

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24
20-22 ตุลาคม 2553 จังหวัดอุบลราชธานี

การประยุกต์ใช้กล้องความร้อนรังสีอินฟราเรดในงานตรวจสอบรอยบัดกรี ท่อกับข้อต่อ

Application of Thermal Infrared Camera

in Non-destructive Testing of Brass Joint - Tube

ธนชัย ศรีสำราญ¹, ชีรพล ศรียุบล² และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว^{1*}

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน – อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร (089)-833-7372, อีเมล Thanit_Srisamran@yahoo.co.th, tps@kmutnb.ac.th, unk@kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

ศึกษาวิธีการตรวจสอบรอยเชื่อมแบบใหม่ โดยนำกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยบัดกรีท่อกับข้อต่อโดยใช้ร่วมกับเทคนิคการคำนวณ Thermography และศึกษาความสัมพันธ์ ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ ปริมาณการถ่ายโอนความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวท่อภายนอก ด้วยการให้ความร้อนกับผนังท่อด้านในแบบอิมพัลส์ และทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปกับผลที่ได้จากการทดลอง ทั้งแบบบัดกรีอย่างสมบูรณ์และแบบบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์

หลักการพื้นฐานในการวิเคราะห์ คือให้ความร้อนที่ผนังด้านในของท่อและทำการวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของท่อเมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งวินาที เพื่อตรวจสอบการถ่ายโอนความร้อนผ่านรอยบัดกรี เนื่องจากคุณลักษณะการถ่ายโอนความร้อนจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของการบัดกรี โดยพบว่าการบัดกรีอย่างสมบูรณ์จะมีการถ่ายโอนความร้อนที่ดีกว่าการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์ ที่ตำแหน่ง และเวลาเดียวกัน

Abstract

The study new means about check of Brass Joint–Tube, Application of Thermal Infrared Camera in Non-destructive Testing of Brass Joint–Tube. Use calculation of Thermography and Study about relation of another parameter such as quantity of thermal heat transfer enter to boundary solder, dissemination of average temperature on outside tube surface. give heat at inside tube surface by impulse system and compare result of calculation by computer program with result of experiment, both is perfect Brass Joint–Tube and imperfect Brass Joint–Tube.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีการเชื่อมต่ออุปกรณ์หรือชิ้นงานเข้าด้วยกันหลายวิธีมีข้อดีแตกต่างกันไป สำหรับงานเชื่อมท่อหรือข้อต่อซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีผนังบางจะใช้วิธีการบัดกรีเป็นส่วนใหญ่ โดยจะทำการ

บัดกรีรอบจุดต่อของท่อหรือบริเวณข้อต่อ ดังแสดงในรูปที่ 1 การบัดกรีต้องการผู้ที่มีความชำนาญในการบัดกรี จึงจะได้รอยบัดกรีที่สมบูรณ์ มีความสวยงาม แข็งแรง และไม่รั่วซึม แต่อย่างไรก็ตามขบวนการผลิตในอุตสาหกรรมไม่มีเวลามากพอที่จะทำการบัดกรี

อย่างพิถีพิถัน และผู้ทำการบัดกรีไม่มีความชำนาญ งาน ดังนั้นปัญหาที่มักพบจากบัดกรีที่บกพร่องคือการการบัดกรีไม่เต็ม หรือเกิดโพรงภายใน ทำให้มีผลกระทบต่อความแข็งแรงและการรั่วซึมบริเวณข้อต่อ การตรวจสอบรอยบัดกรีมีหลายวิธีด้วยกัน เช่น การตรวจสอบรอยบัดกรีด้วยวิธี X-Ray ซึ่งค่อนข้างอันตราย และต้องการผู้เชี่ยวชาญ การสั้มนงานมาผ่าเพื่อตรวจสอบรอยบัดกรีเป็นการตรวจสอบชิ้นงานแบบทำลายทำให้ไม่สามารถนำชิ้นงานนั้นมาใช้ได้อีก ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูง จากเหตุผลดังกล่าวทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดในการศึกษาวิธีการตรวจสอบรอยบัดกรีแบบใหม่ โดยนำกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยบัดกรีที่บกพร่อง โดยใช้ร่วมกับเทคนิคการบันทึกภาพของ Thermography และสร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง อาทิ ปริมาณการถ่ายโอนความร้อน การกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยบนพื้นผิวที่ภายนอก จากการให้ความร้อนกับผนังท่อด้านในแบบอิมพัลส์ ซึ่งคาดว่าจะช่วยลดปัญหาด้านค่าใช้จ่ายและอันตรายที่อาจเกิดจากการตรวจสอบรอยบัดกรีแบบเดิม



รูปที่ 1 การบัดกรีที่บกพร่อง

2. วัตถุประสงค์

2.1 เป็นการศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรด โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยบัดกรีที่บกพร่อง

2.2 สร้างแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของระบบ และ ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจำลองแบบของระบบเพื่อทำการศึกษาความสัมพันธ์ทางพารามิเตอร์ต่างๆ

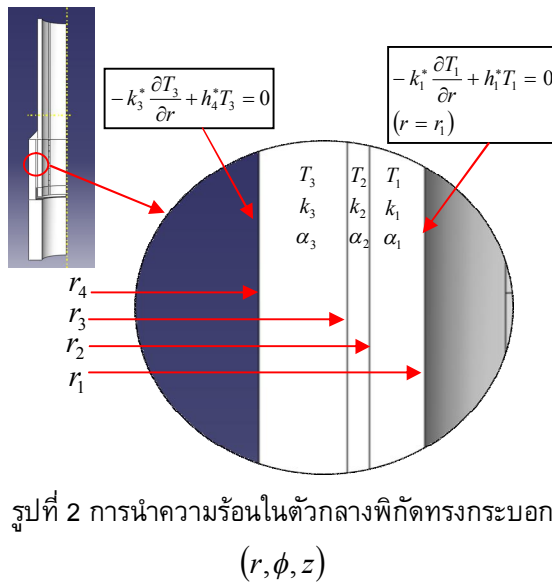
2.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองของระบบทางทฤษฎีกับผลที่ได้จากการทดลองจริง

3. ทฤษฎี

ในการวิเคราะห์ปัญหาการนำความร้อนโดยทั่วไปนั้น สมการการนำความร้อนที่ใช้นั้นจะเขียนในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทั้งนี้ก็เนื่องจากอุณหภูมิ $T(r, \phi, z, t)$ เป็นฟังก์ชันของระบบพิกัด r, ϕ, z และเวลา t ซึ่งได้มาจากกฎการอนุรักษ์พลังงานหรือกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยการนำสมการพลังงานในชั้นวัสดุที่ความหนาแน่นความร้อนไหลผ่านด้วยการนำความร้อน โดยที่ผลการพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนในชั้นวัสดุและส่วนที่เป็นโพรงอากาศภายในนั้น ถือว่ามีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำต่อหน่วยพื้นที่ หรือฟลักซ์ความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับการกระจายอุณหภูมิภายในก่อนวัตถุตามกฎการนำความร้อนของฟูริเยร์ (Fourier's Law) ในการหาฟลักซ์ความร้อนจากกฎดังกล่าว เราจำเป็นต้องทราบค่าความชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ซึ่งความชันของอุณหภูมิภายในทิศทางใด ๆ สามารถหาได้ ถ้าเรารู้การกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature Distribution) โดยที่การกระจายตัวของอุณหภูมิหาได้จากการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสำหรับการนำความร้อนร่วมกับเงื่อนไข (Boundary Condition) และเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition) ที่เหมาะสม สมการการถ่ายเทความร้อนในระบบพิกัดทรงกระบอก โดยทั่วไปจะมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

สมการ (1) คือรูปทั่วไปของสมการ "Heat Diffusion Equation" ในระบบพิกัดทรงกระบอก ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานในการวิเคราะห์การนำความร้อน ซึ่งเมื่อเราแก้สมการนี้จะได้ผลลัพธ์คือการกระจายอุณหภูมิ $T(r, \phi, z, t)$ คุณสมบัติของวัสดุทางวิศวกรรมที่มีอยู่ในคู่มือการถ่ายเทความร้อนส่วนใหญ่มักเป็นประเภทเนื้อเดียวกันและไอโซทรอปิก (Homogeneous and Isotropic) เช่น แก๊ส ของเหลว และของแข็ง ซึ่ง



รูปที่ 2 การนำความร้อนในตัวกลางพิกัดทรงกระบอก

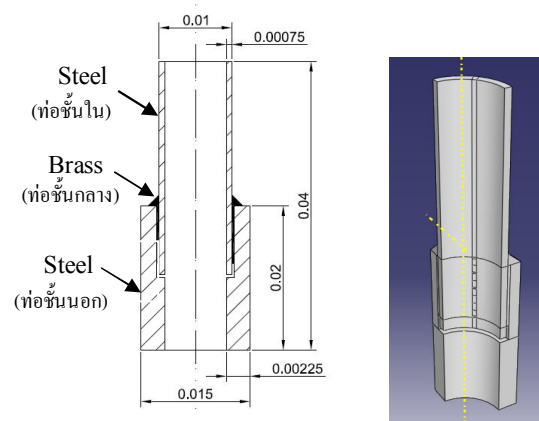
ตัวกลางแบบไอโซทรอปิกจะมีค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), k เท่ากันทุกทิศทาง เมื่อ $\alpha = k/(\rho c_p)$ คือ ค่าการแพร่ความร้อน (Thermal Diffusivity) มีหน่วยเป็น m^2/s

4. วิธีดำเนินการทดลอง

การดำเนินการทดลองเราได้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนแรกเป็นสร้างแบบจำลองของระบบแล้วใช้โปรแกรมสำเร็จรูปจำลองแบบของระบบ ส่วนที่สองเป็นการทดลองจริง

4.1 สร้างแบบจำลอง 3 มิติ

สร้างแบบจำลอง 3 มิติ ของท่อหรือข้อต่อโดยมีลักษณะเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปโดยท่อทรงกระบอกชั้นในมีรัศมีภายใน 4.25 มิลลิเมตร ความหนา 0.75 มิลลิเมตร และมีความยาว 29.5 มิลลิเมตร ส่วนท่อทรงกระบอกชั้นกลางมีรัศมีภายใน 5 มิลลิเมตร ความหนา 0.3 มิลลิเมตร และมีความยาว 8 มิลลิเมตร และท่อทรงกระบอกชั้นนอกมีรัศมีภายใน 5.3 มิลลิเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร และมีความยาว 20 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3

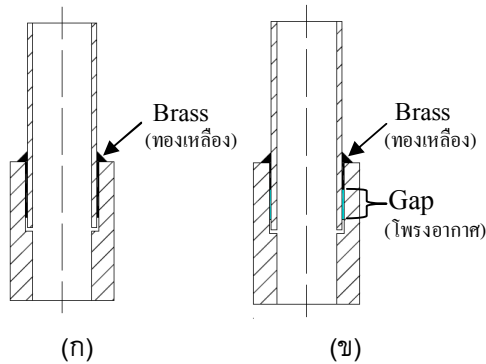


รูปที่ 3 ลักษณะเป็นชิ้นงานรูปทรงกระบอกซ้อนกัน 3 ชั้น

และคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการทดสอบคือ ท่อเหล็ก (AISI 4000 Series Steel) นำมาต่อเข้ากับท่อเหล็ก (AISI 4000 Series Steel) เป็นการเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบ และทำการเชื่อมทั้งสองชิ้นงานเข้าด้วยกัน โดยทำการบัดกรีด้วยลวดทองเหลือง (Red brass, UNS C2300) รอบข้อต่อท่อ ซึ่งบัดกรีชิ้นงานเป็นสองลักษณะคือ ลักษณะที่ 1 การบัดกรีอย่างสมบูรณ์เป็นการบัดกรีที่มีเนื้อทองเหลืองผสานระหว่างท่อทรงกระบอกชั้นนอกและชั้นในเต็มช่องว่างชั้นกลาง (เนื้อผสานทองเหลืองในการทดลองนี้เปรียบเทียบกับท่อทรงกระบอกชั้นกลาง) และการอย่างบัดกรีไม่สมบูรณ์เป็นการบัดกรีไม่เต็ม หรือเกิดโพรงภายในเนื้อทองเหลือง (สำหรับการทดลองนี้ได้กำหนดให้เกิดโพรงอากาศบริเวณท่อทรงกระบอกชั้นกลาง) ดังแสดงในรูปที่ 4 หลังจากนั้นทำการคำนวณผลจากโปรแกรมสำเร็จรูป โดยนำคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลองมาที่ใช้ในการคำนวณ ดังแสดงในตารางที่ 1

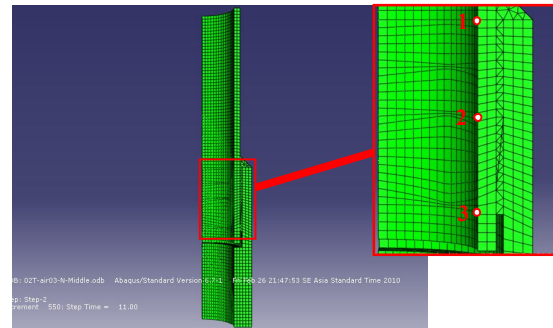
ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของวัสดุ	$k (W/m \cdot K)$	$C_p (J/kg \cdot K)$	$\rho (kg/m^3)$
AISI 400 Series Steel	48.1	473	7850
Red Brass, UNS C2300 (230 Brass), H00 Temper wire	159	380	8750
Air (at Temperature 298 K)	0.026	1005	1.18

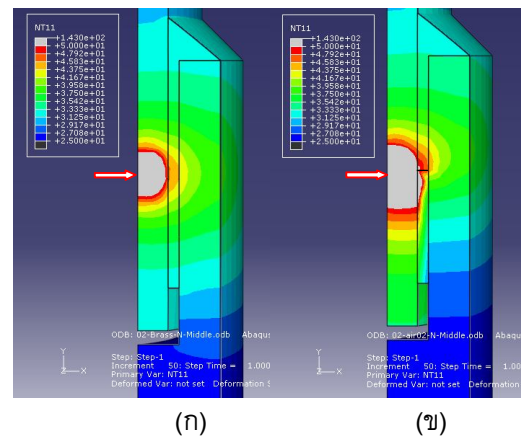


รูปที่ 4 ลักษณะแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย
โปรแกรมสำเร็จรูป
(ก) บัดกร้อย่างสมบูรณ์
(ข) บัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์

โดยที่ k คือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity), C_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Thermal Conductivity) และ ρ คือค่าความหนาแน่น (Density) จากนั้นกำหนดให้อุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมรอบชิ้นงานมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แล้วให้ความร้อน 143 องศาเซลเซียส ที่บริเวณจุดที่ 1 จุดที่ 2 และจุดที่ 3 ซึ่งเป็นผิวด้านในบริเวณข้อต่อของชิ้นงานทั้งแบบบัดกร้อย่างสมบูรณ์และแบบบัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 5 ชิ้นงานจะได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 4 วินาทีแล้วหยุดให้ความร้อน โดยบริเวณที่พื้นผิวที่ให้ความร้อนมีขนาด 0.5×0.5 มิลลิเมตร กริดที่ใช้ในการคำนวณการถ่ายโอนความร้อนเป็นกริดโครงสร้าง (structured mesh) จากการทดลองวัดอุณหภูมิบริเวณข้อต่อที่ผิวด้านนอกของวัสดุ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป พบว่าลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นภายในชิ้นงานของการบัดกร้อย่างสมบูรณ์จะสามารถถ่ายโอนความร้อนได้ดีกว่าชิ้นงานชิ้นงานที่บัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์ เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ดังจะเห็นได้ว่าในรูปที่ 6 (ก) คือชิ้นงานที่มีการบัดกร้อย่างสมบูรณ์และมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่ดีกว่าชิ้นงานที่มีการบัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์ ในรูปที่ 6 (ข) ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน



รูปที่ 5 ลักษณะกริดบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน



รูปที่ 6 ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนชิ้นงานที่ถูกให้ความร้อนที่จุดที่ 2 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที
(ก) บัดกร้อย่างสมบูรณ์
(ข) บัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์

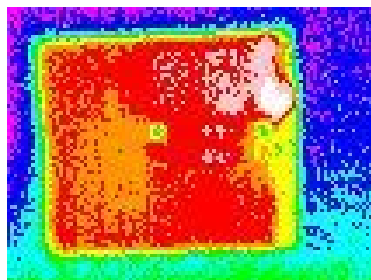
4.2 ทำการทดลองกับชิ้นงานจริง

ส่วนที่สอง ทำการทดลองกับชิ้นงานจริงโดยนำชิ้นงานมาผ่าออกให้เหลือ 1 ใน 4 จากชิ้นงานเดิมหรือให้มีรัศมี 90 องศา ของท่อทรงกระบอก เพื่อให้มีลักษณะเหมือนแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์และง่ายในการทดสอบและตรวจวัดอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมีขนาดและคุณสมบัติของวัสดุเช่นเดียวกับแบบจำลองทางโปรแกรมสำเร็จรูป แล้วให้ความร้อน 143 องศาเซลเซียส ที่บริเวณผิวด้านในของชิ้นงานทั้งแบบบัดกร้อย่างสมบูรณ์และแบบบัดกร้อย่างไม่สมบูรณ์โดยชิ้นงานจะได้รับความร้อนเป็นระยะเวลา 4 วินาที โดยที่พื้นผิวที่ให้ความร้อนมีขนาด 0.5×0.5 มิลลิเมตร จากนั้นทำการตรวจสอบอุณหภูมิที่บริเวณผิวด้านนอก

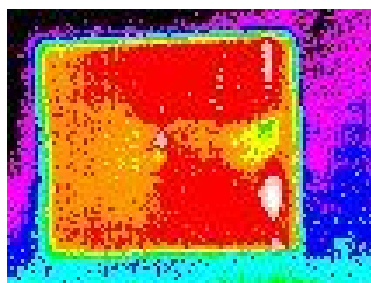


รูปที่ 7 ชิ้นงานจริงที่ใช้ในการทดลอง

ของชิ้นงานเมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที ด้วยกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรด การวิเคราะห์การถ่ายโอนความร้อนของชิ้นงานทั้งแบบบัตกรีอย่างสมบูรณ์และแบบบัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์ในการทดลองจริง ได้ใช้เทคนิคการคำนวณ Thermography เข้ามาเกี่ยวข้องเพื่อให้ได้ผลที่มีความถูกต้องและแม่นยำ ในรูปที่ 8 ได้แสดงการตรวจจับความร้อนที่บริเวณผิวด้านนอกของชิ้นงานโดยใช้กล้องตรวจสอบความร้อนรังสีอินฟราเรด และในรูปที่ 8 (ก) คือชิ้นงานที่มีการบัตกรีอย่างสมบูรณ์และมีลักษณะการถ่ายโอนความร้อนที่ผิวนอกของชิ้นงานดีกว่าชิ้นงานที่มีการบัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์ ในรูปที่ 8 (ข) ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน



(ก) บัตกรีอย่างสมบูรณ์

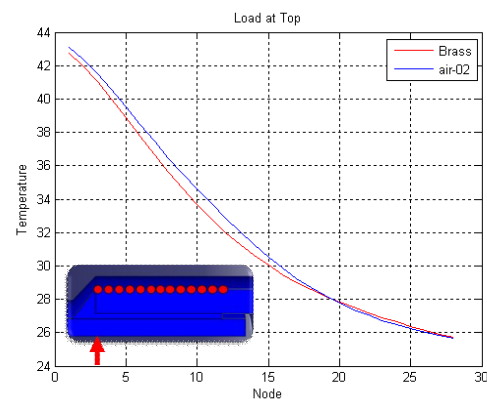


(ข) บัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์

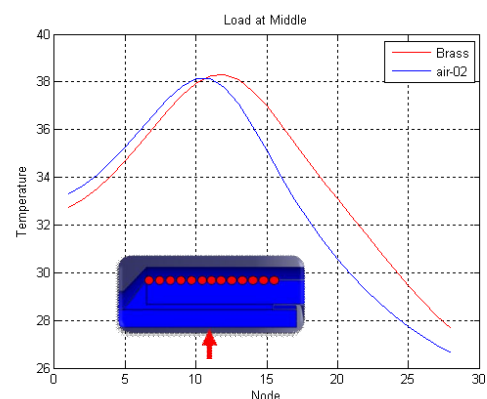
รูปที่ 8 ชิ้นงานที่ถูกให้ความร้อนที่จุดที่ 3 เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที

5. ผลการทดลอง

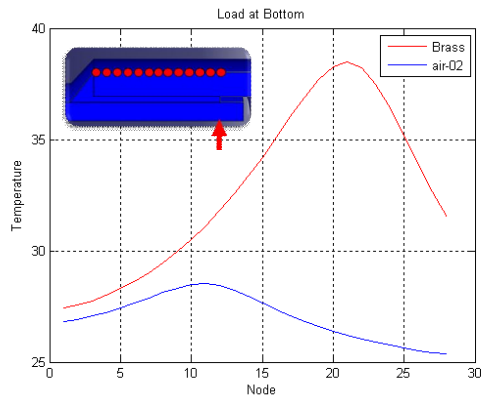
เนื่องจากการบัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์นั้นเป็นการบัตกรีไม่เต็มหรือเกิดโพรงอากาศภายใน จึงมีค่าความต้านทานความร้อนมากกว่าการบัตกรีอย่างสมบูรณ์ และส่งผลให้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของวัสดุแบบบัตกรีไม่สมบูรณ์มีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของวัสดุแบบบัตกรีสมบูรณ์ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน โดยสามารถแสดงการเปรียบเทียบได้ ดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งเป็นกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิววัสดุของการบัตกรีอย่างสมบูรณ์กับการบัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์ด้วยการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป โดยกราฟเส้นสีแดงคือการบัตกรีอย่างสมบูรณ์และกราฟเส้นสีน้ำเงินคือการบัตกรีอย่างไม่สมบูรณ์



(ก)



(ข)



(ค)

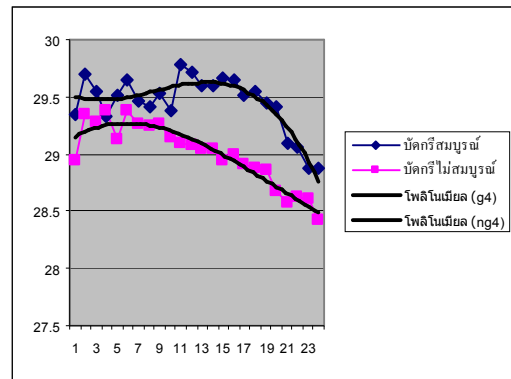
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิววัสดุของ
การบัดกรีอย่างสมบูรณ์กับการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์
โดยการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปเมื่อเวลาผ่าน

ไป 1 วินาที

(ก) ให้ความร้อนจุดที่ 1

(ข) ให้ความร้อนจุดที่ 2

(ค) ให้ความร้อนจุดที่ 3



(ค)

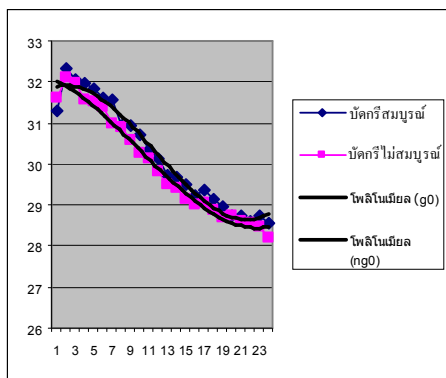
รูปที่ 10 กราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ผิววัสดุของ
การบัดกรีอย่างสมบูรณ์กับการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์
โดยการคำนวณจากกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรด

เมื่อเวลาผ่านไป 1 วินาที

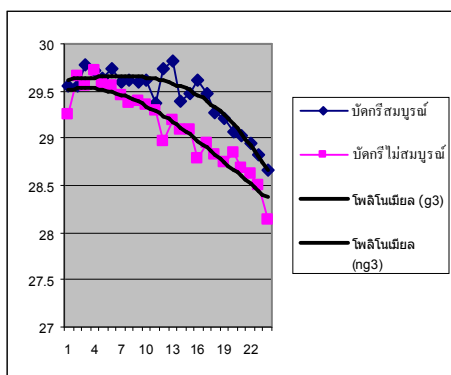
(ก) ให้ความร้อนจุดที่ 1

(ข) ให้ความร้อนจุดที่ 2

(ค) ให้ความร้อนจุดที่ 3



(ก)



(ข)

ส่วนผลที่ได้จากการใช้กล้องความร้อนรังสีอินฟราเรด
ในการตรวจสอบการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานทั้ง
แบบบัดกรีอย่างสมบูรณ์และแบบบัดกรีอย่างไม่
สมบูรณ์สามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความแตกต่าง
ของอุณหภูมิได้ ดังแสดงในรูปที่ 10 โดยกราฟเส้นสี
น้ำเงินคือการบัดกรีอย่างสมบูรณ์และกราฟเส้นสีแดง
คือการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าผลกราฟ
ทั้งการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปและผลกราฟ
จากการคำนวณจากกล้องความร้อนรังสีอินฟราเรดมี
เส้นแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือ เมื่อเวลาผ่านไป
1 วินาที หลังจากการให้ความร้อนอุณหภูมิของการ
บัดกรีอย่างสมบูรณ์มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของการบัดกรี
อย่างไม่สมบูรณ์ ที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน

6. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองให้ความร้อนแก่ชิ้นงานและทำการ
ตรวจสอบรอยเชื่อม โดยนำกล้องความร้อนรังสี
อินฟราเรดมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบรอยบัดกรี
ท่อกับข้อต่อโดยใช้ร่วมกับเทคนิคการคำนวณ
Thermography และนำมาเปรียบเทียบผลการคำนวณ

โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป สามารถสรุปผลได้ว่าการเกิดโพรงอากาศในชิ้นงานหรือการบัดกรีไม่เต็ม มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนในชิ้นงาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากกราฟกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิผิววัสดุของการบัดกรีอย่างสมบูรณ์กับการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์ในรูปที่ 9 และรูปที่ 10 โดยจะพบว่ากราฟทั้งสองมีแนวโน้มเดียวกันคืออุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของการบัดกรีอย่างสมบูรณ์จะสูงกว่าอุณหภูมิของการบัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์ เพราะชิ้นงานที่บัดกรีอย่างไม่สมบูรณ์นอกจากจะมีค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัสแล้วยังมีค่าความต้านทานเนื่องมาจากโพรงอากาศหรือช่องว่างที่เกิดขึ้น จึงทำให้ยากที่จะถ่ายโอนความร้อนผ่านช่องว่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากความต้านทานของอากาศที่มีค่ามากกว่าค่าความต้านทานของทองเหลือง ดังนั้นเมื่อวัดค่าความร้อนที่ผิวด้านนอกที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกันจึงทำให้การบัดกรีอย่างสมบูรณ์มีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งและเวลาเดียวกัน จากการสรุปตั้งต้นจึงเห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้วิธีการตรวจสอบรอยเชื่อมแบบใหม่ด้วยกล้องตรวจสอบความรังสีอินฟราเรด

7. เอกสารอ้างอิง

7.1 บทความจากวารสาร (Journal)

- [1] Maryna Speka, Simone Mattei, Michel Pilloz and Mariana Ilie, 2007. The infrared thermography control of the laser welding of amorphous polymers, NDT&E international, Elsevier.
- [2] Wui-wai Cheng and Chakravarti Madhusudana, 2006, Effect of electroplating on the thermal conductance of fin-tube interface, Applied Thermal Engineering, Elsevier.
- [3] ปรียสุทธิ์ วัฒนธรรม และ ณรงค์เดช พัฒนาไพบุลย์, 2550, การศึกษาประสิทธิภาพของโลหะบัดกรีที่มีส่วนผสมของเงิน ในการบัดกรีเหล็กกล้าไร้สนิม ออสเทนนิติก 304 ด้วยกระบวนการบัดกรีแข็งด้วย

กระแสเหนี่ยวนำ, การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ, 24-26 ตุลาคม 2550

7.2 หนังสือ

- [1] Frank P. Incropera and David P. De Witt, 1990. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Singapore.
- [2] C.V. Madhusudana, 1996. Thermal Contact Conductance, Springer, U.S.A.
- [3] D. Poulikakos, 1994. Conduction Heat Transfer, Prentice-Hall International, Inc. U.S.A.
- [4] Maryna Speka, Simone Mattei, Michel Pilloz and Mariana Ilie, 2007. The infrared thermography control of the laser welding of amorphous polymers, NDT&E international.