



TH0200031

268

B14

## ความเป็นไปได้ของการเพิ่มค่าความเข้มรังสีโดยการสะท้อนแบบกระจาย

ดร.สัชชัย นิลสุวรรณโกษิต

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

โทรศัพท์ 218-6790 โทรสาร 218-6770 e-mail: fntsns@eng.chula.ac.th

### บทคัดย่อ

กระบวนการคำนวณเชิงตัวเลข โดยอาศัยทฤษฎีการขนส่งรังสีถูกใช้คำนวณผลกระทบจากการสะท้อนแบบกระจายต่อความเข้มรังสี ผลจากการคำนวณสอดคล้องกับผลที่ได้โดยการคำนวณแบบมอนเตคาร์โล ระบบที่จำลองในการคำนวณประกอบด้วยแผ่นกลมซึ่งสะท้อนรังสีแบบกระจายและแผ่นกลมอันเป็นฉากรับ แผ่นกลมทั้งสองมีรัศมี  $A$  และมีระยะห่างระหว่างแผ่นเท่ากับ  $10A$  แหล่งกำเนิดรังสีแบบจุดถูกกำหนด ณ ตำแหน่ง  $A$  หน้าแผ่นสะท้อนรังสี ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ปริมาณรังสีที่แผ่นรับรังสีได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่า 23% ภายใต้ภาวะดังกล่าว ค่าที่ได้ยืนยันและแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในทางทฤษฎีของการเพิ่มค่าความเข้มรังสีโดยการสะท้อนแบบกระจาย

## Possibility of Enhancing the Radiation Intensity by Diffusive Reflection

Dr.Sunchai Nilsuwankosit

Dept. of Nuclear Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai Rd., Bangkok 10330

Tel. 218-6790 Fax. 218-6770 e-mail: fntsns@eng.chula.ac.th

### ABSTRACT

The numerical calculation based on the radiation transport theory was conducted in order to calculate the effect of the diffusive reflection on the radiation intensity. The result as obtained from the calculation agreed with that calculated with the Monte-Carlo technique. The system modeled in the calculation was composed of a diffusive reflective disc and a receptive disc, both of radius  $A$  with the separating distance of  $10A$ . A point source was located between the discs and at the distance of  $A$  in front of the reflective disc. The calculation showed that the total amount of the radiation received by the receptive disk was found to be increased by more than 23% in this condition. With this estimation, the possibility of enhancing the radiation intensity by the diffusive reflection was theoretically verified and demonstrated.

## บทนำ

ในการใช้งานรังสีนั้น อุปสรรคที่พบได้โดยทั่วไปคือความเข้มของรังสีที่ใช้มีค่าต่ำ เป็นผลให้การใช้งานดังกล่าวไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้ต้องใช้เวลารังสีนานเพื่อให้ได้ผลตามต้องการ หากตัวอย่างที่ต้องการฉายรังสีมีอายุใช้งานสั้นหรือระยะเวลาสำหรับการปฏิบัติงานมีจำกัด การปฏิบัติงานนั้น ๆ อาจไม่สามารถกระทำได้ ในกรณีที่รังสีที่ใช้เป็นรังสีที่สามารถสร้างได้โดยตรง การแก้ปัญหาสามารถทำได้ง่ายโดยการเพิ่มค่าความเข้มรังสีที่ผลิตขึ้น ทว่าหากรังสีที่ใช้ไม่อาจผลิตได้โดยตรงแล้ว การเพิ่มความเข้มรังสีจากแหล่งกำเนิดตามต้องการย่อมไม่อาจทำได้ ในกรณีดังกล่าวกระบวนการที่อาจทำได้คงมีเพียงการนำรังสีที่ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดมาใช้งานให้มากที่สุด สำหรับรังสีที่ถูกปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดเหล่านี้ จะพบว่ารังสีถูกปลดปล่อยโดยมีความเข้มสม่ำเสมอในทุกทิศทาง นี่หมายความว่ารังสีเพียงส่วนน้อยเฉพาะในทิศทางมุ่งไปยังตัวอย่างที่ต้องการฉายรังสีเท่านั้นที่เป็นประโยชน์ใช้งานได้ในขณะที่รังสีส่วนใหญ่ที่เหลือก็กระจัดกระจายไปมิได้ถูกใช้งาน

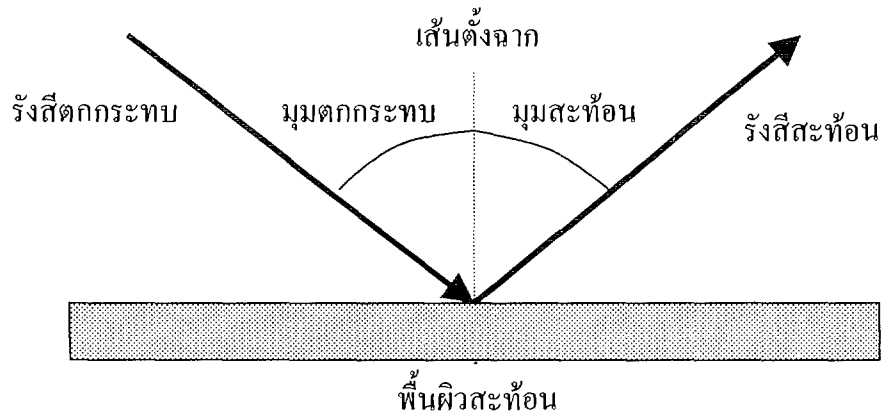
หากจะนำรังสีส่วนที่เหลือรอดไปเหล่านี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์ จำเป็นอย่างยิ่งต้องเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของรังสีเหล่านี้กลับมายู่ในทิศทางที่มุ่งไปยังตัวอย่าง สำหรับรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานต่ำ กระบวนการนี้สามารถทำได้ง่ายโดยอาศัยเพียงแผ่นสะท้อนผิวเรียบที่จัดทำจากวัสดุนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกระบวนการดังกล่าวไม่อาจใช้ได้กับรังสีที่เป็นลำอนุภาคไม่มีประจุเช่นรังสีนิวตรอน หรือลำอนุภาคมีประจุที่มีพลังงานสูงเช่นรังสีเบตา และรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงเช่นรังสีแกมมา สำหรับรังสีในลักษณะดังกล่าวนี้การเปลี่ยนทิศทางรังสีทำได้เพียงอาศัยการกระเจิงอันเนื่องมาจากอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างอนุภาคมูลฐานของรังสีกับนิวเคลียสของวัสดุที่ใช้จัดทำเป็นตัวสะท้อนเท่านั้น นอกจากนี้ปัญหาเกี่ยวกับการเปลี่ยนทิศทางรังสียังมีความยุ่งยากมากขึ้นเนื่องจากการกระเจิงของอนุภาคมูลฐานเหล่านี้มีลักษณะสุ่มซึ่งเป็นผลให้รังสีหลังการกระเจิงมีทิศทางไม่แน่นอนต่างจากการสะท้อนโดยทั่วไป

## การสะท้อนแบบเจาะจงและการสะท้อนแบบกระจาย

การสะท้อนแบบเจาะจง (Speculative Reflection) และการสะท้อนแบบกระจาย (Diffusive Reflection) เป็นลักษณะการสะท้อนที่พบได้ในธรรมชาติสำหรับรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานต่ำ ในความเป็นจริงแล้วไม่มีพื้นผิววัสดุธรรมชาติใดสามารถสะท้อนรังสีดังกล่าวในลักษณะเจาะจงหรือกระจายโดยสมบูรณ์ การสะท้อนจากพื้นผิววัสดุเหล่านี้จะมีลักษณะผสมกันของทั้งสองแบบจะต่างกันไปเพียงว่าลักษณะการสะท้อนจากพื้นผิววัสดุแต่ละชนิดนั้นจะค่อนข้างไปในแบบใดมากกว่าเท่านั้น

- การสะท้อนแบบเงาะง

การสะท้อนในลักษณะนี้อาจบรรยายได้ง่าย ๆ ว่ามุมตกกระทบของลำรังสีเทียบกับเส้นตั้งฉากจากพื้นผิวสะท้อนย่อมมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนซึ่งวัดเทียบกับเส้นตั้งฉากเดียวกัน วัสดุตัวนำที่มีผิวเรียบจะให้ลักษณะการสะท้อนในแบบนี้ ลักษณะการสะท้อนนี้อาจแสดงได้ดังรูปที่ 1



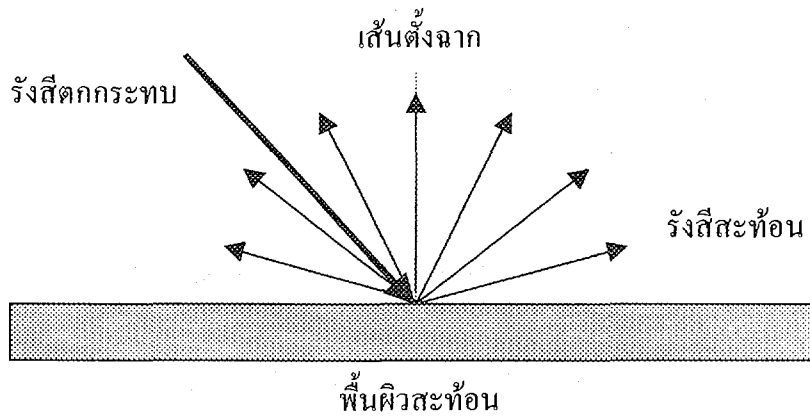
รูปที่ 1 การสะท้อนแบบเงาะง (Speculative Reflection)

- การสะท้อนแบบกระจาย

การสะท้อนในลักษณะนี้เป็นผลให้รังสีสะท้อนออกจากพื้นผิวในทุกทิศทางโดยมีความเข้มรังสีในทิศทางต่าง ๆ ต่อพื้นที่ผิวสะท้อนมีค่าคงที่ ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มรังสี  $I(\phi, \theta)$  ที่สามารถวัดได้จากจุดใด ๆ บนพื้นผิวสะท้อนในทิศทางซึ่งกำหนดได้ด้วยมุมกวาด  $\phi$  และมุมสะท้อน  $\theta$  สามารถบรรยายได้ด้วย Lambert's Law [1] ดังนี้

$$I(\theta, \phi) = (\rho I_0 / \pi) \cos \alpha \cos \theta \quad (1)$$

โดยที่  $I_0$  คือความเข้มรังสีตกกระทบ  $\alpha$  คือมุมตกกระทบ และ  $\rho$  คือสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflectivity) รูปที่ 2 แสดงลักษณะการสะท้อนแบบกระจายนี้



รูปที่ 2 การสะท้อนแบบกระจาย (Diffusive Reflection)

### การประมาณการกระเจิงกลับของรังสีโดยหลักการสะท้อนแบบกระจาย

ดังได้กล่าวแล้วว่าหลักการสะท้อนรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานต่ำโดยทั่วไปไม่อาจใช้ได้กับรังสีแบบลำอนุภาคและรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูง การคำนวณโดยหลักการแล้วจำเป็นต้องพิจารณาอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างอนุภาคมูลฐานของรังสีและนิวเคลียสของวัสดุตัวสะท้อน กระบวนการคำนวณนี้แม้จะกระทำได้ก็มีความยุ่งยากและซับซ้อนมาก อย่างไรก็ตามหากพิจารณาว่าวัสดุที่ใช้มีค่าภาคตัดขวางการกระเจิงสูงมากในขณะที่ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืนมีค่าเข้าใกล้ศูนย์พร้อมกับมีความหนาแน่นเชิงอะตอมและเลขมวลสูง เหล่านี้เป็นผลให้อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการกระเจิงซึ่งเกิดขึ้นใกล้กับพื้นผิวของวัสดุที่รังสีตกกระทบ โดยที่การกระเจิงมีผลให้ทิศทางของรังสีหลังการกระเจิงเป็นแบบสุ่มและโดยที่การกระเจิงเกิดใกล้พื้นผิวรังสีที่ถูกเปลี่ยนทิศทางเนื่องจากการกระเจิงมีโอกาสมากที่จะพุ่งออกจากภายในวัสดุที่ใช้กลับสู่ภายนอก ภายใต้สมมติฐานนี้ความเข้มรังสีกระเจิงกลับที่สามารถวัดได้ที่พื้นผิวจะมีลักษณะใกล้เคียงกับการสะท้อนแบบกระจายที่พื้นผิว อย่างไรก็ตามเนื่องจากรังสีมิได้ถูกสะท้อนที่พื้นผิวหากแต่ถูกกระเจิงจากใต้พื้นผิว ความเข้มรังสีที่กระเจิงที่อาจวัดได้ที่ทิศทางต่าง ๆ ย่อมไม่อาจอธิบายได้ด้วย Lambert's Law หากพิจารณาว่าการกระเจิงเป็นแบบสมมาตรในทุกทิศทาง (Isotropic Scattering) จะสามารถคำนวณค่ารังสีกระเจิงที่อาจวัดได้ดังนี้

$$I(\theta, \phi) = (\rho I_0 / 2\pi) \cos \alpha \quad (2)$$

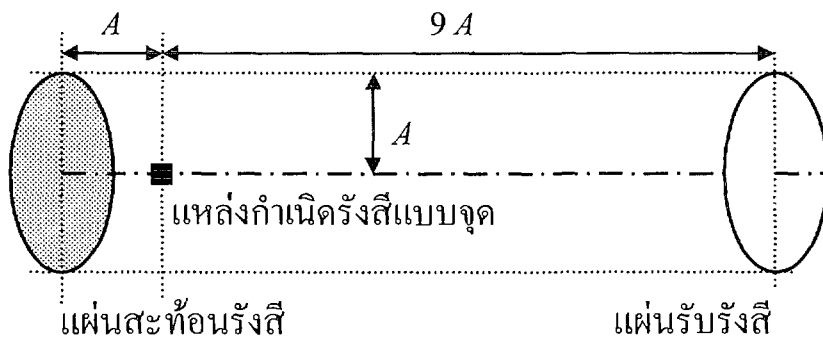
อาศัยสมการที่ 2 ข้างต้น ความเข้มรังสีที่อาจได้รับจากแหล่งกำเนิดรังสีแบบจุดอาจสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีการนำส่งรังสี (Radiation Transport Theory) โดยไม่จำเป็นต้องคำนวณในรายละเอียดถึงอันตรกิริยาการกระเจิงที่จะเกิดขึ้น

### การคำนวณความเข้มรังสีโดยทฤษฎีการนำส่งรังสี

อาศัยสมมติฐานข้างต้น การคำนวณความเข้มรังสีที่อาจรับได้โดยพื้นที่หนึ่ง ๆ อาจคำนวณได้โดยทฤษฎีการนำส่งรังสี ในเบื้องต้นจะพิจารณาระบบปฏิบัติการซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้

1. แหล่งกำเนิดรังสีแบบจุดที่ตำแหน่ง  $(0,0,0)$
2. ฉากรับรังสีแผ่นวงกลมรัศมี  $A$  มีจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่ง  $(9A,0,0)$  และหันหน้าตรงเข้าหาจุดกำเนิดรังสี
3. ฉากรับรังสีรังสีแผ่นวงกลมรัศมี  $A$  มีจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่ง  $(-A,0,0)$  หันหน้าตรงเข้าหาจุดกำเนิดรังสีและฉากรับรังสี

รูปที่ 3 แสดงลักษณะของระบบที่พิจารณาเพื่อคำนวณความเข้มรังสี



รูปที่ 3 ลักษณะของระบบที่พิจารณาเพื่อคำนวณความเข้มรังสี

ภายใต้สมมติฐานว่ารังสีมิได้เกิดอันตรกิริยาใดกับอากาศ ความเข้มรังสีที่พื้นที่เล็ก ๆ  $da_2$  บนฉากรับรังสีได้รับข้อมเป็นผลโดยตรงจากรังสีที่แผ่จากจุดกำเนิดรังสีและรังสีสะท้อนจากแผ่นสะท้อนขณะเดียวกัน รังสีที่พื้นที่เล็ก ๆ  $da_1$  จะมาจากจุดกำเนิดรังสี เมื่อพิจารณาว่าจุดกำเนิดรังสีแผ่รังสีด้วยอัตรา  $S$  ขณะที่  $da_1$  และ  $da_2$  มีค่าเท่ากับ  $r_1 dr_1 d\phi_1$  และ  $r_2 dr_2 d\phi_2$  ตามลำดับโดยที่  $r_1$  และ  $\phi_1$  คือระยะตามแนวรัศมีและมุมกวาดบนแผ่นสะท้อน และ  $r_2$  กับ  $\phi_2$  คือระยะตามแนวรัศมีและมุมกวาดบนแผ่นรับรังสีจะสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง  $S$  และ  $I_1$  โดยที่  $I_1$  คือค่าความเข้มรังสีที่พื้นที่  $da_1$  ได้รับเป็น

$$I_1(r_1, \phi_1) da_1 = \frac{S}{4\pi} \sin \alpha d\theta d\phi_1$$

หรือ

$$I_1(r_1, \phi_1) r_1 dr_1 = \frac{S}{4\pi} \sin \alpha d\alpha \quad (3)$$

โดยที่  $\theta$  คือมุมฉายจากจุดกำเนิดรังสีสู่พื้นที่  $da_1$   
เมื่อพิจารณาว่า

$$r_1 = A \tan \theta \quad (4)$$

สมการที่ 3 สามารถลดรูปได้โดยที่  $I_1(r_1, \phi_1)$  เท่ากับ  $I_1(\theta, \phi_1)$  เป็น

$$I_1(\theta, \phi_1) = \frac{S}{4\pi A^2} \cos^3 \theta \quad (5)$$

ในลักษณะเดียวกัน สำหรับค่าความเข้มรังสี  $I_2$  ที่พื้นที่  $da_2$  ได้รับบนฉากรับ สามารถเขียนได้เป็น

$$I_2(r_2, \phi_2) r_2 dr_2 = \frac{S}{4\pi} \sin \beta d\beta + dI_{12}(r_2, \phi_2) \quad (6)$$

โดยที่  $\beta$  คือมุมฉายจากจุดกำเนิดรังสีไปยังพื้นที่  $da_2$  และ  $dI_{12}(r_2, \phi_2)$  คือปริมาณรังสีที่พื้นที่  $da_2$  ได้รับจากแผ่นสะท้อน

สำหรับ  $dI_{12}(r_2, \phi_2)$  หากพิจารณาว่ารังสีที่ตกกระทบแผ่นสะท้อนรังสีถูกสะท้อนออกทั้งหมดโดยมีความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่สะท้อนและความเข้มรังสีในทิศทางที่สะท้อนดังบรรยายโดยสมการที่ 2 จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} dI_{12}(r_2, \phi_2) &= r_2 dr_2 \int_0^{2\pi} \int_0^A \frac{I_1(\theta, \phi_1)}{2\pi \rho^2} \cos \alpha r_1 dr_1 d\phi_1 \\ &= r_2 dr_2 \int_0^{2\pi} \int_0^A \frac{S}{8\pi^2 A^2 \rho^2} \cos^3 \theta \cos \alpha r_1 dr_1 d\phi_1 \quad (7) \end{aligned}$$

โดยที่  $\rho$  คือระยะจากพื้นที่  $da_1$  ถึงพื้นที่  $da_2$  และ  $\alpha$  คือมุมสะท้อนซึ่งเท่ากับมุมระหว่างเส้นตรงซึ่งเชื่อมพื้นที่  $da_1$  และพื้นที่  $da_2$  กับเส้นตรงซึ่งขนานกับเส้นตรงซึ่งเชื่อมจุดศูนย์กลางของแผ่นสะท้อนและแผ่นรับรังสี ในกรณีนี้จะพบว่า

$$r_1 = A \tan \theta \quad (8)$$

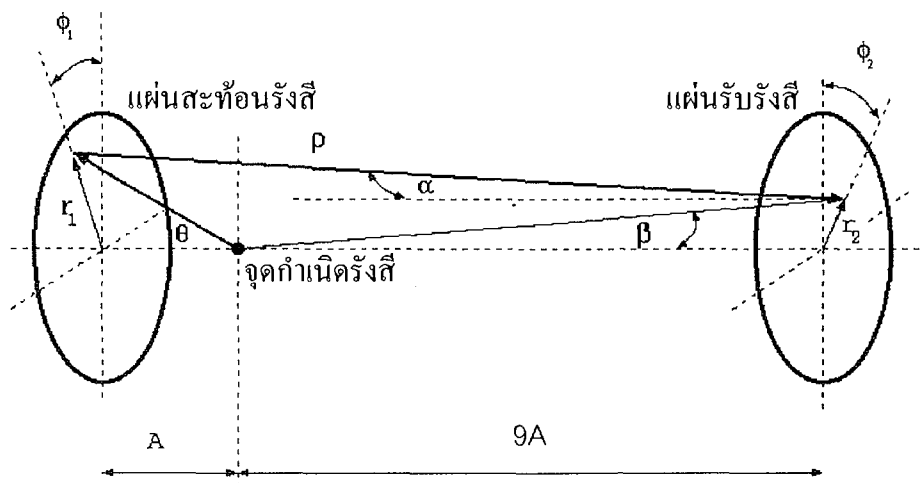
และ

$$\rho = 10A \sec \alpha \quad (9)$$

ดังนั้นสมการที่ 7 สามารถขยายได้เป็น

$$\begin{aligned} dI_{12}(r_2, \phi_2) &= r_2 dr_2 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/4} \frac{S \cos^3 \alpha}{800\pi^2 A^4} A^2 \sin \theta d\theta d\phi_1 \\ &= r_2 dr_2 \frac{S}{800\pi^2 A^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/4} \cos^3 \alpha \sin \theta d\theta d\phi_1 \quad (10) \end{aligned}$$

ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีจากจุดกำเนิด รังสีที่แผ่นสะท้อนและรังสีที่ฉากรับได้รับสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีจากจุดกำเนิด รังสีที่แผ่นสะท้อนและรังสีที่ฉากรับได้รับ จากสมการที่ 10 จะสามารถหาค่าปริมาณรังสีที่แผ่นรับรังสีได้รับโดยตรงจากจุดกำเนิดรังสีคือ  $I_{2,\text{total}}$  โดยที่

$$\begin{aligned} I_{2,\text{total}} &= \int_0^{2\pi} \int_0^A I_2(r_2, \phi_2) r_2 dr_2 d\phi_2 \\ &= 2\pi \left[ \int_0^{\beta_0} \frac{S}{4\pi} \sin \beta d\beta + \int_{r_2} dI_{12}(r_2, \phi_2) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

เทอมแรกในวงเล็บกำกับทิศทางขวาของสมการที่ 11 แสดงปริมาณรังสีทั้งสิ้นที่แผ่นรับรังสีได้รับจากจุดกำเนิดโดยตรง ขณะที่เทอมที่สองแสดงปริมาณรังสีสะท้อนทั้งสิ้นจากแผ่นสะท้อนที่แผ่นรับรังสี

ได้รับ สำหรับเทอมแรก  $\beta_0$  คือมุมฉายสูงสุดที่อาจเป็นไปได้จากจุดกำเนิดรังสีถึงแผ่นรับรังสีและมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned}\beta_0 &= \tan^{-1} \frac{A}{9A} \\ &= \tan^{-1} 1/9 \\ &= 0.1107 \text{ rad}\end{aligned}\quad (12)$$

ปริมาณรังสีจากจุดกำเนิดโดยตรงที่แผ่นรับรังสีได้รับสามารถคำนวณได้เท่ากับ  $I_{2,\text{direct}}$  โดยที่

$$\begin{aligned}I_{2,\text{direct}} &= 2\pi \left[ \int_0^{\beta_0} \frac{S}{4\pi} \sin \beta \, d\beta \right] \\ &= \frac{S}{2} (1 - \cos \beta_0) \\ &= 3.058 \times 10^{-3} S\end{aligned}\quad (13)$$

สำหรับรังสีสะท้อนจากแผ่นสะท้อนรังสีสามารถคำนวณได้เท่ากับ  $I_{2,\text{reflect}}$  โดยที่

$$I_{2,\text{reflect}} = 2\pi \left[ \int_{r_2} dI_{12}(r_2, \phi_2) \right] \quad (14)$$

เมื่อพิจารณา  $dI_{12}(r_2, \phi_2)$  ดังที่นิยามไว้โดยสมการที่ 7 จะได้

$$I_{2,\text{reflect}} = \frac{S}{400\pi A^2} \int_0^A \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/4} \cos^3 \alpha \sin \theta \, d\theta \, d\phi_1 \, r_2 \, dr_2 \quad (15)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ระหว่าง  $r_2$ ,  $\theta$ ,  $\phi_1$  และ  $\alpha$  สามารถเขียนได้คือ

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{10A}{\sqrt{r_2^2 + A^2 \tan^2 \theta - 2r_2 A \tan \theta \cos \phi_1 + 100A^2}} \quad (16)$$

หากกำหนดให้  $\rho = Ar_2$  (17)

จะได้  $\alpha = \cos^{-1} \frac{10}{\sqrt{\rho^2 + \tan^2 \theta - 2\rho \tan \theta \cos \phi_1 + 100}}$  (18)

และสามารถเขียนสมการที่ 15 ได้เป็น

$$I_{2,\text{reflect}} = \frac{10S}{4\pi A^2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/4} \frac{\rho \sin \theta}{(\rho^2 + \tan^2 \theta - 2\rho \tan \theta \cos \phi_1 + 100)^{3/2}} \, d\theta \, d\phi_1 \, d\rho \quad (19)$$



ในกรณีทีระยะห่างระหว่างแผ่นสะท้อนและแผ่นรับรังสีซึ่งมีขนาดรัศมีเท่ากันสามารถวัดได้เป็นจำนวนเท่า  $\xi$  ของขนาดรัศมี สมการที่ 19 สามารถประยุกต์ใช้ในกรณีดังกล่าวนี้เป็น

$$I_{2,\text{reflect}} = \frac{\xi S}{4\pi A^2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/4} \frac{\rho \sin \theta}{(\rho^2 + \tan^2 \theta - 2\rho \tan \theta \cos \phi_1 + \xi^2)^{3/2}} d\theta d\phi_1 d\rho \quad (20)$$

จากสมการที่ 11 13 และ 19 จะสามารถคำนวณค่าปริมาณรังสีที่รับได้เพิ่มขึ้นที่แผ่นรับรังสีเนื่องจากจากรังสีสะท้อนจากแผ่นสะท้อนรังสีเป็น  $\eta$  โดยที่

$$\eta = \frac{I_{2,\text{reflect}}}{I_{2,\text{direct}}} \quad (21)$$

### ผลการคำนวณและการวิเคราะห์ผล

เพื่อคำนวณหาค่าตอบเชิงปริมาณ สมการที่ 19 จึงถูกอินทิเกรตโดยกระบวนการเชิงตัวเลข ทั้งนี้โดยการแบ่งช่วงของการทำอินทิเกรชันของ  $\theta$   $\phi_1$  และ  $\rho$  ออกเป็นส่วนเท่ากันและทำการอินทิเกรตใช้วิธีรุงเกคุดตา (Runge-Kutta Method) โดยพิจารณาว่า

$$I_{2,\text{reflect}} = \frac{\xi S}{4\pi A^2} \int_0^1 F(\rho) d\rho \quad (22)$$

$$F(\rho) = \int_0^{2\pi} G(\rho, \phi_1) d\phi_1 \quad (23)$$

$$G(\rho, \phi_1) = \int_0^{\pi/4} H(\rho, \phi_1, \theta) d\theta \quad (24)$$

และ 
$$H(\rho, \phi_1, \theta) = \frac{\rho \sin \theta}{(\rho^2 + \tan^2 \theta - 2\rho \tan \theta \cos \phi_1 + \xi^2)^{3/2}} \quad (25)$$

อาศัยสมการที่ 22 23 24 และ 25 เมื่อพิจารณาแบ่งช่วง  $\rho$   $\phi_1$  และ  $\theta$  ออกเป็น  $m$   $n$  และ  $p$  ช่วงเท่า ๆ กันโดยมีระยะช่วงเป็น  $\Delta\rho$   $\Delta\phi_1$  และ  $\Delta\theta$  แล้วจะได้ว่า

$$I_{2,\text{reflect}} = \frac{\xi S \Delta\rho}{4\pi A^2} \sum_{i=1}^m F^*(\rho_i) \quad (22)$$

$$F^*(\rho_i) = \Delta\phi_1 \sum_{j=1}^n G^*(\rho_i, \phi_{1j}) \quad (23)$$

และ 
$$G^*(\rho_i, \phi_{ij}) = \Delta\theta \sum_{k=1}^p H^*(\rho_i, \phi_{ij}, \theta_k) \quad (24)$$

โดยที่  $F^*(\rho)$ ,  $G^*(\rho, \phi_{ij})$  และ  $H^*(\rho, \phi_{ij}, \theta_k)$  สามารถคำนวณได้โดยวิธีรุงเกกุดตา [2]

ในการคำนวณนั้นพิจารณาให้  $m = n = p$  ผลการคำนวณสำหรับค่า  $m$  ต่าง ๆ พร้อมทั้งค่าที่ประมาณได้เมื่อระบบถูกจำลองด้วยเทคนิคมอนเตคาร์โล (Monte-Carlo Technique) [3,4] ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณปริมาณรังสีที่แผ่นรับรังสี ( $I_{2,direct}/S = 3.058 \times 10^{-3}$ )

รายละเอียด	$I_{2,reflect}/S$ ( $\times 10^{-3}$ )	$\eta$ (%)
อินทิเกรตด้วย $m = 11$	1.011	33.1
อินทิเกรตด้วย $m = 21$	0.865	28.3
อินทิเกรตด้วย $m = 41$	0.832	27.2
อินทิเกรตด้วย $m = 81$	0.776	25.4
มอนเตคาร์โล (sample = 1000000)	0.719	23.5
มอนเตคาร์โล (sample = 2000000)	0.719	23.5
มอนเตคาร์โล (sample = 4000000)	0.711	23.3
มอนเตคาร์โล (sample = 8000000)	0.734	24.0

แม้ว่าค่าองค์ประกอบ  $\eta$  ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของปริมาณรังสีที่รับได้ที่แผ่นรับอันเนื่องมาจากการใช้แผ่นสะท้อนรังสีจะยังมีค่าแปรผันอยู่ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามลักษณะของข้อมูลที่ได้นี้ชี้ให้เห็นว่าค่าปริมาณรังสีที่แผ่นรับรังสีได้รับมีค่าเพิ่มขึ้นกว่า 23% เทียบกับปริมาณรังสีที่แผ่นรับได้รับโดยตรงจากจุดกำเนิดรังสีเมื่อมีการใช้แผ่นสะท้อนรังสีแบบกระจาย

ในแง่ของความเชื่อถือได้ของผลการคำนวณนั้น ค่าที่ได้จากการทำอินทิเกรชันและค่าที่ได้จากการจำลองแบบมอนเตคาร์โลมีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตามเนื่องจากทั้งการทำอินทิเกรชันและการจำลองแบบมอนเตคาร์โลล้วนต้องใช้เวลาและทรัพยากรในการปฏิบัติงานค่อนข้างสูง การเพิ่มช่วงการทำอินทิเกรชันและหรือการเพิ่มจำนวนตัวอย่างในการจำลองแบบมอนเตคาร์โลเพื่อช่วยเพิ่มความละเอียดของผลลัพธ์มีผลค่อนข้างช้า เมื่อพิจารณาถึงความผิดพลาดในระหว่างการคำนวณซึ่งสะสมเพิ่มมากขึ้น การเพิ่มช่วงการทำอินทิเกรชันและหรือการเพิ่มจำนวนตัวอย่างในการจำลองแบบมอนเตคาร์โลเพียงอย่างเดียวอาจไม่สามารถเพิ่มความละเอียดของค่าที่ได้ให้อยู่ในช่วงที่

ต้องการได้ ในการนี้อาจจำเป็นต้องใช้เทคนิคการคำนวณอื่นที่เหมาะสมประกอบเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดในระดับที่ต้องการภายใต้ข้อจำกัดของทรัพยากรและเวลาที่เป็นไปได้

### วิจารณ์และสรุปผล

จากการคำนวณของระบบจำลองอันประกอบด้วยแผ่นรับรังสี แผ่นสะท้อนรังสีแบบกระจาย และแหล่งกำเนิดรังสีแบบจุด โดยที่แผ่นรับรังสีและแผ่นสะท้อนรังสีมีลักษณะกลมแบน มีรัศมี  $A$  และจัดวางหันหน้าเข้าหากันโดยมีระยะห่างเท่ากับ  $10A$  และมีจุดกำเนิดรังสีอยู่ที่ระยะ  $A$  หน้าแผ่นสะท้อน พบว่าปริมาณรังสีที่แผ่นรับได้รับโดยตรงจากจุดกำเนิดรังสีมีค่าเป็น  $3.058 \times 10^{-3}$  ของปริมาณรังสีที่แผ่จากจุดกำเนิด เมื่อพิจารณาผลกระทบจากแผ่นสะท้อนรังสี พบว่าค่าปริมาณรังสีที่แผ่นรับมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากรังสีสะท้อนจากแผ่นสะท้อนถึงกว่า 23% เทียบกับปริมาณรังสีที่ได้รับโดยตรง ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ของการเพิ่มปริมาณรังสีที่อาจวัดและหรือประยุกต์ใช้งาน ณ บริเวณหนึ่ง ๆ ได้โดยการสะท้อนรังสี

ในทางปฏิบัตินั้นแม้ว่าจะมีความเป็นไปได้น้อยที่จะหาวัสดุที่มีสมบัติในการสะท้อนสมบูรณ์ตามข้อกำหนด ทว่าสำหรับรังสีที่พิจารณาหนึ่ง ๆ แล้ว เป็นไปได้ที่จะหาวัสดุที่มีสมบัติใกล้เคียงเพื่อใช้ทดแทน ในกรณีดังกล่าวย่อมเป็นที่แน่นอนว่ารังสีสะท้อนที่ได้รับจะมีปริมาณและคุณภาพที่แตกต่างไป อย่างไรก็ตามความบกพร่องและหรือความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดขึ้นเหล่านี้สามารถถูกลดทอนและหรือส่งเสริมได้โดยการเปลี่ยนแปลงลักษณะและองค์ประกอบทั้งในด้านโครงสร้างเคมีและรูปลักษณะภายนอก ตัวอย่างเช่นการใช้แผ่นสะท้อนรูปโค้งคล้ายพาราโบลาเพื่อจำกัดแนวการสะท้อนของรังสีให้อยู่ในขอบเขตที่ต้องการให้มากขึ้น และหรือการใช้วัสดุที่เกิดอันตรกิริยากับรังสีเกิดเป็นแหล่งกำเนิดรังสีในระดับทุติยภูมิเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### เอกสารอ้างอิง

1. Michael F. Modest, **Radiative Heat Transfer**, Singapore, McGraw-Hill (1993)16-19, 76-89
2. William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky and William T. Vetterling, **Numerical Recipe, The Art of Scientific Computing**, Cambridge University Press, 1989
3. E.E. Lewis, W.F. Miller, Jr., **Computational Methods of Neutron Transport**, American Nuclear Society, 1993, pp. 296-321
4. Sunchai Niluwankosit, **The Effect of the Radiative Heat Transfer on Subcooled Film Boiling**, PhD. Dissertation, Department of Nuclear Engineering and Engineering Physics, University of Wisconsin-Madison, 1997