



สมการความเข้มรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่จากหลอดรังสีอินฟราเรดไกล
รูปทรงกระบอกเล็กยาว

Radiation intensity equation on a flat plane emitted from far-infrared lamp
in the shape of small-long cylinder

กมล พลคำ

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

อำเภอเมือง จังหวัดมหาสารคาม 44000

E-mail: ponkham@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้สร้างสมการสำหรับคำนวณหาค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกเล็กยาว โดยการอินทิเกรตสมการการแผ่รังสีตามกฎกำลังสองผกผันและกฎโคไซน์ของหลอดรังสีทรงกระบอกช่วงเล็ก ๆ ที่แผ่รังสีตกกระทบบนพื้นระนาบตลอดช่วงความยาวทั้งหมดของหลอดรังสี ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการที่มีประโยชน์ต่อการออกแบบประยุกต์ใช้หลอดรังสีอินฟราเรดไกลในงานต่าง ๆ ผลการวิจัยพบว่ารูปกราฟสามมิติของความเข้มรังสีบนพื้นระนาบที่ได้จากสมการ สอดคล้องเป็นอย่างดีกับรูปกราฟสามมิติที่ได้จากการทดลอง

คำสำคัญ: สมการการแผ่รังสีอินฟราเรดไกล ตัวแผ่รังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกเล็กยาว

Abstract

In this research, based on the Inverse Square Law and the Cosine Law, an equation of radiation intensity on flat plane emitted from a small-long cylinder shape of Far-infrared (FIR) emitter has been derived by integration of the normal radiation intensity equation over small path intervals of the emitter. The exact

Received: October 25, 2017

Revised: January 08, 2018

Accepted: January 11, 2018

solution can be found and used to design many FIR application works. The result showed that the three-dimensional graphs of FIR intensity on flat plane calculated from this equation agree well with the experimental graphs.

Keywords: Far-infrared radiation equation, Small-long cylinder shape of Far-infrared emitter

1. บทนำ

รังสีอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง บางครั้งเรียกว่ารังสีใต้แดงหรือรังสีความร้อน ตามมาตรฐาน ISO 20473:2007 แบ่งรังสีอินฟราเรด ออกเป็นสามช่วงคือ รังสีอินฟราเรดใกล้ (Near-Infrared) มีช่วงความยาวคลื่น $0.78 - 3 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดกลาง (Mid-Infrared) มีช่วงความยาวคลื่น $3 - 50 \mu\text{m}$ และรังสีอินฟราเรดไกล (Far-Infrared) มีช่วงความยาวคลื่น $50 - 1000 \mu\text{m}$ รังสีอินฟราเรดสามารถนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในการให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์และการอบแห้งในงานต่าง ๆ มากมาย เช่น ใช้ในอุตสาหกรรมรถยนต์ โถหะ พลาสติก ไม้ อาหาร อุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์[1] ตลอดจนใช้อบแห้งผลิตผลทางการเกษตร[2] เช่น สับปะรด[3] แครอท[4] โสมแดง[5] สตอเบอร์รี่[6] ปลาหมึก[7] ลำไย[8] ถั่วเขียว[9] รวมถึงสามารถใช้ในทางการแพทย์เพื่อบำบัดรักษาโรค[10] เป็นต้น อย่างไรก็ตามผู้วิจัยพบว่ายังไม่มีสมการที่ใช้คำนวณหาความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ในกระบวนการออกแบบสร้างเตาอบ เพื่อให้มีความเข้มของรังสีที่เหมาะสมและมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะรังสีที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกเล็กยาวซึ่งเป็นรูปทรงหนึ่งที่มีใช้กันอย่างแพร่หลาย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างสมการสำหรับคำนวณหาความเข้มของรังสี

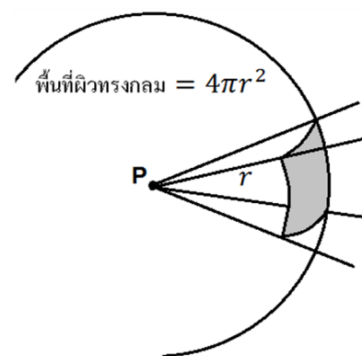
บนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกยาว พร้อมทั้งเปรียบเทียบผลการคำนวณจากสมการที่สร้างขึ้นกับผลการทดลองวัดรังสีด้วยเครื่องเน็ตเรดิโอมิเตอร์ (Net Radiometer)

2. วัสดุอุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การสร้างสมการเพื่อคำนวณหาความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกยาว

พิจารณาแหล่งกำเนิดรังสีแบบจุด (point source) ที่มีกำลังของการแผ่รังสี P ดังรูปที่ 1 สามารถหาความเข้มรังสี I ณ พื้นที่ A ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีเป็นระยะทาง r ได้จากกฎกำลังสองผกผัน (Inverse square law) ดังสมการ

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (1)$$



รูปที่ 1 การแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดแบบจุดตามกฎกำลังสองผกผัน

ในกรณีที่แหล่งกำเนิดรังสีมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกเล็กยาว L รัศมี r_0 การพิจารณาหาค่าความเข้มรังสี I ณ จุด $B(x_0, y_0, z_0)$ ใด ๆ บนพื้นที่ซึ่งห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีรูปทรงกระบอกเล็กยาวเป็นระยะทาง r ดังรูปที่ 2 อาจพิจารณาโดยเริ่มจากกำหนดให้ครึ่งหนึ่งของพื้นที่ผิวรูปวงแหวนเล็ก ๆ บนหลอดรังสีที่จุด $A(x, 0, 0)$ ทำหน้าที่เสมือนแหล่งกำเนิดรังสีแบบจุดแผ่รังสีไปยังจุด B ทำให้มีความเข้มรังสี (dI) ที่จุด B ดังสมการ

$$dI = \frac{dP}{4\pi r^2} \quad (2)$$

ถ้ากำหนดให้ กำลังของการแผ่รังสี P แปรผันโดยตรงกับกำลังไฟฟ้า p ที่จ่ายให้กับหลอดรังสี ดังนั้น

$$P \propto p \\ \therefore P = kp \quad (3)$$

โดย k เป็นค่าคงที่ซึ่งในที่นี้หมายถึงประสิทธิภาพในการแผ่รังสีของหลอด

ดังนั้นจาก (3) จะได้ว่า

$$dP = kdp \quad (4)$$

$$\text{แทน (4) ใน (2) จะได้} \quad dI = \frac{kdp}{4\pi r^2} \quad (5)$$

$$\text{จาก} \quad p = i^2 R \quad (6)$$

$$\text{และ} \quad R = \rho \frac{L}{a} \quad (7)$$

โดยที่ i คือกระแสไฟฟ้า (A)

R คือความต้านทานไฟฟ้า (Ω)

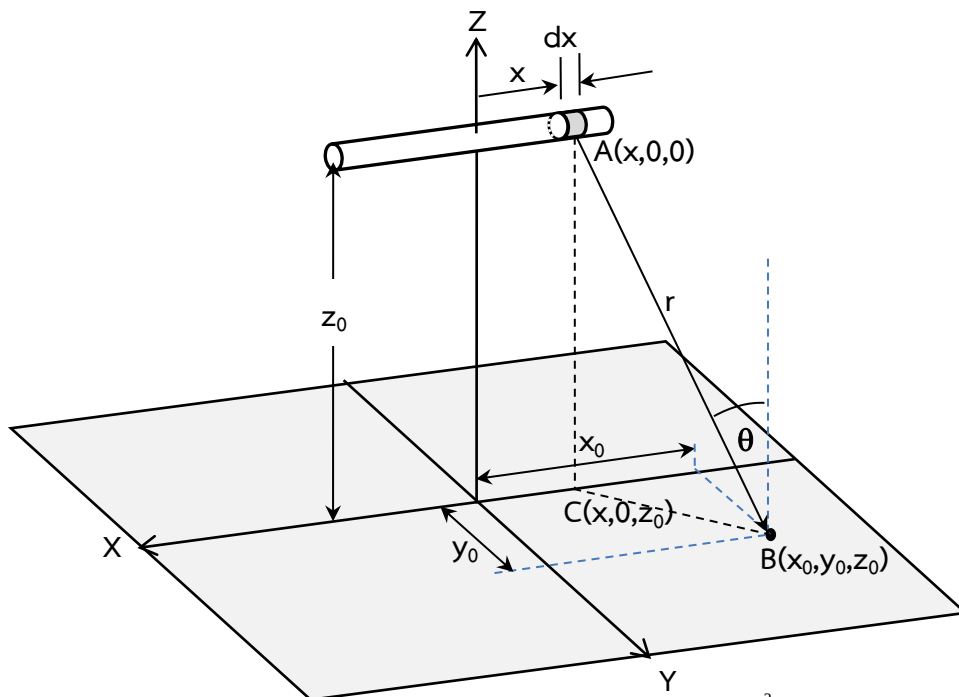
ρ คือสภาพต้านทานไฟฟ้า (Ωm)

L คือความยาวของหลอดรังสี (m)

a คือพื้นที่หน้าตัดของหลอดรังสี (m^2)

แทนค่า (6) และ (7) ใน (5) จะได้

$$dI = \frac{kd \left(\frac{i^2 \rho L}{a} \right)}{4\pi r^2} \\ \therefore dI = \frac{ki^2 \rho}{4\pi r^2 a} dL \quad (8)$$



รูปที่ 2 การแผ่รังสีของแหล่งกำเนิดรูปทรงกระบอกเล็กยาวบนพื้นระนาบ

(9)

แทน (9) ใน (8) จะได้ $dI = \frac{K}{r^2} dL$ (10)

โดยที่ความยาวส่วนเล็ก ๆ dL ของหลอดรังสีก็คือความยาว dx ดังรูปที่ 2 ดังนั้นจาก (10) จะได้

$$dI = \frac{K}{r^2} dx \quad (11)$$

เนื่องจาก dI ตามสมการที่ (10) นี้เป็นความเข้มของรังสีที่จุด $B(x_0, y_0, z_0)$ อันเนื่องมาจากรังสีซึ่งอยู่ในทิศทำมุม θ ดังรูปที่ 2 ดังนั้นถ้าพิจารณาความเข้มของรังสีที่ตกกระทบบนตั้งฉาก ($dI_\perp$) กับพื้นระนาบ XY จะได้

$$dI_\perp = (dI) \cos\theta \quad (12)$$

แทนค่า dI จาก (11) และ $\cos\theta = \frac{z_0}{r}$ (พิจารณารูปที่ 2) ใน (12) จะได้

$$dI_\perp = \frac{Kz_0}{r^3} dx \quad (13)$$

พิจารณารูปที่ 2 จะเห็นว่า

$$r = \left[(x - x_0)^2 + (0 - y_0)^2 + (0 - z_0)^2 \right]^{1/2}$$

ดังนั้นแทน $r = \left[(x - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 \right]^{1/2}$ ใน (13) จะได้

$$dI_\perp = \frac{Kz_0}{\left[(x - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 \right]^{3/2}} dx \quad (14)$$

เราจะสามารถหาความเข้มรังสีที่แผ่ออกมาจากหลอดความยาว L ทั้งหมดของหลอดรังสีที่ตกกระทบบนตั้งฉากกับระนาบ XY ที่จุด B โดยการอินทิเกรตสมการที่ (14) ตลอดช่วงความยาว dx จาก $-L/2$ ถึง $L/2$ จะได้

$$I_\perp = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{Kz_0}{\left[(x - x_0)^2 + y_0^2 + z_0^2 \right]^{3/2}} dx \quad (15)$$

ให้ b เป็นค่าคงที่ และกำหนดให้

$$b^2 = y_0^2 + z_0^2 \quad (16)$$

และให้ $u = x - x_0$ (17)

จาก (17) จะได้ $du = dx$ (18)

พิจารณาช่วงของการอินทิเกรตจาก (17) ถ้า

$$x = L/2 \text{ จะได้ } u = (L/2) - x_0 \quad (19)$$

ทำนองเดียวกันถ้า $x = -L/2$ จะได้

$$u = -(L/2) - x_0 \quad (20)$$

แทน (16) ถึง (20) ใน (15) จะได้

$$I_\perp = Kz_0 \int_{-(L/2)-x_0}^{(L/2)-x_0} \frac{1}{\left[u^2 + b^2 \right]^{3/2}} du \quad (21)$$

กำหนดให้ $u = b(\tan\alpha)$ (22)

จะได้ $du = b(\sec^2\alpha) d\alpha$ (23)

พิจารณาช่วงของการอินทิเกรตจาก (22) ถ้า

$$u = (L/2) - x_0 \text{ จะได้ } \tan\alpha = \frac{(L/2) - x_0}{b} \quad \text{ดังนั้น}$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{(L/2) - x_0}{b}\right) \quad (24)$$

ทำนองเดียวกัน ถ้า $u = -(L/2) - x_0$ จะได้

$$\tan\alpha = \frac{-(L/2) - x_0}{b} \quad \text{ดังนั้น}$$

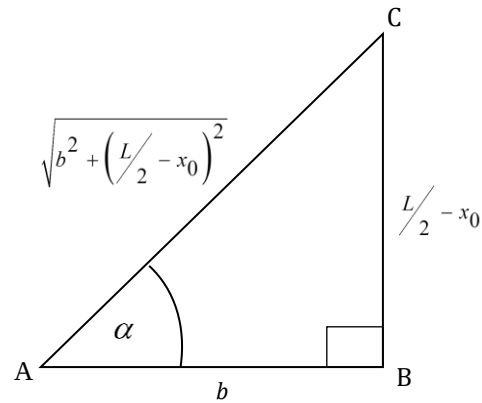
$$\alpha = \arctan\left(\frac{-(L/2) - x_0}{b}\right) \quad (25)$$

แทน (22) ถึง (25) ใน (21) จะได้

$$\begin{aligned}
 I_{\perp} &= Kz_0 \int_{\arctan\left(\frac{-(L/2)-x_0}{b}\right)}^{\arctan\left(\frac{(L/2)-x_0}{b}\right)} \frac{b(\sec^2 \alpha)}{[b^2 \tan^2 \alpha + b^2]^{3/2}} d\alpha \\
 I_{\perp} &= Kz_0 \int_{\arctan\left(\frac{-(L/2)-x_0}{b}\right)}^{\arctan\left(\frac{(L/2)-x_0}{b}\right)} \frac{b(\sec^2 \alpha)}{[b^2 (\tan^2 \alpha + 1)]^{3/2}} d\alpha \\
 I_{\perp} &= Kz_0 \int_{\arctan\left(\frac{-(L/2)-x_0}{b}\right)}^{\arctan\left(\frac{(L/2)-x_0}{b}\right)} \frac{b(\sec^2 \alpha)}{[b^2 (\sec^2 \alpha)]^{3/2}} d\alpha \\
 I_{\perp} &= \frac{Kz_0}{b^2} \int_{\arctan\left(\frac{-(L/2)-x_0}{b}\right)}^{\arctan\left(\frac{(L/2)-x_0}{b}\right)} \cos \alpha d\alpha \\
 I_{\perp} &= \frac{Kz_0}{b^2} \sin \alpha \Big|_{\arctan\left(\frac{-(L/2)-x_0}{b}\right)}^{\arctan\left(\frac{(L/2)-x_0}{b}\right)} \\
 &= \frac{Kz_0}{b^2} \left\{ \sin \left[\arctan \left(\frac{(L/2)-x_0}{b} \right) \right] - \sin \left[\arctan \left(\frac{-(L/2)-x_0}{b} \right) \right] \right\} \\
 &\dots\dots (26)
 \end{aligned}$$

พิจารณาสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ดังรูปที่ 3 ถ้า $\overline{AB} = b$ และ $\overline{BC} = (L/2) - x_0$ จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส จะได้ว่า $\overline{AC} = \sqrt{b^2 + (L/2 - x_0)^2}$ ดังนั้นจากรูปที่ 3 จะได้

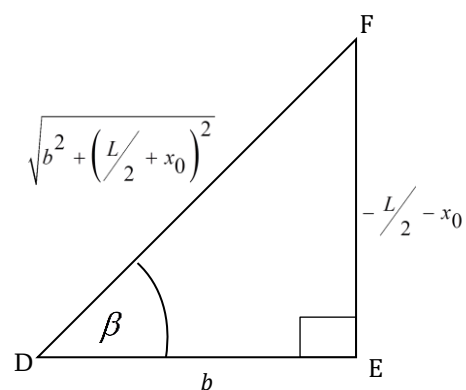
$$\alpha = \arctan \left(\frac{(L/2) - x_0}{b} \right) = \arcsin \left(\frac{(L/2) - x_0}{\sqrt{b^2 + (L/2 - x_0)^2}} \right) \dots\dots (27)$$



รูปที่ 3 สามเหลี่ยมมุมฉากใช้หามุม α ในสมการ(27)

ทำนองเดียวกันพิจารณาสามเหลี่ยมมุมฉาก DEF ดังรูปที่ 4 ถ้า $\overline{DE} = b$ และ $\overline{EF} = -(L/2) - x_0$ จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 \overline{DF} &= \sqrt{b^2 + (L/2 + x_0)^2} \text{ ดังนั้นจากรูปที่ 4 จะได้} \\
 \beta &= \arctan \left(\frac{-(L/2) - x_0}{b} \right) = \arcsin \left(\frac{-(L/2) - x_0}{\sqrt{b^2 + (L/2 + x_0)^2}} \right) \\
 &\dots\dots (28)
 \end{aligned}$$



รูปที่ 4 สามเหลี่ยมมุมฉากใช้หามุม β ในสมการ(28)

แทน (27) และ (28) ใน (26) จะได้

$$I_{\perp} = \frac{Kz_0}{b^2} \left\{ \frac{(L/2) - x_0}{\sqrt{b^2 + (L/2 - x_0)^2}} + \frac{(L/2) + x_0}{\sqrt{b^2 + (L/2 + x_0)^2}} \right\} \quad \text{..... (29)}$$

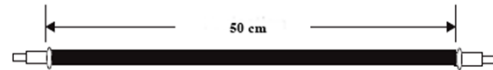
แทนค่า $b^2 = y_0^2 + z_0^2$ จาก (16) ใน (29) จะได้

$$I_{\perp} = \frac{Kz_0}{y_0^2 + z_0^2} \left\{ \frac{(L/2) - x_0}{\sqrt{y_0^2 + z_0^2 + (L/2 - x_0)^2}} + \frac{(L/2) + x_0}{\sqrt{y_0^2 + z_0^2 + (L/2 + x_0)^2}} \right\} \quad \text{.....(30)}$$

สมการที่ (30) นี้จะเป็นสมการที่ใช้คำนวณหาค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกยาว

2.2 การวัดความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกยาว

ติดตั้งหลอดรังสีอินฟราเรดไกลชนิดเซรามิกรูปทรงกระบอกความยาว 50 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 cm ดังรูปที่ 5 บนขาตั้ง โดยให้สูงขึ้นจากระนาบที่จะวัดความเข้ม (ตามรูปที่ 2) และเพื่อความสะดวกในการวัดความเข้มของรังสีที่ตำแหน่ง (x_0, y_0, z_0) ใด ๆ ด้วยเน็ตเรดิโอมิเตอร์ (ยี่ห้อ KIPP&ZONEN รุ่น NR Lite 2 : Spectral range 0.2 to 100 μm) ผู้วิจัยได้ทำระนาบที่จะวัดความเข้มของรังสีให้มีลักษณะเป็นกรอบไม้ขนาดกว้าง 1 m ยาว 1 m และใช้เชือกทำเป็นตาข่ายภายในกรอบไม้ โดยตาข่ายมีขนาดกว้าง 5 cm ยาว 5 cm ดังรูปที่ 6 จุดตัดของตาข่ายก็คือตำแหน่ง (x_0, y_0, z_0) ใด ๆ ที่จะวัดความเข้มของรังสีที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดที่ติดตั้งอยู่ด้านบน



รูปที่ 5 ลักษณะของหลอดรังสีอินฟราเรดไกลที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 6 โครงตาข่ายซึ่งจุดตัดของตาข่ายจะเป็นตำแหน่ง (x_0, y_0, z_0) ใด ๆ ที่ใช้วัดความเข้มรังสี

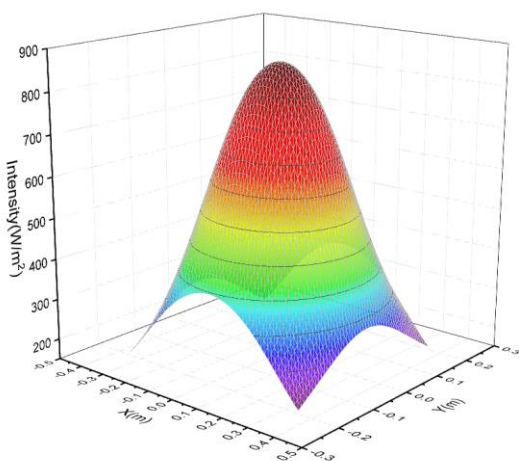
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ผลการสร้างสมการสำหรับคำนวณหาค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกยาว

หาได้โดยการอินทิเกรตสมการการแผ่รังสีตามกฎกำลังสองผกผันและกฎโคไซน์ของวัตถุรูปทรงกระบอกสั้นที่แผ่รังสีตกกระทบตั้งฉากพื้นระนาบตลอดช่วงความยาวทั้งหมดของหลอดรังสี ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตามสมการที่ (30)

3.2 เปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบจากสมการที่สร้างขึ้นกับการทดลองวัดรังสีอินฟราเรดไกลด้วยเครื่องเน็คเรดิโอมิเตอร์

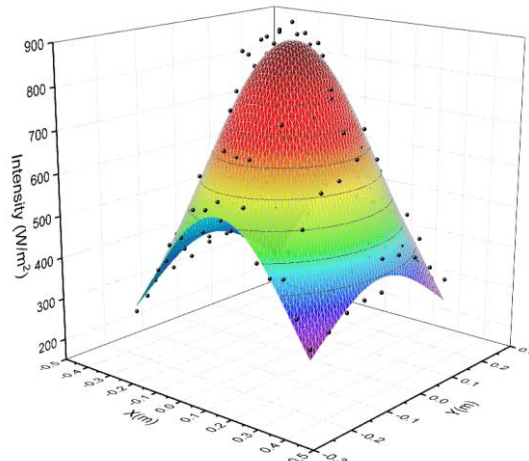
รูปที่ 7 ก. และ 7 ข. เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบผลการคำนวณหาค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบจากสมการที่สร้างขึ้น (โดยใช้ $K = 110.7 \text{ W/m}^2$) กับผลการทดลองวัดความเข้มของรังสีอินฟราเรดไกลด้วยเน็คเรดิโอมิเตอร์ที่ระยะห่างระหว่างหลอดรังสีอินฟราเรดกับพื้นระนาบ 20 cm ($Z_0 = 0.2 \text{ m}$)



ก. กราฟสามมิติที่ได้จากสมการที่ 30

โดยที่จุดสีดำเป็นค่ารังสีที่ได้จากการวัด ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลและพล็อตกราฟแบบ Non-linear surface fitting ด้วยโปรแกรม Origin 2017 ได้ค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) $R^2 = 0.95$

จากรูปที่ 7 พบว่ารูปทรงของกราฟสามมิติของความเข้มรังสีบนพื้นระนาบที่ได้จากสมการมีรูปทรงที่สอดคล้องกันกับกราฟสามมิติที่ได้จากการทดลอง โดยที่ระยะห่างระหว่างหลอดรังสีอินฟราเรดกับพื้นระนาบ 20 cm นั้น ถือว่าเป็นระยะที่ใกล้หลอดรังสีอินฟราเรด เมื่อระยะห่างจากหลอดไปตามแนวราบทั้งแกน X และ Y จะพบว่า ค่าความเข้มของรังสีจะลดลงอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการตกตั้งฉากของรังสีหรือทอม $\cos\theta$ อย่างไรก็ตามรูปทรงของกราฟจากการทดลองจะมีลักษณะที่อ้วนกว่ากราฟที่ได้จากทฤษฎีทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอด แม้จะมีขนาดเล็ก (1.75 cm) เมื่อเทียบกับความยาวของหลอด (50 cm) แต่เมื่อวัดในระยะใกล้ (20 cm) ขนาดของหลอดจะส่งผลต่อระยะห่างระหว่างผิวหลอดกับพื้นระนาบที่สั้นลงทำให้มีผล



ข. กราฟสามมิติที่ได้จากการทดลอง

รูปที่ 7 เปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสีบนพื้นระนาบ

ต่อความชื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับสมการทางทฤษฎี ซึ่งไม่คิดขนาดของหลอด เป็นผลทำให้รูปทรงของ กราฟจากการทดลองมีลักษณะที่อ้วนกว่ากราฟที่ได้ จากทฤษฎี นอกจากนี้ยังพบว่าความชื้นรังสีที่ตก กระทบพื้นระนาบจะมีค่าลดลงตามระยะแกน x กับ y ที่แตกต่างกันทั้งนี้เนื่องมาจาก การจัดวางหลอด รังสีอินฟราเรดได้จัดวางให้ความยาวของหลอด วางตัวไปตามแนวแกน x ส่งผลทำให้ระยะทางจาก ตำแหน่งต่างๆของหลอดไปยังตำแหน่งตามแกน x มีระยะทางโดยรวมแตกต่างจากระยะทางจาก ตำแหน่งต่าง ๆ ของหลอดไปยังตำแหน่งตามแกน y ดังนั้นในการออกแบบการใช้งานหลอดรังสี อินฟราเรดไกลรูปทรงกระบอกเล็กยาวนั้น เพื่อให้ รังสีอินฟราเรดที่ตกบนพื้นระนาบมีความชื้นไม่ ต่างกันมากจึงควรกำหนดให้หลอดรังสีและระนาบ มีระยะห่างที่มากพอหรืออาจติดตั้งโคมสะท้อนรังสี รูปทรงพาราโบลาเพิ่มเติมเข้าไปที่ด้านบนของ หลอด รวมทั้งอาจติดตั้งหลอดรังสีเพิ่มมากกว่าหนึ่ง หลอด โดยให้แต่ละหลอดมีระยะห่างที่เหมาะสม

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างสมการสำหรับ คำนวณหาค่าความชื้นของรังสีบนพื้นระนาบที่แผ่ ออกมาจากหลอดรังสีอินฟราเรดไกลรูปทรง กระบอกเล็กยาว โดยการสร้างสมการการแผ่รังสี ตามกฎกำลังสองผกผันและกฎโคไซน์จากนั้น อินทิเกรตสมการความชื้นรังสีที่แผ่ออกจากหลอด รังสีความยาวสั้น ๆ ที่ตกกระทบบนพื้นระนาบ ตลอดช่วงความยาวทั้งหมดของหลอดรังสี คำตอบที่ ได้เป็นสมการที่ใช้บอกความชื้นของรังสี อินฟราเรดที่ตกกระทบบนพื้นระนาบ ซึ่งมี ประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการคำนวณออกแบบ

การกระจายของความชื้นรังสีอินฟราเรดใน เครื่องอบแห้ง ผลการทดลองเปรียบเทียบกับกราฟ สามมิติของความชื้นรังสีบนพื้นระนาบที่ได้จาก สมการที่สร้างขึ้นพบว่าสอดคล้องกับรูปกราฟสาม มิติที่ได้จากการทดลอง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ สาขาวิชาฟิสิกส์ สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และศูนย์วิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราช ภัฏมหาสารคาม ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่และ อุปกรณ์สำหรับทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ratti C. and A.S. Mujumdar. *Infrared Drying in Handbook of Industrial Drying*. Volume 1.p. 567-588. Marcel Dekker, New York. 1995.
- [2] Sakai N. and T. Hanzawa. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. *Trends in Food Science & Technology*. 5 : 357-362, 1994.
- [3] Kamon Ponkham and others. "Modeling of combined far-infrared radiation and air drying of a ring shaped-pineapple with/without shrinkage," *Food and Bioproducts Processing*. 90(2): 155-164, 2012.
- [4] Congcong Xu., Yunfei Li. and Huaning Yu. "Effect of far-infrared drying on the water state and glass transition temperature in carrots," *Journal of Food Engineering*. 136: 42-47, 2014.

- [5] Xiaofeng Ning, Junsoo Lee and Chungsu Han. "Drying characteristics and quality of red ginseng using far-infrared rays," *Journal of Ginseng Research*. 39(4): 371-375, 2015.
- [6] Nafiye Adak, Nursel Heybeli and Can Ertekin. "Infrared drying of strawberry," *Food Chemistry*. 219: 109-116, 2017.
- [7] Yun Deng and others. "Thermal behavior, microstructure and protein quality of squid fillets dried by far-infrared assisted heat pump drying," *Food Control*. 36(1): 102-110, 2014.
- [8] Adisak Nathakarakule, Petcharat Jaiboon and Somchart Soponronnarit. "Far-infrared radiation assisted drying of longan fruit," *Journal of Food Engineering*. 100(4): 662-668, 2010.
- [9] Maryam Barzegar, Dariush Zare and Richard L. Strohshine. "An integrated energy and quality approach to optimization of green peas drying in a hot air infrared-assisted vibratory bed dryer," *Journal of Food Engineering*. 166: 302-315, 2015.
- [10] Soo Jeong Choi and others. "Clinical utility of far-infrared therapy for improvement of vascular access blood flow and pain control in hemodialysis patients," *Kidney Research and Clinical Practice*. 35(1): 35-41, 2016.