# บทที่ 5

## ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ

จากการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์โดยใช้ทฤษฎีต่างๆ 3 ทฤษฎี และจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับค่าที่ได้จากการทดลอง และกับค่าที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณไว้โดยใช้ moments method ประกอบกับคำวิจารณ์ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 4 พอที่จะสรุปได้ว่า

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำได้ดี พอสมควร ช่วงระยะห่างจากตัวกำเนิดประมาณ 10–20 ซ.ม. ผลการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์โดยใช้ทฤษฎีนี้ให้ผลดี สามารถนำไปใช้หาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่งต่างๆ ดังกล่าวจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุด แบบอเมอริเซียม–เบอริลเลียมในตัวกลางสำหรับลดความเร็วใดๆก็ได้ที่มีภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนเท่ากับหรือน้อยกว่าของน้ำ

ทฤษฎีเฟอร์มิเอจ เป็นทฤษฎีที่ใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำไม่ได้ผล เพราะจากผลการคำนวณปรากฏว่ามีค่าต่างจากค่าที่ใช้เปรียบเทียบมากมาย ทั้งนี้เนื่องมาจากทฤษฎีเฟอร์มิเอจเป็นทฤษฎีที่ใช้ได้ดีสำหรับอธิบายการกระจายของนิวตรอนในตัวกลางที่มี เลขมวล สูงๆ สำหรับตัวกลางที่มี เลขมวล น้อยๆเช่นน้ำทฤษฎีนี้ใช้ไม่ได้ผล แต่ที่ได้นำมาลองใช้ก็เพื่อจะดูว่า อาจจะมีที่บางระยะที่ทฤษฎีนี้ใช้ได้ผล จากผลการคำนวณปรากฏว่าทฤษฎีนี้ใช้ไม่ได้ผลไม่ว่าจะใกล้หรือไกลจากตัวกำเนิดเพียงใด

ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรกพอที่จะใช้อธิบายการกระจายของนิวตรอนในน้ำได้(สำหรับที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดไม่มากนัก) เพราะทฤษฎีนี้ไม่จำกัดว่าจะต้องใช้กับตัวกลางที่มีเลขมวล เท่าใด และตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่านิวตรอนเร็วกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนตรงบริเวณที่เกิดการชนกันครั้งแรกกับนิวเคลียสของตัวกลาง ซึ่งทฤษฎีนี้ควรจะใช้ได้ดีกับตัวกลางที่เป็นน้ำ เพราะนิวตรอนที่วิ่งอยู่ในน้ำจะมีการชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ นิวตรอนจะถ่ายทอดพลังงานที่มีอยู่ในตัวนิวตรอนให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนที่ถูกชนเป็นจำนวน

มาก และบางครั้งอาจจะถ่ายทอดพลังงานที่มีอยู่ในตัวเกือบทั้งหมดให้กับนิวเคลียสของไฮโดรเจนถ้าเกิดชนกันอย่างจัง แต่จากผลการคำนวณปรากฏว่าทฤษฎีนี้ใช้กับน้ำได้ผลไม่ค่อยดี สาเหตุเนื่องมาจากว่าทฤษฎีนี้(รวมทั้งอีก 2 ทฤษฎีข้างต้นด้วย)เป็นทฤษฎีที่ใช้สำหรับอธิบายหรือคำนวณหาปริมาณนิวตรอนที่กระจายอยู่ในตัวกลางชนิดที่ เมื่อมีนิวตรอนวิ่งมาชนกับนิวเคลียสของตัวกลางจะต้องให้นิวตรอนออกมารอบตัว (isotropic medium) แต่การชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของน้ำส่วนใหญ่เป็นการชนกับนิวเคลียสของไฮโดรเจน และเป็นการชนกันแบบยืดหยุ่นทั้งหมด(สำหรับนิวตรอนเร็ว) การชนกันแบบยืดหยุ่นนี้มุมของการกระเจิงมีค่าน้อยกว่า 90° เสมอไป ไม่ว่านิวเคลียสที่ถูกชนจะมี เลขมวล เท่าใด เพราะว่าค่าเฉลี่ยของโคไซน์ (cosine)ของมุมกระเจิงมีค่าเท่ากับ $\frac{2}{3A}$ หรือ

$$\overline{\cos\psi} = \frac{2}{3A}$$

เมื่อ $\psi$ = มุมกระเจิง , A = เลขมวล ของนิวเคลียสของตัวกลาง

ดังนั้นนิวตรอนที่วิ่งมาชนกับนิวเคลียสของน้ำจะกระเจิงไปโดยมีทิศพุ่งไปข้างหน้าทั้งหมด ไม่ได้ให้นิวตรอนออกมารอบตัว ผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีนี้จึงให้ผลไม่ค่อยดี

ข้อเสียของการหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากทฤษฎีเหล่านี้ คือ ทุกทฤษฎีถือว่านิวตรอนเร็วที่กลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนนั้นมีพลังงานค่าเดียว จะเห็นได้ชัดจากค่าเอจ( $\tau$ )ที่นำมาใช้ (รวมถึงค่า $K_f$ ที่หามาจากค่า $\tau$ ด้วย) เนื่องจากตัวกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ศึกษาเป็นตัวกำเนิดชนิดที่ให้นิวตรอนออกมามีค่าพลังงานต่างๆกัน(ประมาณ 5–12 MeV ) เทอร์มาลเอจของนิวตรอนแต่ละตัวก็ต้องมีค่าต่างกัน แต่ในการคำนวณได้ใช้เทอร์มาลเอจของนิวตรอนที่มีพลังงานเริ่มต้นเพียงค่าเดียว สำหรับข้อเสียอันนี้จะไม่มีผลมากนักถ้าเลือกใช้ค่า $\tau$ หรือค่าคงที่อื่นๆซึ่งใช้สำหรับนิวตรอนเร็วที่กลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนให้เหมาะสม

---

[1] Samuel Glasstone, and Alexander Sesonke, Nuclear Reactor Engeneering (New York: D.Van Nostrand Co.Inc., 1967), P.132

กับตัวกำเนิดนิวตรอนนั้นๆ แต่ในการศึกษาครั้งนี้ได้อาศัยค่า $\tau$ ของตัวกำเนิดแบบเรเดียม-เบอริลเลียม มาใช้คำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ ซึ่งเป็นค่า $\tau$ ของตัวกำเนิดคนละชนิดกัน และก็ไม่ใช่เทอร์มาลเอจด้วยแต่เป็นเอจของนิวตรอนที่มีพลังงานเริ่มต้นเท่ากับ 5 MeV และพลังงานสุดท้าย 1.46 eV (โดยเฉลี่ย) ดังนั้นถ้าเรามีค่าเทอร์มาลเอจที่ดีกว่านี้คือเป็นค่าที่เหมาะสมและถูกต้องสำหรับใช้กับตัวกำเนิดนิวตรอนที่ใช้อยู่ ผลการคำนวณหาค่าเทอร์-มาลฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกก็จะให้ผลดีกว่านี้ และจากผลการคำนวณที่หาได้จากทฤษฎีนี้ปรากฏว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ทุกตำแหน่งมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการทดลองที่ได้นำมาใช้เปรียบเทียบ ค่าความแรงของตัวกำเนิดที่ได้นำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเทอร์-มาลฟลักซ์คือ $1.3 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที ซึ่งถ้านำค่าความแรง $1.1 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที (ซึ่งเป็นค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตตัวกำเนิดนี้บอกเอาไว้ และควรจะเป็นค่าที่ถูกต้อง) ไปใช้คำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์แทนค่า $1.3 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที ผลที่ได้ก็คือ ค่าเทอร์มาล-ฟลักซ์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้โดยใช้ค่า $1.3 \times 10^6$ นิวตรอน/วินาที ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทดลองมากขึ้นอีก

ผลสำคัญที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้คือ ทำให้ทราบว่าทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก สามารถใช้คำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์ที่ปรากฏในน้ำที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดประมาณ 10-20 ซ.ม. ได้ผลดี ซึ่งได้มาจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้กับค่าที่ได้จากการทดลองของ นาย ยุทธ และกับค่าที่คำนวณได้โดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method แต่ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ซึ่งเป็นค่าที่ดีและเหมาะสมสำหรับในการใช้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากทฤษฎีนั้นเป็นค่าที่ได้จากการทดลองของ นาย ยุทธ ซึ่งมีอยู่เพียงที่ระยะไกลสุดจากตัวกำเนิดเท่ากับ 19.5 ซ.ม. ส่วนค่าที่ใช้สำหรับเปรียบเทียบที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดมากกว่านี้เป็นค่าที่ได้มาจากการคำนวณโดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็ว แต่วิธีที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากค่าโคสของนิวตรอนเร็วเป็นวิธีที่ไม่สู้จะดีนัก ดังนั้นผลการคำนวณที่ได้ซึ่งนำมาใช้สำหรับเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากทฤษฎีอาจจะไม่ใช่ค่าที่ถูกต้อง เราจึงไม่สามารถบอกได้แน่นอนว่าผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีที่ระยะมากกว่า 20 ซ.ม. ให้ผลดีเพียงใด

จากการศึกษาครั้งนี้เราอาจจะทำการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปได้อีกว่าทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกนี้จะใช้ในการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ได้ผลดีจนถึงระยะห่างจากตัวกำเนิดไกลเพียงใด ถ้าเรามีค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดมากกว่า 19.5 ซ.ม. และเป็นค่าที่ไว้ใจได้เพื่อใช้สำหรับเปรียบเทียบ เพราะว่าที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับ 19.5 ซ.ม. หรือน้อยกว่า 19.5 ซ.ม.เล็กน้อย ผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีก็ยังไม่ได้ทำท่าทีว่าจะให้ผลเลวกว่าผลที่คำนวณได้(โดยใช้ทฤษฎี)ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดน้อยกว่านี้ (แต่ต้องห่างจากตัวกำเนิดไม่น้อยกว่า10 ซ.ม.) และผลการคำนวณที่ได้จากทฤษฎีเมื่อเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะไกลตั้งแต่ 30 ซ.ม.ขึ้นไปซึ่งหาได้จากการคำนวณโดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็วโดยวิธีที่ 3 (ซึ่งเป็นค่าที่ดีกว่าค่าที่ได้จากวิธีอื่น) ก็ยังให้ผลที่ยังพออนุโลมได้ว่าพอใช้ได้

ในการหาสูตรสำหรับใช้หาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ของทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก (รวมทั้งอีก 2 ทฤษฎีที่ได้นำมาศึกษาด้วย) จะสังเกตเห็นได้ว่า(ดูในบทที่ 2 )เวลาหาสูตรนั้นเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ถือว่าตัวกลางสำหรับลดความเร็วนิวตรอนมีขอบเขตอนันต์ ดังนั้นสูตรที่หาได้ก็สามารถใช้หาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ได้ที่ทุกตำแหน่งที่ห่างจากตัวกำเนิด แต่ในการปฏิบัติจริงๆเราไม่สามารถหาตัวกลางหรือภาชนะที่บรรจุตัวกลางที่มีขนาดอนันต์ได้ ในการนำทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกไปใช้หาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ปรากฏในน้ำ (หรือในตัวกลางที่มีค่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนน้อยกว่าหรือเท่ากับน้ำก็ได้) จะต้องไม่นำไปใช้หาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่งใกล้กับขอบของภาชนะ(ขอบเขตของตัวกลาง)มากนัก เพราะที่บริเวณดังกล่าวนี้ไม่เป็นบริเวณที่เรียกว่า บริเวณเอกพันธ์ (homogeneous region) เนื่องจากสมการการฟุ้งใช้ได้เฉพาะบริเวณเอกพันธ์เท่านั้นคือบริเวณที่มีนิวตรอนวิ่งไปมาทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอ แต่ที่บริเวณใกล้กับขอบของภาชนะนิวตรอนที่มีทิศพุ่งเข้าหาขอบภาชนะมีปริมาณมากกว่าจำนวนนิวตรอนที่มีทิศพุ่งจากขอบภาชนะเข้าหาใจกลางของภาชนะ