

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิและความเร็วลมใน เตาเผาดินด้านเกวียนที่เกิดจากการเจาะช่อง สี่เหลี่ยมที่ผนังด้านข้าง*

เกียรติฟ้า ตั้งใจจิต¹⁾ และ ปกรณ์วิศว์ บัณฑา²⁾

¹⁾ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²⁾นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Email: Kiatfa@kku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายของอุณหภูมิ และความเร็วของลมร้อน ที่ไหลแบบอิสระในเตาเผาดินด้านเกวียนโดยไม่มีผลิตภัณฑ์ที่เผาอยู่ในเตา แล้วเปรียบเทียบกับพฤติกรรมดังกล่าวในสองกรณีคือ กรณีไม่ได้เจาะช่องที่ผนังและกรณีเจาะช่องที่ผนังด้านข้างเตา โดยการคำนวณตามระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ข้อมูลที่ได้จะสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อทำความเข้าใจและแก้ไขปัญหาการใช้เชื้อเพลิงไม่และการประหยัดพลังงานในกระบวนการเผาดินได้ หลังจากทำการศึกษาระบบการเผาผลิตภัณฑ์ดินด้านเกวียนแล้ว จึงได้สร้างแบบจำลองเตาเผาดินด้านเกวียนตามลักษณะทางกายภาพของเตาที่มีอยู่จริงแล้วคำนวณหาการกระจายของตัวแปรดังกล่าวข้างต้นในสองค่าของอุณหภูมิคือ 800°C และ 1200°C และที่ความเร็วลมต่างกัน สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกสร้างขึ้นจากหลักทฤษฎีสามประการคือ การอนุรักษ์มวลซึ่งทำให้ได้สมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมในแกน x และ y และสมการพลังงานโดยวิเคราะห์ในแบบสองมิติ จากนั้นพิจารณาสถานะขอบเขตที่ทางเข้า ทางออก และที่ผนังเตา ในการหาผลเฉลยของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้วิธีการของการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weight Residuals) กับสมการโมเมนตัม สมการพลังงาน และสมการความต่อเนื่อง และเนื่องจากรูปของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ไม่เป็นเชิงเส้น จึงต้องหาผลเฉลยโดยใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วงของนิวตัน-ราฟสัน แล้วใช้โปรแกรม ANSYS 8.1 เพื่อคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิและความเร็วในเตาเผา

คำสำคัญ : เตาเผาดินด้านเกวียน, ผลิตภัณฑ์ดินเผา, การกระจายอุณหภูมิ, การกระจายความเร็ว, รูเจาะสี่เหลี่ยมที่ผนังด้านข้าง

* รับต้นฉบับเมื่อวันที่ 1 มีนาคม 2549 และได้รับบทความฉบับแก้ไขเมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม 2549

A study of the air temperature and velocity profile in Dan-kwian village kiln cause by rectangular holes in the side wall*

Kiatfa Tungjaijit¹⁾ and Pakornwit Pattha²⁾

¹⁾ Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,

²⁾ Master Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
Email: Kiatfa@kku.ac.th

ABSTRACT

The research is study in the distribution of the hot air temperature and velocity that have the free flow inside Dan-kwian Kiln without the product, and then comparing the behavior for two cases, not penetrate and penetrate the rectangular holes at two side walls by using the finite element method. The given of data can be used as data base for take understand and solve in the wood problem and save the energy in the process of heat supplying in Dan-Kwian kiln. After study the process of heat supplying in Dan-Kwian kiln and then create the flow domain model same as a real Dan-Kwian kiln and then calculating for the variable distribution in two cases of temperature are 800°C and 1200°C and the varying of velocity. The finite element equation constitution of three theorem are the conservation of mass that bring to the continuity equation, momentum equation in x and y directions, and the last energy equation are analysis in two dimension. Consider the boundary condition at the inlet, outlet, and at the wall. To determine the solution for this problem will be applying the weight residual to the momentum equation, energy equation, and continuity equation and cause by the form of the equation has non-linear, then we determine by the technique of the Newton-Raphson iteration, finally, using the ANSYS 8.1 program to calculate for the distribution of temperature and velocity in the kiln.

Keywords : Dan-Kwian kiln, Pottery product, Temperature profile, Velocity profile, Rectangular hole at the side wall.

*

Original manuscript submitted: March 1, 2005 and Final manuscript received: May 19, 2006

บทนำ

เตาเผาดินด้านเกวียนในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นรูปทรงคล้ายจรวด (ชาวบ้านในท้องถิ่นจึงเรียกว่าเตาจรวด) มีลักษณะดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 เตาเผาดินด้านเกวียน (เตาจรวด) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ซึ่งมีความยาวจากปากทางเข้าถึงปล่องไฟรวมประมาณ 15 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าประมาณ 0.5 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางลำตัวเตาประมาณ 2.5 เมตร อุณหภูมิขณะที่ใช้ในการเผามี 2 ช่วงตามความต้องการสิ่งซึ่ง คือ อุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 800°C (เผาแดง) และ 1200°C (เผาดำ) องค์ประกอบของอากาศในเตาเป็นไปโดยอิสระ ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง วัสดุที่ใช้สร้างเตาเป็นดินเหนียวชนิดเดียวกับที่ใช้ในการปั้นผลิตภัณฑ์ดินเผาด้านเกวียน คุณภาพของการเผาด้วยเตาชนิดนี้หากไม่เจาะรูที่ผนังด้านข้างจะมีความเสียหายประมาณ 50 % (ข้อมูลจากเจ้าของเตา) โดยเกิดจากการให้ความร้อนเร็วเกินไปทำให้เกิดแตก (ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนหน้า) ให้ความร้อนมากเกินไปเพราะต้องให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนกลางและส่วนท้ายได้รับความร้อนที่พอเพียงด้วย ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนหน้ามีผิวลื่นทาสียากหรือสีหลุดร่อน (เนื่องจากจะต้องตั้งผลิตภัณฑ์ตามความต้องการสิ่งซึ่ง) และความเสียหายจากผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนไม่เพียงพอหรือเผาไม่สุก จึงได้ทำการเจาะรูขนาดประมาณ 0.3×0.3 เมตร ที่ผนังด้านข้างของเตาทั้งสองด้าน ห่างกันเป็นระยะประมาณ 1.5 เมตร สูงจากพื้นภายในเตา 1 เมตร แล้วนำท่อนไม้ใส่ในช่องที่เจาะนี้ขณะเผา ปรากฏว่าสามารถลดความเสียหายลงเหลือประมาณ 5% และผลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนอย่างเพียงพอหรือสุกอย่างสม่ำเสมอ และลดปริมาณเชื้อเพลิงลงได้ประมาณ 2 เท่าโดยน้ำหนัก สามารถลดเวลาการเผาได้พอสมควร แต่ต้องใช้แรงงานที่ต้องคอยเติมท่อนไม้ที่ด้านข้างตลอดเวลาจนกระทั่งเผาเสร็จ

อย่างไรก็ดีกระบวนการเผาจำเป็นต้องเริ่มจากการปิดรูด้านข้างในช่วงแรกเพื่อให้ความร้อนไหลจากปากทางเข้าผ่านลำตัวเตาและออกที่ปล่องไฟ แล้วให้ความร้อนแก่ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านหน้าจนกระทั่งสุก แล้วจึงทำการเปิดช่องด้านข้างเพื่อเผาผลิตภัณฑ์ที่อยู่ถัดไป จนกระทั่งถึงรูที่หน้าปล่องไฟ งานวิจัยนี้จะคำนวณหาการกระจายของอุณหภูมิ ความดัน และความเร็วของอากาศร้อนภายในเตา ทั้งกรณีเจาะและไม่เจาะรูที่ผนังด้านข้าง เพื่อแสดงถึงพฤติกรรมดังกล่าว

ผลงานที่เกี่ยวข้อง

สมการทั่วไปสำหรับการไหลของของไหลมีการพัฒนาอย่างสมบูรณ์และคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในลักษณะทางกายภาพที่หลากหลาย [S.Gh. Etemad and F. Bakhtiari, 1999] สมการที่ได้นั้นใช้หาปัจจัยด้านความเสียดทาน (Friction Factor) สำหรับกรณีการไหลแบบราบเรียบ การเพิ่มขึ้นของความดันตก (Pressure Drop) รวมทั้งค่าเลขเซลนัมเบอร์ (Nusselt Number) เมื่อให้เงื่อนไขเป็นอุณหภูมิผนังคงที่ (Constant Wall Temperature) และเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางสูงสุดไรมิติ มีการเสนองานวิจัยว่า ในการออกแบบหาความเหมาะสมในระบบทางความร้อนจะใช้เกณฑ์ที่ว่าค่าการเกิดขึ้นของเอนโทรปี (Entropy Generation) จะต้องมิต่ำน้อยที่สุด โดยได้มีการวิเคราะห์การไหลที่เป็นแบบราบเรียบ (Laminar) ของไหลมีการถ่ายเทความร้อนภายใต้สภาวะการพัฒนาย่างสมบูรณ์ (Fully-Developed) ผ่านท่อที่มีหน้าตัดกลม [Abdul Khaliq, 2003] พบว่า การเกิดขึ้นของเอนโทรปีมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความแตกต่างของอุณหภูมิไรมิติที่ทางเข้าเท่ากับที่ผิวหน้าท่อมิต่ำมากขึ้น ส่วนการเกิดเอนโทรปี (Entropy Generation) สำหรับกรณีการไหลปั่นป่วนที่พัฒนาย่างสมบูรณ์ในท่อเรียบ [Ahmet Z. Sahin, 2000] โดยผนังรับอุณหภูมิอย่างคงที่ (Constant Wall Temperature) โดยพิจารณาความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ พบว่าอัตราระหว่างกำลังที่ใช้ในการปั๊ม (Pumping Power) กับฟลักซ์ความร้อนรวม (Total Heat Flux) มีค่าลดลงเมื่อของไหลได้รับความร้อนเพิ่ม และการเกิดเอนโทรปีต่อหน่วยฟลักซ์ความร้อนจะยังคงมีค่าต่ำตลอดความยาวท่อ กรณีที่การไหลเกิดขึ้นแบบราบเรียบที่พัฒนาย่างสมบูรณ์ ได้มีการวิเคราะห์หาคุณลักษณะการถ่ายเทความร้อนในท่อกึ่งวงรี (Semi-Elliptical Duct) [K. Velusamy, Vijay K. Garg, and G. Vaidyanathan, 1995] โดยให้ผนังท่อมีอุณหภูมิคงที่ และให้ความร้อนในแนวแกนอย่างสม่ำเสมอ แล้วทำการคำนวณโดยเปลี่ยนความยาวในแกนหลักและแกนรองของวงรีไปเรื่อยๆ และเมื่อค่าความยาวแกนมีค่าเกือบจะเท่ากันซึ่งจะทำให้มีหน้าตัดคล้ายวงกลม เมื่อเทียบค่าจากการคำนวณของวงรีกับวงกลมแล้วมีค่าใกล้เคียงกันมาก และในส่วนของ การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลของของไหลร้อนแบบชนิดที่อัดตัวไม่ได้ [Pramote Dechaumphai and Worasit Kanjanakijkasem, 1999] ทำให้ได้สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีดังกล่าวแล้วได้ทำการประยุกต์ใช้กับงานที่มีผลเฉลยอยู่แล้ว ปรากฏว่าได้ผลลัพธ์ที่ดีมาก

ทฤษฎีและหลักการ

การอนุรักษ์มวล [Robert W. Fox, Alant T. Mcdonald, and Philip J. Pritchard. 2004]

ในระบบปิดจากสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการอนุรักษ์มวลจะเป็น

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

สมการที่ 1 เรียกว่า สมการความต่อเนื่อง เมื่อโอเปอเรเตอร์ของเวกเตอร์ (∇) ในระบบพิกัดฉากคือ

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

ดังนั้นจะได้ว่า

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = \nabla \cdot \rho \vec{V}$$

และ การอนุรักษ์มวลก็สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

กรณีการไหลเป็นสองมิติ นั่นคือ $\vec{V} = \vec{V}(x, y)$ สมการอนุพันธ์ย่อยจะเป็น

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

สมการโมเมนตัม [Robert W. Fox, Alant T. Mcdonald, and Philip J. Pritchard. 2004]

1. แรงกระทำกับอนุภาคของไหล

แรงที่กระทำกับของไหลแบ่งออกเป็นสองชนิดได้แก่ แรงที่กระทำจากน้ำหนัก (Body Force) และแรงที่ผิว (Surface Force) โดยที่แรงที่ผิวประกอบไปด้วยแรงในแนวตั้งฉาก (Normal Force) และแรงในแนวสัมผัสกับผิวหรือแรงเฉือนที่ผิว (Shear Force) แรงกระทำทั้งหมดที่ผิวในทิศ x , dF_{S_x} คือ

$$dF_{S_x} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (4)$$

แรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักคือ $\rho g dV$ ดังนั้น แรงกระทำในทิศ x , dF_x คือ

$$dF_x = dF_{B_x} + dF_{S_x} = \left(\rho g_x + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (5)$$

เราสามารถสร้างสมการในรูปคล้ายสมการที่ 5 สำหรับกรณีของทิศ y และ z ได้ดังนี้

$$dF_y = dF_{B_y} + dF_{S_y} = \left(\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (6)$$

$$dF_z = dF_{B_z} + dF_{S_z} = \left(\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (7)$$

2. อนุพันธ์ของสมการโมเมนตัม

องค์ประกอบของแรง, $d\vec{F}$ คือ dF_x , dF_y , และ dF_z กระทำกับอนุภาคมวล dm จะมีสมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่เป็น

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (8a)$$

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (8b)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (8c)$$

3. ของไหลนิวโตเนียน: สมการนาเวียร์-สโตกส์

ของไหลนิวโตเนียน จะมีความเค้นแบบหนึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราความเครียดเฉือน (อัตราการเสียรูปเชิงมุม) ความเค้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของเกรเดียนต์ของความเร็ว (Velocity Gradient) กับสมบัติของของไหล (Fluid Property) ในพิกัดฉากดังนี้

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (9a)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (9b)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (9c)$$

$$\sigma_{xx} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (9d)$$

$$\sigma_{yy} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (9e)$$

$$\sigma_{zz} = -p - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9f)$$

เมื่อ p คือความดัน ซึ่งความดันทางอุณหพลศาสตร์จะมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นและอุณหภูมิ ที่เรียกว่า สมการสภาวะ (Equation of State) [Roland W. Lewis, Perumal Nithiarasu, and Kankanhalli N. Seetharamu. 2004] สมการสำหรับความเค้นในรูปของสมการการเคลื่อนที่ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \rho \frac{Du}{Dt} = & \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (10a)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} \right) \right] \end{aligned} \quad (10c)$$

สมการการเคลื่อนที่นี้เรียกว่าสมการนาเวีย-สโตกส์ สำหรับกรณีการไหลไม่มีความหนืด $\mu = 0$ เรียกว่า สมการออยเลอร์ (Euler's equation) ดังนี้

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad (11)$$

4. สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ กรณีการไหลสองมิติแบบอยู่ตัว

การไหลแบบอัดตัวไม่ได้จะมี $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ เมื่อการไหลมีสภาวะคงตัว (Steady state) จะมี $\partial \rho / \partial t = 0$ และมีแรงกระทำเนื่องจากน้ำหนักกระทำในแกน y จะทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \quad (12)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \rho g [1 - \beta (T - T_0)] \quad (13)$$

สมการพลังงาน

การกระจายของอุณหภูมิในของไหลหาได้จากสมการพลังงาน [M. Nicati Ozisik.1985] ซึ่งสามารถสร้างได้โดยการเขียนสมดุลพลังงานตามกฎข้อที่หนึ่งของอุณหพลศาสตร์ในรูปของอนุพันธ์ของเอลิเมนต์แบบปริมาตรในของไหล สมการพลังงานในระบบพิกัดฉากสำหรับการไหลคงตัวในสองมิติแบบอัดตัวไม่ได้ที่มีความหนาแน่นคงที่ โดยที่ของไหลมีพฤติกรรมเป็นของไหลนิวโตเนียน จะหาได้จาก

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \mu \Phi \quad (14)$$

เมื่อฟังก์ชันของการกระจายพลังงานแบบหนืด (Viscous-energy-dissipation function), Φ คือ

$$\Phi = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (15)$$

เทอมทางซ้ายของสมการที่ 14 แสดงพลังงานที่ส่งถ่ายทั้งหมดเนื่องจากการส่งถ่ายมวล เทอมทางขวาในวงเล็บแสดงการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ และเทอมสุดท้ายทางขวาของสมการที่ 15 แสดงการกระจายพลังงานแบบหนืดในของไหลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเสียดทานภายในของของไหล

กรณีของไหลมีความเร็วระดับกลาง (Moderate Flow Velocity) และไม่คิดค่าการกระจายพลังงานแบบหนืด สมการพลังงานจะลดรูปเป็น

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial}{\partial x} kT \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial}{\partial y} kT \right) \quad (16)$$

สภาวะขอบเขต

สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยในสมการที่ 3, 12, 13, และ 16 จะหาผลเฉลยไปด้วยกันด้วยสภาวะขอบเขตของ [Pramote Dechaumphai and Worasit Kanjanakijkasem. 1999]

1. กำหนดสภาวะขอบเขตที่ทางเข้า (S_i) โดยมีองค์ประกอบของความเร็ว (u_i, v_i) และอุณหภูมิของของไหล (T_i) จะได้ว่า

$$\left. \begin{aligned} u &= u_i(x, y) \\ v &= v_i(x, y) \\ T &= T_i(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

2. กำหนดสภาวะที่ทางออก (S_o) เป็นค่าการลากไปที่ผิว (Surface Traction) คือ

$$\left. \begin{aligned} P_x &= \sigma_x l + \tau_{xy} m \\ P_y &= \tau_{xy} l + \sigma_y m \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

เมื่อ l และ m เป็นทิศโคไซน์ (Direction cosines) ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับพื้นผิว

3. กำหนดสภาวะขอบเขตที่ผนัง ซึ่งมีองค์ประกอบของความเร็ว (u_w, v_w) และอุณหภูมิของของไหล (T_w) หรือฟลักซ์ความร้อน (q_w) ที่ไหลเข้าปยังหรือออกจากโดเมนตามขอบผนัง (S_w) คือ

$$\left. \begin{aligned} u &= u_w(x, y) \\ v &= v_w(x, y) \\ T &= T_w(x, y) \quad \text{or} \quad q = q_w(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

การสร้างสมการไฟไนต์เอลิเมนต์

ตัวไม่ทราบค่าพื้นฐานสำหรับสมการเชิงอนุพันธ์หลักของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ที่มีความร้อนรวมอยู่ด้วยนั้น เมื่อแทนค่าองค์ประกอบของความเร็ว u , v อุณหภูมิ T และความดัน p เข้าไป และในงานวิจัยนี้จะใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบหกจุดต่อ (Six-Node triangular element) สำหรับการไหลที่ไม่เป็นไอโซเทอร์มอล (Non-isothermal flow) เพื่อใช้ในการพัฒนาสมการของไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยกรณ้องค์ประกอบของความเร็วจึงใช้การประมาณค่าแบบควอดราติก (Quadratic Interpolation) และกรณีการกระจายความดันจะใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น (Linear Interpolation) ตามกำลังสูงสุดของสมการเชิงอนุพันธ์ในสมการที่ 3, 12, 13, และ 16 ดังนี้

$$\left. \begin{aligned} u(x, y) &= N_\alpha u_\alpha \\ v(x, y) &= N_\alpha v_\alpha \\ T(x, y) &= N_\alpha T_\alpha \\ p(x, y) &= H_\lambda p_\lambda \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

เมื่อ $\alpha = 1, 2, \dots, 6$; $\lambda = 1, 2, 3$; N_α คือ ฟังก์ชันการประมาณค่าของเอลิเมนต์สำหรับกรณีความเร็วและอุณหภูมิ และ H_λ คือ ฟังก์ชันการประมาณค่าของเอลิเมนต์สำหรับกรณีความดัน

ในการหาผลเฉลยของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะใช้วิธีการของ ถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (Weight Residuals) [K.J. Bathe. 1996] กับสมการโมเมนตัม (สมการที่ 12 และ 13) สมการพลังงาน (สมการที่ 16) และสมการความต่อเนื่อง (สมการที่ 3) ดังนี้

$$\int_A N_\alpha \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dA = \int_A N_\alpha \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) dA \quad (21a)$$

$$\int_A N_\alpha \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) dA = \int_A N_\alpha \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) dA - \int_A N_\alpha \rho g [1 - \beta(T - T_0)] dA \quad (21b)$$

$$\int_A N_\alpha \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA = \int_A N_\alpha \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dA \quad (21c)$$

$$\int_A H_\lambda \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) dA = 0 \quad (21d)$$

เมื่อ A คือพื้นที่ของเอลิเมนต์ สำหรับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบหกจุดต่อสมการที่ 21a ถึง d จะประกอบไปด้วย สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ 21 สมการ แล้วใช้ทฤษฎีบทของเกาส์ (Gauss's Theorem) [A.J. Baker. 1985] กับสมการที่ 21a ถึง c เพื่อสร้างขอบเขตของอินทิกรัลเทอมที่เทียบกับการลากที่ผิว (Surface Traction) และฟลักซ์ความร้อน ซึ่งจะได้เป็น

$$\int_A N_\alpha \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) dA + \int_A \left(\frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \sigma_x + \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \tau_{xy} \right) dA = \int_{S_0} N_\alpha P_x dS_0 \quad (22a)$$

$$\begin{aligned} \int_A N_\alpha \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) dA + \int_A \left(\frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \sigma_y \right) dA \\ = \int_{S_0} N_\alpha P_y dS_0 - \int_A N_\alpha \rho g [1 - \beta(T - T_0)] dA \end{aligned} \quad (22b)$$

$$\int_A N_\alpha \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) dA + \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial(kT)}{\partial x} dA + \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial(kT)}{\partial y} dA = \int_{S_w} N_\alpha q_s dS \quad (22c)$$

แทนค่าการกระจายขององค์ประกอบของความเร็วยของเอลิเมนต์ การกระจายของอุณหภูมิ และการกระจายของความดันจากสมการที่ 22 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จะสามารถเขียนได้ในรูปของ

$$K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta u_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta u_\gamma - H_{\alpha\lambda^x} p_\lambda + S_{\alpha\beta^{xx}} u_\beta + S_{\alpha\beta^{xy}} v_\beta = Q_{\alpha^u} \quad (23a)$$

$$K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta v_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta v_\gamma - H_{\alpha\lambda^y} p_\lambda - K_{\alpha\beta} T_\beta + S_{\alpha\beta^{yx}} u_\beta + S_{\alpha\beta^{yy}} v_\beta = Q_{\alpha^v} - C_\alpha - L \quad (23b)$$

$$K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta T_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta T_\gamma + M_{\alpha\beta^{xx}} T_\beta + M_{\alpha\beta^{yy}} T_\beta = Q_{\alpha^T} \quad (23c)$$

$$H_{\beta\mu^x} u_\beta + H_{\beta\mu^y} v_\beta = 0 \quad (23d)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์ในเอลิเมนต์แมทริกซ์ จะอยู่ในรูปของอินทิกรัลครอบคลุมพื้นที่ของเอลิเมนต์ และตามขอบเอลิเมนต์ ทั้ง S_0 และ S_i นั่นคือ

$$\begin{aligned}
 K_{\alpha\beta\gamma^x} &= \int_A N_\alpha N_\beta \frac{\partial N_\gamma}{\partial x} dA \\
 K_{\alpha\beta\gamma^y} &= \int_A N_\alpha N_\beta \frac{\partial N_\gamma}{\partial y} dA \\
 H_{\alpha\lambda^x} &= \frac{1}{\rho} \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} H_\lambda dA \\
 H_{\alpha\lambda^y} &= \frac{1}{\rho} \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} H_\lambda dA \\
 S_{\alpha\beta^{xx}} &= 2\nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} dA + \nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} dA \\
 S_{\alpha\beta^{yy}} &= \nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} dA + 2\nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} dA \\
 S_{\alpha\beta^{xy}} &= \nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} dA \\
 S_{\alpha\beta^{yx}} &= \nu \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} dA \\
 M_{\alpha\beta^{xx}} &= \frac{k}{\rho c} \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial x} \frac{\partial N_\beta}{\partial x} dA \\
 M_{\alpha\beta^{yy}} &= \frac{k}{\rho c} \int_A \frac{\partial N_\alpha}{\partial y} \frac{\partial N_\beta}{\partial y} dA \\
 K_{\alpha\beta} &= g\beta \int_A N_\alpha N_\beta dA \\
 Q_{\alpha^u} &= \frac{1}{\rho} \int_{S_0} N_\alpha P_x dS_0 \\
 Q_{\alpha^v} &= \frac{1}{\rho} \int_{S_0} N_\alpha P_y dS_0 \\
 Q_{\alpha^T} &= \frac{1}{\rho c} \int_{S_w} N_\alpha q_s dS_w
 \end{aligned} \tag{24}$$

$$\left. \begin{aligned}
 C_\alpha &= g \int_A N_\alpha dA \\
 D_\alpha &= g \beta T_0 \int_A N_\alpha dA \\
 H_{\beta\mu^x} &= \int_A \frac{\partial N_\beta}{\partial x} H_\mu dA \\
 H_{\beta\mu^y} &= \int_A \frac{\partial N_\beta}{\partial y} H_\mu dA
 \end{aligned} \right\} \quad (24 \text{ ต่อ})$$

เมื่อ ν คือ ความหนืดจลน์ของของไหลที่กำหนดโดย

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (25)$$

กระบวนการวิธีการคำนวณ (Computational Procedure)

เนื่องจากรูปของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นไม่เป็นเชิงเส้น สมการพีชคณิตของความไม่เป็นเชิงเส้นนี้จะต้องหาผลเฉลยโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการประมาณค่าในช่วงของนิวตัน-ราฟสัน โดยในขั้นแรกจะเขียนค่าไม่สมดุลจากกลุ่มของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ [Pramote Dechaumphai and Worasit Kanjanakijkasem, 1999] ดังนี้

$$F_{\alpha^u} = K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta u_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta u_\gamma - H_{\alpha\lambda^x} p_\lambda + S_{\alpha\beta^{xx}} u_\beta + S_{\alpha\beta^{xy}} v_\beta - Q_{\alpha^u} \quad (26a)$$

$$\begin{aligned}
 F_{\alpha^v} &= K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta v_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta v_\gamma - H_{\alpha\lambda^y} p_\lambda + S_{\alpha\beta^{yx}} u_\beta \\
 &\quad + S_{\alpha\beta^{yy}} v_\beta - K_{\alpha\beta} T_\beta - Q_{\alpha^v} + C_\alpha + D_\alpha
 \end{aligned} \quad (26b)$$

$$F_{\alpha^T} = K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\beta T_\gamma + K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\beta T_\gamma + M_{\alpha\beta^{xx}} T_\beta + M_{\alpha\beta^{yy}} T_\beta - Q_{\alpha^T} \quad (26c)$$

$$F_{\beta^p} = H_{\beta\mu^x} u_\beta + H_{\beta\mu^y} v_\beta \quad (26d)$$

กลุ่มของสมการพีชคณิตดังกล่าวนี้จะเกิดตัวไม่รู้ค่าเพิ่มขึ้นก็คือ องค์ประกอบของความเร็ว อุณหภูมิ และความดันที่จุดต่อของเอลิเมนต์ ซึ่งจะเป็นรูปแบบสุดท้ายของสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ [Pramote Dechaumphai and Worasit Kanjanakijkasem, 1999] ดังต่อไปนี้

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{uv} & 0 & K_{up} \\ K_{vu} & K_{vv} & K_{vT} & K_{vp} \\ K_{Tu} & K_{Tv} & K_{TT} & 0 \\ K_{pu} & K_{pv} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_\beta \\ \Delta v_\beta \\ \Delta T_\beta \\ \Delta p_\beta \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} F_{\alpha^u} \\ F_{\alpha^v} \\ F_{\alpha^T} \\ F_{\alpha^p} \end{Bmatrix} \quad (27)$$

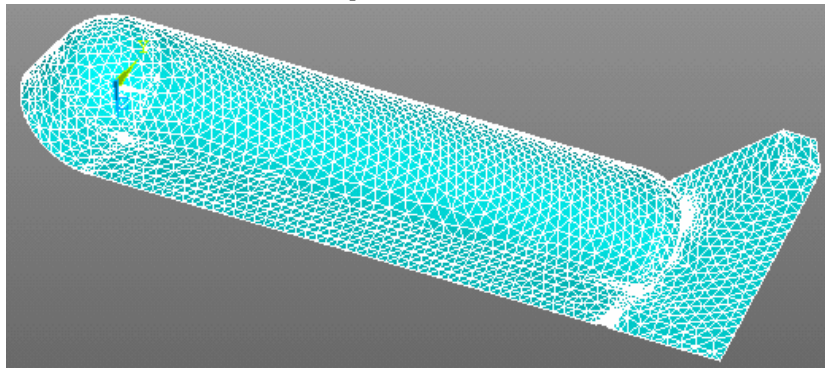
เมื่อ

$$\left. \begin{aligned} K_{uu} &= K_{\alpha\beta\gamma^x} u_\gamma + S_{\alpha\beta^{xx}} \\ K_{uv} &= K_{\alpha\beta\gamma^y} u_\gamma + S_{\alpha\beta^{xy}} \\ K_{up} &= -H_{\alpha\lambda^x} \\ K_{vu} &= K_{\alpha\beta\gamma^x} v_\gamma + S_{\alpha\beta^{yx}} \\ K_{vv} &= K_{\alpha\beta\gamma^y} v_\gamma + S_{\alpha\beta^{yy}} \\ K_{vT} &= -K_{\alpha\beta} \\ K_{vp} &= -H_{\alpha\lambda^y} \\ K_{Tu} &= K_{\alpha\beta\gamma^x} T_\gamma \\ K_{Tv} &= K_{\alpha\beta\gamma^y} T_\gamma \\ K_{TT} &= M_{\alpha\beta^{xx}} + M_{\alpha\beta^{yy}} \\ K_{pu} &= H_{\beta\mu^x} \\ K_{pv} &= H_{\beta\mu^y} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

ตามสมการที่ 28 ค่า u_γ และ v_γ เป็นค่าขององค์ประกอบของความเร็วจึง และ T_γ เป็นค่าของอุณหภูมิที่ครั้งที่ i ใดๆ ของการประมาณค่าช่วง กระบวนการประมาณค่าช่วงจะสิ้นสุดเมื่อเปอร์เซ็นต์ของการเปลี่ยนแปลงโดยรวมเทียบกับค่าการประมาณก่อนหน้านี้น้อยกว่า 0.001

ผลจากการคำนวณ

แบบจำลองเตาเผาที่สร้างขึ้นเป็นการจำลองตามขนาดจริงที่มีการใช้งานอยู่ โดยพิจารณาเฉพาะส่วนที่เป็นอากาศร้อนภายในเตา แล้ววิเคราะห์ด้วย FLOTRAN CFD ใช้เอลิเมนต์ชนิด FLUID142 รูปร่างทางกายภาพเป็นแบบลิ้ม (Wedge) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แบบจำลองของเตาเผาดินด่านเกวียนที่เมชซิง (Meshing) ด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยม

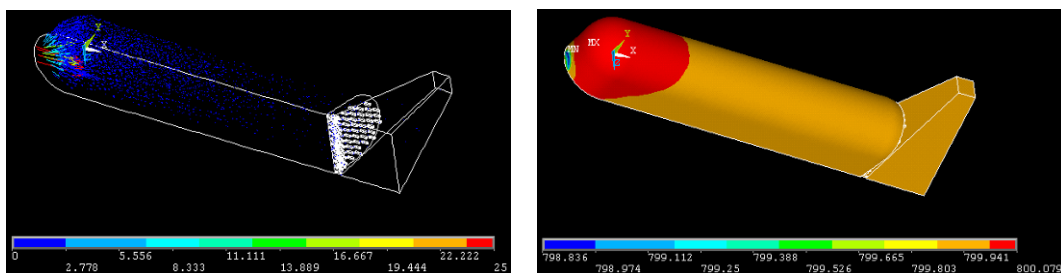
ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณในไฟไนท์เอลิเมนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม ANSYS 8.1 มีสภาวะดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิ เป็นค่าอุณหภูมิภายในเตาที่สภาวะคงที่ โดยมีค่า 800 และ 1200°C
2. ความเร็วลม เป็นการไหลโดยอิสระของอากาศภายในเตา เปลี่ยนค่าในช่วง 10 ถึง 25 m/s
3. ความดัน เป็นความดันสัมพัทธ์ ที่ทางเข้า ทางออกและช่องที่เปิดมีค่า 0 Pa

ทำการคำนวณตัวแปรทั้งสามทุกช่วงค่าที่กำหนด แล้วนำค่าสูงสุด ต่ำสุดมาสร้างเป็นตารางเปรียบเทียบ จะได้ตารางดังนี้

ความเร็วในแกน x (m/s)	ความเร็ว (m/s)		อุณหภูมิ (° C)			หมายเหตุ
	เปลี่ยนแปลง		เริ่มต้น	เปลี่ยนแปลง		
	ต่ำสุด	สูงสุด		ต่ำสุด	สูงสุด	
10	0	10	800	729.07	805.56	
15	0	15		791.57	805.61	
20	0	20		791.68	805.72	
25	0	25		798.84	800.08	
10	0	10	1200	1196.00	1202.00	
15	0	15		1194.00	1202.00	
20	0	20		1192.00	1203.00	
25	0	25		1187.00	1203.00	

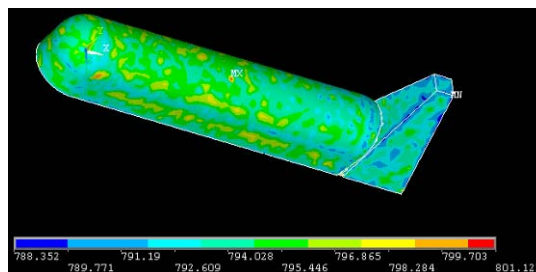
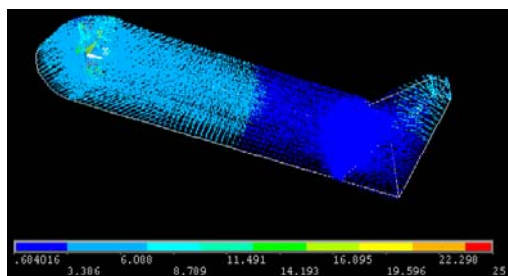
ตารางที่ 1 แสดงผลการคำนวณค่าตัวแปรภายในเตากรณีไม่ได้เจาะรูที่ผนังด้านข้างจากการคำนวณ



รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิกรณีไม่ได้เจาะรูที่ผนังด้านข้าง ที่สภาวะความเร็วทางเข้า 25 m/s อุณหภูมิเริ่มต้น 800 °C

ความเร็วในแกน x (m/s)	ความเร็ว (m/s)		อุณหภูมิ (°C)			หมายเหตุ
	เปลี่ยนแปลง		เริ่มต้น	เปลี่ยนแปลง		
	ต่ำสุด	สูงสุด		ต่ำสุด	สูงสุด	
10	0.05	10	800	797.92	800.02	
15	0.19	15		795.45	800.38	
20	0.36	20		792.34	800.75	
25	0.69	25		788.35	801.12	
10	0.84	10	1200	1197.00	1200.00	
15	0.26	15		1198.00	1201.00	
20	0.02	20		1194.00	1201.00	
25	0.04	25		1191.00	1201.00	

ตารางที่ 2 แสดงผลการคำนวณค่าตัวแปรภายในเตากรณีเจาะรูที่ผนังด้านข้างจากการคำนวณ



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วและอุณหภูมิกรณีเจาะรูที่ผนังด้านข้าง ที่สภาวะความเร็วทางเข้า 25 m/s อุณหภูมิเริ่มต้น 800 °C

บทสรุป

จากรูปที่ 3 และข้อมูลในตารางที่ 1 กรณีไม่ได้ทำการเจาะรูที่ผนังด้านข้าง ความเร็วและอุณหภูมิที่ปากทางเข้าจะมีค่ามาก แต่จะลดค่าลงจนเป็นศูนย์บริเวณส่วนท้ายเตา โปรไฟล์ของความเร็ว (Velocity Profile) ไม่เกิดการไหลย้อนกลับที่ทางเข้า แต่เกิดที่ผนังเจาะรูที่อยู่ส่วนท้ายของเตา ทำให้ที่ปล่องทางออกจะมีความเร็วต่ำมาก ที่ความเร็วต่ำๆ อุณหภูมิจะมีความแตกต่างกันมาก นั่นคือ ความร้อนกระจายไปถึงส่วนท้ายเตาได้น้อย ขณะที่ทำการเผาเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนท้ายเตาได้รับความร้อนมากขึ้น ก็จะต้องเติมเชื้อเพลิงมากขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนหน้าเตาได้รับความร้อนมาก

จากรูปที่ 4 และข้อมูลในตารางที่ 2 กรณีทำการเจาะรูที่ผนังด้านข้าง ทางเข้าด้านหน้าถูกปิด อากาศเข้าที่ผนังด้านข้างทั้งสองด้าน รูที่เจาะมีขนาดเล็กกว่าปากทางเข้าทำให้มีการกระจายแบบปั่นป่วน

มากกว่า การกระจายของอุณหภูมิเกิดขึ้นมากกว่ากรณีไม่ได้เจาะรู อีกทั้งตำแหน่งที่ให้ความร้อนจะเปลี่ยนมาเป็นที่ส่วนล่างตัวเตา ผลลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนนี้จึงได้รับความร้อนมากขึ้น ส่วนผลลิตภัณฑ์ที่อยู่ส่วนหน้าของเตาก็ยังคงได้รับความร้อนอยู่เป็นการควบคุมการเย็นตัวของผลลิตภัณฑ์ได้อีกทางหนึ่ง ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่าการกระจายของอุณหภูมิจะดีขึ้นเมื่อความเร็วมากขึ้น

การคำนวณนี้กำหนดให้ไม่มีผลลิตภัณฑ์ที่จะเผื่ออยู่ภายใน กรณีทำช่องที่ผนังด้านข้างขณะทำการเผาจะเติมเชื้อเพลิงด้านหน้าเพียงแค่นี้ให้ผลลิตภัณฑ์ได้รับความร้อนเพียงพอ จากนั้นจะปิดทางเข้าด้านหน้าแล้วเปิดช่องด้านข้างทั้งสองด้านเพื่อเผาผลลิตภัณฑ์ที่อยู่ลึกเข้าไปด้านใน ถึงแม้ทั้งสองกรณีจะมีการกระจายของค่าตัวแปรคล้ายๆกัน แต่เมื่อทำการเผาจริงที่มีผลลิตภัณฑ์บรรจุอยู่เต็มจะเกิดปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนจากด้านหน้าไปยังด้านหลังเตา ผลลิตภัณฑ์ที่อยู่ด้านหน้าและด้านหลังเตามักจะเกิดความเสียหาย ผู้ประกอบการจึงได้แก้ไขโดยการเจาะผนังด้านข้างเป็นระยะเพื่อเติมเชื้อเพลิงให้ชิ้นงานได้รับความร้อนสม่ำเสมอทุกชิ้น

เอกสารอ้างอิง

- Abdul Khaliq. 2003. "Thermodynamic optimization of laminar viscous flow under convective heat-transfer through an isothermal walled duct". **Applied Energy** 78 (2004) 289–304.
- Ahmet Z. Sahin. 2000. "Entropy generation in turbulent liquid flow through a smooth duct subjected to constant wall temperature". **International Journal of Heat and Mass Transfer** 43 (2000) 1469 -1478.
- A.J. Baker. 1985. **Finite Element Computational Fluid Mechanics: International Student Edition**. McGraw-Hill: Singapore.
- Hwang, G.J., Tzeng, S.C., Soong, C.Y. 2001. "A computer-aided parametric analysis of mixed convection in ducts". **Int. J. Heat Mass Transfer** 44: 1857–1867.
- K. Velusamy, Vijay K. Garg, G Vaidyanathan. 1995. "Fully developed flow and heat transfer in semi-elliptic ducts". **Int. J. Heat and Fluid flow** 16: 145-152.
- K.J. Bathe. 1996. **Finite Element Procedure**. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New Jersey.
- M. Nicati Ozisik.1985. **Heat Transfer: A Basic Approach**. McGraw-Hill International Edition. Singapore.
- Pramote Dechaumphai and Worasit Kanjanakijkasem. 1999. "A Finite Element Method for Viscous Incompressible Thermal Flows". **ScienceAsia** 25: 165-172.
- Robert W. Fox, Alant T. Mcdonald, and Philip J. Pritchard. 2004. **Introduction to Fluid Mechanics (Sixth Edition)**. John Wiley & Sons Inc. USA.
- Roland W. Lewis, Perumal Nithiarasu, and Kankanhalli N. Seetharamu. 2004. **Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow**. John Wiley & Sons, Inc., Great Britain.
- S.Gh. Etemad and F. Bakhtiari. 1999. "General Equations for Fully Developed Fluid Flow and Heat Transfer Characteristics in Complex Geometries". **Int. Comm. Heat Mass Transfer**. Vol. 26, No. 2, pp. 229-238.