บทที่ 2
หลักการ เหตุผล และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อุตสาหกรรมการผลิตอิฐ

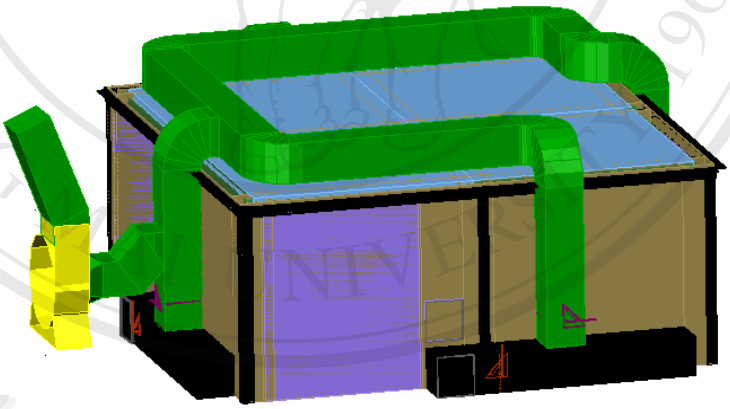
อุตสาหกรรมก่อสร้างในประเทศไทยนั้นมีการเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่อง และมีการขยายตัวตามภาวะเศรษฐกิจของประเทศอุตสาหกรรมนั้นมีหลายขนาดทั้งขนาดใหญ่ กลางและอุตสาหกรรมขนาดเล็กที่กระทำภายในครอบครัว ซึ่งมีการลงทุนไม่มากและใช้ความรู้ในการผลิตน้อย ส่วนมากเป็นภูมิปัญญาชาวบ้าน อุตสาหกรรมอิฐก็เป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีการทำกันอย่างแพร่หลายในขนาดกำลังผลิตน้อย หรือเป็นอุตสาหกรรมขนาดเล็กภายในครัวเรือนนั่นเองเนื่องจากว่ามีการลงทุนในการผลิตที่ไม่มากอีกทั้งยังใช้ความรู้น้อยในการผลิตในปัจจุบันได้มีการขยายทำเป็นอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดใหญ่ตามกำลังการผลิต ในการผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่นั้นมีการลงทุนในการผลิตสูงและใช้ความรู้ในการผลิตสูงจึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตนั้นสูงขึ้นนั่นหมายถึงการสิ้นเปลืองพลังงานนั้นจะน้อยกว่า เมื่อเทียบกับการผลิตอิฐในอุตสาหกรรมขนาดเล็กซึ่งมีประสิทธิภาพต่ำมีการลงทุนน้อยและใช้ความรู้และเทคโนโลยีต่ำทำให้มีการสิ้นเปลืองพลังงานสูงต้นทุนในการผลิตก็สูงตามไปด้วย ในการผลิตอุตสาหกรรมที่มีการสิ้นเปลืองพลังงานโดยเปล่าประโยชน์มากๆ จะส่งผลกระทบต่อทรัพยากรประเทศโดยรวมและขยายวงกว้างไปในด้านต่างๆ ซึ่งส่งผลเสียโดยรวมต่อประเทศอย่างแน่นอนในอนาคตอันใกล้ ในการผลิตอิฐทรัพยากรเชื้อเพลิงที่มีการใช้มากนั้นแตกต่างไปกันแต่ละท้องถิ่นตามวัสดุที่หาง่ายในพื้นที่ของแต่ละท้องถิ่น ซึ่งจากการสำรวจโดย Joseph และคณะ (1990) พบว่ามีโรงงานผลิตในประเทศไทยประมาณ 700 โรง มีการจ้างงานไม่ต่ำกว่า 120,000 คน และโรงงานเผาอิฐมีการใช้ไม้ฟืนประมาณ 1.4 ล้านตันต่อปี ซึ่งอาจเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้เชื้อเพลิงเป็นไม้ฟืนมากที่สุดในประเทศ ภาคเหนือตามการสำรวจจะพบว่ามีโรงงานเผาอิฐทั้งหมด 92 แห่ง ใน 9 จังหวัด พบว่าการใช้เชื้อเพลิงส่วนมากเป็นไม้ แกรบและน้ำมัน ตามลำดับ (โครงการเตาเผาสาธิตเตาเผาอิฐแบบประหยัดพลังงาน) ส่วนใหญ่ยังคงใช้ไม้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงในการผลิต

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 ลักษณะโครงสร้างและส่วนประกอบเตา

เตาเผาอิฐประหยัดพลังงานเป็นเตาที่สร้างขึ้น โดยใช้หลักการนำความร้อนทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (Heat Recovery) ซึ่งได้รับการออกแบบโดยทีมวิจัยภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จุดประสงค์ของงานวิจัยเพื่อประหยัดพลังงานในการเผาอิฐในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก และต่อมาได้ถูกพัฒนาการก่อสร้างโดยทีมวิจัยของภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

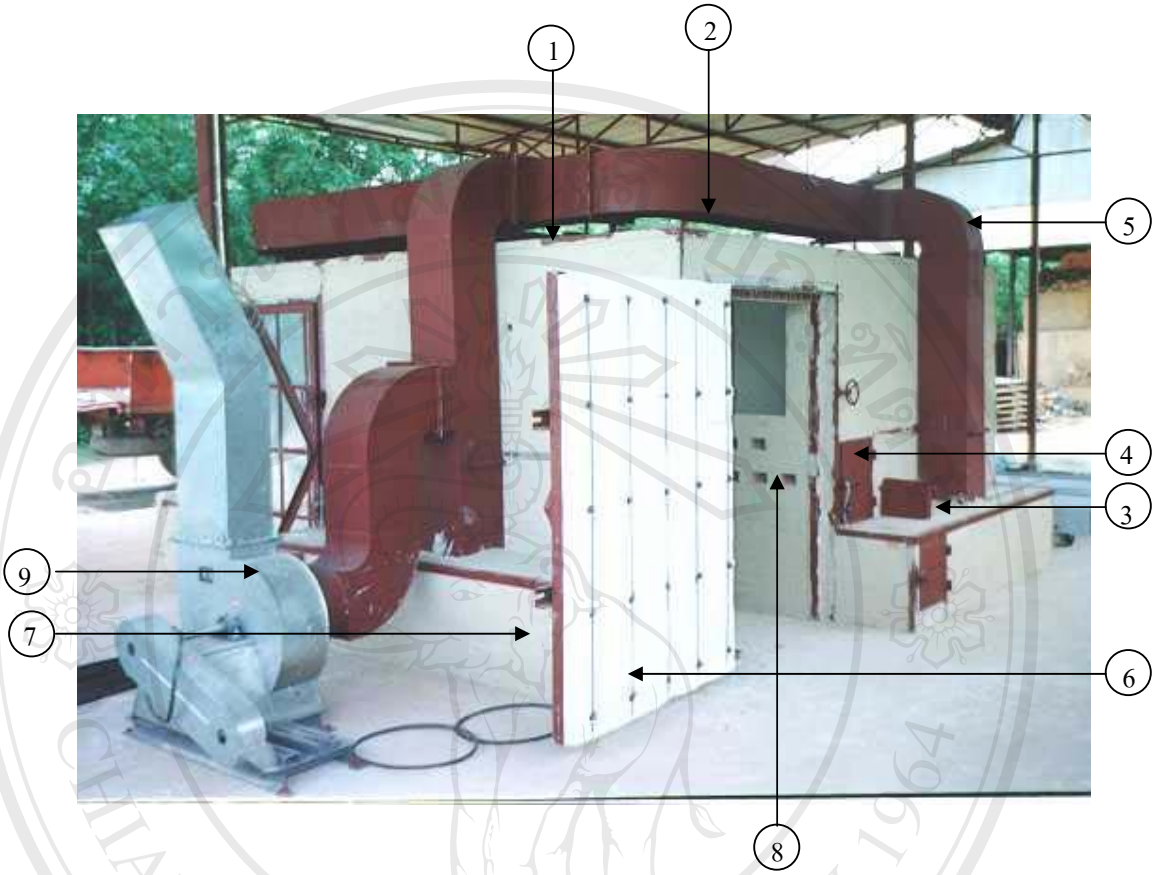
โดยลักษณะของโครงสร้างเตาประกอบด้วย ส่วนที่เป็นเหล็ก ส่วนที่เป็นอิฐกับปูน และระบบควบคุมลมโดยพัดลมดูด ส่วนของกำแพงจะก่อด้วยอิฐส้มธรรมดา (อิฐขนาดเล็กที่นิยมผลิตกันของภาพเหนือ) ส่วนของห้องเผาอิฐที่เป็นช่วงที่โดนไฟนั้นจะก่อด้วยอิฐทนไฟเพื่อป้องกันการแตกร้าวของอิฐเมื่อใช้ไปนานๆ ส่วนหลังคานั้นเป็นเซรามิกไฟเบอร์เพื่อความง่ายในการก่อสร้างและยังสามารถป้องกันความร้อนได้ดีกว่าหลังคาอิฐธรรมดา ประตูใช้เซรามิกไฟเบอร์เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการเปิดปิดอยู่จึงต้องการน้ำหนักเบาเพื่อความสะดวกในการทำงาน และป้องกันความร้อนสูญเสียได้ดีกว่าผนังอิฐธรรมดา



(ก)

รูปที่ 2.1 แบบโครงสร้างเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ส่วนประกอบของเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน

1. โครงเหล็กสำหรับรัดตัวเตาทำด้วยเหล็กฉากหนาเพื่อป้องกันการขยายตัวของกำแพงอิฐเมื่อได้รับความร้อน ซึ่งอาจทำให้กำแพงเบี้ยวแล้วพังลงมาได้

2. เพดานเตาทำด้วยเซรามิกไฟเบอร์สามารถทนไฟ ป้องกันความร้อนสูญเสียได้ ด้านนอกยึดด้วยแผ่นเหล็กธรรมดา ใช้น๊อตยึดรั้งแผ่นเซรามิกอีกทีนึง

3. ประตูกั้นลมเพื่อควบคุมทิศทางลม ประตูส่วนนี้จะมีอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนกั้นทางเดินก๊าซร้อนระหว่างห้อง และกั้นทางเดินก๊าซร้อนออกทางท่อเหล็กสังกะสี ทำด้วยแผ่นเหล็กหนาประมาณ 3 มิลลิเมตร

4. ประตูช่องใส่ฟืน ทำด้วยแผ่นเหล็กแล้วหล่อปูนซิเมนต์ทนไฟด้านในในส่วนที่โดนไฟในช่วงที่ทำการเผา เพื่อป้องกันอากาศภายนอกรั่วเข้าในห้องเผาไหม้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

5. ท่อก๊าซ ทำด้วยสังกะสีหนาประมาณ 1 มิลลิเมตร เป็นทางเดินก๊าซร้อนทิ้งออกจากตัวเตาออกสู่บรรยากาศ ในการใช้งานนั้นจะมีไอน้ำปนออกมาด้วยและมีอุณหภูมิประมาณ 50-60 องศาเซลเซียส

6. ประตูเตา ทำจากเซรามิกไฟเบอร์มีลักษณะโครงสร้างเหมือนกับเพดานเตา ป้องกันความร้อนสูญเสียออกจากเตาและมีน้ำหนักเบาจึงสะดวกในการปิดเปิดเตา

7. ช่องทางออกก๊าซร้อนด้านในเตาจะอยู่ถัดจากรถเข็นอิฐทางด้านซ้ายเมื่อหันหน้าเข้าเตา ทำหน้าเป็นทางเดินก๊าซร้อนออกจากห้องเผาอิฐไปสู่อีกห้องที่อยู่ติดกันด้วยทางเดินก๊าซร้อนด้านนอกที่ก่อเป็นท่อไว้ (ทางเดินก๊าซนี้จะทำด้วยอิฐธรรมดา, อิฐส้ม)

8. ผนังกั้นฟืน ทำจากอิฐทนไฟก่อเป็นกำแพงโดยลักษณะการก่อจะก่อให้เป็นช่องอากาศสามารถไหลผ่านได้เพื่อให้อิฐที่อยู่ใกล้บริเวณนี้ได้รับอุณหภูมิอย่างทั่วถึง ทำหน้าที่เป็นกำแพงห้องเผาไหม้ไม่ให้ฟืนไปโดนกองอิฐที่ทำการเผาอยู่

9.พัดลม ทำหน้าที่ในการดูดก๊าซร้อนออกจากเตาโดยปรกติเตาทั่วไปจะใช้ลมดูดธรรมชาติ (Natural draft) แต่เนื่องจากเตาเผาอิฐประหยัดพลังงานต้องหมุนเวียนอากาศผ่านหลายห้องและต้องมีการควบคุมลมที่แน่นอนจึงต้องใช้พัดลมดูดก๊าซร้อนออก

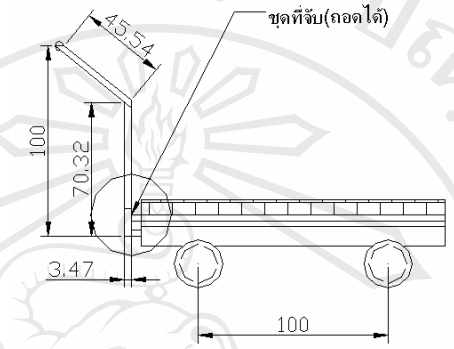
รูปที่ 2.3 ตะแกรงฟืนเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

10. ตะแกรงฟืน ทำหน้าที่ในการวางฟืนในห้องเผาไหม้ทำด้วยเหล็กหล่อซึ่งทนไฟกว่าเหล็กธรรมดา รูปที่ 2.3

11. รถเข็นอิฐ ในการลำเลียงอิฐเพื่อความสะดวกและรวดเร็วในการขนถ่ายอิฐสุกและดิบออกหรือเข้าสู่เตาเผาต้องอาศัยรถเข็นลำเลียงอิฐ เนื่องจากว่าเตาขนาดใหญ่นั้นมีระบบลำเลียงอิฐไว้

อยู่แล้วจึงได้ดัดแปลงมาใช้กับเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน โครงสร้างของรถเข็นอิฐประกอบไปด้วยล้อเหล็กที่สั่งกลึง (เนื่องจากขนาดไม่มีขายตามท้องตลาด) เหล็กเพลา แบริ่งเหล็กฉากและเหล็กแผ่น ดังแสดงได้รูปที่ 2.4

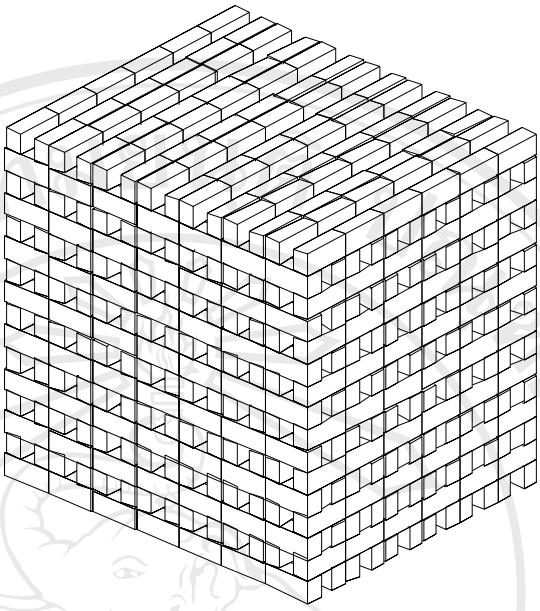


รูปที่ 2.4 ลักษณะโครงสร้างรถเข็นลำเลียงอิฐ [ที่มา: โครงการเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน]

เนื่องจากว่าตัวรถนั้นทำด้วยเหล็กเพราะต้องการความแข็งแรงในการรับน้ำหนักและสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่ว่าการใช้งานนั้นตัวรถจะต้องอยู่ในเตาเผาอิฐจึงต้องมีการนำอิฐทนไฟมาเรียงไว้บนรถเพื่อป้องกันไฟจากการเผาอิฐมาโดนเหล็ก

การเรียงอิฐภายในเตาจะเรียงให้มีช่องวางและให้ได้จำนวนอิฐในการเรียงเหมาะสม ถ้าเรียงอิฐที่แน่นเกินไป อาจเรียงได้จำนวนก้อนมากแต่ต้องใช้เวลาในการเผาที่มากขึ้นเนื่องจากอากาศร้อนไม่สามารถไหลเวียนได้ทั่วห้องเผาทำให้อิฐไม่สุกในบางจุดจึงเสียเวลาและเชื้อเพลิงในการเผามากว่าที่ควรจะเป็น หากทำการเรียงอิฐได้เหมาะสมมีอากาศร้อนไหลผ่านกองอิฐได้อย่างสม่ำเสมอแล้วจะทำให้อิฐนั้นแห้งได้ทั่วถึงและพร้อมกันทั้งห้องนำมาซึ่งการประหยัดพลังงานในการเผาอิฐ และเวลาในการเผาที่สั้นกว่า เพราะฉะนั้นจึงควรเรียงอิฐให้ได้ปริมาณที่เหมาะสมต่อการเผาดีกว่าที่จะเรียงให้ได้จำนวนมากโดยไม่คำนึงถึงการไหลของอากาศ นอกจากอิฐจะไม่สุกทั่วทั้งกอง แล้วคุณภาพอิฐยังได้ไม่สม่ำเสมอเหมือนกันทั้งกองอีกด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.5 การเรียงอิฐในเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

2.3 การเผาอิฐ

ในกระบวนการเผาอิฐต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเผาเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ดี

(1) องค์ประกอบของดินเหนียวและผลของความร้อนต่อดินเหนียว

องค์ประกอบหลักในดินเหนียวโดยมากมีซิลิกา, อลูมินาและเหล็กออกไซด์ สูตรทางเคมีของดินเหนียวคือ $Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$ มีน้ำเป็นองค์ประกอบเคมีอยู่ประมาณ 13.96% โดยน้ำหนัก ซึ่งเรียกว่า น้ำประกอบ (Combined Water) ส่วนน้ำที่ผสมดินเหนียวเพื่อใช้ในกระบวนการขึ้นรูปอิฐดิบซึ่งจะต้องไล่ออกในช่วงการทำให้แห้งหรือการตากอิฐ (Drying) เรียกว่าน้ำเชิงกล (Mechanical Water) สำหรับอุณหภูมิที่ทำให้น้ำเชิงกลออกไปจากอิฐดิบอยู่ในช่วง 100-150 องศาเซลเซียส ในการเผาอิฐดินเหนียวจะมีการไล่น้ำเชิงกล, น้ำประกอบ, สารคาร์บอนที่เผาไหม้ได้และซัลเฟอร์ (Carbonaceous Matterand Sulfur) ออกจากดินเหนียว

(2) การสลายสารคาร์บอนที่มีอยู่ในดินเหนียว

สารคาร์บอเนตที่มีอยู่ในดินเหนียวเป็นสารปนเปื้อน (Impurities) ซึ่งสามารถสลายไปได้ด้วยความร้อนไปอยู่ในรูปของออกไซด์และคาร์บอนไดออกไซด์ เช่น

อุณหภูมิ 400-700^{o}C; $FeCO_3 = FeO + CO_2$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

อุณหภูมิ 400-650°C; $MgCO_3 = MgO + CO_2$

อุณหภูมิ 600-900°C; $CaCO_3 = CaO + CO_2$

สำหรับเหล็กคาร์บอเนตเป็นอนุภาคเล็กๆ ของเหล็กออกไซด์จะรวมตัวอยู่ในดินเหนียวทำให้เกิดสีดำคล้ำขึ้นในอิฐดินเหนียวที่มีการเผาในสภาวะขาดออกซิเจน (Reducing Atmosphere) การเผาไหม้พวกสารคาร์บอน จะเริ่มเผาไหม้ตั้งแต่ช่วง 200-350 องศาเซลเซียส ซึ่งช่วงนี้จะให้สารระเหยได้ออกมา การที่จะเผาให้สารคาร์บอนที่หลงเหลือในอิฐออกไปเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์หรือคาร์บอนไดออกไซด์ได้มากขึ้น ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขดังต่อไปนี้

ก. ต้องมีอากาศเกินพอ (Excess Air) ในการสันดาปเชื้อเพลิงเพื่อให้ก๊าซเผาไหม้ (Combustion Gases) มีอ๊อกซิเจนเหลือและเกิดการออกซิไดซ์ซึ่งขึ้นภายในเตาเผา

ข. ต้องมีช่องว่างระหว่างอิฐในเตาเพื่อให้อากาศสามารถเข้าไปเผาไหม้สารคาร์บอนได้

ค. ต้องมีช่วงเวลาที่เหมาะสมให้การเผาไหม้ดำเนินไป ซึ่งอัตราการเผาไหม้ขึ้นอยู่อัตราที่อ๊อกซิเจนสามารถเข้าทำปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบออกไซด์ในอิฐ ถ้าอัตราการเผาไหม้หรือการให้ความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงช่วงอุณหภูมิ 450-650 องศาเซลเซียส (ช่วงที่ไล่น้ำประกอบ) จะทำให้อากาศไม่สามารถเข้าไปในเนื้ออิฐได้ทัน ภาวะเช่นนี้จะทำให้บรรยากาศในเตาเผาเกิดออกซิไดซ์ซึ่งแต่จะเกิดสภาวะรีดิวซึ่งภายในก้อนอิฐ สารคาร์บอนที่อยู่ภายในเนื้ออิฐจะรวมตัวกับไอน้ำเกิดเป็นรีดิวซิ่งก๊าซ,ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ที่อุณหภูมิสูง ส่งผลให้เหล็กในเนื้ออิฐดินเหนียวรวมตัวเป็นจุดเกิดสีของผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นที่ต้องการขึ้น ลักษณะของอิฐเนื่องจากสภาวะเช่นนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มสัดส่วนของอากาศเกินพอ และลดอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิลงหลัง จากไล่น้ำประกอบออกไป

ง. สารประกอบคาร์บอนในเนื้อดินควรถูกเผาไหม้ไปหมดที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดการเกิดไวตริฟิเคชั่น (Vitrification) ที่ผิวของอิฐ (ไวตริฟิเคชั่นเป็นกระบวนการเกิดสารมันวาวเคลือบผิวคล้ายแก้ว)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ขบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเผาอิฐดินเหนียว

อุณหภูมิโดยประมาณของกระบวนการที่เกิดขึ้น

20-150°C ไล่น้ำเชิงกลออกจากอิฐ

150-900°C ไล่น้ำประกอบ โดยการสลายองค์ประกอบแร่ธาตุที่มีอยู่ในดินเหนียว (ปกติอยู่ในช่วง 400-650 องศาเซลเซียส)

200-900°C เกิดการเผาไหม้สารคาร์บอนในเนื้อดิน โดยอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ขึ้นอยู่กับ

ชนิดของอิฐ, ปริมาณ, ความหนาแน่น, ปริมาณอากาศเกินพอและอากาศอิสระที่เข้าสู่อิฐ

400-450°C สลายองค์ประกอบไพไรท์ (Iron Sulphide, FeS_2) ในการเผาอิฐต้องให้ FeS_2 ออกซิไดซ์ให้หมดก่อนอุณหภูมิสูงถึงจุดไวตริฟิเคชั่น มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการโป่งพองที่ผิวของอิฐเนื่องจากก๊าซซัลเฟอร์ผุดออกมา

400-900°C สลายองค์ประกอบของคาร์บอเนต, แคลเซี่ยม, แมกเนเซี่ยมและเหล็ก

570°C เกิดการเปลี่ยนรูปของซิลิกาจากอัลฟาควอตซ์ (α -Quartz) เป็นเบต้าควอตซ์ (β -quartz) โดยมีการขยายปริมาตรเพิ่มขึ้น 2% ในดินเหนียวที่มีควอตซ์อยู่มากควรใช้อัตราการเพิ่มความร้อนช้าลงในช่วงอุณหภูมินี้เพื่อหลีกเลี่ยงการแตกร้าว (Cracking) เนื่องจากมีการเปลี่ยนปริมาตรอย่างทันทีทันใดและควรรักษาช่วงอุณหภูมิ 500-700 องศาเซลเซียส นี้ไว้ระยะหนึ่ง

900°C-ถึงอุณหภูมิสิ้นสุด จะเกิดไวตริฟิเคชั่นที่อุณหภูมิประมาณ 900 องศาเซลเซียส โดยความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้นมากที่ช่วงอุณหภูมินี้

เวลาในการเผาอิฐและอัตราการเผาขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำเชิงกล, น้ำประกอบและสารคาร์บอนในเนื้อดินและยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของอิฐกับความหนาแน่นของอิฐ การเผาอิฐในเตาเผาทั้งแบบไม่ต่อเนื่องและแบบต่อเนื่อง พิจารณาได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ก. ช่วงไล่น้ำ ในกรณีการเผาแบบไม่ต่อเนื่องนี้ต้องปล่อยให้ช่วงนี้ค่อยเป็นค่อยไป คือ การเผาไฟอ่อนและให้มีอากาศเกินพออย่างน้อย 1,000-1,500% ช่วงเวลาการไล่น้ำนี้จะขึ้นอยู่กับเปอร์เซ็นต์ของน้ำเชิงกลและปริมาณของอิฐที่นำเข้าเผาในเตา โดยอาจใช้เวลา 2-4 วัน จนถึง 2 สัปดาห์ การไล่น้ำเชิงกลไม่ควรทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากจะทำให้เกิดการแตกร้าว (Cracking) ขึ้นที่ผิวหน้าอิฐได้

ข. ช่วงไฟกลาง เป็นกระบวนการหลังจากการไล่น้ำเสร็จแล้วซึ่งสามารถเพิ่มอุณหภูมิในเตาในอัตราที่เร็วกว่าเดิมได้โดยเมื่ออุณหภูมิถึงช่วง 400-450 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงไล่น้ำประกอบจนถึงอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส กระบวนการในช่วงนี้ควรให้เกิดในลักษณะค่อยเป็นค่อยไปอย่างช้าๆ (450-650 องศาเซลเซียส) เพราะถ้าอุณหภูมิช่วงนี้เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วจะทำให้อิฐที่ได้มีสีดำคล้ำ และเกิดเป็นตุ่มพองที่ผิวอิฐสำหรับช่วงอุณหภูมิ 850-900 องศาเซลเซียส ขบวนการไล่น้ำประกอบจะกลับมาเกิดอีกครั้งหนึ่ง สิ่งที่สำคัญคือ สารพวกคาร์บอนในเนื้อดินควรถูกเผาไหม้ไปให้หมดก่อนการเกิดกระบวนการไวตริฟิเคชั่นซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยการชักตัวอย่างอิฐจากเตา

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

มาทดสอบดูและเพื่อให้ได้อิฐที่มีคุณภาพดีควรทำให้มีอากาศผ่านเข้าเตาอย่างเพียงพอสำหรับการเกิดออกซิเดชั่นตั้งแต่ช่วง อุณหภูมิ 400-800 องศาเซลเซียส ทั้งด้านบนของเตาและด้านล่างของชั้นเรียงอิฐ (อิฐที่ผลิตในประเทศไทยจะสิ้นสุดกระบวนการเผาในขั้นตอนของการเผาไฟกลาง)

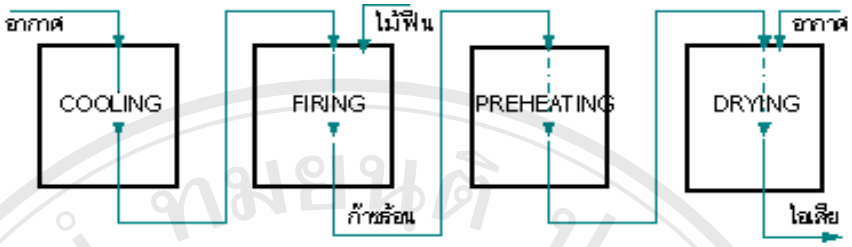
ค. ช่วงไฟแรง (เป็นการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 90 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการผลิตอิฐแกร่งที่ใช้ในประเทศที่พัฒนาแล้ว) เมื่อสารคาร์บอนในเนื้อดินถูกเผาไหม้หมด และธาตุเหล็กในเนื้ออิฐถูกออกซิไดซ์แล้วสามารถเพิ่มอุณหภูมิจาก 900 องศาเซลเซียส ขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งขบวนการไวตริฟิเคชั่นจะเริ่มเกิดขึ้นจนถึงอุณหภูมิสุดท้ายของการเผา โดยช่วงนี้อิฐจะไม่เกิดการบิดเบี้ยวหรือหดตัวมากนัก ความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ด้วย และจะเกิดการเคลือบผิวหน้าอิฐโดยฟลักซ์ (Fluxes) ที่มีอยู่ในดินเหนียว (Ferrous, Lime, Magnesia, Soda and Potash) สำหรับดินเหนียวที่ใช้ทำอิฐต่างชนิดกันก็จะมีอุณหภูมิสุดท้ายของการเผาต่างกันด้วยซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่กำหนดคุณสมบัติของอิฐ (เช่น Strength, Absorption, Porosity เป็นต้น) การกำหนดเงื่อนไขเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการเช่น สีของอิฐสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการเกิดสภาวะรีดิวซิ่งและออกซิไดซ์ซิ่งภายในเตาในช่วงอุณหภูมิสุดท้ายที่เผา

ง. การลดอุณหภูมิ (Cooling) หลังจากสิ้นสุดการเผาอิฐในเตา การปล่อยให้อิฐเย็นลงจะค่อยเป็นค่อยไปโดยใช้เวลา 4-5 วันหรือมากกว่านั้นซึ่งเมื่อไฟในเตาดับ รูหรือช่องใส่เชื้อเพลิงจะถูกปิดด้วยดินเหนียว โดยทิ้งไว้ 1-2 วัน แล้วจึงค่อยเปิดให้อากาศไหลผ่านเข้าเตาเป็นบางส่วนจนถึงทยอยเปิดช่องต่างๆ ทั้งหมดในช่วง 2-3 วันหลัง

2.4 หลักการทำงานเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน

หลักการทำงานของเตาเริ่มจากนำอากาศภายนอกเข้าห้องที่เผาเสร็จเป็นการลดอุณหภูมิของอิฐแล้วอากาศส่วนนี้ที่ผ่านเมื่อได้รับความร้อนจากอิฐก็จะมี อุณหภูมิสูงขึ้นแล้วไหลสู่อีกห้องเพื่อการเผาโดยผ่านเข้าทางช่องฟืนเพื่อช่วยในการสันดาปให้อุณหภูมิสูงขึ้นก๊าซร้อนที่ไหลออกจากห้องเผาจะถูกส่งต่อไปที่ห้องอบอิฐซึ่งจะทำให้อิฐนั้นค่อยๆ แห้งไปเรื่อยๆ อุณหภูมิอากาศที่ส่งมาจากห้องเผานี้จะมีอุณหภูมิสูง จากนั้นอากาศก็จะวิ่งต่อไปที่ห้องอุ่นอิฐเพื่อทำการไล่น้ำ อุณหภูมิของอากาศเมื่อผ่านแต่ละห้องจะค่อยๆ ต่ำลงแล้วอากาศจะไหลออกทางปล่องทิ้งออกสู่อากาศภายนอกโดยการบังคับอากาศโดยพัดลมดูดอากาศ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.6 หลักการทำงานของเตาเผาอิฐ [ที่มา: เอกสารเผยแพร่งานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ก๊าซที่ออกจากห้องอุ่นอิฐห้องสุดท้ายนี้จะมีอุณหภูมิต่ำมาก เนื่องจากผ่านการไหลมาจากห้องอุ่นและอบอิฐก่อนแล้ว ทำให้มีการใช้ความร้อนแทนที่จะทิ้งไปเลยได้อีก 2 กระบวนการ การควบคุมลมนั้นควบคุมได้โดยประตูกั้นลม (Damper) ที่อยู่ระหว่างทางเชื่อมของแต่ละห้องและท่ออากาศที่ต่อออกแต่ละห้อง

ในการเริ่มเผาอิฐจะต้องทำการอุ่นเตาก่อนทุกครั้งเนื่องจากการขยายตัวของเตาอันเนื่องมาจากความร้อนจะทำให้เตาเสียหายได้ การอุ่นเตาทำได้โดยการใส่ฝืนในปริมาณน้อยในทุกเตา (ทั้ง 4 เตา) และควบคุมอุณหภูมิเผาให้อยู่ระหว่าง 100 องศาเซลเซียส ใน 8 ชั่วโมงแรกของการเผา จากนั้นจึงค่อยเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ ประมาณ 50 -100 องศาเซลเซียส ต่อชั่วโมง โดยเพิ่มการป้อนไม้ฟืนจนกระทั่งถึงอุณหภูมิเผาจริงคือ 900 – 1000 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จึงหยุดอุ่นเตา ข้อควรระวังในการอุ่นเตา เมื่ออุณหภูมิภายในเตามีค่าประมาณ 100 องศาเซลเซียส ให้อุ่นเตาแบบไล่ลำดับทีละเตา โดยใช้ความร้อนจากเตาหนึ่งผ่านไปยังอีกเตาหนึ่งคล้ายกับการเผาอิฐตามหลักการของเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจากท่ออากาศที่ทำด้วยเหล็กไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ หากอุ่นเตาเผาอิฐที่อุณหภูมิสูงพร้อมกันทุกเตาจะทำให้ท่ออากาศที่ทำด้วยเหล็กชำรุดได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

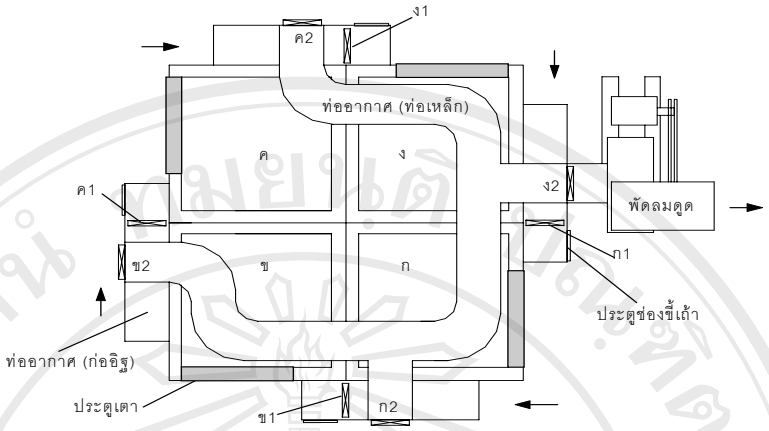
รูปที่ 2.7 เตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: เอกสารเผยแพร่งานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ลักษณะการควบคุมประตูควบคุมลม คือใช้ความเข้าใจในเรื่องของการไหลของอากาศภายในเตา ซึ่งการไหลของอากาศภายในเตา นั้นจะเริ่มไหลจากห้องลดอุณหภูมิผ่านทางช่องทางเชื่อมระหว่างห้องผ่านเข้าไปทางห้องสันดาปของห้องเผาไหม้ผ่านทางตะแกรงที่รองฟืนช่วยในการสันดาปแล้ว ผ่านกองอิฐไปทางขนานแล้วลมร้อนก็จะไหลออกทางช่องทางเชื่อมระหว่างห้องของห้องถัดไป แล้วผ่านทางห้องสันดาปผ่านตะแกรงฟืนขึ้นทางด้านบนเหมือนเดิมไปยังห้องอุ่นอิฐ ผ่านกองอิฐแล้วไหลออกทางช่องทางเชื่อมไปยังห้องอบอิฐ (ห้องไล่น้ำ) แล้วถึงผ่านขึ้นทางช่องอากาศ (ซึ่งมีต่อทุกห้องอยู่แล้ว แต่ขณะนี้ทำการปิดอยู่) ไหลทิ้งออกสู่อากาศภายนอก (อุณหภูมิก็จะลดลงเรื่อยๆ จนอุณหภูมิทิ้งนั้นต่ำมาก) เมื่อเข้าใจตามนี้แล้วก็สามารถทำการปิด-เปิด ประตูทางเดิมลม และประตูทางเชื่อมอากาศระหว่างห้องได้อย่างถูกต้อง

ลักษณะการเผาเช่นนี้จะเป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง รอบการทำงานของเตาจะสั้น-ยาวสลับกันไป เนื่องจากมีช่วงเวลาการรอให้อิฐเย็นและการนำอิฐเข้าออก แต่การทำงานของเตายังมีความยืดหยุ่นมากกว่านี้ หากต้องการเผาอิฐเฉพาะเวลากลางวันก็สามารถทำได้โดยการหยุดเผา (หยุดเดินพัดลมและหยุดป้อนฟืน) ปิดประตูเตาและประตูอากาศให้หมด จากนั้นในวันถัดไปให้เริ่มเผาในเตาที่มีอิฐผ่านการอุ่นมาแล้วเป็นเตาถัดไปโดยใช้อากาศสันดาปจากเตาที่ต้องการทำให้อิฐเย็นมาใช้ ด้วยวิธีการนี้พลังงานความร้อนจะยังไม่สูญเสียไปมากนัก เนื่องจากโครงสร้างของผนังเตามีค่าความต้านทานความร้อนสูงทำให้สามารถเก็บกักพลังงานความร้อนได้

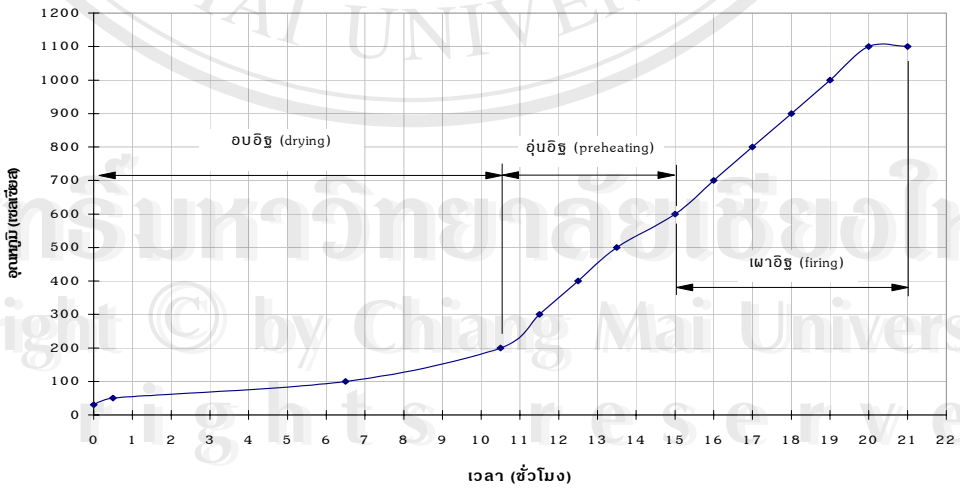
โดยสรุปหลักการเปิดปิดประตูอากาศคือ ให้ก๊าซร้อนหรืออากาศร้อนไหลผ่านเตาที่อยู่ติดกันเพื่อนำความร้อนไปใช้อย่างคุ้มค่าและปล่อยออก ณ ตำแหน่งเตาอบอิฐหรือเตาไล่น้ำอิฐดิบเท่านั้นและไม่เปิดประตูอากาศให้อากาศหรือก๊าซร้อนที่อุณหภูมิสูงไหลผ่านท่อเหล็กและประตูช่องขี้เถ้าจะเปิดเฉพาะเตาที่ต้องการทำให้อิฐเย็น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.8 แสดงประตูควบคุมอากาศร้อน [ที่มา: เอกสารเผยแพร่งานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ในกระบวนการเผานั้นห้องที่ทำการเผาอิฐจะเรียงลำดับกันไปเรื่อยๆ ทั้งกระบวนการ ซึ่งทุกห้องจะต้องทำหน้าที่ ทั้งเผา อบ อุ่น และลดอุณหภูมิ ลักษณะการควบคุมอุณหภูมิในเตานั้น ในกระบวนการอบอิฐ (Drying) จะใช้เวลาประมาณ 10 ชั่วโมงครึ่ง กระบวนการอุ่นอิฐ (Preheating) จะใช้เวลาประมาณ 4 ชั่วโมงครึ่ง และเผาอิฐ (Firing) ใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง สามารถอธิบายได้ตามกราฟข้างล่าง



รูปที่ 2.9 แสดงเส้นกราฟสำหรับการควบคุมอุณหภูมิเผาในเตาเผาอิฐประหยัดพลังงาน [ที่มา: เอกสารเผยแพร่งานวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 สมดุลความร้อนของเตา (Heat Balance)

ในการวัดพลังงานที่ใช้ในเตาเผาอิฐจะวัดจากเชื้อเพลิงที่ใช้ไปและวัดความร้อนสูญเสียในรูปต่างๆ ออกมาเพื่อหาประสิทธิภาพของเตา ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการเผา จำนวนอิฐในการเผา และอัตราการไหลของอากาศที่สภาวะต่างๆ กัน เมื่อใช้เงื่อนไขอื่นๆ ที่เหมือนกัน เพื่อหาสภาพการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เตาชนิดเผาอิฐแบบ 4 ห้องเผา พลังงานที่สูญเสียออกไปสู่สิ่งแวดล้อมจากการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfers) สามารถคำนวณจาก

2.5.1 ปริมาณความร้อนของเชื้อเพลิงที่ให้กับเตา (Heat Input)

อัตราความร้อนที่ให้แก่เตาได้แก่การเผาเชื้อเพลิงแล้วได้ความร้อนออกมาใช้ในกระบวนการซึ่งค่าความร้อนจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 ตัว คือ จำนวนเชื้อเพลิงที่ใช้ กับค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิงซึ่งการสันดาปภายนอกจะใช้ค่าความร้อนต่ำ

$$Q_{fuel} = \left(\dot{m} \cdot LHV\right) \tag{2.1}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการใช้ของเชื้อเพลิง (kg/s)

LHV คือ ค่าความร้อนต่ำของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

2.5.2 ความร้อนสูญเสียจากก๊าซไอเสีย (Flue Gas Loss)

ในกระบวนการสันดาปจะมีการเผาไหม้เชื้อเพลิงโดยการใช้ออกซิเจนในอากาศเข้าไปทำปฏิกิริยาจนได้ความร้อนแล้วปล่อยอากาศไหลออกสู่สิ่งแวดล้อมอากาศที่ไหลออกจะนำความร้อนออกไปด้วย

$$Q_{flue} = \left(\dot{m} C_p \left(T_g - T_{amb}\right)\right)\Delta t \tag{2.2}$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลของก๊าซเสีย (kg/s)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg-K)

T_g คือ อุณหภูมิก๊าซร้อน (^{0}C)

T_{amb} คือ อุณหภูมิก๊าซร้อน (^{0}C)

Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา (s)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.3 ความร้อนสูญเสียจากการสะสม (Storage Loss)

การเผาไหม้ในเตาความร้อนส่วนหนึ่งจะถูกสะสมไว้ในผนังเตา หลังคาและพื้นเตา เนื่องจากว่าก่อนการเผาเตาจะมีอุณหภูมิต่ำทำให้ดูดซับความร้อนไว้ส่วนหนึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงาน

$$Q_{storage} = \left(m_k C_p \left(T_{t_2} - T_{t_1}\right)\right)\Delta t \tag{2.3}$$

เมื่อ m_k คือ มวลของอิฐที่ใช้ทำผนัง (kg)

C_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอิฐ (kJ/kg-K)

T_{t_1} คือ อุณหภูมิของอิฐตอนแรก (^0C)

T_{t_2} คือ อุณหภูมิของอิฐตอนหลัง (^0C)

Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา (s)

2.5.4 ความร้อนสูญเสียจากการนำ (Conduction Loss)

การถ่ายเทความร้อนจากการนำเป็นการถ่ายเทที่อาศัยของแข็งเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของของแข็งการนำความร้อนจะขึ้นอยู่กับ พื้นที่ ความหนา ชนิดของวัสดุและผลต่างของอุณหภูมิตามกฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier's Law of Conduction)

$$Q_{cond} = \left(\frac{kA\left(T_{s\,in} - T_{s_{out}}\right)}{\Delta x}\right)\Delta t \tag{2.4}$$

เมื่อ k คือ ค่าการนำความร้อน (W/m-K)

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

$T_{s_{in}}$ คือ อุณหภูมิผิวภายใน (^{0}C)

$T_{s_{out}}$ คือ อุณหภูมิผิวภายนอก (^{0}C)

Δt คือ ช่วงเวลาที่พิจารณา (s)

Δx คือ ความหนาของผนัง (m)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.5 ความร้อนสูญเสียจากการพาความร้อน (Convection Loss)

เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยอาศัยของไหลเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานความร้อนเกิดขึ้นระหว่างของไหลกับวัตถุ แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การพาแบบอิสระ (Free Convection) และการพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection) ใช้สมการกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's Law of Cooling)

$$Q_{conv} = \left(h_m A\left(T_{s_{out}} - T_{amb}\right)\right)\Delta t \tag{2.5}$$

เมื่อ h_m คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (W/m^2)

A คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)

$T_{s_{out}}$ คือ อุณหภูมิผนังด้านนอก (^0C)

สัมประสิทธิ์การพาความร้อน $\left(h_m\right)$, (W/m^2)

การหาค่าสัมประสิทธิ์มี 2 แบบ Free Convection และแบบ Force Convection ซึ่งสามารถแบ่งได้อีก 2 กรณี คือ การไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน ในการคำนวณจะมีการคำนวณแบบแม่นตรง แบบประมาณ และแบบอาศัยผลจากการทดลองประกอบการสร้างสมการเอมพิริคัล ซึ่งในการคำนวณที่ใช้นี้จะใช้วิธีแบบสมการเอมพิริคัล โดยใช้สัมประสิทธิ์ $Gr\,\mathrm{Pr}$ ตรวจสอบการไหลและเงื่อนไขในการใช้สมการ

การหาแบบ Free Convection พื้นผิว Vertical plate กรณี Uniform Wall Temperature เลือกใช้สมการของ Vliet and Liu

$$h_m = \frac{k}{L} Nu_m \tag{2.6}$$

เมื่อ k คือ สภาพการนำความร้อนของก๊าซ (W/m-K)

Nu_m คือ Nusselt Number

L คือ Characteristic Length (m)

$$Nu_m = 0.568\left(Gr_L^* \,\mathrm{Pr}\right)^{0.22} \tag{2.7}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ Gr_L^* คือ กราสโฮฟดัดแปลง (Modified Grashof Number)

Pr คือ Prandtl Number

สมการนี้จะใช้ได้ในช่วง $10^3 < Gr_L^* \text{ Pr} < 10^{16}$

$$Gr_L^* = g\beta q_s'' L^4 / kv^2 \tag{2.8}$$

เมื่อ k คือ สภาพการนำความร้อนของก๊าซ (W/m-K)

q_s'' คือ ฟลักซ์ความร้อน(W/m^2)

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 9.81 (m/s^2)

β คือ $1/T_f$ โดย $T_f = (T_s - T_\infty)/2$

L คือ Characteristic Length (m)

υ คือ ค่าความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

การหาแบบ Force Convection พื้นผิว Horizontal plate กรณี Hot Surface Facing Up

$$h_m = \frac{k}{L} Nu_m \tag{2.9}$$

เมื่อ k คือ สภาพการนำความร้อนของก๊าซ (W/m-K)

Nu_m คือ Nusselt Number

L คือ Characteristic Length (m)

$$Nu_m = c(Gr_L \text{ Pr})^n \tag{2.10}$$

เมื่อ Gr_L คือ Grashof Number

Pr คือ Prandtl Number

c คือ ค่าคงที่หาได้จากตาราง

n คือ ค่าคงที่หาได้จากตาราง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)L^3}{\nu^2} \qquad (2.11)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงมีค่าเท่ากับ 9.81 (m/s^2)

β คือ $1/T_f$ โดย $T_f = (T_s - T_\infty)/2$

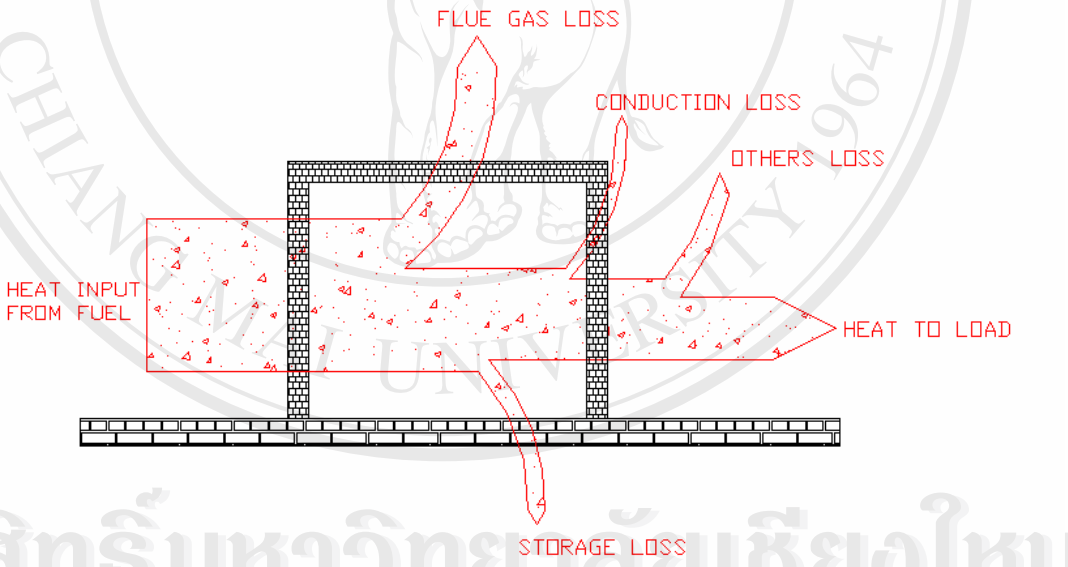
L คือ Characteristic Length (m)

υ คือ ค่าความหนืดจลน์ของของไหล (m^2/s)

T_w คือ อุณหภูมิเตาเผา (K)

T_∞ คือ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม (K)

ความร้อนสูญเสียทั้งระบบ สามารถแสดงเป็นรูปได้ดังนี้



รูปที่ 2.10 Shanky Diagrams

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.6 ประสิทธิภาพเชิงความร้อน (η_{th})

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาเผาอิฐหมายถึง พลังงานความร้อนที่ใช้จริงคือความร้อนที่ให้ทั้งหมดหักลบกับพลังงานความร้อนที่สูญเสียทั้งหมด

$$\eta_{th} = (100\%\text{-Total loss }\%) \quad (2.12)$$

เมื่อ Total Loss คือ ความร้อนที่สูญเสียทั้งหมดประกอบด้วย ความร้อนที่สูญเสียจากการนำที่ผนัง ประตูและหลังคา ความร้อนที่สูญเสียจากก๊าซไอเสียและความร้อนที่สูญเสียจากการสะสมในโครงสร้างของเตา

($Q_{total\ loss} = Q_{flue} + Q_{cond} + Q_{other} + Q_{strage}$)

2.5.7 พลังงานที่ใช้ในการเผาอิฐ

เชื้อเพลิงส่วนใหญ่ที่ใช้ในการเผาอิฐคือไม้ซึ่งเป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้กันเนื่องจากหาได้ง่ายและยังมีอยู่มากตามชนบท ในการเผาอิฐส่วนมากเป็นเป็นเตาแบบ Updraft type คือความร้อนวิ่งจากด้านล่างทางช่องฟืนขึ้นผ่านอิฐแล้วออกทางด้านบนทางปล่องจากการสำรวจเตาชนิดนี้จะใช้พลังงานประมาณ 4-5 MJ/kg brick (Prasertsan et al., 1995a) แต่พลังงานจริงๆ ที่ใช้ในการเปลี่ยนจากดินเหนียวเป็นอิฐจะใช้ประมาณ 1 MJ/kg brick (Prasertsan and Theppaya, 1995) ซึ่งเตาอุโมงค์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่จะใช้พลังงานประมาณ 1.2-2.5 MJ/kg brick (Koopmanns and Joseph, 1993) พลังงานที่ใช้ในการเผาอิฐสามารถคำนวณจาก

$$\text{พลังงานที่ใช้ในการเผาอิฐ} = \frac{Energy_{input}(MJ)}{Product(kg_{brick})} \quad (2.13)$$

2.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหล

ในการคำนวณปัญหาที่เกี่ยวกับการไหลโดยปรกติจะมีองค์ประกอบหลัก 3 ประการ คือ ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย เงื่อนไขขอบเขตของปัญหาและรูปร่างลักษณะของปัญหา ซึ่งในการแก้ปัญหาเรื่องการไหลระบบสมการเชิงอนุพันธ์ที่เกี่ยวข้องคือ สมการอนุรักษ์มวล สมการโมเมนตัมและสมการพลังงาน ซึ่งระบบสมการย่อยนี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหล สมการเหล่านี้จะประกอบไปด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ (Derivative) ต่างๆ กัน ซึ่งต้องใช้ความเข้าใจเป็นอย่างดี จึงจะช่วยทำให้เกิดผลลพธ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำ น่าเชื่อถือ และสามารถอธิบายได้ ซึ่งจะนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาได้ดียิ่งขึ้น

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้สมมุติว่าก๊าซร้อนที่ไหลหมุนเวียนอยู่ภายในเตาเป็นอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิเท่ากันแทน เนื่องจากว่าการคำนวณการไหลโดยมีปฏิกริยาเคมีมาเกี่ยวข้องเนื่องจากการ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สันดาปจากไม้ฟืนและอากาศนั้นเป็นการคำนวณที่ยากของการไหลและหากทำการคำนวณปฏิกิริยาที่ได้จากการเผาไหม้จริงก็ไม่สามารถหาเครื่องมือมาวัดได้อย่างละเอียดซึ่งสุดท้ายอาจวัดได้เพียงการกระจายอุณหภูมิเท่านั้นเพราะฉะนั้นการศึกษาโดยการใช้อากาศร้อนแทนน่าจะให้ผลที่ถูกต้องและไกล้เคียงกว่า อีกทั้งการวัดในการทดสอบจริงยังสามารถวัดได้ง่ายกว่าอีกด้วย

2.6.1 ลักษณะทั่วไปของการไหล

ของไหลโดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งได้เป็น แบบราบเรียบ (Laminar Flow) และแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น ความหนืด ความดันและอุณหภูมิ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ ได้กำหนดให้การไหลเป็นการไหลของอากาศร้อน (Hot Air) เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow) อากาศร้อนไม่สามารถอัดตัวได้ (Incompressible Flow) ไม่มีการลื่นไถลที่ขอบ (No-Slip Wall) และเป็นการไหลสถานะเดียว เป็นการไหลแบบนิวโตเนียน (Newtonian) ไม่มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังเตา (Adiabatic)

โดยปรกติการแบ่งแยกการไหลสามารถแบ่งได้โดยใช้ค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่าตัวเลข Reynolds (Reynolds Number หรือ Re) โดย

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{v} D}{\mu} \tag{2.14}$$

เมื่อ Re คือ ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์

$\bar{v}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

μ คือ ความหนืด ($N\text{-}s/m^2$)

ในการไหลทั่วไปจะพิจารณาจากค่าของเรย์โนลนัมเบอร์ (Reynolds Number, Re) ถ้าค่า $\mathrm{Re} < 2300$ รูปแบบของการไหลจะเป็นแบบราบเรียบ เมื่อค่า $2300 < \mathrm{Re} < 4000$ รูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบเปลี่ยนแปลง (Transition Flow) และเมื่อค่า $\mathrm{Re} > 4000$ รูปแบบการไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Flow)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.2 สมการเชิงอนุรักษ์มวล (Conservation of Mass)

เป็นสมการเชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่อธิบายการไม่สูญหายของมวล ซึ่งประกอบไปด้วยตัวแปรทั้งหมด 3 ตัว (ρ, u, v) หรือเรียกอีกชื่อว่าสมการความต่อเนื่อง (Continuity) โดยที่ตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหลซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} \right] = 0 \tag{2.15a}$$

สามารถเขียนในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \rho \vec{V} = 0 \tag{2.15b}$$

อธิบายได้ว่า ปริมาณทางด้านซ้ายเทอมแรกคือ อัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในต่อหน่วยปริมาตร ส่วนเทอมที่สองการไหลเข้าออกของมวลต่อหน่วยปริมาตรถ้าเป็นการไหลที่ไม่อัดตัว (Incompressible Flow) ค่าความหนาแน่น (ρ) จะมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการ (2.15b) จะเปลี่ยนเป็น

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \tag{2.15c}$$

หรือ $$div \cdot \vec{V} = 0 \tag{2.15d}$$

2.6.3 สมการเชิงอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of Momentum Equation)

ได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นมาจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน (Newton's Second Law) ด้วยความสัมพันธ์ระหว่างมวลกับความเร่ง

$$F = ma \tag{2.16}$$

เรียกสมการเหล่านี้ว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stoke Equations) เพื่อเป็นการให้เกียรติแก่ M.Navier and G.Stokes

แกน X: $$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V} u \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \vec{\nabla} \cdot \left(\mu \vec{\nabla} u \right) + \rho f_x \tag{2.17a}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

แกน Y: $$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V} v\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \vec{\nabla} \cdot \left(\mu \vec{\nabla} v\right) + \rho f_y \tag{2.17b}$$

แกน Z: $$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \vec{V} w\right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \vec{\nabla} \cdot \left(\mu \vec{\nabla} w\right) + \rho f_z \tag{2.17c}$$

สมการข้างต้นเขียนในรูปแบบอนุรักษ์ (Conservation Form) สามารถอธิบายได้ว่าผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมจะต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงของโมเมนตัมภายในปริมาตรควบคุม (อัตราการไหลเข้าออกสุทธิของโมเมนตัม) ในงานวิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่าของไหลเป็นแบบนิวโตนียน (Newtonian Fluid) จึงนำกฎความเสียดทานของสโตกส์ (Stokes's Law) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเค้นกับความเครียดเป็นเส้นตรง จึงสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับสมการข้างต้นได้ดังนี้

$$\sigma_x = -\frac{2}{3}\mu \nabla . \vec{V} + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \tag{2.18a}$$

$$\sigma_y = -\frac{2}{3}\mu \nabla . \vec{V} + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \tag{2.18b}$$

$$\sigma_z = -\frac{2}{3}\mu \nabla . \vec{V} + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \tag{2.18c}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right] \tag{2.18d}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu\left[\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right] \tag{2.18e}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right] \tag{2.18f}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดย μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ (Dynamic Viscosity) หรือเรียกว่าความหนืดที่หนึ่ง (First Viscosity) และ λ คือ ค่าความหนืดที่สอง (Second Viscosity) ซึ่งสโตกส์ได้ตั้งสมมุติฐาน (Stokes's Hypothesis) ดังนี้

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \tag{2.19}$$

สมมุติฐานนี้ใช้กับของไหลที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow) ซึ่งค่าความหน่าแน่น (ρ) จะคงที่ จากสมการอนุรักษ์มวลจะทำให้ $\bar{\nabla} \cdot \bar{V} = 0$ หรือ $div \cdot \bar{V} = 0$ ทำให้เทอมของความหนืดที่สองนั้นไม่ได้ถูกนำมาคำนวณด้วย

แทนสมการ (2.18a-f) ในสมการ (2.17) ได้ดังนี้

แกน X:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\nabla\cdot\mathbf{V}+2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+f_x \tag{2.20a}$$

แกน Y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\nabla\cdot\mathbf{V}+2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+f_y \tag{2.20b}$$

แกน Z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\nabla\cdot\mathbf{V}+2\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+f_z \tag{2.20c}$$

2.6.4 สมการเชิงอนุรักษ์พลังงาน (Conservation of Energy)

สมการนี้ประดิษฐ์มาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิคส์ที่กล่าวว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ให้แก่ก้อนมวลบวกกับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\right]+\vec{\nabla}\cdot\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\vec{V}\right)\right]=\rho\overline{Q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}+\frac{\partial(u\sigma_x)}{\partial x}$$

$$+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial(v\sigma_y)}{\partial y}+\rho\vec{f}\cdot\vec{V} \qquad (2.21)$$

เมื่อ u คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน x, (m/s)

v คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน y, (m/s)

w คือ ความเร็วย่อยในแนวแกน z, (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (Density), (kg/m^3)

f คือ ความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลางของโลก ,(m/s^3)

และ $$\vec{\nabla}\equiv\frac{\partial}{\partial x}\hat{i}+\frac{\partial}{\partial y}\hat{j}+\frac{\partial}{\partial k}\hat{k} \qquad (2.22)$$

$$\vec{V}=\left(u\hat{i}+v\hat{j}+w\hat{k}\right) \qquad (2.23)$$

สมการที่กล่าวมาทั้งหมดอาจรวมเรียกทั้งระบบว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equations) ซึ่งเป็นสมการที่แก้ได้ยากมากทางคณิตศาสตร์ไม่ว่าจะเขียนระบบสมการย่อยเหล่านี้ในรูปแบบใดก็ตามด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ ประการแรกการเป็นระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Coupled Partial Differential Equations) ซึ่งผลลัพธ์ที่หาได้ เช่น u, v, p และ T ต้องสอดคล้อง (Satisfy) กับทั้งระบบสมการไปพร้อมๆ กัน ความยากประการที่สองคือ สมการเหล่านี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Equations) ซึ่งยากที่จะหาผลเฉลยแม่นตรงถึงแม้ว่าเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหาจะง่ายเพียงไรก็ตาม ทำให้วิธีการแก้ปัญหาของไหลด้วยพลศาสตร์การคำนวณ โดยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้เข้ามามีบทบาทเป็นที่นิยมในปัจจุบัน และผลลัพธ์ที่ได้สามารถแสดงถึงลักษณะการไหลได้อย่างแท้จริง นำไปสู่ความเข้าใจในปัญหาได้เป็นอย่างดี

สมการที่กล่าวมาข้างต้น (2.15-2.21) มีตัวแปรที่ไม่รู้ค่า (Unknowns) ทั้งหมด 6 ตัว คือ ρ , u, v, w, P และ e แต่มี 5 สมการ เราจึงต้องหาสมการเพิ่มเติมอีก 1 สมการ สำหรับของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible Flow) ในกรณีนี้ให้ก๊าซเป็นก๊าซสมบูรณ์ (Perfect Gas)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$p = \rho RT \tag{2.24}$$

เมื่อ R คือ ค่าคงตัวสากลของก๊าซ (Universal Gas Constant)

เรียกสมการ (2.24) นี้ว่า สมการของสถานะ (Equation of State) แต่สมการนี้ได้เพิ่มตัวแปรที่ไม่รู้ค่าอีก 1 ตัว คือ T (Temperature) เราจึงต้องหาสมการอีก 1 สมการมาช่วย คือสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิ T กับพลังงานภายใน e

$$e = c_v T \tag{2.25}$$

เมื่อ c_v คือ ความร้อนจำเพาะของก๊าซที่ปริมาตรคงตัว (Specific Heat at Constant Volume)

ระบบสมการควบคุม (Governing Equations) ทั้งหมดสามารถเขียนให้อยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} + \frac{\partial H}{\partial z} = J \tag{2.26}$$

โดยที่

$$U = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho\left(e + \frac{V^2}{2}\right) \end{Bmatrix}, \; F = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p - \tau_{xx} \\ \rho vu - \tau_{xy} \\ \rho wu - \tau_{xz} \\ \rho\left(e + \frac{V^2}{2}\right)u + pu - k\frac{\partial T}{\partial x} - u\tau_{xx} - v\tau_{xy} - w\tau_{xz} \end{Bmatrix}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$G=\begin{Bmatrix} \rho v \\ \rho uv-\tau_{yx} \\ \rho v^2+p-\tau_{yy} \\ \rho wu-\tau_{yz} \\ \rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)v+pv-k\frac{\partial T}{\partial y}-u\tau_{yx}-v\tau_{yy}-w\tau_{yz} \end{Bmatrix}$$

$$H=\begin{Bmatrix} \rho w \\ \rho uw-\tau_{zx} \\ \rho vw-\tau_{zy} \\ \rho w^2+p-\tau_{zz} \\ \rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)w+pw-k\frac{\partial T}{\partial z}-u\tau_{zx}-v\tau_{zy}-w\tau_{zz} \end{Bmatrix},\ J=\begin{Bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ \left(uf_x+vf_y+wf_z\right)+\rho\dot{q} \end{Bmatrix}$$

F, G, H เรียกว่า Flux Terms หรือ Flux Vectors, *J* เรียกว่า Source Term, *U* เรียกว่า Solution Term แก้สมการ (2.26) จะได้ว่า

$$\frac{\partial U}{\partial t}=J-\frac{\partial F}{\partial x}-\frac{\partial G}{\partial y}-\frac{\partial H}{\partial z} \tag{2.27}$$

จะได้ *U* ซึ่งเป็น Flux Variables เป็นคำตอบ ซึ่งสามารถนำไปหาค่าของ Primitive Variables ได้จาก

$$\rho=\rho$$

$$u=\frac{\rho u}{\rho}$$

$$v=\frac{\rho v}{\rho}$$

$$w=\frac{\rho w}{\rho}$$

$$e=\frac{\rho\left(e+V^2/2\right)}{\rho}-\frac{u^2+v^2+w^2}{2}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ในกรณีที่การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady State)

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0 \tag{2.28}$$

และ
$$\frac{\partial F}{\partial x} = J - \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial z} \tag{2.29}$$

คำตอบของสมการนี้คือ F ได้แก่

$$\rho u = c_1$$
$$\rho u^2 = c_2$$
$$\rho uv = c_3$$
$$\rho uw = c_4$$
$$\rho u\left(e + \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2}\right) + pu = c_5$$

สมการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถแก้ปัญหาการไหลได้ทุกชนิดๆ แต่คำตอบจะแตกต่างกันไปตามเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) ที่กำหนดซึ่งแตกต่างกันไปแต่ละปัญหา สมการที่ได้ทั้งหมดนี้ (2.15-2.25) ทำให้เราสามารถแก้สมการได้เนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่รู้ค่าเท่ากับจำนวนสมการที่มี ซึ่งวิธีการแก้ระบบสมการเหล่านี้จะกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.7 ต่อไป

2.6.5 สมการสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Model)

เป็นแบบจำลองที่สามารถทำนายการกระจายตัวทางความร้อนที่เกิดขึ้นได้ซึ่งเขียนในรูปของผลรวมเอนทาลปีได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho h_0)}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot\left(\rho\vec{V}h_0\right) = \vec{\nabla}\cdot\left(k\vec{V}T\right) + \frac{\partial\rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}\right]$$

$$+\left[\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z}\right]$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$+\left[\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x}+\frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y}+\frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z}\right]+S_h \qquad (2.30)$$

เมื่อ h_0 คือ ผลรวมของเอนทาลปี

i คือ internal energy ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ขึ้นอยู่กับค่า ρ และ T , (m^2/s^2)

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของ, (W/m-K)

$$h_0 = i+\frac{1}{2}\left(u^2+v^2+w^2\right) \qquad (2.31)$$

หากพิจารณาสมการข้างต้นคือการเปลี่ยนปริมาณที่เราสนใจ ϕ ในสมการการเคลื่อนที่ (Transport Equations) ไปเป็นค่าพลังงานภายในหรือเอนทาลปี

2.6.6 สมการสำหรับการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Equation)

การไหลแบบปั่นป่วนเป็นการไหลที่ของไหลเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบ ของไหลมีความเร็วไม่สม่ำเสมอ และมีทิศทางการเคลื่อนที่ที่แตกต่างกัน ทำให้อนุภาคของของไหลผสมกันอย่างรุนแรงซึ่งจากการทดลองจะพบว่าความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงกับเวลาและตำแหน่ง เนื่องจากการไหลของอากาศร้อนภายในเตานั้นเป็นการไหลแบบปั่นป่วนมีทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศไม่แน่นอน จึงต้องอาศัยสมการของการไหลแบบปั่นป่วนร่วมในการคำนวณ

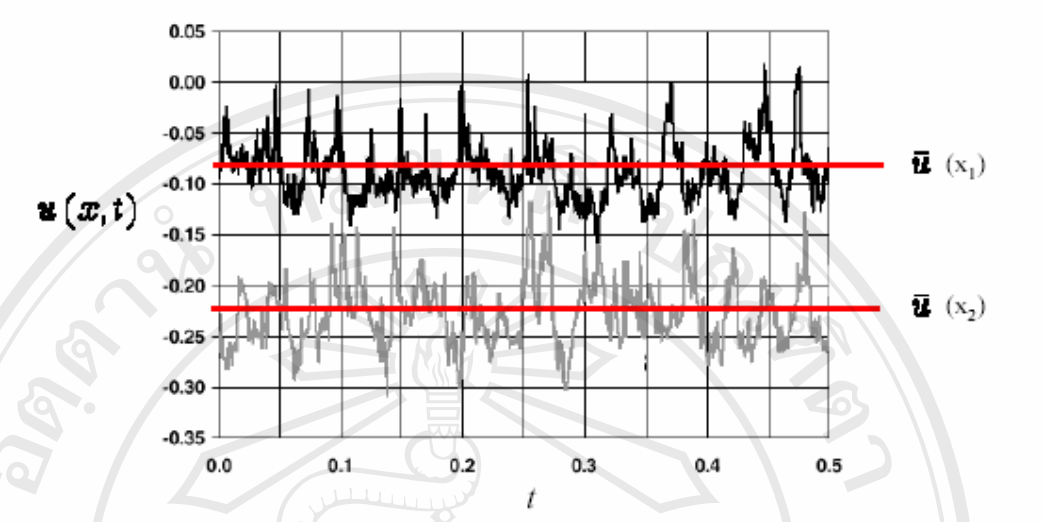
โดยธรรมชาติของการไหลแบบปั่นป่วนจะเป็นการไหลที่ขึ้นกับเวลาและระยะทางตามการทดลองดังรูปที่ 2.11 สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$u(x,t)=\bar{u}(x)+u'(x,t) \qquad (2.32)$$

โดยที่ $\bar{u}(x)$ คือ ความเร็วเฉลี่ยที่เวลาใดๆ

$u'(x,t)$ คือ ความเร็ว ณ เวลาใด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.11 การวัดความเร็วการไหลแบบปั่นป่วนผ่านทรงกระบอก
[ที่มา: ME469B/3/GI Stanford]

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{2.33}$$

$$u_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \bar{\sigma} ji}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho}\frac{\overline{\partial u_i' u_j'}}{\partial x_j} \tag{2.34}$$

$$\bar{\sigma}_{ji} = 2\mu \bar{S}_{ij} \tag{2.35}$$

เมื่อ u_i คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล

$\bar{P}$ คือ ความดัน

μ คือ ค่าความหนืด

ρ คือ ค่าความหนาแน่น

$\bar{\sigma}_{ji}$ คือ Deviatoric part ของ Viscous Stress Tensor (Newtonian Fluid)

$$S_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)}{2} \tag{2.36}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

S_{ij} คือ Strain Tensor

2.6.7 สมการ k-ε Model

จากสมการการไหลแบบปั่นป่วนนั้นส่วนหนึ่งของตัวแปรจะอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์หลายตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Partial Differential Equation) จึงนำสมการ k-ε Model มาใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งแบบจำลองนี้ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เป็นแบบจำลองที่ไม่ยุ่งยาก โดยแบบจำลองดังกล่าวหาค่า μ_t (Turbulence Eddy Viscosity) เพื่อนำไปแทนค่ากลับในสมการโมเมนตัม

$$\mu_t = \rho C_D k^2 / \varepsilon \tag{2.37}$$

โดยที่ k คือ ค่าของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (Turbulence Kinetic Energy)

และ ε คือ อัตราการสลายตัวแบบปั่นป่วน (TKE Dissipation Rate)

สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho U_i k\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + G - \rho\varepsilon \tag{2.38a}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho U_i \varepsilon\right) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}\right] + C_1\frac{\varepsilon}{k}G - \rho C_2\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{2.38b}$$

โดยที่ G คือ Production Rate of Turbulence

σ_ε คือ Prandtl/Schmidt Number สำหรับการกระจายตัว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$G = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\partial \mu_i}{\sigma x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\sigma x_i}\right)\frac{\partial \mu_i}{\sigma x_j}\right] \tag{2.39}$$

ค่า $C_1, C_2, C_D, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ เป็นค่าคงที่ดังนี้

$$C_1 = 1.44$$

$$C_2 = 1.92$$

$$C_D = 0.09$$

$$\sigma_k = 1.00$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.30$$

2.6.8 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions)

ระบบสมการที่กล่าวมาข้างต้น ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์นี้จะขึ้นอยู่กับเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) และรูปร่างของปัญหา เช่น การคำนวณหาสภาวะการไหลในห้องหากสภาพของห้องเปลี่ยนไปหรือความเร็วเปลี่ยนไป ผลลัพธ์ของสภาวะการไหลก็จะแต่ต่างกันไปด้วยทั้งที่สมการต่างๆ ยังคงเป็นชุดเดียวกันก็ตาม การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องและเหมาะสมนั้นจะทำให้ได้คำตอบที่ถูกต้อง ตรงข้ามหากกำหนดเงื่อนไขที่ไม่เหมาะสมจะทำให้คำตอบนั้นไม่มีความถูกต้อง ในงานวิจัยนี้ได้ให้สมมุติฐานไว้แต่ตอนต้นว่า ความเร็วของของไหลที่ติดกับผนังนั้นต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ (No-Slip Condition)

$$u = v = w = 0 \tag{2.40}$$

สำหรับของไหลที่มีการถ่ายเทความร้อนร่วมอยู่ด้วยอุณหภูมิของของไหลที่อยู่ติดกับผนังจำเป็นต้องเท่ากับอุณหภูมิของผนังนั้น

$$T = T_w \tag{2.41}$$

เมื่อ T_w คือ อุณหภูมิของผนัง

บางครั้งในการแก้ปัญหาที่มีความสมมาตรตามแนวแกน การกำหนดเงื่อนไขที่ขอบอาจกำหนดได้อีกแบบหนึ่ง คือ การกำหนดเงื่อนไขแบบสมมาตร (Symmetric boundary) เพื่อลดภาระการคำนวณของเครื่องคอมพิวเตอร์ลงได้ รวมทั้งเวลาในการคำนวณ และยังให้ผลที่ถูกต้องเท่ากัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 ระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method)

โปรแกรม CFDRC® (Computational Fluid Dynamics) นั้นมีวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขแบบระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Method, FVM) ซึ่งจะทำการจัดรูปแบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของสมการพีชคณิตบนจุดต่างๆ เป็นปริมาตรควบคุม (Control Volume) แล้วทำการกำหนดค่าขอบเขตเพื่อให้สามารถแก้ระบบสมการได้ ในการแก้ระบบสมการจะใช้วิธีการทำซ้ำเพื่อหาคำตอบ (Iteration) เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical Analysis) สมการควบคุมของการไหลสามารถเขียนได้ในรูปแบบทั่วไปซึ่งเรียกว่า Transport Equation ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho\phi\mathbf{V})=\nabla\cdot(\Gamma\nabla\phi)+S_{\phi} \tag{2.42}$$

โดยความหมายของสมการสามารถอธิบายได้ดังนี้ เทอมแรกทางด้านซ้ายมือคือ อัตราการเปลี่ยนแปลง ϕ ภายในอิลิเมนต์ของของไหล เทอมที่สองคือ อัตราการไหลสุทธิของ ϕ ที่ไหลเข้าออกออกอิลิเมนต์ของของไหล เทอมต่อมาทางด้านขวาของสมการเทอมแรกคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของ ϕ เนื่องจากการแพร่ (Diffusion) ส่วนเทอมสุดท้ายคือ อัตราการเพิ่มขึ้นของ ϕ เนื่องจากพลังงานที่ให้หรือเกิดขึ้นกับอิลิเมนต์ของของไหลจากสมการที่ (2.42) สามารถเขียนกระจายเทอมต่างๆ กันออกมาได้ดังนี้

การพา (Convective Terms) 3 มิติ ในแนวแกนพิกัด X, Y, Z

$$\nabla\cdot(\rho\phi\mathbf{V})=\frac{\partial(\rho u_j\phi)}{\partial x_j}=\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \tag{2.43}$$

การแพร่ (Diffusive Terms) 3 มิติ ในแนวแกนพิกัด X, Y, Z

$$\nabla\cdot(\Gamma\nabla\phi)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x_j}\right)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\frac{\partial\phi}{\partial z}\right) \tag{2.44}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.1 การพาและการแพร่ (Convective and Diffusive)

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาปัญหาที่มีเทอมของการพา (Convective Term) การแพร่ (Diffusive Term) ร่วมด้วยในสมการและเทอมของพลังงาน (Source) 2 มิติ ในสภาวะคงตัว (Steady State) จากระบบสมการควบคุม (Governing Equation)

$$\nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \tag{2.45}$$

เทอมทางด้านซ้ายมือเทอมแรกแสดงถึงปริมาณ ϕ ไหลผ่านพื้นผิวปริมาตรควบคุม เทอมที่สองหรือเทอมแรกทางด้านขวามือแสดงถึงปริมาณ ϕ ที่แพร่ผ่านปริมาตรควบคุม เทอมสุดท้ายแสดงถึงพลังงานที่ให้หรือได้รับของปริมาตรควบคุม จากสมการ (2.45) ทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม (Control Volume)

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \nabla \phi) dA + \int_V S_\phi dV \tag{2.46a}$$

หรือ

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \right] dV + \int_V S_\phi dV \tag{2.46b}$$

เมื่ออินทิเกรตแล้วสามารถเขียนได้ดังนี้

$$(\rho u A \phi)_e - (\rho u A \phi)_w + (\rho u A \phi)_n - (\rho u A \phi)_s = \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s$$

$$+ (S_u + S_p \phi_P) \tag{2.47}$$

กำหนดให้

$$F = \rho u, \qquad D = \frac{\Gamma}{\Delta x}$$

โดยที่ตัวแปรที่กำหนดให้แต่ละด้านของปริมาตรควบคุมสามารถเขียนได้ดังนี้

$$F_w = (\rho u)_w, \quad F_e = (\rho u)_e \qquad F_n = (\rho u)_n, \quad F_s = (\rho u)_s$$

$$D_w = \frac{\Gamma_w}{\Delta x_{WP}}, \quad D_e = \frac{\Gamma_e}{\Delta x_{PE}} \qquad D_n = \frac{\Gamma_n}{\Delta x_{NP}}, \quad D_s = \frac{\Gamma_s}{\Delta x_{PS}}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

และสมมุติให้กริดเป็นแบบ Uniform Grid คือ มีทุกด้านเท่ากัน $A_w = A_e = A_n = A_s = A$ แทนสมการข้างต้นทั้งหมดในสมการ (2.47) ได้ดังนี้

$$F_e\phi_e - F_w\phi_w + F_n\phi_n - F_s\phi_s = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S) \tag{2.48}$$

จากสมการต่อเนื่อง (Continuity Equation), $(\rho uA)_e - (\rho uA)_w = 0$ จึงได้ $F_e - F_w = 0$ หากรู้ค่าความเร็ว u, v ก็สามารถหาค่า F ได้ ส่วนปริมาณ ϕ ที่พื้นผิวของปริมาตรควบคุมสามารถหาได้จากวิธีการนำค่าที่แต่ละจุดมาเฉลี่ยกัน (Central Difference Scheme) โดยในที่นี้สมมุติว่าเป็นกริดที่มีขนาดเท่ากันทุกด้าน (Uniform Grid) ได้ดังนี้

$$\phi_e = (\phi_P + \phi_E)/2 \qquad \phi_n = (\phi_P + \phi_N)/2$$
$$\phi_w = (\phi_W + \phi_P)/2 \qquad \phi s = (\phi_S + \phi_P)/2$$

แทนในสมการ (2.48) ได้ดังนี้

$$\frac{F_e}{2}(\phi_P + \phi_E) - \frac{F_w}{2}(\phi_W + \phi_P) + \frac{F_n}{2}(\phi_P + \phi_N) - \frac{F_s}{2}(\phi_S + \phi_P) =$$
$$D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) + D_n(\phi_N - \phi_P) - D_s(\phi_P - \phi_S) \tag{2.49}$$

จัดรูปสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\left[\left(D_w - \frac{F_w}{2}\right) + \left(D_e + \frac{F_e}{2}\right) + \left(D_n - \frac{F_n}{2}\right) + \left(D_s + \frac{F_s}{2}\right)\right]\phi_P =$$
$$\left(D_w + \frac{F_w}{2}\right)\phi_W + \left(D_e - \frac{F_e}{2}\right)\phi_E + \left(D_n + \frac{F_n}{2}\right)\phi_N + \left(D_s - \frac{F_s}{2}\right)\phi_S \tag{2.50}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

หรือ

$$\left[\left(D_w+\frac{F_w}{2}\right)+\left(D_e-\frac{F_e}{2}\right)+\left(D_n+\frac{F_n}{2}\right)+\left(D_s-\frac{F_s}{2}\right)+\left(F_e-F_w\right)+\left(F_n-F_s\right)\right]\phi_P = \left(D_w+\frac{F_w}{2}\right)\phi_W+\left(D_e-\frac{F_e}{2}\right)\phi_E+\left(D_n+\frac{F_n}{2}\right)\phi_N+\left(D_s-\frac{F_s}{2}\right)\phi_S \tag{2.51}$$

เขียนเป็นสมการเชิงเส้นติดค่าสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_N\phi_N + a_S\phi_S \tag{2.52}$$

โดยที่

$$a_W = D_w+\frac{F_w}{2} \quad a_N = D_n+\frac{F_n}{2}$$
$$a_E = D_e+\frac{F_e}{2} \quad a_S = D_s+\frac{F_s}{2}$$
$$a_P = a_W + a_E + \left(F_e-F_w\right)+\left(F_n-F_s\right)$$

ในการแก้ระบบสมการรวม (Convection-Diffusion Equation) จะมีปัญหาในการเขียนโปรแกรมเทอมของการพา (Convective Terms) เนื่องจากเทอมนี้หากเลือกใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบอัปวินด์ (Upwind Scheme) ซึ่งเป็นวิธีที่ต้องรู้ทิศทางในการไหลของของไหลอย่างแน่นอนก่อนทำการแก้ปัญหา การเคลื่อนที่ของของไหลจะแบ่งจากเครื่องหมายของความเร็ว หากความเร็วมีค่าเป็นบวก ($u_{w|}>0, u_{e|}>0$ ($F_{w|}>0, F_{e|}>0$) และ $\phi_{w|}=\phi_W$ and $\phi_{e|}=\phi_P$ จะสามารถเขียนสมการการพาและการแพร่ (Convection-Diffusion Equation) ได้ดังนี้

$$F_e\phi_P - F_w\phi_W = D_e\left(\phi_E-\phi_P\right)-D_w\left(\phi_P-\phi_W\right) \tag{2.53}$$

หรือ

$$\left[\left(D_w-F_w\right)+D_e+\left(F_e-F_w\right)\right]\phi_P = \left(D_w+F_w\right)\phi_W + D_e\phi_E \tag{2.54}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

หากความเร็วมีค่าเป็นลบ ($u_{w|} < 0, u_{e|} < 0\,(F_{w|} < 0, F_{e|} < 0)$ และ $\phi_{w|}=\phi_W$ and $\phi_{e|}=\phi_P$ จะสามารถเขียนสมการการพาและการแพร่ (Convection-Diffusion Equation) ได้ดังนี้

$$F_e\phi_E - F_w\phi_P = D_e(\phi_E - \phi_P) - D_w(\phi_P - \phi_W) \tag{2.55}$$

หรือ

$$[D_w + (D_e - F_e) + (F_e - F_w)]\phi_P = D_w\phi_W + (D_e - F_e)\phi_E \tag{2.56}$$

สมการ (2.53-2.56) สามารถเขียนรวมในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E \tag{2.57}$$

โดยที่

$$a_W = D_w + \max(F_w, 0)$$
$$a_E = D_e + \max(0, -F_e)$$
$$a_P = a_W + a_E + (F_e - F_w)$$

ซึ่งการกำหนดโค๊ดโปรแกรมในลักษณะนี้จะทำให้การเขียนโปรแกรมในเทอมของการพา โดยวิธีอัปวินด์นั้นสั้นลงมาก

2.7.2 การแก้ระบบแบบ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Link Equations), (Patankar and Spalding, 1972)

เป็นวิธีการแก้ระบบสมการรวมหลายๆ สมการที่ต้องทำการแก้ไปพร้อมๆ กันในระบบสมการข้างต้นที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นระบบสมการรวมหลายๆ สมการที่เรียกว่าสมการควบคุม (Governing Equations) ซึ่งแต่ละจุดการคำนวณ (Node) จะประกอบไปด้วยสมการเหล่านี้ ซึ่งหากจุดการคำนวณนั้นมีหลายจุดจะทำให้ระบบสมการนั้นมีขนาดใหญ่และยากต่อการแก้สมการมาก เพราะมีจำนวนตัวแปรที่ไม่รู้ค่ามากมาย และยังต้องทำการแก้ไปพร้อมๆ กันอีกด้วย โดยการคำนวณจะเริ่มจากการเดาค่า ความเร็วและความดัน แล้วแก้สมการตามปรกติเมื่อได้คำตอบแล้วทำการเปรียบเทียบกับค่าเดาที่ได้แล้วปรับแก้ค่าจนกว่าจะมีค่าใกล้เคียงกันจนยอมรับได้เป็นคำตอบของสมการ ต่อไปจะกล่าวถึงขั้นตอนการคำนวณอย่างละเอียด ในที่นี้จะพิจารณาการไหลแบบราบเรียบใน 2 มิติ สภาวะคงตัวพิกัดคาร์ทีเซียน (2-D Laminar Steady Flow on Cartesian Coordinate)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พิจารณาสมการโมเมนตัมในแนวแกน X และแกน Y ได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)+S_x \qquad (2.58)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+S_y \qquad (2.59)$$

เมื่อทำการแก้ระบบสมการด้วยวิธีตามที่กล่าวมาข้างต้นสามารถเขียนได้ดังนี้ (Discretized Form)

$$a_{i,J}u_{i,J}=\sum a_{nb}u_{nb}+\left(p_{I-1,J}-p_{I,J}\right)A_{i,J}+b_{i,J} \qquad (2.60)$$

$$a_{I,j}v_{I,j}=\sum a_{nb}v_{nb}+\left(p_{I,J-1}-p_{I,J}\right)A_{I,j}+b_{I,j} \qquad (2.61)$$

ขั้นตอนแรกเริ่มจากการเดาค่าความดัน P^* แล้วแก้สมการโมเมนตัมหาค่า u^*, v^* จากสมการดังนี้

$$a_{i,J}u^*_{i,J}=\sum a_{nb}u^*_{nb}+\left(p^*_{I-1,J}-p^*_{I,J}\right)A_{i,J}+b_{i,J} \qquad (2.62)$$

$$a_{I,j}v^*_{I,j}=\sum a_{nb}v^*_{nb}+\left(p^*_{I,J-1}-p^*_{I,J}\right)A_{I,j}+b_{I,j} \qquad (2.63)$$

นำสมการ (2.62) - (2.63) และ (2.60) - (2.61) ได้ดังนี้

$$a_{i,J}\left(u_{i,J}-u^*_{i,J}\right)=\sum a_{nb}\left(u_{nb}-u^*_{nb}\right)+\left[\left(p_{I-1,J}-p^*_{I-1,J}\right)-\left(p_{I,J}-p^*_{I,J}\right)\right]A_{i,J} \qquad (2.64)$$

$$a_{I,j}\left(v_{I,j}-v^*_{I,j}\right)=\sum a_{nb}\left(v_{nb}-v^*_{nb}\right)+\left[\left(p_{I,J-1}-p^*_{I,J-1}\right)-\left(p_{I,J}-p^*_{I,J}\right)\right]A_{I,j} \qquad (2.65)$$

เพื่อให้ง่ายตัดเทอมตัวแปร $\sum a_{nb}u'_{nb}$ และ $\sum a_{nb}v'_{nb}$ ทิ้ง สมการ (2.64) และ (2.65) จะกลายมาเป็น

$$u'_{i,J}=d_{i,J}\left(p'_{I-1,J}-p'_{I,J}\right) \qquad (2.66)$$

$$v'_{I,j}=d_{I,j}\left(p'_{I,J-1}-p'_{I,J}\right) \qquad (2.67)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อ

$$d_{i,J} = \frac{A_{i,J}}{a_{i,J}}, \qquad d_{I,j} = \frac{A_{I,j}}{a_{I,j}}$$

จากสมการ Velocity correction $u = u^* + u'$ และ $v = v^* + v'$ ถูกแทนด้วยสมการ (2.66) และ (2.67) ได้ดังนี้

$$u_{i,J} = u^*_{i,J} + d_{i,J}\left(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}\right) \tag{2.68}$$

$$v_{I,j} = v^*_{I,j} + d_{I,j}\left(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}\right) \tag{2.69}$$

ในทำนองเดียวกันที่จุด $u_{i+1,J}$, $v_{I,j+1}$

$$u_{i+1,J} = u^*_{i+1,J} + d_{i+1,J}\left(p'_{I,J} - p'_{I+1,J}\right) \tag{2.70}$$

$$v_{I,j+1} = v^*_{I,j+1} + d_{I,j+1}\left(p'_{I,J} - p'_{I,J+1}\right) \tag{2.71}$$

เมื่อ

$$d_{i+1,J} = \frac{A_{i+1,J}}{a_{i+1,J}}, \quad d_{I,j+1} = \frac{A_{I,j+1}}{a_{I,j+1}}$$

จากสมการข้างต้นสามารถหาค่าของ u และ v ต่อมาจะหาค่า P ได้โดยพิจารณาสมการต่อเนื่อง (continuity equation) ในรูปที่ทำการอินทิเกรตแล้วได้ดังนี้

$$\left[(\rho uA)_{i+1,J} - (\rho uA)_{i,J}\right] + \left[(\rho vA)_{I,j+1} - (\rho vA)_{I,j}\right] = 0 \tag{2.72}$$

แทนสมการ (2.70) และ (2.71) ในสมการ (2.72) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}&\left[\rho_{i+1,J}A_{i+1,J}\left(u^*_{i+1,J} + d_{i+1,J}\left(p'_{I,J} - p'_{I+1,J}\right)\right) - \rho_{i,J}A_{i,J}\left(u^*_{i,J} + d_{i,J}\left(p'_{I-1,J} - p'_{I,J}\right)\right)\right] \\ &+ \left[\rho_{I,j+1}A_{I,j+1}\left(v^*_{I,j+1} + d_{I,j+1}\left(p'_{I,J} - p'_{I,J+1}\right)\right) - \rho_{J,j}A^*_{I,j}\left(v^*_{I,j} + d_{I,j}\left(p'_{I,J-1} - p'_{I,J}\right)\right)\right] = 0\end{aligned} \tag{2.73}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned}\left[(\rho dA)_{i+1,J}+(\rho dA)_{i,J}+(\rho dA)_{I,j+1}\right]p'_{I,J} &= (\rho dA)_{i+1,J}\,p'_{I+1,J}+(\rho dA)_{i,J}\,p'_{I-1,J}\\ &+(\rho dA)_{I,j+1}\,p'_{I,J+1}+(\rho dA)_{I,j}\,p'_{I,J-1}\\ &+\left[(\rho u^{*}A)_{i,J}-(\rho u^{*}A)_{i+1,J}+(\rho v^{*}A)_{I,j}+(\rho v^{*}A)_{I,j+1}\right]\end{aligned} \tag{2.74}$$

เขียนติดในเทอมสัมประสิทธิ์ได้ดังนี้

$$a_{I,J}\,p'_{I,J} = a_{I+1,J}\,p'_{I+1,J}+a_{I-1,J}\,p'_{I-1,J}+a_{I,J+1}p'_{I,J+1}+a_{I,J-1}p'_{I,J-1}+b'_{I,J} \tag{2.75}$$

เมื่อ

$$\begin{aligned}a_{I,J} &= a_{I+1,J}+a_{I-1,J}+a_{I,J+1}+a_{I,J-1}\\ a_{I+1,J} &= (\rho dA)_{i+1,J}\\ a_{I-1,J} &= (\rho dA)_{i,J}\\ a_{I,J+1} &= (\rho dA)_{I,j+1}\\ a_{I,J-1} &= (\rho dA)_{I,j}\\ b'_{I,J} &= (\rho u^{*}A)_{i,J}-(\rho u^{*}A)_{i+1,J}+(\rho v^{*}A)_{I,j}-(\rho v^{*}A)_{I,j+1}\end{aligned}$$

สมการ Pressure Correction เมื่อทำการแก้สมการหาค่าความดันในแต่ละรอบการคำนวณหากค่าที่ได้ในรอบแรกๆ นั้นมีค่าสูงจะเกิดการแกว่งของคำตอบมาก ซึ่งหากเกิดกรณีนี้เกิดขึ้นอาจทำให้คำตอบไม่ลู่เข้าสู่คำตอบได้ วิธีแก้ของปัญหานี้คือ การกำหนดค่า Under-Relaxation Factor (α_p) เพิ่มเข้าไปในสมการเพื่อเป็นการลดค่าของความดันที่คำนวณได้ในรอบก่อน แล้วค่อยนำไปคำนวณต่อในรอบต่อไปผลที่ได้คือคำตอบจะไม่ลู่ออกแต่คำตอบที่ได้อาจต้องใช้เวลามากขึ้นในการคำนวณ แสดงสมการได้ดังนี้

$$p^{new} = p^{*}+\alpha_p\,p' \tag{2.76}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

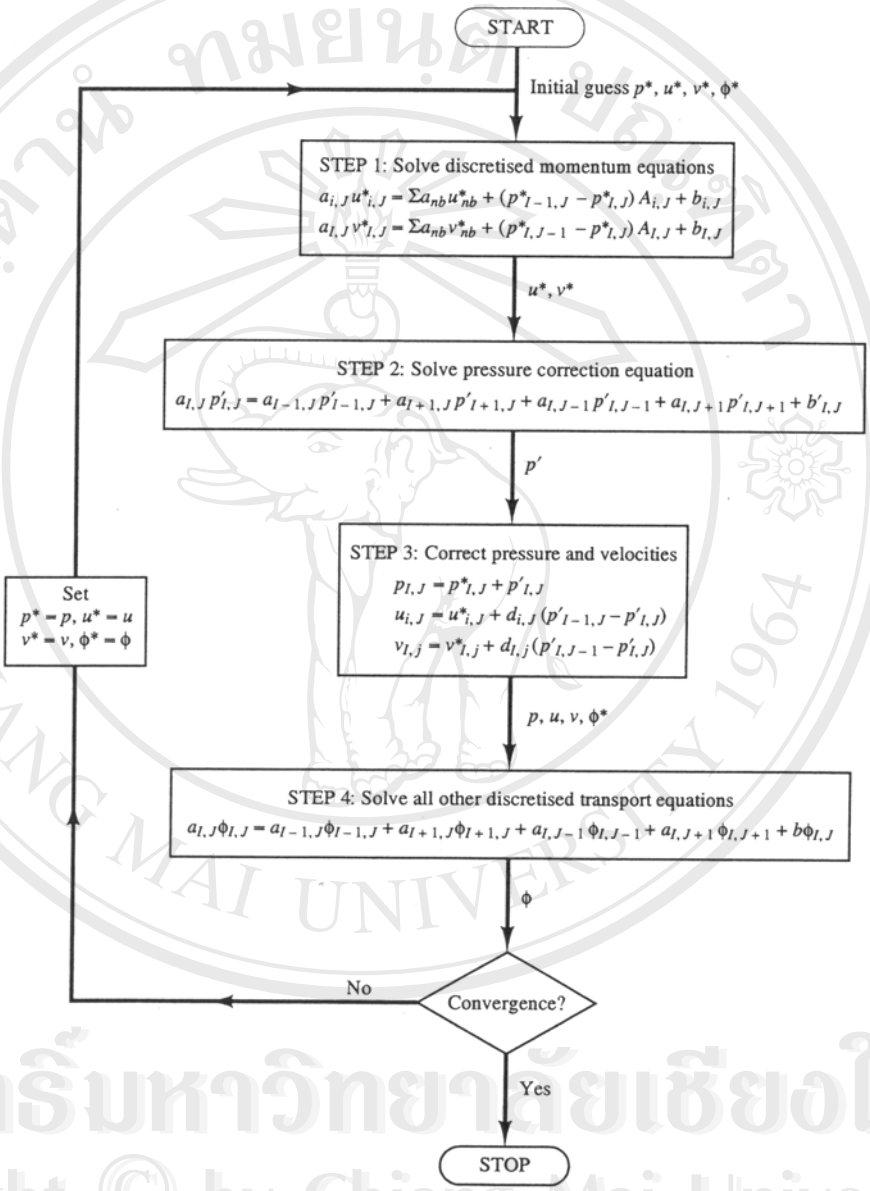
โดยที่ค่า α_p จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 หากกำหนดค่านี้ในการคำนวณไว้ต่ำจะทำให้การคำนวณนั้นเสถียรกว่าแต่เวลาในการคำนวณเพื่อเข้าสู่คำตอบนั้นจะช้ากว่าและในทำนองเดียวกันการกำหนดค่านี้สามารถใช้ได้กับสมการความเร็วได้ด้วย

$$u^{new} = \alpha_u u + (1-\alpha_u)u^{(n-1)} \tag{2.77}$$

$$v^{new} = \alpha_v v + (1-\alpha_v)v^{(n-1)} \tag{2.78}$$

ซึ่งความหมายและค่าของ Under-Relaxation จะมีความหมายเดียวกับที่กล่าวมาแล้วข้างต้น อย่างไรก็ดีการกำหนดค่าของ α_p จะขึ้นกับประสบการณ์และปัญหาในแต่ละโดเมน บางครั้งอาจต้องประมาณค่าเอาเอง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



รูปที่ 2.12 Flowchart ลำดับขั้นตอนการคำนวณวิธี SIMPLE
[ที่มา: เอกสารการสอน CFD, ยศธนา]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved