

เอกสารอ้างอิง

1. General Atomic Company. "Standard TRIGA Mark III". Safety Analysis Report, General Atomic Co., California, 1975.
2. Hetrick, D.L. in Dynamics of Nuclear Reactor. pp. 141-198, The University of Chicago Press, Chicago, 1971.
3. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Reactor Theory. 2d. ed., p. 450, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1972.
4. General Atomic Company. "Standard TRIGA". Safety Analysis Report, General Atomic Co., California, 1973.
5. Simuad, M.T., Foushee, F.C., and West, G.B. "Fuel Elements for Pulsed TRIGA Research Reactors". Nuclear Technology. 28 (1976): 31-56.
6. Westinghouse Electric Corporation. "Westinghouse Nuclear Training". WNTO-7703, Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, n.d.
7. General Atomic Company. "Generic Enrichment Reduction Calculations for Rod-Type Reactors". Guidebook of Research Reactor Core Conversion from the Use of Highly Enriched Uranium to the Use of low Enriched Uranium Fuels IAEA-TECDOL-233, IAEA, Vienna, 1980.
8. ประสม สุขสว่าง และคณะ. "Low Enriched Uranium/standard TRIGA Fuel Comparision Test". รายงานวิชาการประจำปี ๒๕๒๔, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, ๒๕๒๔.

9. Gietzen, A.J., West, G.B. "Develop of Long-life Low Enrichment Fuel". TRIGA Ower Conference NO.-11. pp. 3.1-3.7, General Atomic Co., California, 1978.
10. Stone, R.S., Sleeper, H.P., Stahl, R.H., and West, G.B. "Transient Behavior of TRIGA, a Zirconium-hydride, Water-moderated Reactor". Nucl. Sci. Eng. 6 (1959): 255-259.
11. Coffey, C.O., Dee, J.B., Shoptaugh, J.R., West, G.B., and Whittemore, W. L. "Characteristics of Large Reactivity Insertions in a High-performance TRIGA Uranium-zirconium Hydride Core". AEC Symposium Series 7, U.S. Atomic Energy Comission, Tennessee, 1966.
12. Schrull, E., Sowers, G., Spriggs, G.D., and Meinturf, J. "Experimental Determination of Reactor Dynamic Parameters". p. 52. University of Arizona, 1973. (Mimeographed).
13. Spriggs, G.D., Nelson, G.W. "Preliminary Investigation of New Experimental Technique to Measure the Fuel's Temperature Feedback Coefficient". Trans. Am. Nucle. Soc. 24 (1976): 432-433.
14. ————"Experimental Measurement of Temperature Dependent Prompt Feedback Coefficient". University of Arizona, 1980. (Mimeographed).
15. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Engineering. pp. 161-164, Addison-Wesley Publishing Co., Philippines, 1975.
16. Keepin, G.R. in Physics of Nuclear Kinetics. pp. 90-102, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1965.

17. Ash, M. in Nuclear Reactor Kinetics. 2d. ed., p. 90, Macgraw-Hill International Book Co., New York, 1979.
18. Hetrick, D.L. in Dynamics of Nuclear Reactor. pp. 3-9, The University of Chicago Press, Chicago, 1971.
19. _____ in Dynamics of Nuclear Reactor. pp. 20-30, The University of Chicago Press, Chicago, 1971.
20. Toppel, B.J. "Source of Error in Reactivity Determination by Means of Asymptotic Period Measurements". Nucl. Sci. Eng. 51 (1959): 88-98.
21. Hetrick, D.L. in Dynamics of Nuclear Reactor. pp. 55-56, The University of Chicago Press, Chicago, 1971.
22. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Reactor Theory. 2d ed., pp. 448-467, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1972.
23. พลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, สำนักงาน. "ครบรอบ ๒๐ ปี พปส. ๒๗ ตุลาคม ๒๕๒๕". หน้า ๔๑-๔๔, โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว, กรุงเทพมหานคร, ๒๕๒๕.
24. ปฏิกรณ์ปฏิบัติ, กอง. "Logbook of TRR-1/M1, 1977". หน้า ๓๖, กรุงเทพมหานคร สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, ๒๕๒๐.
25. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Engineering. pp. 585-595, Addison-Wesley Publishing Co., Philippines, 1975.
26. _____ in Introduction to Nuclear Engineering. pp. 308-359, Addison-Wesley Publishing Co., Philippines, 1975.
27. El-Wakil, M.M. in Nuclear Heat Transport. pp. 73-76. International Textbook Company, London, 1971.

28. อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว และวันชัย ธรรมวาณิช. "การวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในท่ออานิวตรอนต่าง ๆ ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู" รายงานวิชาการประจำปี ๒๕๒๔, สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, ๒๕๒๔.
29. ปฏิกรณ์ปฏิบัติ, กอง. "รายงาน Burnup of TRR-1/M1 fuel" กรุงเทพมหานคร สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, ๒๕๒๖.
30. Nelson, G.W. "Heat Transfer From a Standard TRIGA Fuel Element". Experiments and Information for NE 420 a Nuclear Reactor Laboratory Course, University of Arizona, 1979.
31. ——— "Prompt Temperature Feedback Coefficient". Experiments and Information for NE 420 a Nuclear Reactor Laboratory Course, University of Arizona, 1979.
32. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Reactor Theory. 2d ed., pp. 105-106, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1972.
33. Topping, J. in Errors of Observation and Their Treatment. 3rd ed., pp. 82-106, Chapman and Hall LTD, London, 1971.
34. Lamarsh, J.R. in Introduction to Nuclear Reactor Theory. 2d ed., pp. 125-130, Addison-Wesley Publishing Co., Massachusetts, 1972.
35. WEAST, R.C. (ed) CRC Handbook of Chemistry and Physics. 60th ed., p. B-19, CRC Press Inc., Florida, 1979.
36. ——— "CRC Handbook of Chemistry and Physics. 60th ed., p. D-165, CRC Press Inc., Florida, 1979.
37. Richards, J.W. in Interpretation of Technical Data. pp. 43-46, Iliffe Books Ltd., London, 1967.

ภาคผนวก ก.

กฎของฟิคค์ (Fick's law) (34)

ภาคผนวก ก.1 การคำนวณหากฎของฟิคค์

ตัวกลางปฏิกรณ์ที่มีความหนาแน่นของนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์มากกว่าบริเวณข้างเคียง นิวตรอนจะแพร่กระจายไปสู่ย่านที่มีความหนาแน่นของนิวตรอนหรือนิวตรอนฟลักซ์น้อยกว่า ความสัมพันธ์ระหว่างนิวตรอนฟลักซ์กับความหนาแน่นของกระแสนิวตรอน อธิบายได้โดยกฎของฟิคค์ กล่าวคือ กำหนดให้ระบบตัวกลางปฏิกรณ์ มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

ก.1.1 ตัวกลางปฏิกรณ์ไม่มีขอบเขต

ก.1.2 ตัวกลางปฏิกรณ์มีคุณสมบัติเหมือนกันทั้งระบบ ทำให้ค่าภาคตัดขวางมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับตำแหน่ง

ก.1.3 ไม่มีแหล่งกำเนิดนิวตรอนภายในตัวกลางปฏิกรณ์

ก.1.4 การแพร่กระจายของนิวตรอนเป็นไปอย่างทุกทิศทางทุกทาง

ก.1.5 นิวตรอนฟลักซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ กับระยะทาง

ก.1.6 นิวตรอนฟลักซ์ไม่เป็นฟังก์ชันของเวลา

สมมติฐานข้างต้นมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้สะดวกในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของกฎของฟิคค์ โดยสมมติฐานนี้จะกล่าวถึงในภายหลังอีกครั้งหนึ่ง

พิจารณาลูกที่ต้องการคำนวณหาความหนาแน่นของกระแสนิวตรอน กำหนดให้ลูกนี้ อยู่ที่กึ่งกลางฟิสิกส์ของระบบฯ หรือจุดกำเนิด (origin) แสดงได้ดังรูปที่ ก.1 เวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสนิวตรอน (\vec{J}) ประกอบด้วยเวกเตอร์ในแนวแกน x , y , และ z คือ J_x, J_y, J_z ตามลำดับ พิจารณา J_z หาอัตราการแพร่กระจายของนิวตรอนที่ไหลผ่านพื้นที่ dA_z กล่าวคือจำนวนการชนที่เกิดขึ้นในปริมาตร dV ต่อวินาที ที่ตำแหน่ง r ทำให้นิวตรอนแพร่กระจายไป มีค่าเป็น $\Sigma \phi(\vec{r}) dV$ เมื่อ Σ_s เป็นภาคตัดขวางมหภาคในการแพร่กระจายของนิวตรอน โดยที่นิวตรอนนี้จะแพร่กระจายไปทุกทิศทาง พบว่าพื้นที่ dA_z

ได้ทำมุม θ กับปริมาตร dV ซึ่งทำให้พื้นที่ผิวที่นิวตรอนสามารถไหลผ่านได้เป็น $dA_z \cos\theta$ ดังนั้นความน่าจะเป็นที่นิวตรอนแพร่กระจายผ่านพื้นที่ dA_z คือ

$$\frac{dA_z \cos\theta}{4\pi r^2}$$

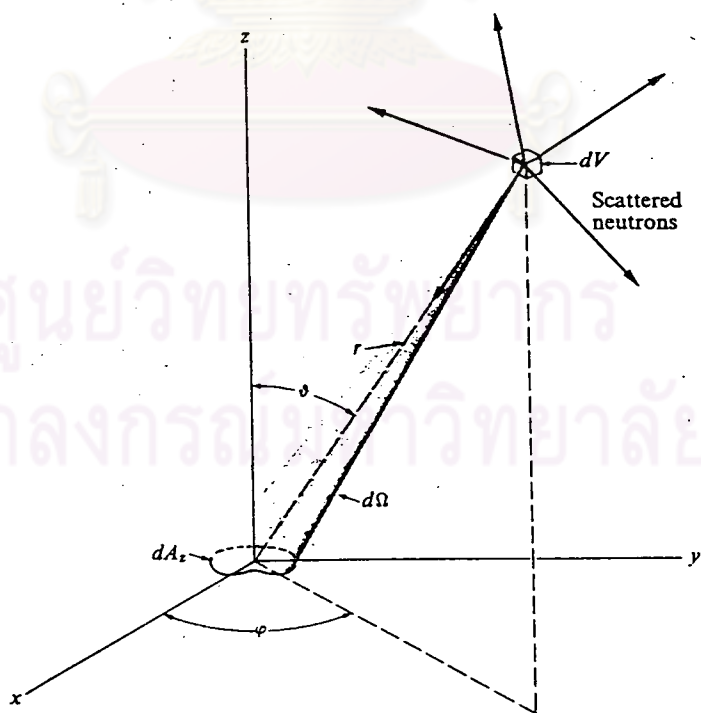
จำนวนนิวตรอนในปริมาตร V ที่สามารถแพร่กระจายผ่านพื้นที่ dA_z ต่อวินาที มีค่า

$$\frac{\Sigma_s \phi(\vec{r}) \cos\theta dA_z dV}{4\pi r^2}$$

นิวตรอนจำนวนนี้ทุกตัวไม่สามารถที่จะไหลผ่านพื้นที่ dA_z ไปได้หมด เนื่องจากบางตัวอาจถูกดูดกลืนไป ดังนั้นจึงเหลือจำนวนนิวตรอนที่ไหลผ่านพื้นที่ dA_z ต่อวินาที เป็น

$$\frac{e^{-\Sigma_t r} \Sigma_s \phi(\vec{r}) \cos\theta dA_z dV}{4\pi r^2}$$

เมื่อ Σ_t เป็นภาคตัดขวางมหภาครวมของตัวกลางปฏิกิริยา



รูปที่ ก.1 แผนภาพการคำนวณของฟลักซ์

เปลี่ยนปริมาตร dV อยู่ในรูปกัณฑ์ทรงกลม คือ $dV = r^2 \sin\theta dr d\theta d\psi$ ดังนั้นจำนวนนิวตรอนทั้งหมดที่ไหลทะลุ ผ่านพื้นที่ dA_z ต่อวินาที มีค่า

$$\frac{\sum_s dA_z}{4\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{r=0}^{\infty} e^{-\sum_t r} \phi(\vec{r}) \cos\theta \sin\theta dr d\theta d\psi$$

ให้ J_z^- แทนจำนวนนิวตรอนต่อวินาทีที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศทาง $-z$ ดังนั้นจากจำนวนนิวตรอนดังกล่าวข้างต้น หาด้วย dA_z ได้

$$J_z^- = \frac{\sum_s}{4\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{r=0}^{\infty} e^{-\sum_t r} \phi(\vec{r}) \cos\theta \sin\theta dr d\theta d\psi \quad \text{ก.1.1}$$

กำหนดให้ $\phi(\vec{r})$ เปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ กับตำแหน่ง ซึ่งสามารถเขียนเป็นอนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor's series) ได้ดังนี้

$$\phi(\vec{r}) = \phi_0 + x \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_0 + y \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_0 + z \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_0 + \dots \quad \text{ก.1.2}$$

เลขชี้กำลังที่ห้อยท้ายแสดงถึงการคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงของฟังก์ชันที่จุดกำเนิด เปลี่ยน x, y และ z ให้อยู่ในพิกัดทรงกลม คือ

$$x = r \sin\theta \cos\psi; \quad y = r \sin\theta \sin\psi; \quad z = r \cos\theta$$

แทนค่าสมการที่ ก.1.2 ลงในสมการที่ ก.1.1 ได้ J_z^- มีค่าดังนี้

$$J_z^- = \frac{\sum_s}{4\pi} \int_{\psi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{r=0}^{\infty} e^{-\sum_t r} \left[\phi_0 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_0 r \cos\theta \right] \cos\theta \sin\theta dr d\theta d\psi$$

ซึ่งหาค่าได้เป็น

$$J_z^- = \frac{\sum_s \phi_0}{4\sum_t} + \frac{\sum_s}{6\sum_t^2} \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_0 \quad \text{ก.1.3}$$

สำหรับการคำนวณหาค่า J_z^+ ซึ่งเป็นจำนวนนิวตรอนต่อวินาทีที่ไหลผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ในทิศทาง z กระทำได้ในทำนองเดียวกัน ต่างกันเพียงการอินทิเกรต (integration) หาค่าที่มุม θ ซึ่งได้ผลการคำนวณคือ

$$J_z^+ = \frac{\Sigma_s \phi_0}{4\Sigma_t} - \frac{\Sigma_s}{6\Sigma_t^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z_0} \right) \quad \text{ก.1.4}$$

ดังนั้นในทิศทาง z ได้ความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนมีค่าดังนี้

$$J_z = J_z^+ - J_z^- = -\frac{\Sigma_s}{3\Sigma_t^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial z_0} \right) \quad \text{ก.1.5}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนในทิศทาง x, y ซึ่งมีค่าดังนี้

$$J_x = -\frac{\Sigma_s}{3\Sigma_t^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_0} \right) \quad \text{ก.1.6}$$

$$J_y = -\frac{\Sigma_s}{3\Sigma_t^2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial y_0} \right) \quad \text{ก.1.7}$$

จากสมการที่ ก.1.5 สมการที่ ก.1.6 และสมการที่ ก.1.7 ดังนั้นเวกเตอร์ความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนคือ

$$\vec{J} = \vec{i}J_x + \vec{j}J_y + \vec{k}J_z = -\frac{\Sigma_s}{3\Sigma_t^2} \text{grad } \phi \quad \text{ก.1.8}$$

สมการที่ ก.1.8 เรียกว่า กฎของฟิกค์ แสดงถึงการแพร่กระจายของนิวตรอนในตัวกลางปฏิกรณ์ กล่าวคือ ความหนาแน่นของกระแสนิวตรอน มีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าลบเกรดีเียน (gradient) ของนิวตรอนฟลักซ์ ค่าคงที่สำหรับความสัมพันธ์นี้เรียกว่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย (diffusion coefficient), D ดังนั้นกฎของฟิกค์จึงเป็น

$$\vec{J} = -D \text{grad } \phi$$

$$\text{เมื่อ } D = \frac{\Sigma_s}{3\Sigma_t^2}$$

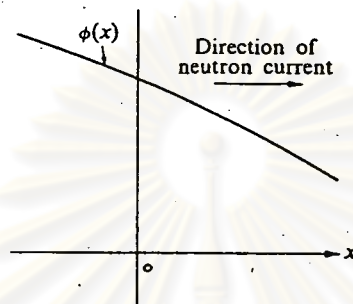
ภาคผนวก ก.2 ความหมายกฎของฟิกค์

พิจารณากฎของฟิกค์ในทิศทาง x ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



$$J_x = -D \frac{d\phi}{dx}$$

เครื่องหมายลบแสดงทิศทางการไหลของความหนาแน่นของนิวตรอนซึ่งเกิดการแพร่กระจายไปในทิศทางตรงกันข้ามกับการเพิ่มขึ้นของนิวตรอนฟลักซ์



รูปที่ ก.2 ความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนเมื่อนิวตรอนฟลักซ์เปลี่ยนแปลงตามระยะทาง

จากรูปที่ ก.2 ทิศทางที่ระยะ $x = 0$ นิวตรอนที่แพร่กระจายจากทางซ้ายมือไปยังขวามือเป็นผลมาจากเกิดการชนทางซ้ายมือและแพร่กระจายไป ล้วนนิวตรอนที่แพร่กระจายจากทางขวามือไปยังซ้ายมือก็เป็นผลจากการชนทางขวามือเช่นกัน เนื่องจากทางซ้ายมือมีนิวตรอนฟลักซ์มาก ทำให้มีโอกาสที่เกิดการชนและแพร่กระจายไปยังขวามือได้มากกว่า จึงมีความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนไหลไปในทิศทางบวก หรือเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนฟลักซ์ต่อระยะทาง พบว่ามีค่าเป็นลบ ดังนั้นจึงเกิดความหนาแน่นของกระแสนิวตรอนแพร่กระจายไปในทิศทางบวก ตามกฎของฟิสิกส์

ภาคผนวก ก.3 ขอบเขตการโยกย้ายของฟิสิกส์

การโยกย้ายของฟิสิกส์เพื่ออธิบายการแพร่กระจายของนิวตรอนในระบบตัวกลางปฏิกรณ์ จำเป็นต้องคำนึงถึงขอบเขตค่าถึงขอบเขตของลัมมัตริยาน ดังภาคผนวก ก.1 ซึ่งกล่าวโดยสรุปได้ดังนี้

ก.3.1 เมื่อตัวกลางปฏิกิริยามีขอบเขต กฎของฟิคค์สามารถใช้ได้ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์หรือในส่วนที่ห่างจากผิววนอกของเครื่องปฏิกรณ์

ก.3.2 เมื่อตัวกลางปฏิกิริยามีคุณสมบัติแตกต่างกัน คุณสมบัติที่แตกต่างกันย่อมไม่ส่งผลกระทบต่อสมมติฐาน

ก.3.3 เมื่อมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนในระบบฯ แหล่งกำเนิดนิวตรอนต้องห่างมากกว่า 2-3 เท่า ของระยะทางเฉลี่ยของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ไปจนเกิดการชนครั้งต่อไป (mean free parth)

ก.3.4 เมื่อการแพร่กระจายของนิวตรอนไม่เป็นไปทุกทิศทาง จำเป็นต้องใช้ค่า D ที่มีความสัมพันธ์กับการแพร่กระจายของนิวตรอนนี้

ก.3.5 เกิดการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนฟลักซ์ต่อตำแหน่ง ใต้น้อย

ก.3.6 เกิดการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนฟลักซ์ต่อเวลาอย่างช้า ๆ โดยมีสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลงนิวตรอนฟลักซ์น้อย ภายในช่วงเวลาที่นิวตรอนเคลื่อนที่ไปได้ 3 เท่าของระยะทางเฉลี่ยของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ไปจนเกิดการชนครั้งต่อไป

จากขอบเขตการใช้งานกฎของฟิคค์ดังกล่าว อย่างไรก็ตามสามารถนำมาใช้ประมาณการการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์ได้ โดยพยายามที่จะพิจารณาเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในขอบเขตดังกล่าวมากที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

ค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิง

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ประกอบด้วยแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน จำนวน 99 แท่ง และแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU จำนวน 5 แท่ง ความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงในแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน (C_p') มีค่าดังนี้ (5)

$$C_p' = 825 + 1.61 (\bar{T} - 25^\circ\text{C}) \quad \text{วัตต์-วินาที/}^\circ\text{C-แท่ง} \quad \text{ข.1}$$

$$\text{เมื่อ } \bar{T} = \text{อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของเนื้อเชื้อเพลิง (}^\circ\text{C)}$$

พิจารณาค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงในแท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU กล่าวคือ Douglas (5) ได้ทำการทดลองและคำนวณหาค่าเอนทัลปี (enthalpy) ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางด้านเทอร์โมไดนามิก (thermodynamic quantity) ของเนื้อเชื้อเพลิง มีค่าเท่ากับผลบวกของพลังงานภายใน (internal energy) กับงาน (work) ในเนื้อเชื้อเพลิง ได้ค่าเอนทัลปีของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ที่มีอัตราส่วนอะตอมของไฮโดรเจนต่อเซอร์โคเนียมเป็น x และที่อุณหภูมิตั้งแต่ 25°C ขึ้นไป, $(\text{H-H}_{25})\text{ZrH}_{1.5}$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (\text{H-H}_{25})\text{ZrH}_{1.5} &= 0.03488 \bar{T}^2 + [34.446 + 14.8071 \\ &\quad (x-1.65)] \bar{T} - 882.95 - 370.18 \\ &\quad (x-1.65) \text{ จูล/โมล} \end{aligned}$$

แท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU มีค่า $x = 1.5$ และ 1 โมลของ $\text{ZrH}_{1.5} = 92.731955$ กรัม ดังนั้น

$$\begin{aligned} (\text{H-H}_{25})\text{ZrH}_{1.5} &= 3.76138 \times 10^{-4} \bar{T}^2 + 0.34751 \bar{T} \\ &\quad - 10.12024 \text{ จูล/กรัม} \quad \text{ข.2} \end{aligned}$$

ส่วนค่าเอนทัลปีของโลหะยูเรเนียม, $(\text{H-H}_{25})\text{U}$, ซึ่ง Etherington (5) แสดงไว้เป็นสมการดังนี้

$$(\text{H-H}_{25})\text{U} = 0.6525 \times 10^{-4} \bar{T}^2 + 0.1094 \bar{T} - 2.776 \text{ จูล/กรัม} \quad \text{ข.3}$$

แท่งเชื้อเพลิงแบบ LEU มีเนื้อเชื้อเพลิงอยู่ในรูป U-Er-ZrH_{1.5} ซึ่งมียูเรเนียม 20% และเออร์เบียม 0.53% โดยน้ำหนัก ดังนั้นเนื้อเชื้อเพลิง 1 กรัม จึงประกอบด้วยยูเรเนียม 0.2 กรัม เออร์เบียม 0.0053 กรัม และ ZrH_{1.5} 0.7947 กรัม เมื่อคิดเป็นปริมาตรเนื้อเชื้อเพลิง (V) ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$V = \frac{0.20}{\rho_U} + \frac{0.0053}{\rho_{Er}} + \frac{0.7947}{\rho_{ZrH_{1.5}}} \quad \text{ลบ.ซม.} \quad \text{ข.4}$$

เมื่อ ρ_U = ความหนาแน่นของโลหะยูเรเนียม
 $= 18.9$ กรัม/ลบ.ซม (5)

ρ_{Er} = ความหนาแน่นของเออร์เบียม
 $= 9.066$ กรัม/ลบ.ซม (35)

และ $\rho_{ZrH_{1.5}}$ = ความหนาแน่นของ ZrH_{1.5}
 $= 5.665$ กรัม/ลบ.ซม (5)

แทนค่าความหนาแน่นดังกล่าว ลงในสมการที่ ข.4 ได้

$$V = 0.15145 \quad \text{ลบ.ซม.}$$

ดังนั้นความหนาแน่นของเนื้อเชื้อเพลิง (ρ) มีค่าดังนี้

$$\rho = \frac{1}{0.15145} = 6.6028 \quad \text{กรัม/ลบ.ซม.} \quad \text{ข.5}$$

นำมาหาค่าเอนทัลปีของโลหะยูเรเนียมที่ผสมอยู่ในเนื้อเชื้อเพลิง 20% โดยน้ำหนัก, (H-H₂₅) 20% U, จากสมการที่ ข.3 ดังนี้

$$\begin{aligned} (H-H_{25})_{20\%U} &= (0.6525 \times 10^{-4} T^2 + 0.1094 T - 2.776) \\ &\quad \times \frac{20}{100} \times 6.6028 \\ &= 8.616654 \times 10^{-5} T^2 + 0.144469 T \\ &\quad - 3.66587 \quad \text{จูล/ลบ.ซม.} \quad \text{ข.6} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการที่ ข.2 ค่าเอนทัลปีของเซอร์โคเนียมไฮไดรด์ 79.47% โดยน้ำหนัก มีค่าดังนี้

$$(H-H_{25})_{79.47\% \text{ ZrH}_{1.5}} = 1.97369 \times 10^{-3} \bar{T}^2 + 1.82347 \bar{T} - 53.10338 \text{ จูล/ลบ.ซม.} \quad \text{ข.7}$$

จากสมการที่ ข.6 และ ข.7 ค่าเอนทัลปีของ U-ZrH_{1.5} จึงมีค่าเป็น

$$(H-H_{25})_{20\% \text{ U}-79.47\% \text{ ZrH}_{1.5}} = 2.060 \times 10^{-3} \bar{T}^2 + 1.968 \bar{T} - 56.76925 \text{ วัตต์-วินาที/ลบ.ซม.} \quad \text{ข.8}$$

เมื่อ 1 จูล = 1 วัตต์-วินาที

ค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีเนื่อง จากอุณหภูมิ (5) ดังนั้น ทำการดิฟเฟอเรนเชียล (differentiate) สมการที่ ข.8 เทียบ กับอุณหภูมิ ได้ความจุความร้อนของ U-ZrH_{1.5} ในเนื้อเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร (C'_p) มีค่าดังนี้

$$C'_p = 1.968 + 4.12 \times 10^{-3} \bar{T} \text{ วัตต์-วินาที/ลบ.ซม.-}^\circ\text{ซ} \quad \text{ข.9}$$

คำนวณหาปริมาตรของเนื้อเชื้อเพลิง จากขนาดของแท่งเชื้อเพลิง (ดูในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.3) ได้ปริมาตรของเนื้อเชื้อเพลิง 382.713 ลบ.ซม. จากสมการที่ ข.9 ความจุความร้อนในแท่งเชื้อเพลิง จึงมีค่าเป็น

$$C'_p = 753.179 + 1.577 \bar{T} \text{ วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ-แท่ง} \quad \text{ข.10}$$

จัดรูปสมการที่ ข.10 ใหม่ เพื่อให้สะดวกแก่การปฏิบัติ โดยใช้ค่า C'_p ที่อุณหภูมิ 25^oซ เป็นหลัก ดังนั้น

$$\begin{aligned} C'_p &= 753.179 + 1.577 (\bar{T} - 25^\circ\text{ซ}) + 1.577 \times 25 \\ &= 792.604 + 1.577 (\bar{T} - 25^\circ\text{ซ}) \text{ วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ-แท่ง} \end{aligned}$$

ข.11

กลับมาพิจารณาเออร์เปียมในเนื้อเชื้อเพลิง Kelly และ Hultgren (36) ได้หาค่าความจุความร้อนต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของเออร์เปียมที่อุณหภูมิ 25°C มีค่าเป็น

$$C'_p = 0.16778 \quad \text{วัตต์-วินาที/กรัม-}^{\circ}\text{C}$$

จากความแน่นของเนื้อเชื้อเพลิงล่มการที่ ข.5 ค่าความจุความร้อนของเออร์เปียมในเนื้อเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วยเออร์เปียม 0.53% โดยน้ำหนัก มีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} C'_p &= 0.16778 \times \frac{0.53}{100} \times 6.6028 \\ &= 5.8714 \times 10^{-3} \quad \text{วัตต์-วินาที/ลบ.ซม.-}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

เนื้อเชื้อเพลิงมีปริมาตร 382.713 ลบ.ซม. ดังนั้น

$$\begin{aligned} C'_P &= 5.8714 \times 10^{-3} \times 382.713 \\ &= 2.247 \quad \text{วัตต์-วินาที/}^{\circ}\text{C-แท่ง} \end{aligned} \quad \text{ข.12}$$

กำหนดให้การเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนของเออร์เปียมเนื่องจากอุณหภูมิมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าความจุความร้อนของ $\text{ZrH}_{1.5}$ จากล่มการที่ ข.11 และ ข.12 ค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงแบบ LEU มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} C'_p &= 792.604 + 1.577(\bar{T} - 25^{\circ}\text{C}) + 2.247 \\ &= 794.851 + 1.577(\bar{T} - 25^{\circ}\text{C}) \quad \text{วัตต์-วินาที/}^{\circ}\text{C-แท่ง} \end{aligned} \quad \text{ข.13}$$

จากค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงในแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน ล่มการที่ ข.1 และค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงแบบ LEU ล่มการที่ ข.13 ความจุความร้อนรวมของเนื้อเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (C_p) จึงมีค่าดังนี้

$$\begin{aligned} C_p &= 99 \times [825 + 1.61(\bar{T} - 25^{\circ}\text{C})] + 5 \times [794.851 + 1.577(\bar{T} - 25^{\circ}\text{C})] \\ &= 85649.255 + 167.255(\bar{T} - 25^{\circ}\text{C}) \quad \text{วัตต์-วินาที/}^{\circ}\text{C} \end{aligned} \quad \text{ข.14}$$

เปลี่ยนค่าความจุความร้อนรวมให้อยู่ในรูปอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง

ที่เพิ่มขึ้น จาก

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

$$T = \bar{T} - T_o = aT_m$$

$$\bar{T} = aT_m - T_o$$

$$\text{หรือ} = \frac{\gamma m}{\zeta \gamma} T_m - T_o$$

ดังนั้นสมการที่ ข.14 เขียนได้ดังนี้

$$C_p = 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 T$$

$$= 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 (aT_m)$$

$$\text{หรือ} = 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 \frac{\gamma_m}{\zeta \gamma} T_m$$

วัตต์-วินาที/°ซ ข.15

ค่าเฉลี่ยความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงในถังเชื้อเพลิงแต่ละถัง (\bar{C}_p')

หาได้จากสมการที่ ข.15 หารด้วยจำนวนถังเชื้อเพลิงทั้งหมด 104 ถัง มีค่าดังนี้

$$\bar{C}_p' = 823.55 + 1.61 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 T$$

$$= 823.55 + 1.61 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 (aT_m)$$

$$\text{หรือ} = 823.55 + 1.61 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 \left(\frac{T_m}{\zeta \gamma} T_m \right)$$

วัตต์-วินาที/°ซ-ถัง ข.16

ภาคผนวก ค.

การปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเร็กกูเลติง
(Control rod Calibration)

ค.1 วัตถุประสงค์การปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต

หากกราฟการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต (calibration curve) ของแท่งควบคุมเร็กกูเลติง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของแท่งควบคุมกับค่าเปลี่ยนวิกฤต เพื่อใช้ประมาณการการตั้งแท่งควบคุมเร็กกูเลติง ในการวิจัยหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉับพลัน ให้ได้ค่าเปลี่ยนวิกฤตเพิ่มขึ้นตามที่ต้องการ

ค.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต

นาฬิกาจับเวลา จำนวน 2 เรือน

ค.3 วิธีการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต

ตั้งแท่งควบคุมขึ้นเป็นช่วง ๆ ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะวิกฤตที่กำลังคงที่ 15 วัตต์ ให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตเพิ่มขึ้นครั้งละประมาณ 20 เซนต์ ทำการวัดค่าคงตัว เวลา เล็ดเยรินในช่วงเริ่มต้นการเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งถือว่ามีผลของอุณหภูมิน้อยมาก กำหนดให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตมีค่าคงที่ ขึ้นตอนในการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต มีดังต่อไปนี้

ค.3.1 ตั้งแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งหมดขึ้นที่ระดับใกล้เคียงกัน ยกเว้น

แท่งควบคุมเร็กกูเลติง ยังคงอยู่ที่ระดับต่ำที่สุด คือที่ตำแหน่ง 100 ให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานอยู่ในสภาวะวิกฤตที่กำลัง 15 วัตต์ อ่านระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ได้จากเครื่องบันทึกกราฟระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์เชิงเส้นบนแผงควบคุม ซึ่งปรับสวิตช์ให้มาตราส่วนกำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงสุดที่ 30 วัตต์ นำแหล่งกำเนิดนิวตรอนจากภายนอกออกจากแกนเครื่องปฏิกรณ์

ค.3.2 เดินเครื่องปฏิกรณ์ให้อยู่ในสภาวะสมดุลที่ 15 วัตต์ ประมาณ 3 นาที

ค.3.3 บันทึกตำแหน่งของแท่งควบคุมทั้งหมด ยกเว้น แท่งควบคุมเร็กกูเลติง

ค.3.4 ตั้งแท่งควบคุมเร็กกูเลติงให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตเพิ่มขึ้นประมาณ 20 เซนต์

สำหรับตำแหน่งของแท่งควบคุมเร็กกูเลติงที่ต้องการตั้งขึ้นโดยประมาณ ดูได้จากกราฟการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต ครั้งล่าสุด รูปที่ ค.3.4.1

ค.3.5 เริ่มจับเวลาที่รอก่อนทำการวัดค่าคงตัวเวลาเสถียร

ค.3.6 ปรับลิวิตซ์มาตราส่วนกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีมาตราส่วนกำลังสูงสุดที่ 1 กิโลวัตต์

ค.3.7 รอประมาณ 40 - 60 วินาที เพื่อให้การวัดค่าคงตัวเวลาเสถียรมีความคลาดเคลื่อน 1 - 5% จับเวลาขณะที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า เช่นจากกำลัง 200 วัตต์ ถึง 300 วัตต์ เป็นต้น

ค.3.8 บันทึกเวลาที่รอก่อนเริ่มวัดค่าคงตัวเวลาเสถียร เวลาที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า

ค.3.9 บันทึกตำแหน่งของแท่งควบคุมเร็กกูเลติง

ค.3.10 ปลดแท่งควบคุมทั้งหมดลง ยกเว้นแท่งควบคุมเร็กกูเลติงยังอยู่ในตำแหน่งที่ตั้งขึ้นไป

ค.3.11 เริ่มตั้งแท่งควบคุมที่ปล่อยลงไปขึ้นในระดับที่ใกล้เคียงกัน ให้เครื่องปฏิกรณ์ทำงานที่กำลัง 15 วัตต์ ปรับลิวิตซ์มาตราส่วนกำลังสูงสุดไปที่ 30 วัตต์

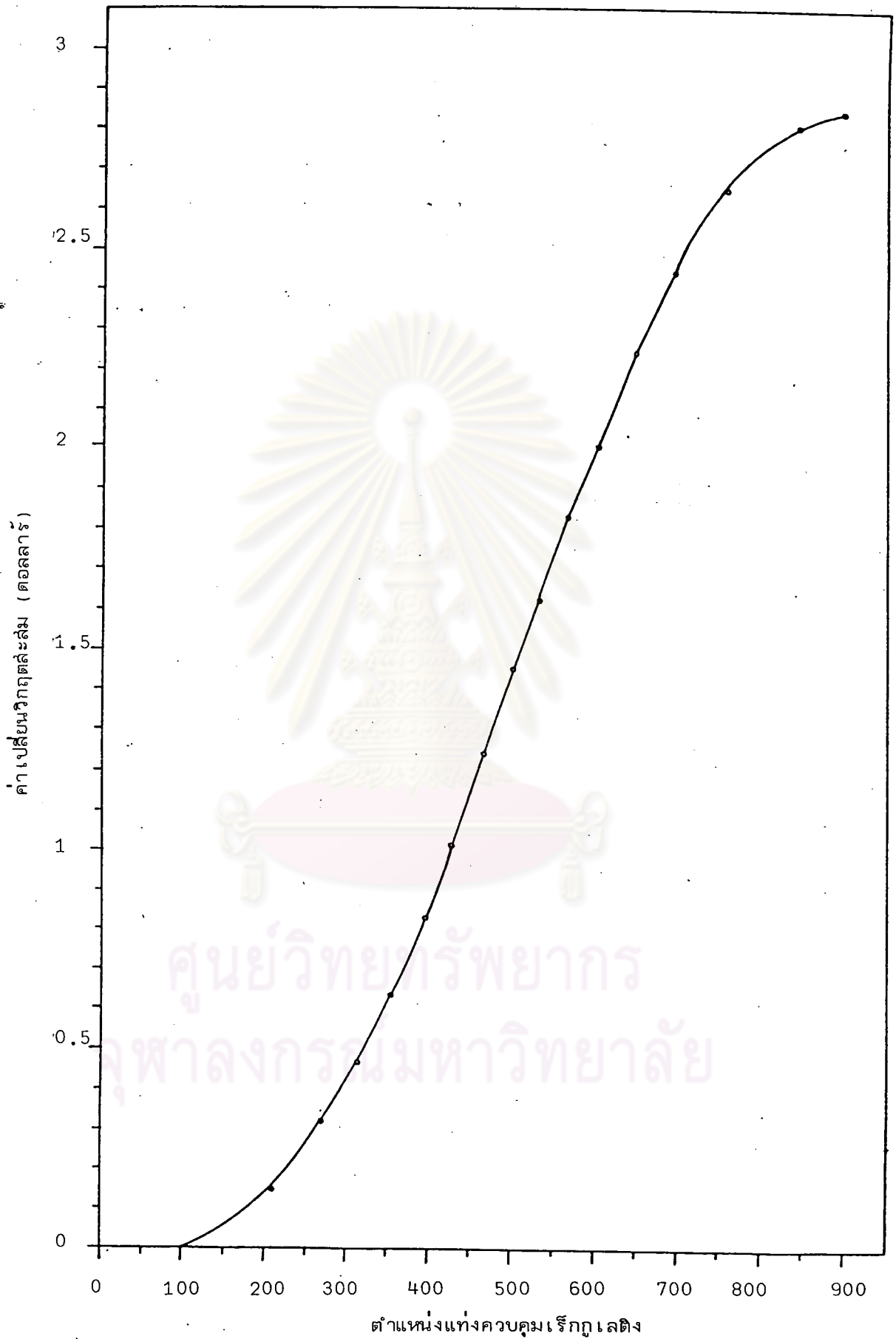
ค.3.12 ทำการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตดังข้อที่ ค.3.2 - ค.3.11 จนกระทั่งแท่งควบคุมเร็กกูเลติงถูกตั้งขึ้นจนสุดแกนเครื่องปฏิกรณ์ที่ตำแหน่ง 900 สำหรับการตั้งแท่งควบคุมเร็กกูเลติงตำแหน่งสุดท้ายนี้ จะมีค่าเปลี่ยนวิกฤตเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เซนติเมตร ควรใช้เวลารอก่อนเริ่มวัดค่าคงตัวเวลาเสถียรประมาณ 60 - 130 วินาที เพื่อให้มีความคลาดเคลื่อน 1-5% ตามที่ต้องการ

ค.3.13 ปลดแท่งควบคุมทั้งหมดลง

ค.3.14 สับเครื่องปฏิกรณ์

ค.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤตให้แก่เครื่องปฏิกรณ์ โดยกำหนดให้ค่าวิกฤตในช่วงเวลาที่



รูปที่ ค.3.4.1 กราฟการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแห่งควบคุมเรีกูเลตง

พิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวตรอนมีค่าคงที่ จากสมการสมมูลยปฏิกรณ์จุด จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยกับค่าเปลี่ยนวิกฤต ที่เรียกว่าสมการในช่วงโมง ดังนั้นในการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเรีกฎเลติง จึงคำนวณค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นเมื่อตั้งแท่งควบคุมเรีกฎเลติงขึ้นแต่ละครั้ง ได้จากค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยที่วัดได้ ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

ค.4.1 คำนวณหาค่าคงตัวเวลาเฉลี่ย (T) เมื่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้นเป็น 1.5 เท่า จากสมการที่ 2.5.2 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ดังนี้

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{P_2}{P_1}} = \frac{\Delta t}{\ln 1.5}$$

เมื่อ Δt = ช่วงเวลาที่กำลังของเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มขึ้น 1.5 เท่า

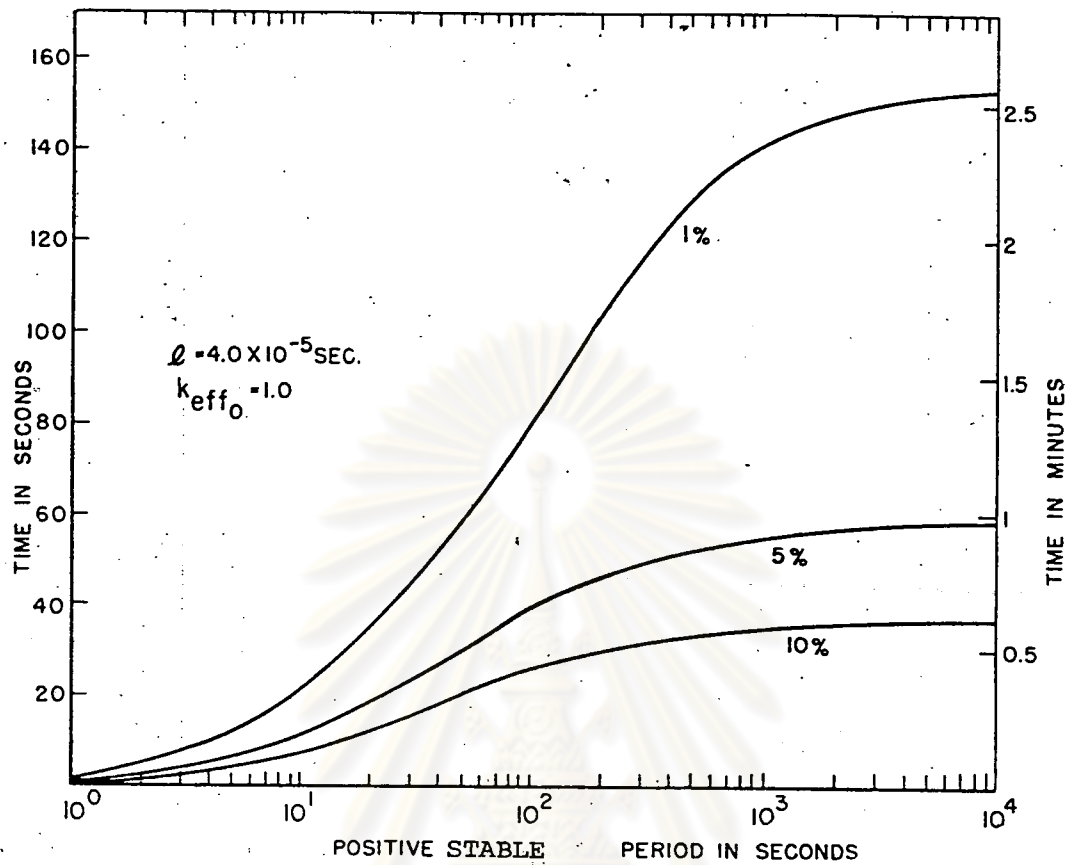
ค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยที่วัดได้ จะมีความแม่นยำเพียงใด ต้องรอให้การเพิ่มขึ้นของระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ มีผลจากนิวตรอนล่า่น้อยมาก ดังนั้นนำเวลาที่รอก่อนวัดค่าคงตัวเวลาเฉลี่ย มาหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนิวตรอนล่าได้จากอ่านค่ากราฟรูปที่ ค.4.1.1 (กราฟรูปที่ 2.5.1) ตัวอย่างในการคำนวณมีดังนี้

ที่แท่งควบคุมเรีกฎเลติงตำแหน่ง 215

$$\Delta t = 21.36 \text{ วินาที}$$

$$\text{ดังนั้น } T = \frac{21.36}{\ln 1.5} = 52.68 \text{ วินาที}^{-1}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปลี่ยนวิกฤตกับเวลาที่รอก่อนเริ่มวัด ค่าคงตัวเวลาเสถียรโดยมีความคลาดเคลื่อน 1% 5% และ 10%

ลากกราฟรูปที่ ค.4.1.1 ที่ค่าคงตัวเวลาเสถียรประมาณ 53 วินาที อ่านค่าความคลาดเคลื่อนกับเวลาที่รอได้ดังนี้

เวลาที่รอ (t_{wi} , วินาที)	ความคลาดเคลื่อน ($y_{i.e.}$ %)
60	1
30.67	5
20.84	10

กำหนดให้ความสัมพันธ์ของความคลาดเคลื่อนกับเวลาที่รอก่อนเริ่มวัดค่าคงตัวเวลา-
เสถียร เป็นสมการเอกซ์โปเนนเชียล ดังต่อไปนี้ (20)

$$y = A e^{Bt_w}$$

เมื่อ y = ความคลาดเคลื่อน (%)

t_w = เวลาที่รอก่อนวัดค่าคงตัวเวลาเสถียร (วินาที)

A, B = ค่าคงที่

คำนวณหาค่า A และ B โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด จากสมการ (37)

$$\ln A = \frac{\sum_i \ln y_i - B \sum_i t_{wi}}{n}$$

$$B = \frac{n \sum_i t_{wi} \ln y_i - \sum_i t_{wi} \sum_i \ln y_i}{n \sum_i t_{wi}^2 - (\sum_i t_{wi})^2}$$

เมื่อ n = จำนวนคู่ของข้อมูล

จากข้อมูลที่อ่านได้จากกราฟ หาค่า A และ B ได้สมการดังนี้

$$y = 31.69 e^{-0.0579 t_w}$$

เมื่อใช้เวลารอ (t_w) = 70.4 วินาที

ดังนั้น

$$\text{มีความคลาดเคลื่อน} = 0.54 \%$$

ค.4.2 นำค่าคงตัวเวลาเสถียร มาคำนวณหาค่าเปลี่ยนวิกฤต (ρ_0) จากสมการใน
ชั่วโมง สัมการที่ 2.5.5 ซึ่งนำมาเขียนใหม่ดังนี้

$$\rho_0 = \frac{\lambda \omega_1}{\beta} \sum_{i=1}^6 \frac{(\beta_i / \beta) \omega_1}{\omega_1 + \lambda_i}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T}$$

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 มีค่า (1,7)

$$\lambda = 39 \times 10^{-6} \quad \text{วินาที}$$

$$\beta = 0.007$$

ค่า β_i/β และ λ_i ของ U-235 ลากปฏิกริยาลูกโซ่ของเทอร์มัลนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.2.1

ตัวอย่างในการคำนวณค่าเปลี่ยนวิกฤต แสดงได้ดังนี้

$$\text{เมื่อ } T = 52.68 \quad \text{วินาที}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T} = 0.0190 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$\rho_0 = \frac{39 \times 10^{-6} \times 0.0190}{0.007} + \frac{0.033 \times 0.0190}{0.0190 + 0.0124}$$

$$+ \frac{0.219 \times 0.0190}{0.0190 + 0.0105} + \frac{0.196 \times 0.0190}{0.0190 + 0.1115}$$

$$+ \frac{0.395 \times 0.0190}{0.0190 + 0.301} + \frac{0.115 \times 0.0190}{0.0190 + 1.138}$$

$$+ \frac{0.042 \times 0.0190}{0.0190 + 3.01}$$

$$= 0.1582 \quad \text{ดอลลาร์}$$

ค.4.3 เขียนกราฟระหว่างค่าเปลี่ยนวิกฤตแต่ละสมกับตำแหน่งของแท่งควบคุมเรีกูเลติงให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตแต่ละสมอยู่ในแนวแกน y และตำแหน่งแท่งควบคุมเรีกูเลติงอยู่ในแนวแกน x

ค.5 สรุปผลการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤต

ค.5.1 ข้อมูลการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเรีกูเลติงและผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ ค.5.1

ค.5.2 การวัดค่าคงตัวเวลาเสถียรนับว่ามีความแม่นยำสูง เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากนิวตรอนล่าอยู่ในช่วง 0.5 - 3 % โดยส่วนมากมีความคลาดเคลื่อนประมาณ 1 %

ตารางที่ ค.5.1 ข้อมูลการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเร็กดูเลดิง

ตำแหน่งแกนเครื่องปฏิกรณ์ Beam Port

แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากภายนอก

วันที่ 30 มกราคม 2527

ครั้งที่	ตำแหน่ง Reg. Rod	ตำแหน่ง Tran. Rod	ตำแหน่ง Seft. Rod	ตำแหน่ง Shim-1. Rod	ตำแหน่ง Shim-2 Rod	เวลาที่รอ (วินาที)	Δt (วินาที)	ค่าคงตัวเวลา เดย์บร(T, วินาที)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ค่าเปลี่ยนวิกฤต (ดอลลาร์)	ค่าเปลี่ยนวิกฤตสะสม (ดอลลาร์)
1	100	690	690	689	689	-	-	-	-	-	0
2	215	690	690	689	689	70.4	21.36	52.68	0.54	0.1582	0.1582
3	291	679	679	680	679	46.5	11.81	29.13	0.79	0.2308	0.3890
4	352	662	662	662	662	44.8	11.38	28.07	0.86	0.2359	0.6249
5	392	647	647	647	647	50.9	15.93	39.29	1.04	0.1921	0.8170
6	425	635	635	635	635	50.9	17.14	42.27	1.15	0.1832	1.0002
7	467	624	624	624	624	44.0	11.35	27.99	0.92	0.2363	1.2365
8	500	610	610	610	610	50.25	16.43	40.52	1.08	0.1883	1.4248
9	535	599	599	599	599	46.4	15.50	38.23	1.30	0.1954	1.6202
10	569	588	588	588	588	49.1	15.61	38.50	1.08	0.1945	1.8147
11	611	578	578	578	578	48.4	12.28	30.29	0.68	0.2255	2.0402
12	641	566	566	566	566	44.45	27.26	67.23	2.94	0.1332	2.1734
13	680	560	560	560	560	50.9	17.24	42.52	1.15	0.1825	2.3559
14	743	549	549	549	549	54.9	18.09	44.62	0.97	0.1768	2.5327
15	835	395	395	395	395	40.5	13.52	33.34	1.54	0.2128	2.7455
16	901	529	529	529	529	129.25	122.34	301.73	0.67	0.0388	2.7843

กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 15 วัตต์

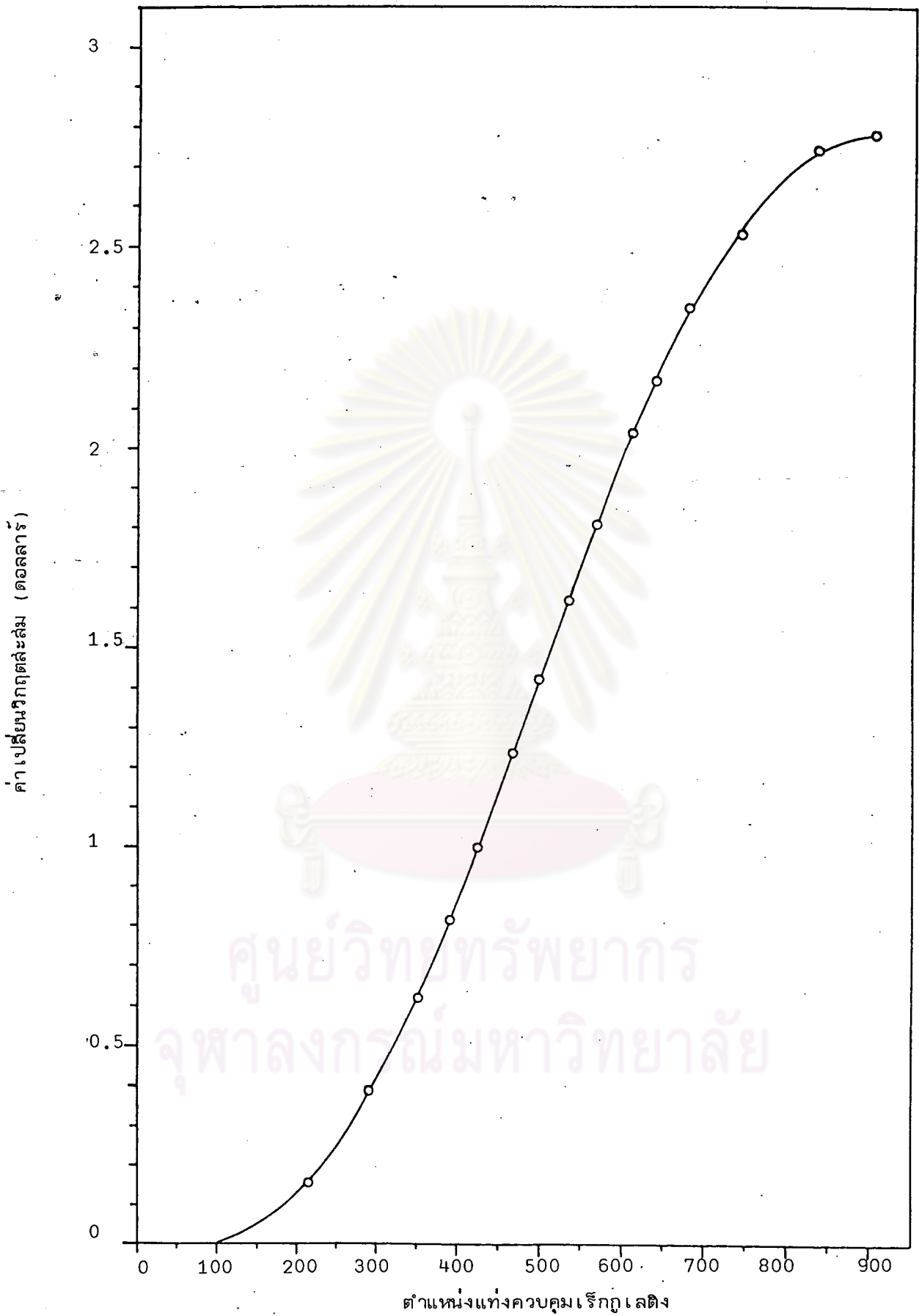
อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 40 °C

อุณหภูมิของน้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ = 31.5 °C

และภายหลังจากวัดค่าคงตัว เวลา เสถียร เสรีจได้อ่านอุทธรณ์ของแท่ง เชื้อเพลิงจากมาตรวัดบนแผงควบคุม พบว่าการวัดค่าคงตัว เวลา เสถียรทุกครั้งอุทธรณ์ของแท่ง เชื้อเพลิงคงที่ อย่างไรก็ตามถ้าต้องการวัดค่าคงตัว เวลา เสถียรให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น จำเป็นต้องใช้เวลา รอานานในกรณีนี้ อาจทำให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นไม่คงที่เนื่องจากผลของอุทธรณ์

ค.5.3 กราฟการเปรียบเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุม เร็กกูเลติงแสดงไว้ในรูปที่ ค.5.1 ซึ่งช่วยให้ผู้ปฏิบัติงานทราบถึงตำแหน่งการตั้งแท่งควบคุม เร็กกูเลติงโดยประมาณ ให้ได้ค่าเปลี่ยนวิกฤตตามต้องการ นอกจากนี้ยังช่วยคาดการณ์การเพิ่มกำลังของ เครื่องปฏิกรณ์ล่วงหน้า ทำให้ปฏิบัติงานได้อย่างมีความปลอดภัย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ค.5.1 กราฟการเปรียบเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเร็กกูเลติง

ภาคผนวก ง.

ข้อมูลจากการวิจัยและตัวอย่างในการคำนวณ

การหาค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน

ข้อมูลจากการวิจัยหาค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน แสดงได้

ดังตารางที่ ง.1 ตัวอย่างในการคำนวณหาค่า γ_m มีดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \zeta = 2.23$$

$$P_e = 10 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$= 10,000 \text{ วัตต์}$$

$$T_{me} = 4^\circ\text{ซ}$$

$$T_o = 38^\circ\text{ซ}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \gamma_m &= \frac{\zeta P_e}{(825 + 1.61 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 T_{me}) 104 T_{me}} \\ &= \frac{2.23 \times 10,000}{(825 + 1.61 (38 - 25) + 1.61 \times 4) 104 \times 4} \\ &= 0.0629 \text{ วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

ให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ระหว่าง 110-250

กิโลวัตต์ เป็นสมการเส้นตรง ดังนี้

$$\gamma_m = a + b P$$

หาค่าของ a และ b โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังสูตร

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลจากการวิจัยหาค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน

31 มกราคม 2527

ครั้งที่	ตำแหน่ง Tran. Rod.	ตำแหน่ง Safe. Rod.	ตำแหน่ง Shim-1 Rod.	ตำแหน่ง Shim-2 Rod.	ตำแหน่ง Reg. Rod.	F_e (กิโลวัตต์)	T_f ($^{\circ}$ ซ)	T_{me} ($^{\circ}$ ซ)
1	602	600	600	599	491	0.015	38	0
2	569	603	574	597	554	10	42	4
3	585	600	580	601	545	30	52	14
4	600	600	580	601	552	50	68	30
5	600	599	580	601	572	70	80	42
6	600	600	580	601	592	90	92	54
7	600	600	601	601	593	110	110	72
8	601	599	600	601	608	130	118	80
9	600	599	600	601	629	150	128	90
10	601	600	601	601	642	170	132	94
11	601	599	601	601	659	190	140	102
12	601	599	601	601	679	210	146	108
13	601	599	601	601	695	230	149	111
14	611	600	601	601	696	250	152	114
15	610	610	610	610	690	270	160	122
16	620	620	620	620	677	290	170	132
17	630	630	630	630	653	300	175	137

อุณหภูมิของน้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์ = 29° ซ

$$b = \frac{n \sum_i P_i Y_{mi} - \sum_i P_i \sum_i Y_{mi}}{n \sum_i P_i^2 - (\sum_i P_i)^2}$$

$$a = \frac{\sum_i Y_{mi} - b \sum_i P_i}{n}$$

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient)

$$= \frac{n \sum_i P_i Y_{mi} - \sum_i P_i \sum_i Y_{mi}}{\left[(n \sum_i P_i^2 - (\sum_i P_i)^2) (n \sum_i Y_{mi}^2 - (\sum_i Y_{mi})^2) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

เมื่อ n = จำนวนคู่ของข้อมูล

แทนค่า P_i และ Y_{mi} เมื่อ $\zeta = 2.23$ ดังตารางต่อไปนี้

P_i (กิโลวัตต์)	Y_{mi} (วินาที ⁻¹)	$P_i Y_{mi}$ (กิโลวัตต์/วินาที)	P_i^2 (กิโลวัตต์)	$Y_i^2 \times 10^{-3}$ (วินาที ⁻²)
110	0.0341	3.751	12,100	1.16281
130	0.0357	4.641	16,900	1.27449
150	0.0361	5.415	22,500	1.30321
170	0.0389	6.613	28,900	1.51321
190	0.0395	7.505	36,100	1.56025
210	0.0409	8.589	44,100	1.67281
230	0.0434	9.982	52,900	1.88356
250	0.0457	11.425	62,500	2.08849
$\sum_i P_i$ = 1440	$\sum_i Y_{mi}$ = 0.3143	$\sum_i P_i Y_{mi}$ = 57.921	$\sum_i P_i^2$ = 276,000	$\sum_i Y_i^2$ = 12.45883

$$n = 8$$

$$b = \frac{8 \times 57.921 - 1440 \times 0.3143}{8 \times 276,000 - (1440)^2} = 8.0179 \times 10^{-5} \text{ (วินาที-กิโลวัตต์)}^{-1}$$

$$a = \frac{0.3143 - 9.0179 \times 10^{-5} \times 1440}{8} = 0.0249 \text{ วินาที}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} &= \frac{8 \times 57.921 - 1440 \times 0.3143}{\left[(8 \times 276,000 - (1440)^2) (8 \times 12.45883 \times 10^{-3} - (0.3143)^2) \right]^{1/2}} \\ &= 0.9874 \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น } \gamma_m = 0.0249 + 8.0179 \times 10^{-5} P$$

คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกราฟเส้นตรงจากสูตร

$$S_{Y_m P} = \left[\frac{\sum_i (\gamma_{mi} - \hat{\gamma}_{mi})^2}{n - 2} \right]^{1/2}$$

เมื่อ $\hat{\gamma}_{mi}$ = ค่า γ_m ตัวที่ i ได้จากการคำนวณตามสมการ

γ_{mi} = ค่า γ_m ตัวที่ i ได้จากการวิจัย

n = จำนวนคู่ของข้อมูล

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปผลการคำนวณได้ดังตารางต่อไปนี้

P_i (กิโลวัตต์)	Y_{mi} (วินาที ⁻¹)	\hat{Y}_{mi} (วินาที ⁻¹)	$Y_{mi} - \hat{Y}_{mi}$ (วินาที ⁻¹)	$(Y_{mi} - \hat{Y}_{mi})^2$ (วินาที ⁻²) $\times 10^{-7}$
110	0.0341	0.0337	0.0004	1.6
130	0.0357	0.0353	0.0004	1.6
150	0.0361	0.0369	-0.0008	6.4
170	0.0389	0.0385	0.0004	1.6
190	0.0395	0.0401	-0.0006	3.6
210	0.0409	0.0417	-0.0008	6.4
230	0.0434	0.0433	-0.0001	0.1
250	0.0457	0.0449	0.0008	6.4
n = 8				<u><u>27.7 $\times 10^{-7}$</u></u>

$$S_{Y_m P} = \left[\frac{27.7 \times 10^{-7}}{(8 - 2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 0.0007 \text{ วินาที}^{-1}$$

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y_m กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ย่านที่มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้น เมื่อ $\zeta = 2.25$ เขียนสมการได้ดังนี้

$$Y_m \pm S_{Y_m P} = 0.0249 + 8.0179 \times 10^{-5} P \pm 0.007 \text{ วินาที}^{-1}$$

เมื่อ $P =$ กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)

สำหรับตัวอย่างในการคำนวณค่า γ มีดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } P_e &= 10 \text{ กิโลวัตต์} \\ &= 10,000 \text{ วัตต์} \\ &= 4^\circ\text{ซ} \\ &= 38^\circ\text{ซ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \gamma &= \frac{P_e}{823.55 + 1.61(T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61(0.62T_{me}) + 104 \times 0.62T_{me}} \\ &= \frac{10,000}{(823.55 + 1.61(38 - 25^\circ\text{ซ}) + 0.9982 \times 4) \times 64.48 \times 4} \\ &= 0.0457 \text{ วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

หาสมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการ เช่นเดียวกับการคำนวณค่า γ_m

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

ข้อมูลจากการวิจัยและตัวอย่างในการคำนวณ
การหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบลัมพลัน

จ.1.1 ข้อมูลจากการวิจัยแสดงไว้ดังตารางที่ จ.1.1 - จ.1.2

การคำนวณค่าเปลี่ยนวิกฤตและเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของค่าคงตัว เวลา เสถียร
คำนวณเช่นเดียวกับภาคผนวก ค.

คำนวณหาค่า λ ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเปลี่ยนวิกฤต ดังตัวอย่างต่อไปนี้

เมื่อ $T = 7.90$ วินาที

$$\rho_o = 28.92 \text{ เซนต์}$$

ดังนั้น $\omega_i = \frac{1}{T} = \frac{1}{7.90}$

$$\lambda = \omega_i \frac{(100 - \rho_o)}{\rho_o} = \frac{1}{7.90} \frac{(100 - 28.92)}{28.92}$$

$$= 0.1261 \text{ วินาที}^{-1}$$

ได้ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ λ (λ_{av}) ดังนี้

$$\lambda_{av} = \frac{0.0767 + \omega(100 - \rho_o)/\rho_o}{2}$$

$$= \frac{0.0767 + 0.1261}{2} = 0.1014 \text{ วินาที}^{-1}$$

ตารางที่ จ.1.1 ข้อมูลค่าเปลี่ยนวิกฤตที่ใช้ในการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม

ตำแหน่งแกนเครื่องปฏิกรณ์		Beam Port		แหล่งกำเนิดนิวตรอนจากภายนอก			วันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2527			
ครั้งที่	ตำแหน่ง Reg. Rod.	ตำแหน่ง Tran. Rod.	ตำแหน่ง Safe. Rod.	ตำแหน่ง Shim-1 Rod.	ตำแหน่ง Shim-2 Rod.	เวลาที่รอ (วินาที)	Δt (วินาที)	ค่าคงตัว เวลาเสถียร (T, วินาที)	ความคลาด เคลื่อน (%)	ค่าเปลี่ยนวิกฤต (เซนต์)
1	258	692	691	688	670	33.5	10.92	26.93	1.80	24.17
2	271	692	690	690	665	31.0	7.90	19.48	1.47	28.92
3	276	691	690	690	685	19.5	6.37	15.71	2.66	32.31
4	294	691	690	691	687	16.25	4.14	10.21	2.05	39.59
5	303	691	690	680	684	23.5	5.12	12.63	1.27	35.93
6	306	690	690	691	691	12.0	3.35	8.26	3.20	43.35
7	314	690	691	691	671	12.75	3.10	7.65	2.11	44.75
8	331	690	690	691	680	9.0	2.27	5.60	2.56	50.46
9	341	691	691	692	673	7.25	1.63	4.02	2.73	56.58

กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 15 วัตต์

อุณหภูมิของน้ำในบ่อ เครื่องปฏิกรณ์ก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 26°C

ตารางที่ จ.1.2 ข้อมูลการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม

ρ_o (เซนต์)	\hat{P} (กิโลวัตต์)	\hat{T}_F ($^{\circ}\text{ซ}$)	T_o ($^{\circ}\text{ซ}$)	\hat{T}_m ($T_F - T_o$, $^{\circ}\text{ซ}$)	λ (วินาที $^{-1}$)	$\lambda = \frac{\omega_1(100 - \rho_o)}{\rho_o}$ (วินาที $^{-1}$)	ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ λ (λ_{av}) (วินาที $^{-1}$)
24.17	-	-	36	-			
28.92	63	66	36	30.0	0.0767	0.1261	0.1014
32.31	72	67.2	36	31.2	0.0767	0.1334	0.1051
35.93	91.8	67.2	35	32.2	0.0767	0.1412	0.1090
39.59	106.2	68.4	35	33.4	0.0767	0.1494	0.1131
43.35	127.8	66	32.4	33.6	0.0767	0.1582	0.1175
44.75	130.2	69.6	35	34.6	0.0767	0.1615	0.1191
50.46	177.6	67.2	33.6	33.6	0.0767	0.1754	0.1261
56.58	223.8	56.4	33.6	22.8	0.0767	0.1909	0.1338

กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 15 วัตต์

อุณหภูมิของน้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์เพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต = 26 $^{\circ}\text{ซ}$



จ.2 คำนวณหาค่า γ_m และ K จากการประมาณค่า γ ดังนี้

$$\text{เมื่อ } \zeta = 2.23$$

$$\rho_o = 28.92, \text{ เซนต์}$$

$$\hat{P} = 63^\circ \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\hat{T}_m = 30^\circ$$

$$T_o = 36^\circ$$

จากสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m กับระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ เมื่อ $\zeta = 2.23$ ดังสมการที่ 5.1.2.3.1

$$\gamma_m = 0.0249 + 9.0179 \times 10^{-5} P \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$S_{\gamma_m P} = 0.0007 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

แทนค่า \hat{P} ได้

$$\begin{aligned} \gamma_m \pm S_{\gamma_m P} &= 0.0249 + 8.0179 \times 10^{-5} \times 63 \pm 0.0007 \\ &= 0.0300 \pm 0.0007 \quad \text{วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

คำนวณหาค่า C_p เมื่อเครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด จากสมการ

$$\begin{aligned} C_p &= 85649.255 + 167.255(T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255\left(\frac{1}{\zeta} \hat{T}_m\right) \\ &= 85649.255 + 167.255(36 - 25) + 167.255\left(\frac{1}{2.23} \times 30\right) \\ &= 89739.12726 \quad \text{วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } K &= \frac{1}{C_p} \\ &= 1.1143 \times 10^{-5} \quad \text{}^\circ\text{ซ/วัตต์-วินาที} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันคำนวณหาค่า γ และ K จากการประมาณค่า a ได้ดังนี้ (จากสมการที่ 5.1.2.3.4)

$$\gamma = 0.0183 + 6.625 \times 10^{-5} P \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$S_{\gamma P} = 0.0005 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \gamma \pm S_{\gamma P} &= 0.0183 + 6.625 \times 10^{-5} \times 63 \pm 0.0005 \\ &= 0.0225 \pm 0.0005 \quad \text{วินาที}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{และ } C_p = 85649.255 + 167.255(T_o - 25^{\circ}\text{ซ}) + 167.255(a \frac{T_m}{m})$$

$$\text{เมื่อ } a = 0.62$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } C_p &= 85649.255 + 167.255(36 - 25^{\circ}\text{ซ}) + 167.255(0.62 \times 30) \\ &= 90600.003 \quad \text{วัตต์-วินาที/}^{\circ}\text{ซ} \end{aligned}$$

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

$$= 1.1038 \times 10^{-5} \quad \text{ซ/วัตต์-วินาที}$$

ผลการคำนวณแสดงไว้ในตารางที่ จ.2.2

จ.3 คำนวณหาค่า x และ y จากสมการ

$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x \quad \text{จ.3.1}$$

$$\text{เมื่อ } x = \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \left[\frac{\frac{KP}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{2} \frac{\hat{T}_m}{\zeta}}{\left[\frac{KP}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right]} \right] \quad \text{จ.3.2}$$

$$y = \frac{\rho_o}{\zeta} \left[\frac{KP}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right] \quad \text{จ.3.3}$$

ตารางที่ จ.2.2 ข้อมูลค่า γ_m , γ และ K จากการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม

ρ_o (เซนต์)	จากการประมาณค่า γ เมื่อ $\zeta=2.23$		จากการประมาณค่า γ เมื่อ $\zeta=1.99$		จากการประมาณค่า γ เมื่อ $\zeta=1.67$	
	$\gamma_m \pm S_{\gamma_m P}$ (วินาที ⁻¹)	K (°/วัตต์-วินาที)	$\gamma_m \pm S_{\gamma_m P}$ (วินาที ⁻¹)	K (°/วัตต์-วินาที)	$\gamma_m \pm S_{\gamma_m P}$ (วินาที ⁻¹)	K (°/วัตต์-วินาที)
24.17	-	-	-	-	-	-
28.92	0.0300 ± 0.0007	1.1143 x 10 ⁻⁵	0.0267 ± 0.0006	1.1110 x 10 ⁻⁵	0.0224 ± 0.0005	1.1051 x 10 ⁻⁵
32.31	0.0307 ± 0.0007	1.1132 x 10 ⁻⁵	0.0274 ± 0.0006	1.1097 x 10 ⁻⁵	0.0299 ± 0.0005	1.1036 x 10 ⁻⁵
35.93	0.0323 ± 0.0007	1.1144 x 10 ⁻⁵	0.0288 ± 0.0006	1.1108 x 10 ⁻⁵	0.0241 ± 0.0005	1.1044 x 10 ⁻⁵
39.59	0.0334 ± 0.0007	1.1133 x 10 ⁻⁵	0.0298 ± 0.0006	1.1095 x 10 ⁻⁵	0.0250 ± 0.0005	1.1029 x 10 ⁻⁵
43.35	0.0351 ± 0.0007	1.1185 x 10 ⁻⁵	0.0314 ± 0.0006	1.1147 x 10 ⁻⁵	0.0263 ± 0.0005	1.1080 x 10 ⁻⁵
44.35	0.0353 ± 0.0007	1.1121 x 10 ⁻⁵	0.0315 ± 0.0006	1.1083 x 10 ⁻⁵	0.0264 ± 0.0005	1.1015 x 10 ⁻⁵
50.46	0.0391 ± 0.0007	1.1160 x 10 ⁻⁵	0.0344 ± 0.0006	1.1122 x 10 ⁻⁵	0.0293 ± 0.0005	1.1055 x 10 ⁻⁵
56.58	0.0428 ± 0.0007	1.1262 x 10 ⁻⁵	0.0382 ± 0.0006	1.1235 x 10 ⁻⁵	0.0320 ± 0.0005	1.1189 x 10 ⁻⁵

ตารางที่ จ.2.2 : (ต่อ)

P_0 (เซนต์)	จากการประมาณค่า $a = 0.62$	
	$\gamma \pm S_{\gamma P}$ (วินาที ⁻¹)	K (⁰ ช/วัตต์-วินาที)
24.17	-	-
28.92	0.0225 ± 0.0005	1.1038×10^{-5}
32.31	0.0231 ± 0.0005	1.1022×10^{-5}
35.93	0.0244 ± 0.0005	1.1030×10^{-5}
39.59	0.0254 ± 0.0005	1.1015×10^{-5}
43.35	0.0268 ± 0.0005	1.1065×10^{-5}
44.75	0.0270 ± 0.0005	1.1000×10^{-5}
50.46	0.0301 ± 0.0005	1.1041×10^{-5}
56.58	0.0332 ± 0.0005	1.1179×10^{-5}

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างในการคำนวณมีดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \zeta = 2.23$$

$$\rho_0 = 28.92 \text{ เซนติ}$$

$$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$$

$$\hat{P} = 63 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$= 63,000 \text{ วัตต์}$$

$$\hat{T}_m = 30^\circ \text{ซ}$$

$$\gamma_m = 0.0300 \pm 0.0007 \text{ วินาที}^{-1}$$

$$K = 1.1143 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{ซ/วัตต์-วินาที}$$

เนื่องจากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ γ_m ทำให้ค่า x และ y ที่ได้จากการคำนวณ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเกิดขึ้น ให้

$$S_x = \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ } x$$

$$S_y = \text{ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ } y$$

เมื่อแทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ จ.3.2 ได้

$$x \pm S_x = \frac{(30)}{2.23} \frac{(10.6172 \pm 0.12278)}{(17.3436 \pm 0.12278)}$$

คำนวณหาค่าผลหารของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจากสูตร (33)

$$\frac{A \pm S_A}{B \pm S_B} = \frac{A}{B} \pm \left[\left(\frac{A}{B} \right)^2 \left(\frac{S_A^2}{A^2} + \frac{S_B^2}{B^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } x \pm S_x &= \frac{30}{2.23} (0.61217 \pm 0.0083) \\ &= 8.24 \pm 0.112 \text{ }^\circ\text{ซ} \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกันได้

$$y \pm S_y = \frac{18.92}{(17.3436 \pm 0.12278)}$$

$$= 1.67 \pm 0.012 \quad \text{เซนต์/}^{\circ}\text{ซ}$$

ผลการคำนวณค่า x และ y แสดงไว้ในตารางที่ จ.3..1

คำนวณหาค่า α_1 และ α_2 จากข้อมูลค่า x และ y ที่ค่าเปลี่ยนวิกฤต $28.92 - 50.64$ เซนต์ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด เช่นเดียวกับการคำนวณในภาคผนวก ง. ตัวอย่างในการคำนวณมีดังต่อไปนี้

$$\text{เมื่อ } \zeta = 2.23 \quad \text{และ } \lambda = 0.0767 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

x_i ($^{\circ}\text{ซ}$)	y_i (เซนต์/ $^{\circ}\text{ซ}$)	$x_i y_i$ (เซนต์)	x_i^2 ($^{\circ}\text{ซ}^2$)	y_i^2 (เซนต์/ $^{\circ}\text{ซ}$) ²
8.24	1.67	13.7608	67.9876	2.7889
8.80	1.71	15.0480	77.4400	2.9241
9.63	1.66	15.9858	92.7369	2.7556
10.28	1.66	17.0648	105.6784	2.7556
10.83	1.62	17.5446	117.2889	2.6244
10.10	1.64	16.5640	102.0100	2.6896
11.65	1.52	17.7080	135.7225	2.3104
$\Sigma_i x_i$	$\Sigma_i y_i$	$\Sigma_i x_i y_i$	$\Sigma_i x_i^2$	$\Sigma_i y_i^2$
=69.53	=11.48	=113.676	=698.7743	=18.8486

$$n = 7$$

$$\alpha_2 = \frac{n \Sigma_i x_i y_i - \Sigma_i x_i \Sigma_i y_i}{n \Sigma_i x_i^2 - (\Sigma_i x_i)^2}$$

$$\alpha_2 = \frac{7 \times 113.676 - 69.53 \times 11.48}{7 \times 698.7743 - (18.8486)^2}$$

$$= -0.0434 \quad \text{เซนต/}^\circ\text{ซ}$$

$$\alpha_1 = \frac{\sum_i y_i - \alpha_2 \sum_i x_i}{7}$$

$$= 2.07 \quad \text{เซนต/}^\circ\text{ซ}$$

ดังนั้น $y = 2.07 - 0.0434 x$ เซนต/°ซ

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = \frac{n \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{\left[(n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2) (n \sum_i y_i^2 - (\sum_i y_i)^2) \right]^{1/2}}$$

$$= -0.8461$$

หาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นกราฟ (S_{xy}) ดังตารางต่อไปนี้

x_i (°ซ)	y_i (เซนต/°ซ)	\hat{y}_i (เซนต/°ซ)	$y_i - \hat{y}_i$ (เซนต/°ซ)	$(y_i - \hat{y}_i)^2$ (เซนต/°ซ) ²
8.24	1.67	1.71	-0.04	1.6×10^{-3}
8.80	1.71	1.69	0.02	0.4×10^{-3}
9.63	1.66	1.65	0.01	0.1×10^{-3}
10.28	1.66	1.62	0.04	1.6×10^{-3}
10.83	1.62	1.60	0.02	0.4×10^{-3}
10.10	1.64	1.63	0.01	0.1×10^{-3}
11.65	1.52	1.57	-0.05	2.5×10^{-3}
$n = 7$				<u><u>6.7×10^{-3}</u></u>

เมื่อ \hat{y}_i = ค่า y ตัวที่ i ได้จากการคำนวณตามสมการเส้นตรง

$$\text{ดังนั้น } s_{xy} = \left[\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} \right]^{1/2}$$

$$= 0.037 \quad \text{เซนต์/°ซ}$$

คำนวณหาค่า x' และ y' ในทำนองเดียวกับการคำนวณหาค่า x และ y จากสมการ

$$y' = \alpha_1 + \alpha_2 x'$$

$$\text{เมื่อ } x' = (a \hat{T}_m) \left[\frac{\frac{KP}{\lambda} + \left(\frac{1-\gamma}{2}\right) a \hat{T}_m}{\left[\frac{KP}{\lambda} + (1-\gamma) a \hat{T}_m \right]} \right]$$

$$y' = \frac{\rho_o}{\lambda} \left[\frac{KP}{\lambda} + (1-\gamma) a \hat{T}_m \right]$$

$$a = 0.62$$

ผลการคำนวณแสดงไว้ดังตารางที่ จ.3.2 จากข้อมูล x' และ y' ที่ค่าเปลี่ยนวิกฤต 28.92-50.46 เซนต์ คำนวณหาค่า α_1 และ α_2 โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานได้เช่นกัน

จ.4 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน จากค่า α_1 และ α_2 ดังตัวอย่างดังนี้

$$\text{เมื่อ } \alpha_1 = 2.07 \quad \text{เซนต์/°ซ}$$

$$\alpha_2 = -0.0434 \quad \text{เซนต์/°ซ}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{prompt}} &= -\left[\alpha_1 + \alpha_2 (\hat{T} - T_o) \right] \\ &= -\left[2.07 - 0.0434 (\hat{T} - T_o) \right] \quad \text{เซนต์/°ซ} \end{aligned}$$

$$\text{กำหนดให้ } T_o = 35^{\circ}\text{ซ}$$

$$\bar{T} = 40^{\circ}\text{ซ}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \alpha_{\text{prompt}} &= -\left[2.07 - 0.0434 (40-35) \right] \\ &= -1.85 \quad \text{เซนต์/°ซ} \end{aligned}$$

ตารางที่ จ.3.1 ค่า x และ y จากการประมาณค่า

$$\zeta = 2.23$$

ρ_0 (เซนต์)	$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda = \omega_1(100-\rho_0)/\rho_0 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda_{av} \text{ (วินาที}^{-1}\text{)}$	
	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$
24.17	-	-	-	-	-	-
28.92	8.24 ± 0.112	1.67 ± 0.012	7.73 ± 0.073	1.83 ± 0.009	7.93 ± 0.089	1.76 ± 0.010
32.31	8.80 ± 0.112	1.71 ± 0.012	8.16 ± 0.071	1.93 ± 0.008	8.41 ± 0.087	1.84 ± 0.010
35.93	9.63 ± 0.105	1.66 ± 0.010	8.77 ± 0.066	1.95 ± 0.008	9.11 ± 0.081	1.84 ± 0.009
39.59	10.28 ± 0.104	1.66 ± 0.009	9.24 ± 0.063	2.03 ± 0.007	9.64 ± 0.079	1.88 ± 0.008
43.35	10.83 ± 0.095	1.62 ± 0.008	9.60 ± 0.057	2.09 ± 0.007	10.07 ± 0.072	1.91 ± 0.008
44.75	10.10 ± 0.099	1.64 ± 0.009	9.81 ± 0.059	2.12 ± 0.007	10.30 ± 0.074	1.94 ± 0.008
50.46	11.65 ± 0.079	1.52 ± 0.006	10.13 ± 0.047	2.19 ± 0.006	10.72 ± 0.059	1.93 ± 0.006
56.58	8.83 ± 0.034	1.51 ± 0.004	7.75 ± 0.022	2.67 ± 0.005	8.20 ± 0.027	2.19 ± 0.005

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ. 3.1 (ต่อ)

$$\zeta = 1.99$$

ρ_o (เซนต์)	$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda = \omega_1(100-\rho_o)/\rho_o \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda_{av} \text{ (วินาที}^{-1}\text{)}$	
	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$
24.17	-	-	-	-	-	-
28.92	9.08 ± 0.110	1.53 ± 0.010	8.56 ± 0.071	1.66 ± 0.007	8.77 ± 0.086	1.61 ± 0.008
32.31	9.68 ± 0.110	1.58 ± 0.009	9.01 ± 0.069	1.75 ± 0.007	9.27 ± 0.085	1.68 ± 0.008
35.93	10.59 ± 0.105	1.54 ± 0.008	9.67 ± 0.064	1.79 ± 0.006	10.02 ± 0.080	1.8 ± 0.007
39.59	11.29 ± 0.104	1.54 ± 0.008	10.18 ± 0.062	1.86 ± 0.006	10.60 ± 0.78	1.74 ± 0.007
43.35	11.89 ± 0.096	1.52 ± 0.007	10.56 ± 0.057	1.92 ± 0.006	11.07 ± 0.071	1.77 ± 0.006
44.75	12.19 ± 0.099	1.54 ± 0.007	10.80 ± 0.058	1.95 ± 0.006	11.32 ± 0.073	1.80 ± 0.006
50.46	12.81 ± 0.080	1.44 ± 0.006	11.13 ± 0.047	2.04 ± 0.005	11.77 ± 0.059	1.81 ± 0.005
56.58	9.75 ± 0.035	1.46 ± 0.003	8.59 ± 0.022	2.47 ± 0.004	9.02 ± 0.028	2.10 ± 0.004

ตารางที่ จ. 3.1 (ต่อ)

$\zeta = 1.67$

ρ_o (เซนต์)	$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda = \omega_1(100-\rho_o)/\rho_o \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda_{av} \text{ (วินาที}^{-1}\text{)}$	
	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$
24.17	-	-	-	-	-	-
28.92	10.56 \pm 0.112	1.33 \pm 0.007	10.01 \pm 0.072	1.43 \pm 0.005	10.23 \pm 0.088	1.39 \pm 0.006
32.31	11.24 \pm 0.113	1.38 \pm 0.007	10.54 \pm 0.070	1.51 \pm 0.005	10.81 \pm 0.087	1.46 \pm 0.006
35.93	12.25 \pm 0.109	1.36 \pm 0.006	11.26 \pm 0.066	1.55 \pm 0.005	11.64 \pm 0.082	1.48 \pm 0.005
39.59	13.04 \pm 0.108	1.38 \pm 0.006	11.83 \pm 0.064	1.62 \pm 0.005	12.29 \pm 0.080	1.53 \pm 0.005
43.35	13.73 \pm 0.101	1.37 \pm 0.006	12.25 \pm 0.058	1.69 \pm 0.004	12.80 \pm 0.074	1.57 \pm 0.005
44.75	14.07 \pm 0.105	1.39 \pm 0.006	12.53 \pm 0.059	1.71 \pm 0.004	13.10 \pm 0.076	1.59 \pm 0.005
50.46	14.80 \pm 0.086	1.33 \pm 0.005	12.88 \pm 0.049	1.81 \pm 0.004	13.59 \pm 0.062	1.63 \pm 0.004
56.58	11.36 \pm 0.039	1.39 \pm 0.003	9.85 \pm 0.025	2.31 \pm 0.003	10.45 \pm 0.030	1.44 \pm 0.003

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.3.2 ค่า x' และ y' จากการประมาณค่า a

$a = 0.62$

ρ_0	$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda = \omega_1 (100 - \rho_0) / \rho_0 \text{ วินาที}^{-1}$		$\lambda_{av} \text{ (วินาที}^{-1}\text{)}$	
	(เซนต์) $x' \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y' \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x' \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y' \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$	$x' \pm S_x \text{ (}^\circ\text{ช)}$	$y' \pm S_y \text{ (เซนต์/}^\circ\text{ช)}$
24.17	-	-	-	-	-	-
28.92	10.81 \pm 0.117	1.30 \pm 0.007	10.28 \pm 0.074	1.39 \pm 0.005	10.49 \pm 0.092	1.36 \pm 0.006
32.31	11.50 \pm 0.119	1.35 \pm 0.007	10.82 \pm 0.073	1.47 \pm 0.005	11.08 \pm 0.091	1.43 \pm 0.006
35.93	12.53 \pm 0.114	1.34 \pm 0.007	11.55 \pm 0.069	1.52 \pm 0.005	11.92 \pm 0.086	1.45 \pm 0.005
39.59	13.34 \pm 0.114	1.36 \pm 0.006	12.14 \pm 0.066	1.58 \pm 0.004	12.59 \pm 0.084	1.50 \pm 0.005
43.35	14.05 \pm 0.107	1.36 \pm 0.006	12.56 \pm 0.061	1.65 \pm 0.004	13.11 \pm 0.078	1.54 \pm 0.005
44.75	14.39 \pm 0.111	1.37 \pm 0.006	12.85 \pm 0.062	1.67 \pm 0.004	13.41 \pm 0.080	1.56 \pm 0.005
50.46	15.16 \pm 0.092	1.32 \pm 0.005	13.20 \pm 0.052	1.77 \pm 0.004	13.92 \pm 0.066	1.61 \pm 0.004
56.58	11.68 \pm 0.042	1.39 \pm 0.003	10.10 \pm 0.026	2.28 \pm 0.003	10.73 \pm 0.032	1.96 \pm 0.003

จ.5 คำนวณค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด ดังตัวอย่างต่อไปนี้

$$\text{ที่ } \rho_0 = 28.92 \text{ เซนต์}$$

$$\hat{T}_f = 66^\circ\text{ซ}$$

$$T_0 = 36^\circ\text{ซ}$$

$$\hat{T}_m = 30^\circ\text{ซ}$$

ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน จากการประมาณค่า $a = 0.62$ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha_{\text{prompt}} = -[1.26 + 0.0064 (\bar{T} - T_0)]$$

$$\frac{\hat{T} - T_0}{\hat{T}_f - T_0} = \frac{\hat{T} - T_0}{\hat{T}_m} = a$$

$$\hat{T} = a \hat{T}_m + T_0$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \hat{T} &= 0.62 \times 30 + 36 \\ &= 54.6^\circ\text{ซ} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{prompt}} &= -[1.26 + 0.0064 (54.6 - 36)] \\ &= -1.38 \text{ เซนต์/}^\circ\text{ซ} \end{aligned}$$

หรือคำนวณจากอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ในแท่งเชื้อเพลิง B1 ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{prompt}} &= -[1.26 + 0.0064 (a(T_f - T_0))] \\ &= -[1.26 + 0.0064 \times 0.62 (T_f - T_0)] \\ &= -[1.26 + 0.004 (T_f - T_0)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \alpha_{\text{prompt}} &= -[1.26 + 0.004 (66-36)] \\ &= -1.38 \quad \text{เซนต์/}^{\circ}\text{ซ} \end{aligned}$$

เมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้น้อยกว่า T_o ($T_f \cong T$) ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัม เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\alpha_{\text{prompt}} = -[1.26 + 0.0064 (T_f - T_o)]$$

$$\text{เมื่อ } T_o = 36^{\circ}\text{ซ}$$

$$T_f = 26^{\circ}\text{ซ}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{prompt}} &= -[1.26 + 0.0064 (26-36)] \\ &= -1.20 \quad \text{เซนต์/}^{\circ}\text{ซ} \end{aligned}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ประวัติผู้เขียน

นายภาณุ อุทโยภาศ. เกิดเมื่อวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2501 กรุงเทพมหานคร สำเร็จ
 ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2521 ปัจจุบัน
 รับราชการในตำแหน่งนักฟิสิกส์รังสี 4. โครงการเตรียมการและควบคุมโรงไฟฟ้าปรมาณู
 สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและการพลังงาน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย