บทที่ 4

วิจารณ์ผลการคำนวณ

ในการศึกษาถึงการกระจายของนิวตรอนจากตัวกำเนิดขนาดจุดในน้ำ ได้นำเอา ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก ทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ มาใช้คำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะห่างต่าง ๆ กันจากตัวกำเนิดไม่เกิน 19.5 ซ.ม. แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะเดียวกันนี้ ซึ่งเป็นผลการทดลองของ นาย ยุทธ และใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก กับทฤษฎีเฟอร์มิเอจคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่งห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับ 30, 60, 90, และ 120 ซ.ม. นำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะเดียวกันซึ่งได้มาจากการคำนวณโดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method ในการที่ไม่นำทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรกมาใช้คำนวณหาเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะไกล ($r > 30$ ซ.ม.) เนื่องจากทฤษฎีนี้ตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่า นิวตรอนเร็วกลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนตรงบริเวณที่นิวตรอนเร็วชนกับนิวเคลียสแล้วกระเจิงไปเป็นครั้งแรก ดังนั้นที่ระยะไกลเช่นนี้ทฤษฎีนี้คงใช้ไม่ได้ผล เพราะว่านิวตรอนที่วิ่งออกมาจากตัวกำเนิดจนถึงระยะไกลจากตัวกำเนิดเช่นนี้ โอกาสที่จะไม่ชนกับนิวเคลียสของตัวกลางมีน้อยมาก

ผลการคำนวณปรากฏว่าที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดน้อยกว่าประมาณ 10 ซ.ม. ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากแต่ละทฤษฎีมีค่าแตกต่างกันมาก และไม่มีทฤษฎีใดให้ผลใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลองเลย สำหรับที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดมากกว่า 10 ซ.ม. ขึ้นไปจนถึง 19.5 ซ.ม. ผลปรากฏว่าทุกทฤษฎีให้ผลดีขึ้น ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากแต่ละทฤษฎีมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าเดิม เส้นกราฟแสดงค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ ที่ได้จากแต่ละทฤษฎีและจากการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกัน คือเกือบเป็นเส้นตรงและมีความชันใกล้เคียงกัน (ดูตารางที่ 3.7 และรูปที่ 3.4 ประกอบ) ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดในช่วงนี้ ($10 < r < 19.5$)

ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก ให้ผลดีกว่าอีก 2 ทฤษฎี ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้มีค่าต่างจากค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองมากที่สุดประมาณ 10% ที่ตำแหน่งห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับ 13.5 ซ.ม. สำหรับอีก 2 ทฤษฎีนั้นให้ผลต่างจากการทดลองมากกว่านี้ ระหว่าง 2 ทฤษฎีนี้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีการกระเจิงครั้งแรกมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองมากกว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้จากทฤษฎีเฟอร์มิเอจ สาเหตุที่ทำให้ทฤษฎีทั้ง 3 ที่นำมาใช้ศึกษานี้ ใช้คำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดน้อยกว่า 10 ซ.ม. ไม่ได้ผล เนื่องจากทั้ง 3 ทฤษฎีอาศัยสมการการฟุ้งเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับหา (derive) สูตรแสดงค่าเทอร์มาลฟลักซ์ โดยที่สมการการฟุ้งมีสมมุติฐานหรือเงื่อนไขที่ว่า ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งกระจายอยู่ในตัวกลางจะต้องให้นิวตรอนออกมารอบตัวแต่ที่ระยะดังกล่าวนี้ ($r < 10$ ซ.ม.) นิวตรอนที่มีทิศพุ่งออกจากตัวกำเนิดมีจำนวนมากกว่านิวตรอนที่มีทิศพุ่งเข้าหาตัวกำเนิด

วิธีการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์โดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็ว (ซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method) มีอยู่ด้วยกัน 3 วิธี ซึ่งไม่ทราบว่าวิธีใดจะให้ผลดีที่สุดเพราะไม่มีค่ามาตรฐานสำหรับเอาไว้เปรียบเทียบ และการคำนวณในแต่ละวิธีก็เป็นการประมาณเอาทั้งนั้น จากผลการคำนวณซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.10 วิธีที่ 3 ควรจะเป็นวิธีที่ให้ผลดีกว่าอีก 2 วิธี เพราะว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 10$ ซ.ม. และ $r = 20$ ซ.ม. ที่หาได้จากวิธีที่ 3 นี้ มีค่าใกล้เคียงกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากผลการทดลองของ นาย [illegible] มากกว่าวิธีอื่น สาเหตุที่ทำให้การหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์โดยวิธีที่ 3 ให้ผลดี เนื่องมาจากว่าสมการการฟุ้งใช้ได้ดีสำหรับระบบที่นิวตรอนทุกตัวมีพลังงานเท่ากันหมด การชนกันระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลางไม่ทำให้นิวตรอนสูญเสียพลังงานไป ดังนั้นสมการการฟุ้งจึงใช้ได้ดีสำหรับเทอร์มาลนิวตรอน แต่สำหรับนิวตรอนเร็วใช้ได้ไม่ดี เพราะว่าการชนกันระหว่างเทอร์มาลนิวตรอนกับนิวเคลียสไม่ทำให้เทอร์มาลนิวตรอนสูญเสียพลังงาน ส่วนนิวตรอนเร็วจะสูญเสียพลังงานที่มีอยู่ทุกครั้งให้กับนิวเคลียสที่ถูกชน ในการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์

โดยวิธีที่ 3 นี้ได้ใช้ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่หาได้โดยอาศัยค่าโคสของนิวตรอนเร็ว ซึ่งมีผู้คำนวณเอาไว้โดยใช้ moments method (ซึ่งเป็นวิธีที่ยุ่งยากกว่าทฤษฎีที่ใช้ศึกษาอยู่ และให้ผลดี) เป็นต้นกำเนิดของเทอร์มาลนิวตรอนหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ออกมาจากสมการการฟุ้งสำหรับเทอร์มาลนิวตรอน แต่มีข้อเสียอยู่ที่ว่าถือว่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ใช้นั้นเป็นฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานค่าเดียว สำหรับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากทั้ง 3 วิธีที่ตำแหน่งห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับหรือมากกว่า 60 ซ.ม. มีค่าอยู่ในลำดับ (order) เดียวกัน ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่หาได้จากวิธีที่ 1 ให้ผลไม่ค่อยดีเนื่องจากว่าสูตรในสมการที่ (2.34) ที่นำมาใช้หาเทอร์มาลฟลักซ์เป็นสูตรที่หา (derive) มาได้โดยมีตัวกำเนิดนิวตรอนเป็นตัวกำเนิดแบบระนาบ ดังนั้นผลการคำนวณที่ระยะใกล้กับตัวกำเนิดจึงให้ผลสู้ที่ระยะไกลไม่ได้ เพราะที่ระยะไกลถือว่าตัวกำเนิดนิวตรอนแบบระนาบอันนั้นมีขนาดเป็นจุดได้ ส่วนกรณีของเทอร์มาลฟลักซ์ที่หาได้จากวิธีที่ 2 เป็นการประมาณอย่างหยาบ ๆ ว่าจำนวนนิวตรอนเร็วที่กลายเป็นเทอร์มาลนิวตรอนหรือจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดขึ้นในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. ที่ตำแหน่ง r ใด ๆ มีค่าเท่ากับจำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนเอาไว้ในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. เดิมนั้น แต่จริง ๆ จำนวนเทอร์มาลนิวตรอนที่เกิดขึ้นในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. ใด ๆ ไม่ได้ถูกดูดกลืนเอาไว้ในน้ำ 1 ลบ.ซ.ม. นั้นหมดทุกตัว เพราะว่าภาคตัดขวางสำหรับการดูดกลืนนิวตรอนของน้ำมีค่าน้อยมาก ด้วยเหตุนี้การคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์จากวิธีที่ 2 นี้จึงให้ผลไม่ค่อยดี

สำหรับผลการคำนวณหาค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะ r = 30, 60, 90, และ 120 ซ.ม. โดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก และทฤษฎีเฟอร์มิเอจ ได้ใช้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่หาได้จากวิธีที่ 3 เป็นค่าสำหรับเปรียบเทียบ ผลปรากฏว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่คำนวณได้โดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ใช้เปรียบเทียบมากกว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากทฤษฎีเฟอร์มิเอจ ผลต่างระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวก กับค่าที่ใช้เปรียบเทียบมีค่าน้อยที่สุด 12% ที่ตำแหน่ง r = 30 ซ.ม. ที่ตำแหน่งไกลออกไปผลต่างระหว่างค่าเทอร์มาลฟลักซ์ 2 พวกนี้มีค่ามากขึ้น (ดูตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.10 และรูปที่ 3.6 ประกอบ)

จากค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในตารางที่ 3.9 (ซึ่งหามาจากค่าโคสของนิวตรอนเร็วซึ่งมีผู้คำนวณไว้โดยใช้ moments method) ได้ลองนำเอาทฤษฎีการฟุ้งของนิวตรอน 2 พวกมาใช้คำนวณหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ระยะเดียวกัน นำผลที่ได้ซึ่งแสดงอยู่ในตารางที่ 3.11 มาเปรียบเทียบกับค่าที่มีอยู่ในตารางที่ 3.9 ปรากฏว่าใช้ไม่ได้ผล ผลต่างระหว่างค่าฟลักซ์ที่คำนวณได้กับค่าฟลักซ์ในตารางที่ 3.9 มีค่ามาก คือต่างกันน้อยที่สุด 10% ที่ตำแหน่ง r = 20 ซ.ม. และจากค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่มีอยู่ในตารางที่ 3.9 นี้ ได้นำไปใช้หาสูตรสำเร็จสำหรับหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่งใด ๆ ในน้ำจากตัวกำเนิดนิวตรอนขนาดจุดแบบอเมอริเซียม–เบอริลเลียม ที่มีความแรง 1 นิวตรอน/วินาที จากสูตรที่หาได้นี้ (สมการที่(3.19)) เมื่อลองนำกลับไปหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่ตำแหน่งเดียวกันกับค่าที่ได้นำมาใช้หาสูตรนี้ ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่คำนวณได้จากสูตรมีค่าต่างจากค่าที่ได้นำมาใช้หาสูตรมากที่สุดเพียง 1.7% เท่านั้นที่ตำแหน่ง r = 10 ซ.ม. สูตรในสมการ (3.19) ที่หาได้นี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์สำหรับหาค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วในน้ำจากตัวกำเนิดขนาดจุดแบบอเมอริเซียม–เบอริลเลียม ที่มีความแรงเท่าใดก็ได้ โดยการนำเอาค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนคูณเข้ากับค่าฟลักซ์ที่หาได้จากสูตรในสมการ (3.19) ผลที่ได้ก็จะเป็นค่าฟลักซ์ของนิวตรอนเร็วที่เกิดขึ้นจากตัวกำเนิดนิวตรอนนั้น

นอกจากนี้ยังได้นำค่าเทอร์มาลฟลักซ์ซึ่งเป็นผลการทดลองของ นาย ยุทธ ที่มีอยู่จนถึงตำแหน่งห่างจากตัวกำเนิดเท่ากับ 19.5 ซ.ม. ไปหาความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอน ผลปรากฏว่าค่าความแรงของตัวกำเนิดที่หาได้มีค่า 0.783×10^6 นิวตรอน/วินาที ซึ่งมีค่าต่างจากความแรงของตัวกำเนิดที่บอกไว้ในวิทยานิพนธ์ของ นาย ยุทธ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.3×10^6 นิวตรอน/วินาที แต่จากบัญชีแสดงรายการของตัวกำเนิดนิวตรอนของทางบริษัทผู้ผลิตตัวกำเนิดนิวตรอนนี้ ได้แสดงค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนชนิดเดียวกันและมีความแรงเท่ากันคือ 500 มิลลิคูรี่

ไว้ว่าจำนวนนิวตรอนที่เกิดขึ้นมีค่า 1.1×10^6 นิวตรอน/วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแรงที่หาได้มากขึ้น แต่ก็ยังต่างกันมากอยู่ที่เดียว สาเหตุที่ทำให้ค่าความแรงที่หาได้มีค่าน้อยกว่าค่าความแรงของตัวกำเนิดที่บอกไว้ อาจเนื่องมาจาก

1) ค่าความแรงของตัวกำเนิดที่หาได้นี้ หามาจากการรวมจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในน้ำซึ่งประมาณว่าเป็นทรงกลมรัศมียาว 20 ซ.ม. โดยอาศัยค่าเทอร์มาลฟลักซ์เท่าที่มีอยู่ (ที่ระยะไกลสุด 19.5 ซ.ม.) ปริมาตรของน้ำซึ่งมีรัศมีเพียง 20 ซ.ม. คงจะมีขนาดใหญ่ไม่พอที่จะทำให้จำนวนนิวตรอนที่แผ่ออกจากตัวกำเนิดถูกดูดกลืนเอาไว้จนหมดทุกตัว หรือทำให้จำนวนนิวตรอนที่เล็ดรอดออกไปได้มีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้

2) ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่นำมาใช้หาค่าความแรงซึ่งได้จากการทดลองนั้นแต่ละค่าอาจจะมีค่าน้อยกว่าที่ควรเป็นจริง

ผู้เขียนได้ลองขยายเส้นกราฟ (extrapolate) ออกไปจนถึงตำแหน่ง $r = 24.5$ ซ.ม. แล้วใช้ค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่อ่านได้จากกราฟคำนวณหาจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนไว้ในน้ำที่มีปริมาตรเพิ่มขึ้นนี้ (ถึงทรงกลมรัศมียาว 25 ซ.ม.) ผลปรากฏว่าเมื่อรวมเข้าด้วยกันทั้งหมดได้ค่าความแรงของตัวกำเนิดเป็น 0.917×10^6 นิวตรอน/วินาที ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่บอกไว้มากขึ้นอีก สำหรับจำนวนนิวตรอนที่ถูกดูดกลืนอยู่ในน้ำซึ่งมีปริมาตรใหญ่กว่านี้คงมีจำนวนไม่มากนัก เพราะว่าค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ตำแหน่ง $r = 19.5$ ซ.ม. นั้นก็มีค่าน้อยอยู่แล้วเมื่อเทียบกับค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ระยะห่างจากตัวกำเนิดน้อยกว่านี้ ดังนั้นสาเหตุข้อที่ 2 ควรจะเป็นจริง คือค่าเทอร์มาลฟลักซ์ที่ได้จากการทดลองแต่ละจุดควรจะมีค่ามากกว่าที่เป็นอยู่ ค่าความแรงที่หาได้จึงจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแรงของตัวกำเนิดนิวตรอนที่บอกไว้มากขึ้น