ME-NETT23
The 23rd Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand

CST

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23
4 – 7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่

การคำนวณอุณหภูมิผิวทรงกลมภายในท่อด้วยโครงข่ายความร้อน โดยการใช้ตัวควบคุมกระแส

Calculating Surface Temperature of Sphere in Pipe with Thermal Network By Using Current Controller

ประเสริฐ อินประเสริฐ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม
235 ถนนเพชรเกษม เขตภาษีเจริญ กรุงเทพฯ 10163
โทร. 457-0068 ต่อ 121, โทรสาร 457-3982, อีเมล์ Prasert_Inp@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นการคำนวณอุณหภูมิผิวทรงกลมซึ่งอยู่ภายในท่อโดยการนำตัวควบคุมกระแสที่ใช้ในโครงข่ายไฟฟ้ามาช่วยในการคำนวณการแผ่รังสีความร้อนร่วมกับการพาความร้อนที่เกิดขึ้นบนผิววัสดุ โดยการใช้โปรแกรมมัลติซิมคำนวณอุณหภูมิในโครงข่ายความร้อนแล้วเปรียบเทียบกับทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนโดยใช้หลักสมดุลความร้อนของการแผ่รังสีความร้อนและการพาความร้อนที่ผิววัสดุ เพื่อหาค่าความผิดพลาดของอุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม ในการจำลองกำหนดให้ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm อยู่ภายในท่อที่มีพื้นผิวภายใน 0.5 m^2 ขณะที่ของอากาศภายในท่อมีอุณหภูมิ 293.15 K โดยผนังท่อภายในมีอุณหภูมิ 572.15 K กำหนดให้สภาพการแผ่รังสีความร้อนของผิวทรงกลม 0.30, สภาพการแผ่รังสีความร้อนผนังท่อ 0.80 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอากาศ 10 $W/m^2.^oC$ เมื่อทำการเขียนโครงข่ายความร้อนแล้วคำนวณด้วยโปรแกรมมัลติซิม อุณหภูมิผิวทรงกลมที่คำนวณด้วยโปรแกรมมีความผิดพลาด 0.001% จากค่าความผิดพลาดแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายความร้อนที่ใช้ตัวควบคุมกระแสสามารถใช้คำนวณการแผ่รังสีร่วมกับโครงข่ายความร้อนของการพาความร้อนได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนร่วมกับการแผ่รังสีความร้อนต่อไป

คำหลัก: ตัวควบคุมกระแส, การแผ่รังสีความร้อน, การพาความร้อน, โครงข่ายความร้อน

Abstract

This paper presents calculating surface temperature of sphere in pipe by using the current controller that use in electrical network to help for calculates about radiation heat transfer which combines with convection heat transfer at the surface of material. By using multiSIM™ software calculate temperature in thermal network and then compare with heat transfer theory which is calculated by heat equilibrium principle of radiation heat transfer and convection heat transfer on the surface of material in order to find an error of temperature which calculate by the software. In the simulation, let a sphere is 1 cm in diameter placed in a pipe which has inside surface area 0.5 m^2. While air in pipe have temperature

293.15 K, inside surface of the pipe has temperature 572.15 K. Let sphere emissivity is 0.30, pipe wall emissivity is 0.80 and convection heat transfer coefficient is 10 W/m^2.^{o}C. After write the thermal network and calculating by multiSIM^{TM} software, sphere temperature has an error result 0.001%. From the error result show that this thermal network which using the current controller can be calculated thermal radiation combine with convection thermal network. It will be useful to solve a complicate heat transfer of radiation problem.

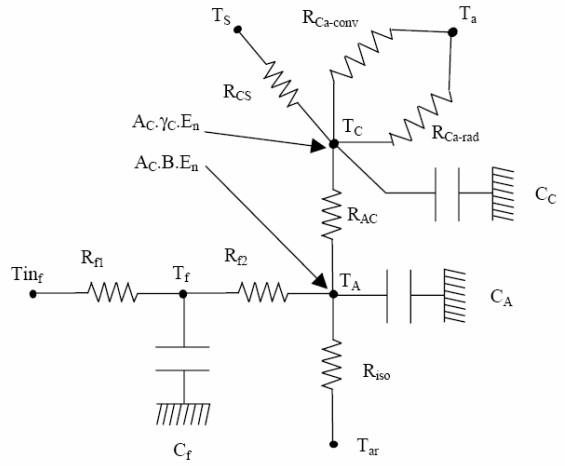
***Keywords**:* current controller, radiation heat transfer, convection heat transfer, thermal network

1. บทนำ

การคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการใช้โครงข่ายความร้อน(Thermal network) เป็นที่นิยมและเข้าใจได้โดยง่าย เหมาะสำหรับการแก้ปัญหาในเชิงระบบ(System solution) แต่สำหรับปัญหาใดที่มีการแผ่รังสีความร้อนมาเกี่ยวข้องค่าตัวต้านทานการแผ่รังสีจะคำนวณในรูปเทียบเท่าการพาความร้อนซึ่งคำนวณมาจากสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีถ่ายเทความร้อน (Radiation heat transfer coefficient)[4] ซึ่งอยู่กับอุณหภูมิพื้นผิวอย่างมากทำให้ไม่เป็นที่นิยมที่จะใช้โครงข่ายความร้อนในแก้ปัญหาเมื่อไม่ทราบอุณหภูมิพื้นผิว แต่ถ้ายังต้องการจะแก้ปัญหาโดยการใช้โครงข่ายความร้อนจะต้องสมมุติอุณหภูมิพื้นผิวขึ้นมาก่อนแล้วคำนวณค่าตัวต้านทานการแผ่รังสี เมื่อทำการแก้ปัญหาแล้วทำการตรวจสอบค่าอุณหภูมิพื้นผิวที่ได้ว่าใกล้เคียงกับค่าที่สมมุติไว้ในตอนแรกหรือไม่ ถ้าไม่ใกล้เคียงก็ต้องใช้ค่าใหม่ที่ได้ย้อนกลับไปคำนวณค่าความต้านทานการแผ่รังสีซ้ำอีกแล้วแทนค่าใหม่ลงในโครงข่ายความร้อน

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าตัวต้านทานการพาความร้อน($R_{Ca\text{-}conv}$) และตัวต้านทานการแผ่รังสี ($R_{Ca\text{-}rad}$) นำมาต่อขนานกันระหว่างโนดอุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์ (T_C) และ อุณหภูมิของบรรยากาศ (T_a) ซึ่งเป็นอุณหภูมิยกกำลังที่หนึ่ง

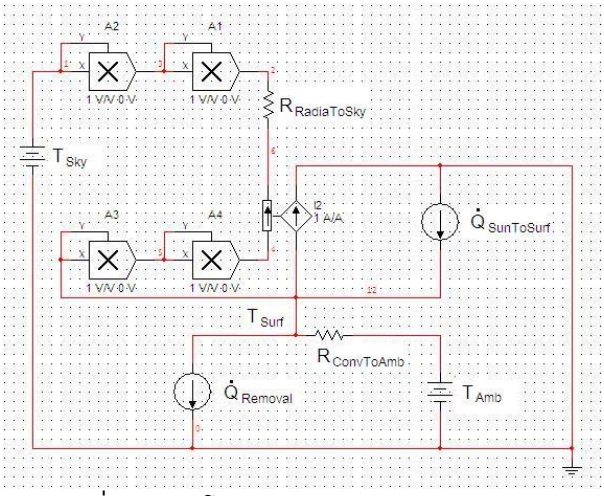
แต่อย่างไรก็ตามได้มีบทความนำเสนอตัวควบคุมกระแส(Current Controlled Current Source) ที่ใช้ในโครงข่ายไฟฟ้า (Electrical network) มาช่วยแก้ปัญหาในการคำนวณการแผ่รังสีความร้อนร่วมกับการพา



รูปที่ 1 โครงข่ายความร้อนสำหรับแผงรังแสงอาทิตย์ในสภาวะแปรเปลี่ยน [2]

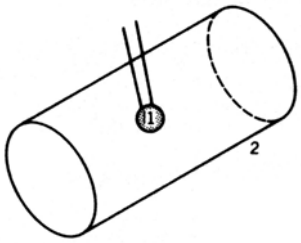
ความร้อนที่แผงรับแสงอาทิตย์ในโครงข่ายความร้อน [1] ซึ่งการใช้ตัวควบคุมกระแสจะช่วยให้ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องสมมุติอุณหภูมิพื้นผิวเพื่อหาค่าความต้านทานการแผ่รังสีในโครงข่ายความร้อนอีกต่อไป นั่นคือไม่ต้องใช้วิธีทดลองแทนค่าแล้วตรวจสอบค่าความผิดพลาด (No trial & error method) นั่นเอง

จากรูปที่ 2 จะเห็นได้ว่าได้มีการคูณสัญญาณอุณหภูมิที่แผงรับแสงอาทิตย์และอุณหภูมิท้องฟ้าให้เป็นกำลังที่ 4 แล้วใช้ตัวต้านทานการแผ่รังสีสู่ท้องฟ้า ($R_{RadiatoSky}$) สำหรับโนดผลต่างกำลังที่ 4 ซึ่งสามารถคำนวณหากระแสไฟฟ้าเทียบเท่าอัตราการถ่ายเทความร้อนได้ และใช้กระแสไฟฟ้านี้ผ่านตัวควบคุมกระแสไปดึงหรือป้อน [5] ให้กับให้กับโครงข่ายความร้อนที่มีโนดเป็นกำลังที่ 1 นั่นคือโครงข่ายการพาความร้อนนั่นเอง



รูปที่ 2 วงจรโครงข่ายความร้อนของแผงรับแสงอาทิตย์ [1]

แต่อย่างไรก็ตามบทความนี้นำได้เสนอเพิ่มเติมในส่วนของตัวควบคุมกระแสที่ใช้ในโครงข่ายความร้อนให้สามารถคำนวณร่วมกับตัวประกอบมุมมอง(View factor) ของการแผ่รังสีได้ โดยการจำลองเพื่อทดสอบความถูกต้องนี้ กำหนดให้ทรงกลมที่จะคำนวณอุณหภูมิอยู่ภายในท่อที่มีอากาศอยู่ภายใน โดยอุณหภูมิทรงกลมจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิอากาศและอุณหภูมิของผนังท่อ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 3 วัตถุทรงกลมอยู่ภายในท่อที่มีความยาวมากหรือท่อที่มีพื้นผิวปิดล้อมทั้งหมด [3]

2. การวิเคราะห์ด้วยหลักสมดุลย์พลังงาน

ในที่นี้จะกล่าวถึงการคำนวณการถ่ายเทความร้อนสำหรับวัตถุทรงกลมอยู่ภายในท่อ ตามรูปที่ 3

2.1 การแผ่รังสีระหว่างผิววัตถุเทา

รูปที่ 4 โครงข่ายการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิวหน้าวัสดุทั้งสอง [3]

เมื่ออุณหภูมิผิวหน้าวัสดุทั้งสองมีอุณหภูมิแตกต่างกันจะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสีดังสมการ[4]

$$\dot{Q}_{Radia\,2\,Surf} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{[(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1 + (1/A_1 F_{1,2}) + (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2]} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{Radia\,2\,Surf} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{RT}} \quad (2)$$

$$R_{RT} = \frac{[(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1 + (1/A_1 F_{1,2}) + (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2]}{\sigma(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)} \quad (3)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{Radia\,2\,Surf}$ - อัตราการแผ่รังสีผิวหน้าวัสดุทั้งสอง, W

ε_1 , ε_2 - สภาพการแผ่รังสีผิววัสดุที่ 1 และวัสดุที่ 2 (Emissive), -

$F_{1,2}$ - ตัวประกอบมุมมองจากผิววัตถุชิ้นที่ 1 ไปผิววัตถุที่ 2, -

σ - ค่าคงที่สเตฟาน-โบลต์ซมานน์ (Stefan-Boltzmann Constant), 5.66956x10^{-8} W/m^2.K^4

A_1 , A_2 - พื้นที่ผิววัสดุที่ 1 และวัสดุที่ 2, m^2

T_1 , T_2 - อุณหภูมิผิววัสดุที่ 1 และวัสดุที่ 2 (Surface temperature), K

R_{RT} - ตัวต้านทานการแผ่รังสีในเทอมผลต่างอุณหภูมิกำลังที่หนึ่ง, K/W

2.2 การพาความร้อนระหว่างผิววัสดุกับอากาศ

เมื่ออุณหภูมิผิวหน้าวัสดุแตกต่างจากอุณหภูมิอากาศโดยรอบจะเกิดการถ่ายเทความร้อน หาค่าได้ดังนี้[4]

$$\dot{Q}_{SurfToAir} = hA_{Surf}(T_{Surf} - T_{Air}) = \frac{(T_{Surf} - T_{Air})}{\frac{1}{hA_{Surf}}} \quad (4)$$

$$R_{ConvToAir} = \frac{1}{hA_{Surf}} \quad (5)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{SurfToAir}$ - อัตราการพาความร้อนให้กับอากาศ, W

h - สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection heat transfer coefficient), W/m^2.^{o}C

A_{Surf} - พื้นที่ผิวการพาความร้อน, m^2

T_{Surf}, T_{Air} - อุณหภูมิผิววัตถุและอุณหภูมิอากาศ, ^{o}C

$R_{ConvToAir}$ - ตัวต้านทานการพาความร้อนสู่อากาศ, ^{o}C/W

2.3 หลักสมดุลย์พลังงานที่ผิวทรงกลม

ที่ผิวทรงกลมมีการถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนสู่อากาศและการแผ่รังสีให้กับผนังท่อเท่านั้น ซึ่งมีสมการดังนี้

$$\dot{Q}_{ConvSphereToAir} + \dot{Q}_{RadiaSphereToPipe} = 0 \quad (6)$$

เมื่อ $\dot{Q}_{ConvSphereToAir}$ - อัตราการพาความร้อนจากผิวทรงกลมสู่อากาศ, W

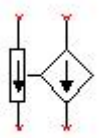
$\dot{Q}_{RadiaSphereToPipe}$ - อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวทรงกลมสู่ผิวท่อ, W

3.การวิเคราะห์ด้วยโครงข่ายความร้อน

การคำนวณโดยการใช้โครงข่ายความร้อนจะต้องหาค่าตัวต้านทานการแผ่รังสีความร้อนเพื่อนำไปใส่ในโครงข่าย จากสมการที่ 3 แต่เมื่อไม่ทราบอุณหภูมิพื้นผิวจะต้องสมมุติอุณหภูมิพื้นผิวขึ้นมาก่อน อย่างไรก็ตามบทความนี้นำได้เสนอตัวควบคุมกระแสที่ใช้ในโครงข่ายไฟฟ้ามาช่วยแก้ปัญหาในการคำนวณการแผ่รังสีความร้อน ซึ่งตัวควบคุมกระแสในที่นี้จะใช้ในการควบคุมอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากผิววัตถุเทียบเท่ากับการแผ่รังสีความร้อนนั่นเอง

3.1 ตัวควบคุมกระแส

สำหรับวงจรไฟฟ้าตัวควบคุมกระแสใช้สำหรับกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในวงจรไฟฟ้าหนึ่ง จะกลายเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอีกวงจรไฟฟ้าหนึ่ง[5] ใช้สัญลักษณ์ตามมาตรฐาน ANSI ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สัญลักษณ์ Current Controlled Current Source

ในที่นี้อัตราการถ่ายเทความร้อนในโครงข่ายการแผ่รังสีจะไปดึงอัตราการถ่ายเทความร้อนออกจากผิววัตถุในโครงข่ายการพาความร้อน

3.2 ตัวต้านทานการแผ่รังสีความร้อนระหว่างผิววัตถุเทา

จากสมการที่ 1 สามารถจัดสมการการถ่ายเทความร้อนในรูปของการแผ่รังสีเทียบเท่าวัตถุดำที่ผิววัตถุทั้งสอง โดยเขียนอยู่ในเทอมของ$E_b=\sigma T^4$ ได้ดังนี้ [3]

$$\dot{Q}_{Radia2Surf} = \frac{(E_{b1} - E_{b2})}{[(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1 + (1/A_1 F_{1,2}) + (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2]} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{Radia2Surf} = \frac{(E_{b1} - E_{b2})}{R_{Eb}} \quad (8)$$

$$R_{Eb} = [(1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1 + (1/A_1 F_{1,2}) + (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2] \quad (9)$$

$$= R_{SC1} + R_{JJ12} + R_{SC2} \quad (10)$$

$$R_{SC1} = (1-\varepsilon_1)/\varepsilon_1 A_1 \quad (11)$$

$$R_{JJ} = 1/A_1 F_{1,2} = 1/A_2 F_{2,1} \quad (12)$$

$$R_{SC2} = (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2 A_2 \quad (13)$$

เมื่อ E_{b1}, E_{b2} - กำลังแผ่รังสีต่อพื้นที่ผิว (Emissive power per surface area) หรือความเข้มกำลังงานแผ่รังสี (Radiation flux) ของวัตถุดำ, W/m^2

R_{Eb} - ความต้านทานการแผ่รังสีระหว่างผิววัตถุเทา, 1/m^2

R_{SC1}, R_{SC2} - ความต้านทานการแผ่รังสีลักษณะผิว (Surface characteristic radiation resistance) อ้างอิงเป็นวัตถุเทาชิ้นที่ 1 และชิ้นที่ 2, 1/m^2

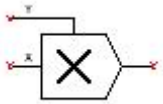
R_{JJ} - ความต้านทานการแผ่รังสีความสัมพันธ์รูปร่าง (Geometry relative radiation resistance) ระหว่างวัตถุเทาหรือความต้านทานเรดิโอซิตี้ (Radiosity resistance) ระหว่างโนด J_1 และ J_2, 1/m^2

$F_{1,2}$ - ตัวประกอบมุมมองจากผิววัตถุชิ้นที่ 1 ไปยังชิ้นที่ 2, -

$F_{2,1}$ - ตัวประกอบมุมมองจากผิววัตถุชิ้นที่ 2 ไปยังชิ้นที่ 1, -

3.3 ตัวคูณสัญญาณ

ในโครงข่ายไฟฟ้ามีบล็อคคูณสัญญาณ 2 สัญญาณเข้าด้วยกัน ใช้สัญลักษณ์ตามมาตรฐาน ANSI ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 สัญลักษณ์ Multiplier Block

สามารถนำมาดัดแปลงเป็นบล็อคที่ให้สัญญาณเป็นกำลังสี่ได้ โดยนำสัญญาณเดียวกันมาคูณกัน $T*T=T^2$ แล้วนำสัญญาณที่ได้มาคูณซ้ำกันอีกครั้งหนึ่ง จะได้ $T^2*T^2=T^4$

4.การคำนวณเปรียบเทียบ

ในการจำลองกำหนดให้ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง(d) 1 cm อยู่ภายในท่อที่มีพื้นผิวภายใน(A_{Pipe}) 0.5 m^2 ขณะที่ของอากาศภายในท่อมีอุณหภูมิ(T_{Amb}) 293.15 K โดยผนังท่อภายในมีอุณหภูมิ(T_{Pipe}) 572.15 K กำหนดให้สภาพการแผ่รังสีความร้อนผิวทรงกลม($\mathcal{E}_{Sphere}$) 0.30, สภาพการแผ่รังสีความร้อนผนังท่อ($\mathcal{E}_{Pipe}$) 0.80 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอากาศ(h) 10 $W/m^2.{}^oC$

4.1 คำนวณโดยใช้หลักสมดุลย์พลังงาน

1. พื้นที่ผิวการถ่ายเทความร้อน

ผิวทรงกลม A_1 = 3.141592654(10^{-4}) m^2

ผิวท่อ $A_2 = A_{Pipe}$ = 0.5 m^2

2. อัตราการแผ่รังสีความร้อนจากผิวทรงกลมสู่ผิวท่อ จาก (1) เนื่องจากกำหนดให้ท่อยาวมาก การแผ่รังสีจากผิวทรงกลมสู่ผิวท่อจะไปถึงทุกทิศทาง ดังนั้นตัวประกอบมุมมองการแผ่รังสีจากผิวทรงกลมกำหนดเป็นวัตถุชิ้นที่ 1 และผิวท่อกำหนดเป็นวัตถุชิ้นที่ 2 มีค่าเท่ากับ 1.0 นั่นคือ

$F_{1,2}$ = 1.0 และอัตราการแผ่รังสีเป็นดังนี้

$$\dot{Q}_{RadiaSphereToPipe} = 2.750767498(10^{-12})(T_{Sphere}^4 - 572.15^4) \quad W$$

3. อัตราการพาความร้อนให้กับอากาศ จาก (2)

$$\dot{Q}_{ConvSphereToAir} = 3.141592654(10^{-3})(T_{Sphere} - 293.15) \quad W$$

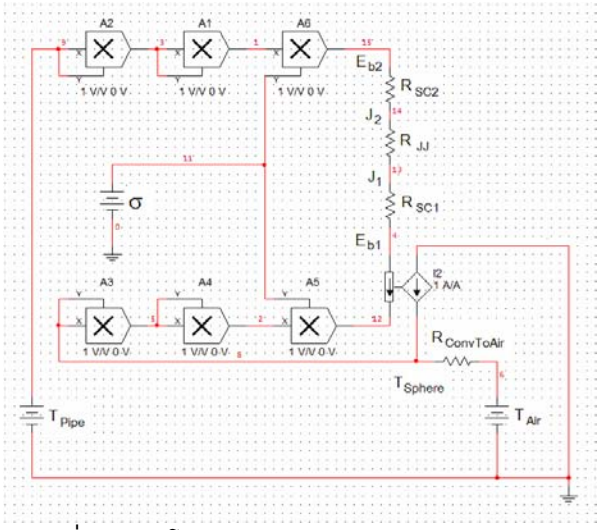
4. คำนวณอุณหภูมิผิวทรงกลม จาก (6)

$$3.141592654(10^{-3})(T_{Sphere} - 293.15) + 2.750767498(10^{-12})(T_{Sphere}^4 - 572.15^4) = 0$$

T_{Sphere} = 370.4842463 K

4.2 คำนวณด้วยวิธีโครงข่ายความร้อน

ในการคำนวณด้วยโครงข่ายความร้อน จะต้องทราบค่าความต้านทานความร้อนทุกตัวในโครงข่าย ในที่นี้จะใช้ (11), (12) และ (13) นำมาต่อกันเป็นโครงข่ายดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 วงจรโครงข่ายความร้อนของวัตถุทรงกลมภายในท่อ

มีขั้นตอนในการคำนวณด้วย Electronic work sheet ดังนี้

1. ตัวต้านทานการพาความร้อนสู่อากาศ จาก (5)

$R_{ConvToAir}$ = 318.3098862 $^oC/W$

2. ความต้านทานการแผ่รังสีลักษณะผิวของทรงกลม กำหนดให้เป็นชิ้นที่ 1 จาก (11)

R_{SC1} = 17427.23068 $1/m^2$

3. ความต้านทานการแผ่รังสีความสัมพันธ์รูปร่างหรือความต้านทานเรดิโอซิตี้ระหว่างโนด J_1 และ J_2 จาก (12)

R_{JJ} = 3183.098862 $1/m^2$

4. ความต้านทานการแผ่รังสีลักษณะผิวของท่อกำหนดให้เป็นชิ้นที่ 2 จาก (13)

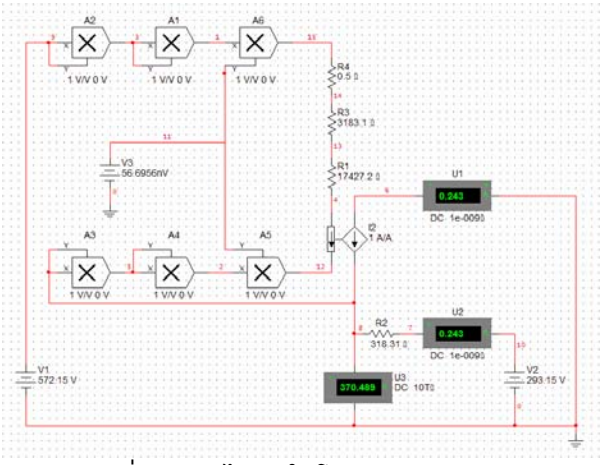
R_{SC2} = 0.5 $1/m^2$

5. เขียนตัวต้านทานลงใน Electronic work sheet ในโปรแกรมมัลติซิม แต่อย่างไรก็ตามสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าอื่นๆได้เช่นกัน

6. ให้โปรแกรมคำนวณอุณหภูมิผิวทรงกลม ดังรูปที่ 8 ซึ่งค่าความต่างศักดิ์ที่ได้คืออุณหภูมิและค่า

กระแสไฟฟ้าที่ได้คืออัตราการถ่ายเทความร้อนนั่นเอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ

T_{Sphere} = 370.489 K



รูปที่ 8 วงจรไฟฟ้าในโปรแกรมมัลติซิม

5. วิเคราะห์ผล

จากการคำนวณด้วยหลักสมดุลย์พลังงานได้อุณหภูมิผิวทรงกลม 370.4842463 K สำหรับการคำนวณโครงข่ายความร้อนได้อุณหภูมิผิวทรงกลม 370.489 K ดังนั้น

$$\%Error = \left(\frac{370.489 - 370.484246}{370.484246} \right) x100 = 0.001\%$$

จะเห็นได้ว่าการใช้ตัวควบคุมกระแสมาร่วมในโครงข่ายความร้อนสามารถคำนวณให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงค่าที่ได้จากผลการคำนวณอย่างมาก

6. สรุป

เมื่อกำหนดให้ทรงกลมมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 cm อยู่ภายในท่อที่มีพื้นผิวภายใน 0.5 m^2 ขณะที่ของอากาศภายในท่อมีอุณหภูมิ 293.15 K โดยผนังท่อภายในมีอุณหภูมิ 572.15 K กำหนดให้สภาพการแผ่รังสีความร้อนผิวทรงกลม 0.30, สภาพการแผ่รังสีความร้อนผนังท่อ 0.80 และสัมประสิทธิ์การพาความร้อนอากาศ 10 $W/m^2.^oC$ แล้วคำนวณโดยโปรแกรมมีความผิดพลาดอุณหภูมิทรงกลม 0.001% จากค่าความผิดพลาดแสดงให้เห็นว่าโครงข่ายความร้อนที่ใช้ตัวควบคุมกระแสสามารถใช้คำนวณการแผ่รังสีร่วมกับโครงข่ายความร้อนของการพาความร้อนได้ ซึ่งจะมีประโยชน์ในการแก้ปัญหาที่มีความซับซ้อนสำหรับการแผ่รังสีความร้อนต่อไป

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ประเสริฐ อินประเสริฐ (2552). การใช้ตัวควบคุมกระแสสำหรับคำนวณอุณหภูมิแผงรับแสงอาทิตย์, *การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 5*, มหาวิทยาลัยนเรศวร จ.พิษณุโลก

[2] Christophe PLANTIER, Gilles FRAISSE, Gilbert ACHARD (2009). *Development and Experimental Validation of a Detailed Flat-Plate Solar Collector Model*, available online at http://enr.cstb.fr/file/rub17_doc12_2.pdf (Accessed on Jan 2009)

[3] Frank W. Schmidt, Robert E, Henderson,Carl H. Wolgemuth (1993). The Pennsylvania State University, *Introduction to Thermal Sciences*, 2nd edition, John Wiley&Sons inc., Singapore, pp 380-383, 388

[4] Jack P. Holman (2002). *Heat transfer*, Southern Methodist University, U.S.A., 9th edition, McGraw-Hill. Inc, New York, pp. 450,451.

[5] John Keown (1998). *MicroSim TM PSpice® and Circuit Analysis*, Southern Polytechnic State University, U.S.A., 3rd edition, Prentice-Hall International. Inc, New Jersey, pp. 367-381.