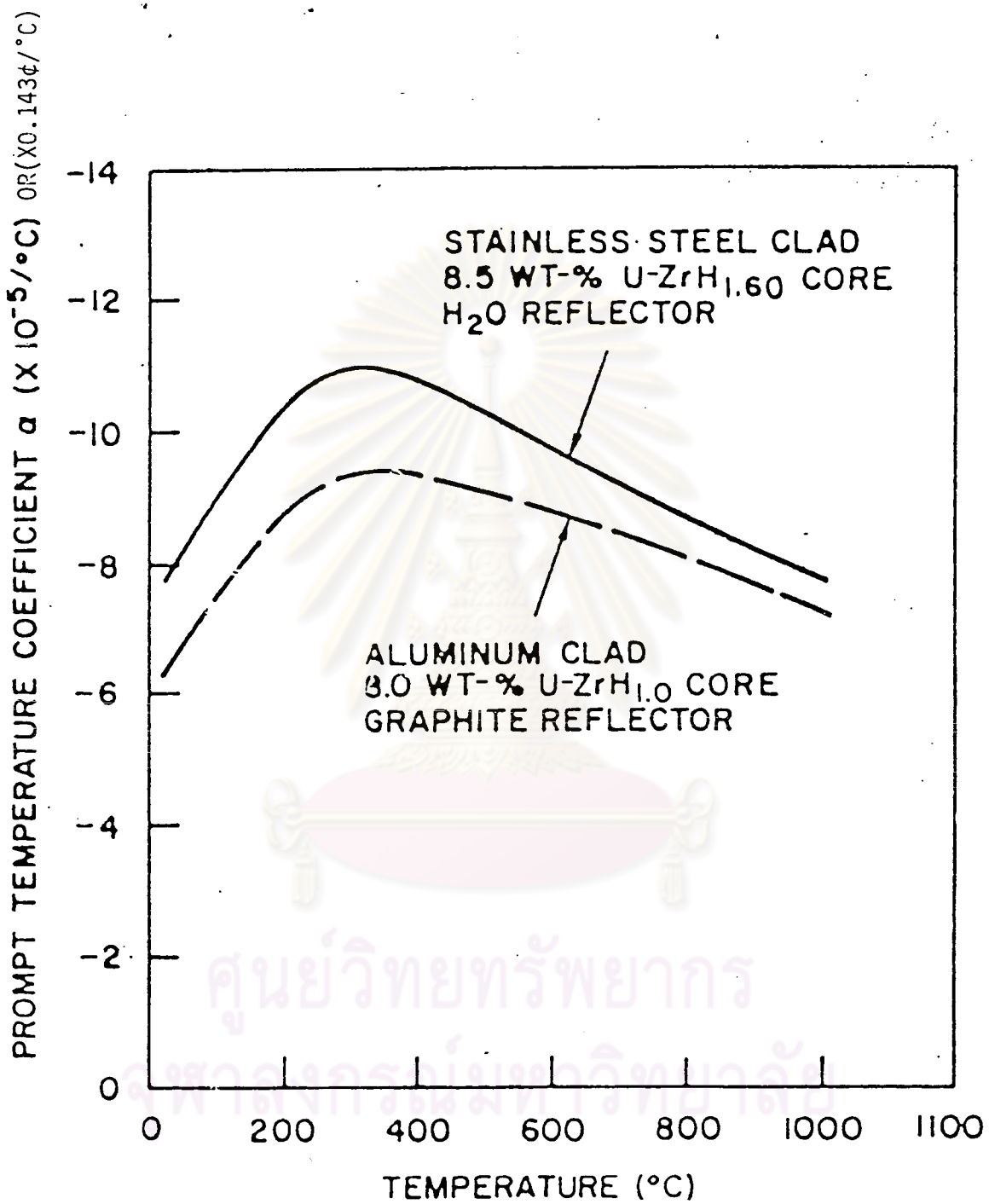
1.5.2 ขั้นตอนและวิธีการวิจัยจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาด้านฟิสิกส์ของเครื่องปฏิกรณ์ (reactor physics) และการเคลื่อนไหวของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป

1.6 ข้อมูลของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงจำนวน 104 แท่ง แบ่งเป็นแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน (standard fuel element) จำนวน 99 แท่ง และแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU (Low Enriched Uranium) จำนวน 5 แท่ง แท่งเชื้อเพลิงทั้งสองแบบนี้ แตกต่างกันเพียงองค์ประกอบของเนื้อเชื้อเพลิงที่บรรจุอยู่ภายใน กล่าวคือ เนื้อเชื้อเพลิงของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานมียูเรเนียมผสมอยู่ 8.5% โดยน้ำหนัก มีความเข้มข้นของ U-235 20% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น 1.6 ($ZrH_{1.6}$) ส่วนแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU มียูเรเนียมผสมอยู่ 20% และเออร์เบียม (erbium) 0.53% โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของ U-235 20% โดยน้ำหนัก อัตราส่วนของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียม 1.5 ($ZrH_{1.5}$) ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันของเครื่องปฏิกรณ์ต้องพิจารณา ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ที่เกิดจากแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานและแบบ LEU (8)

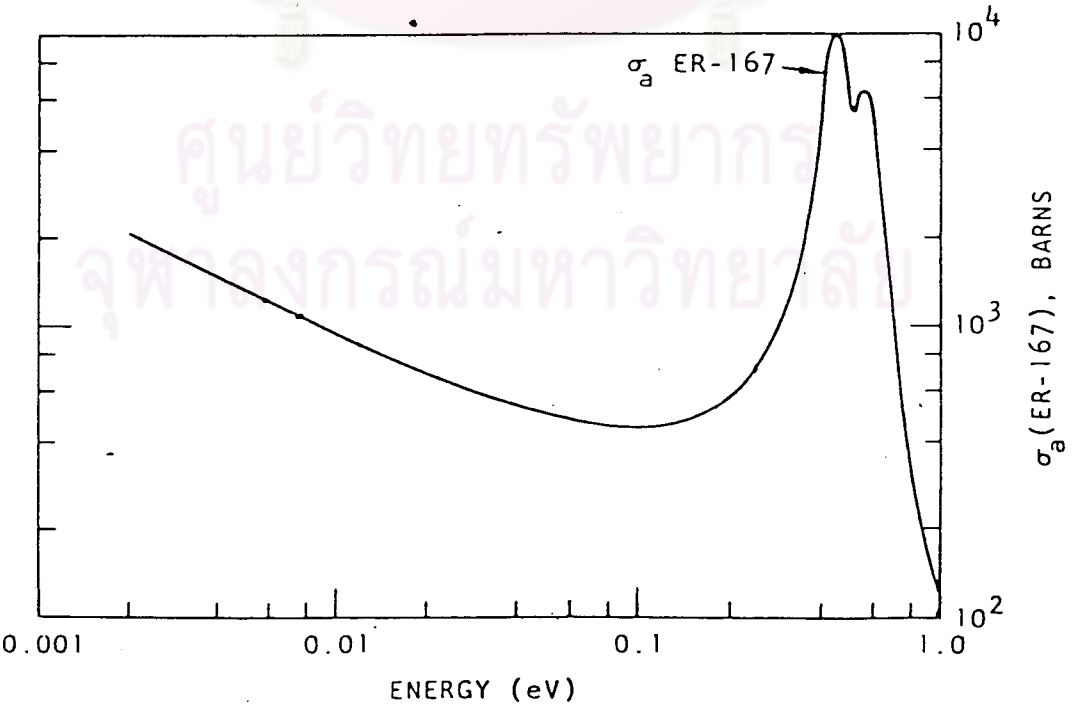
บริษัทเจเนอรัลอะตอมมิค (1) ได้คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับของเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA Mark III ขนาด 2 เมกกะวัตต์ ที่ใช้ในแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานพบว่าค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ มากกว่า 50% เกิดขึ้นจากการถ่ายเทพลังงานของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ให้แก่เทอร์มัลนิวตรอน และอีกประมาณ 20% เกิดจากผลของดอปเปลอร์ เครื่องปฏิกรณ์มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงประมาณ -1.36 เซนต์/°ซ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง แสดงไว้ดังรูปที่ 1.6.1

สำหรับแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU มีปริมาณยูเรเนียมในเนื้อเชื้อเพลิงมากกว่าของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ทำให้การถ่ายเทพลังงานของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์เกิดขึ้นได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตามจะมีผลของดอปเปลอร์จาก U-238 และ Er-167 มากขึ้น โดยเฉพาะ Er-167

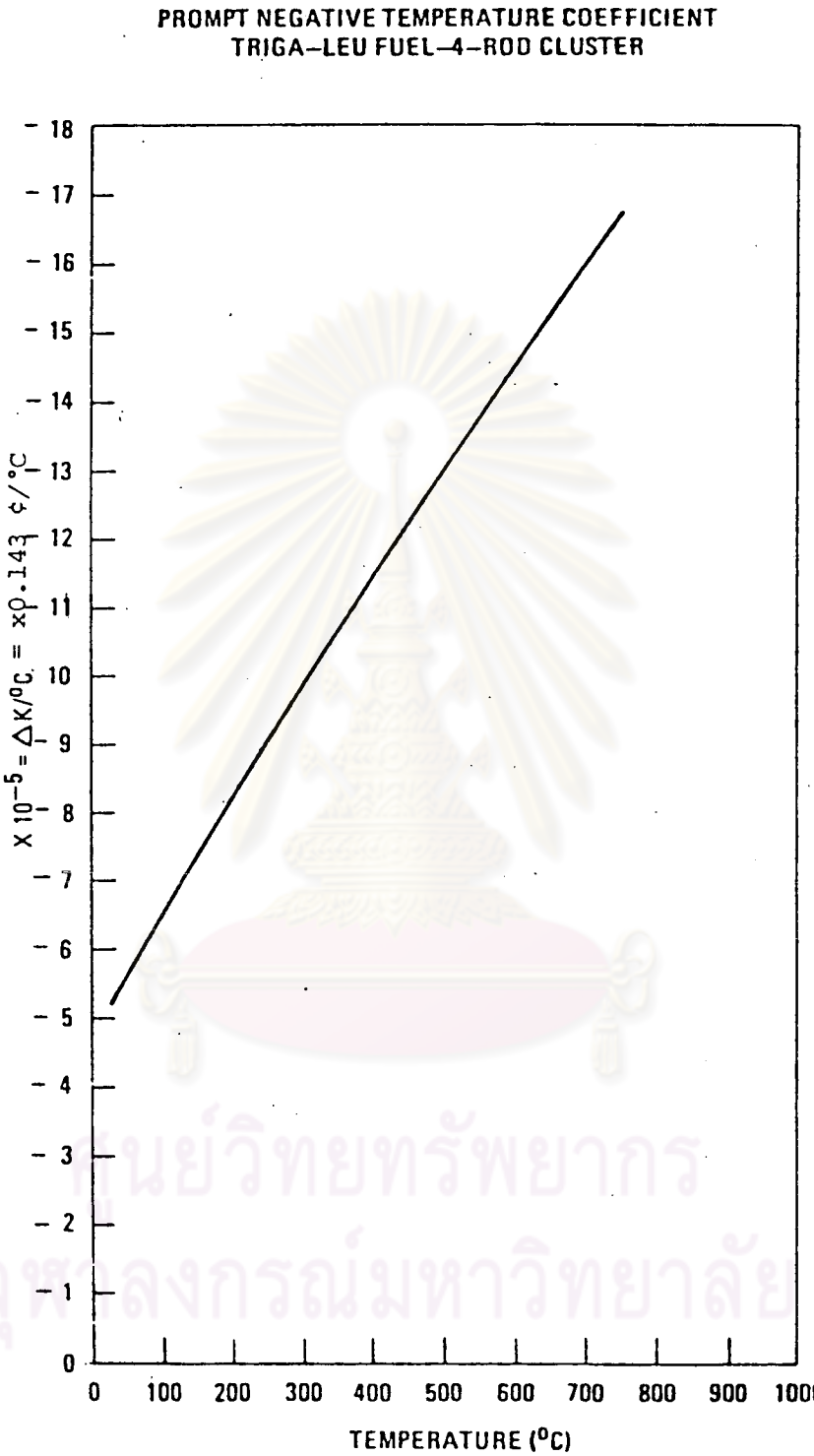


รูปที่ 1.6.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานกับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง

จะมีโอกาสดูดกลืนนิวตรอนในย่านพลังงานรีโซแนนซ์ (resonance energy) 0.5 eV ถึง 2 ยอด (peak) ติดกันดังรูปที่ 1.6.2 ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงกว่า 400 °ซ ผลของการดูดกลืนนิวตรอนโดย Er-167 นี้ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันยังมีค่าสูงขึ้น แตกต่างกับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน จากการออกแบบและการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA 2 เมกกะวัตต์ ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU จำนวน 104 แท่ง มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ แสดงได้ดังรูปที่ 1.6.3 ซึ่งค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ตั้งแต่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง 23 °ซ ถึง 700 °ซ เท่ากับ -1.43 เซนต์/°ซ มากกว่าของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานกับแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU ดังรูปที่ 1.6.1 และ 1.6.3 พบว่าในช่วงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงต่ำลง ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU มีค่าน้อยกว่าของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ทำให้การเพิ่มระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ขณะเดินเครื่องปกติมีการสูญเสียค่าเปลี่ยนวิกฤตน้อยกว่าตามไปด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูง เช่น ในกรณีเกิดอุบัติเหตุ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU จะมีค่ามาก ทำให้เครื่องปฏิกรณ์มีความปลอดภัยยิ่งขึ้น (7,9)



รูปที่ 1.6.2 แสดงค่าภาคตัดขวางในการดูดกลืนนิวตรอนของ Er-167 ในย่านพลังงานรีโซแนนซ์ (7)



รูปที่ 1.6.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลันของเครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้แท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU กับอุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง

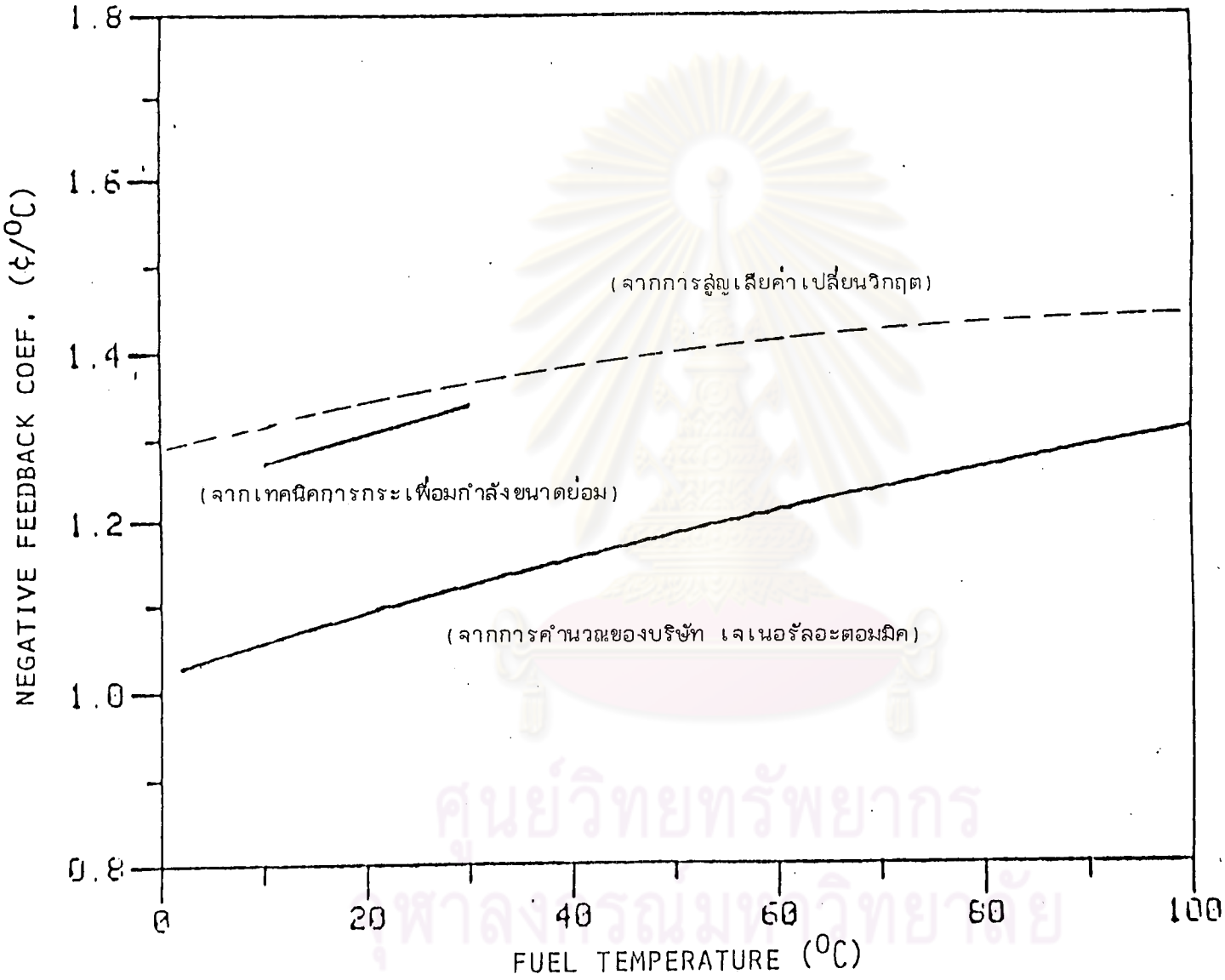
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Stone, Sleeper, Stahl และ West (10) ได้ทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ของเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA (ไม่ได้ระบุระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์) โดยการเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤตแก่เครื่องปฏิกรณ์ให้มีกำลังคงที่ที่ระดับกำลังต่าง ๆ กัน คำนวณหาค่าเปลี่ยนวิกฤตที่สูญเสียไปจากเมื่อเริ่มต้นการทดลอง ในแต่ละระดับของเครื่องปฏิกรณ์ได้ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิง ประมาณ -1.5 เซนต์/°ซ และที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงสูงสุด 400°ซ มีค่า -1.0 เซนต์/°ซ

Coffer, Dee, Shoptaugh, West และ Whittermore (11) ได้ทำการทดลองเดินเครื่องปฏิกรณ์ ATPR (Advanced TRIGA Phototype Reactor) แบบทวีกำลังชั่วขณะ (pulsing) คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ จากสมการสมมูลย์ฟุคส์-นอร์ดแฮม (Fuchs-Norheim model) ได้ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าถึง 450°ซ เท่ากับ -1.71 เซนต์/°ซ Schrull, Sowers, Spriggs และ Mcinturf (21) ได้ทำการทดลองเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA 100 กิโลวัตต์ ของมหาวิทยาลัยอริโซนา ได้ค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงเท่ากับ -1.23 เซนต์/°ซ

Spriggs และ Nelson (13, 14) ได้พัฒนาการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ โดยเดินเครื่องปฏิกรณ์แบบ TRIGA ของมหาวิทยาลัยอริโซนา ให้เกิดการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ (ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของแท่งเชื้อเพลิงขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด) ได้ค่า -1.27ถึง-1.34 เซนต์/°ซ และเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ นี้กับค่าที่ได้จากการทดลองหาค่าเปลี่ยนวิกฤตที่สูญเสียไปที่ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ต่าง ๆ กัน และค่าที่ได้จากการคำนวณของบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิค แสดงได้ดังรูปที่ 1.6.4

จากการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ ดังที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น พบว่าการทดลองซึ่งรายงานโดย Spriggs และ Nelson (13, 14) ใช้เทคนิคที่ไม่ยุ่งยากนัก และเหมาะที่จะปรับปรุงนำมาใช้ทำการทดลองกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ปรับปรุงการหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับฯ โดยใช้เทคนิคดังกล่าว



รูปที่ 1.6.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิยินอกลับแบบฉับพลันที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ กับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงของ มหาวิทยาลัยอริโซนา