

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

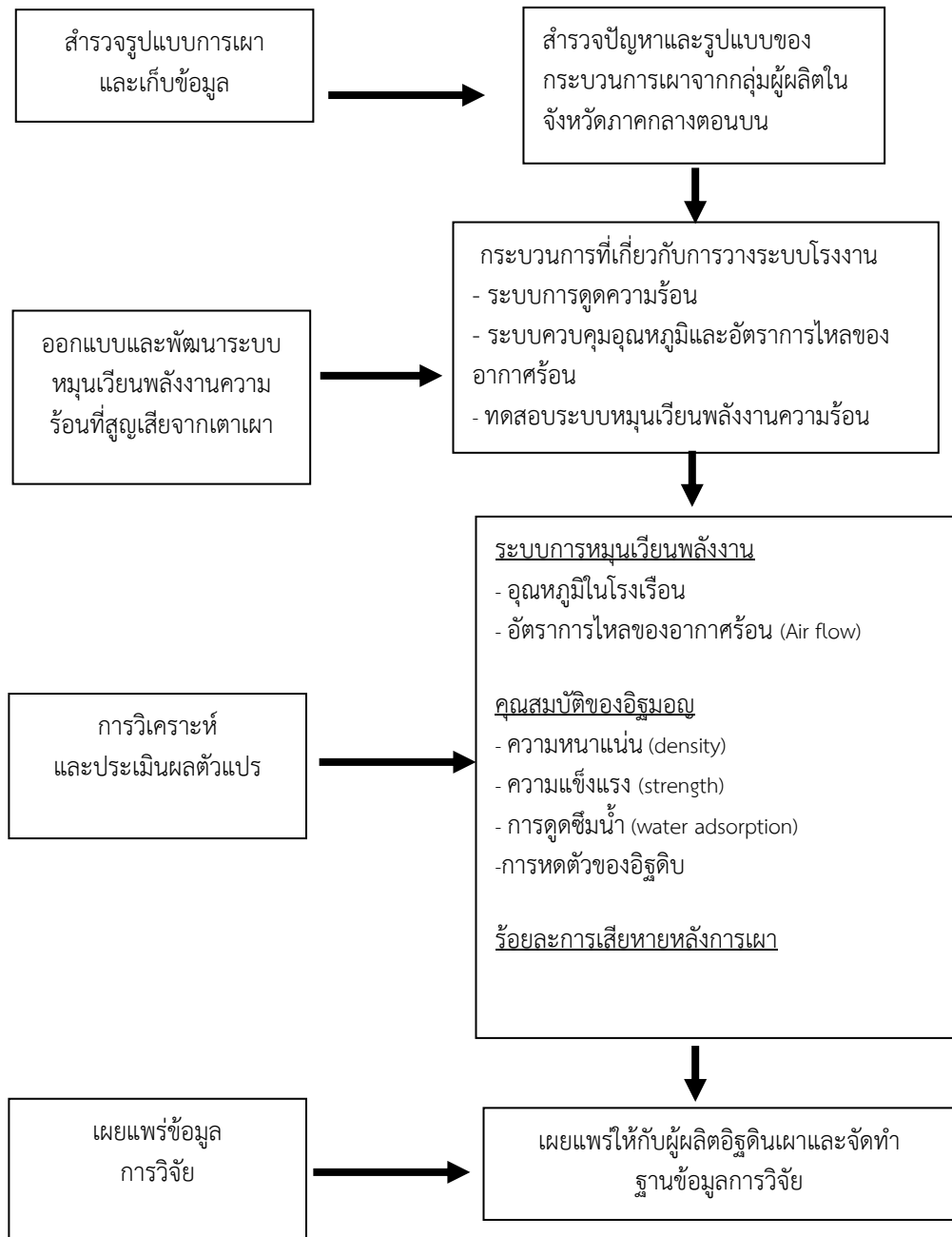
2.1 ที่มาและความสำคัญ

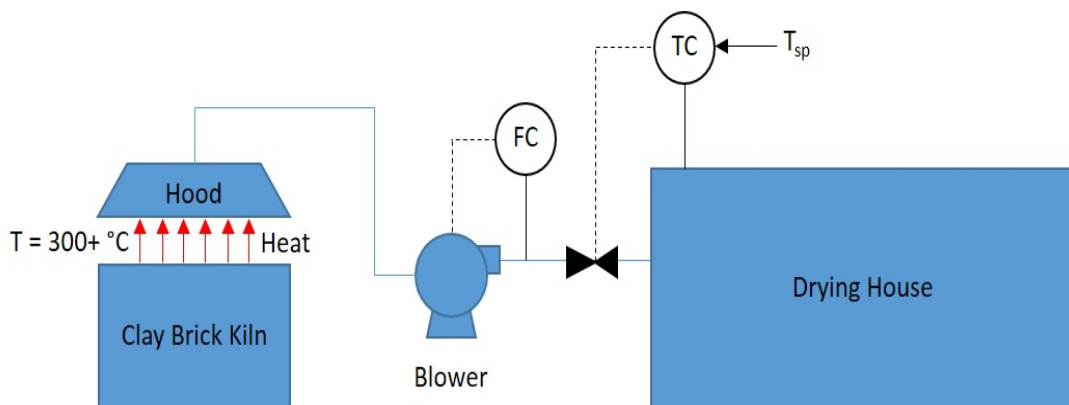
กระบวนการเผาผลิติดังกล่าวโดยปกติผู้ประกอบการในระดับท้องถิ่นส่วนใหญ่จะนิยมใช้การวางเชื้อเพลิงในการเผาประเภทแก๊สกลบให้ท่วมกับกองอิฐที่ต้องการเผา หลังจากนั้นเริ่มจึงเริ่มจุดไฟเผาจากด้านล่างของเตา ทำให้ความร้อนในเตาเผาเริ่มจากข้างล่างขึ้นสู่ด้านบน โดยอิฐที่อยู่ข้างล่างจะได้รับความร้อนก่อน ทำให้ความร้อนเกิดการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ จากการที่เตาเผาเป็นการทำในลักษณะเปิด ทำให้ในกระบวนการเผาเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปแบบของการพาความร้อน (convection heat transfer) ออกสู่สิ่งแวดล้อมภายนอกเป็นปริมาณมาก โดยเฉพาะส่วนด้านบนสุดของเตาที่ไม่มีวัสดุปิดทับส่งผลทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการเผาและพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากกระบวนการเผาอิฐดินเผาใช้ในการอบแห้งอิฐดินเผา ซึ่งกระบวนการอบแห้งอิฐดินเผานั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของอิฐดินเผา เนื่องจากถ้าภายในชิ้นงานอิฐดินเผานั้นยังคงมีปริมาณความชื้นอยู่มากจะส่งผลทำให้อิฐเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะรูปร่าง เกิดการบิดงอ ซึ่งจะไม่ได้มาตรฐานภายหลังจากที่นำชิ้นงานเหล่านี้เข้าสู่กระบวนการเผา ก่อให้เกิดการสูญเสียในเชิงธุรกิจเป็นอย่างมาก อีกทั้งการตากแห้งแบบปกติที่ใช้การตากแห้งในที่โล่งยังได้รับผลกระทบจากสภาพอากาศและฤดูกาลเป็นอย่างมาก อาทิ ช่วงฤดูฝนที่มีฝนตกชุก หรือ ช่วงที่มีปริมาณแสงแดดน้อยนั้นจะก่อให้เกิดปัญหาการตากอิฐไม่แห้งหรือต้องใช้เวลาในการตากที่ยาวนานขึ้นทำให้ผู้ประกอบการหลายรายไม่สามารถที่จะผลิตอิฐดินเผาป้อนตลาดได้ทัน สำหรับการศึกษาข้อมูลในการออกแบบและพัฒนาระบบหมุนเวียนพลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาผลิติดังกล่าวจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ

1. การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการออกแบบและวางระบบกระบวนการหมุนเวียนพลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาอิฐดินเผา ที่จะสามารถกำหนดบทบาทของเครื่องมือ อุปกรณ์และการวางระบบได้อย่างถูกต้อง โดยรวบรวมข้อมูลเพื่อศึกษาข้อดีข้อเสีย เพื่อนำมาปรับปรุงแก้ไขในการปรับปรุงคุณภาพและการออกแบบกระบวนการ

2. การออกแบบและวางระบบกระบวนการหมุนเวียนพลังงานความร้อนจากกระบวนการเผาอิฐดินเผา โดยจะดำเนินการออกแบบตามองค์ประกอบที่เหมาะสม ลักษณะการใช้งาน ต้นทุนการจัดสร้าง วัสดุอุปกรณ์ เพื่อให้ได้ระบบหมุนเวียนพลังงานมาที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งมีการคำนึงถึงปัจจัยในการทำงานต่าง ๆ ได้แก่ การป้อนเชื้อเพลิง การควบคุมปริมาณความร้อน การออกแบบเตารูปแบบการดึงพลังงาน เป็นต้น

3. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิการอบแห้ง ความชื้นของบรรยากาศที่มีต่อคุณภาพของผลิติดังกล่าว ซึ่งข้อมูลส่วนนี้จะเป็นข้อมูลที่ใช้กำหนดรูปแบบของภาวะการอบแห้งของอิฐดินเผา ก่อนกระบวนการเผาเพื่อให้ผลิติดังกล่าวที่ได้มีคุณภาพดีที่สุดในแง่ของมาตรฐานและความต้องการของตลาด





ภาพที่ 2.1 แผนภาพระบบหมุนเวียนพลังงานความร้อน

2.2 ประวัติความเป็นมาของอิฐดินเผา

อิฐดินเผา (หรือ อิฐมอญ) ถือว่าเป็นวัสดุก่อสร้างที่คนไทยรู้จักและใช้อย่างแพร่หลายมาเป็นระยะเวลายาวนาน โดยพบว่าสิ่งก่อสร้างในอดีต เช่น โบราณสถานต่าง ๆ กำแพงเมือง บ้านเรือน ล้วนจากสร้างด้วยอิฐดินเผาเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากอิฐดินเผานั้นถูกใช้เป็นส่วนประกอบหลักในการประกอบเพื่อยึดโครงสร้างของตัวอาคาร ผนัง ให้มีความแข็งแรง มั่นคง นอกจากนี้ยังถูกใช้สำหรับการประดับตกแต่งอาคารให้มีความสวยงามมากขึ้นอีกด้วย สำหรับสาเหตุของการใช้ชื่อ “อิฐมอญ” นั้นเนื่องจากในอดีตชาวมอญซึ่งอพยพเข้ามาอยู่ในประเทศไทยเป็นคนกลุ่มแรกที่ได้มีการทำอิฐดินเผาขึ้นในบริเวณพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งเป็นแกวพื้นที่บริเวณปากเกร็ดและปทุมธานีในปัจจุบัน ด้วยความนิยมในการก่อสร้างอาคารบ้านเรือนของคนโดยการใช้อิฐ ทำให้อิฐซึ่งออกเรขาคณิตโดยชาวมอญเป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายในยุคนั้นจึงทำให้เรียกชื่ออิฐดินเผาว่าอิฐมอญนั่นเอง

อิฐมอญ เป็นอิฐที่ใช้ในการก่อสร้างโดยทั่วไป โดยมีการดำเนินการผลิตกันทุกภาคส่วนของประเทศไทย ทั้งในรูปแบบของอุตสาหกรรมในชุมชนจนกระทั่งถึงการผลิตในลักษณะโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ โดยวัตถุดิบที่ใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตอิฐมอญนั้น ได้แก่ ดินเหนียว ผสมกับแกลบ หรือขี้เถ้า อย่างใดอย่างหนึ่ง แต่ที่นิยมกันมากที่สุด คือ แกลบ ซึ่งสมบัติของอิฐมอญนั้น คือ สามารถถ่ายโอนความร้อนเข้าและออกได้โดยง่าย เก็บกักความร้อนไว้ภายในโครงสร้างได้เป็นระยะเวลานาน เนื่องจากอิฐมอญมีค่าความจุความร้อน (heat capacity) ที่สูงทำให้อิฐดินเผามีความสามารถกักเก็บพลังงานความร้อนไว้ในเนื้อวัสดุได้ดีและจะปล่อยพลังงานความร้อนออกสู่สิ่งแวดล้อมอย่างช้าๆ จึงเหมาะกับการนำไปใช้ในบริเวณพื้นที่ใช้งานเฉพาะช่วงกลางวัน อิฐมอญเป็นหนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่มีการควบคุมมาตรฐานตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช) โดยเกณฑ์ที่กำหนดคุณภาพของอิฐดินเผาที่ได้มาตรฐานประกอบ คือ อิฐดินเผาจะต้องไม่มีรอยแตกร้าว แต่อาจจะมีการบิ่นได้เล็กน้อย มีขนาดในด้านมิติความกว้าง ความยาวและความหนา ตามมาตรฐานโดยมีความคลาดเคลื่อนของขนาดไม่เกิน ± 5 mm มีความต้านทานแรงอัดไม่น้อยกว่า 7 MPa และการดูดซึมน้ำน้อยกว่า ร้อยละ 25 (ที่มา: มผช. อิฐดินเผา) ในการเลือกวัตถุดิบประเภทดินเหนียวมาใช้นั้นควรคำนึงถึงความเหนียวของดินวัตถุดิบเพื่อให้เกิดการขึ้นรูปได้ง่าย อุณหภูมิในการเผาที่ทำให้อิฐดินเผาสุกตัวควรอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 950-1100 °C เพื่อให้อิฐดินเผามีความแข็งแรง โดยไม่มีการหด

ตัวหรือบิดเบี้ยวเปลี่ยนแปลงรูปร่างมากจนเกินไป นอกจากนั้นควรมีปริมาณดินเหนียวสำรองที่เพียงพอเพื่อมีวัสดุคืบใช้ในระยะเวลา

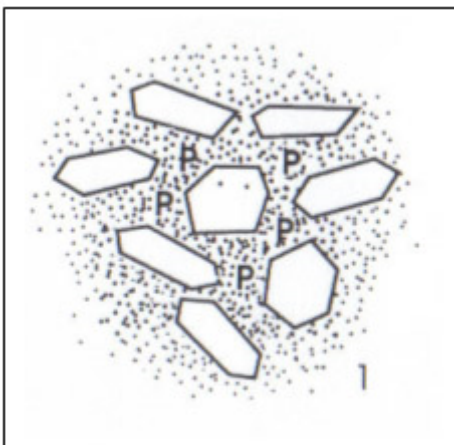


ภาพที่ 2.2 ลักษณะภายนอกของอิฐดินเผา

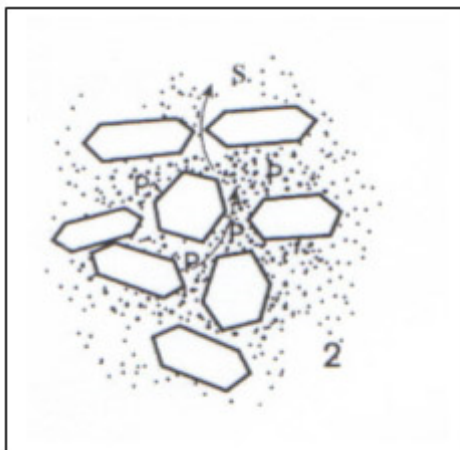
การตากผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา (Drying)

ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อิฐดินเผานั้นเนื้อดินที่ถูกใช้เป็นตัวคืบในกระบวนการขึ้นรูปจะถูกผสมกับน้ำเพื่อให้เนื้อดินเกิดความเหนียวที่เหมาะสมเพื่อทำให้กระบวนการขึ้นรูปจะสามารถทำได้ง่าย ดังนั้นก่อนนำอิฐดินเผาที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วเข้าสู่กระบวนการเผาจึงต้องทำการตากแห้งอิฐดินเผาให้แห้งสนิท ถ้าหากตากไม่แห้งสนิทแล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผาจะทำให้เกิดแตกร้าวของอิฐเนื่องจากความร้อนจากกระบวนการเผาทำให้ความชื้นและน้ำที่ผสมอยู่ที่ผิวหน้าของอิฐเกิดการระเหยอย่างรวดเร็วทำให้ผิวหน้าของเนื้อดินเกิดการร้อนอย่างรวดเร็ว โดยบริเวณส่วนกลางของอิฐดินเผาจะได้รับความร้อนช้ากว่าที่ผิว ทำให้เกิดการหดตัวที่ไม่เท่ากันก่อให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ในกระบวนการตากแห้งอิฐดินเผาประกอบไปด้วยหลายขั้นตอน ดังนี้

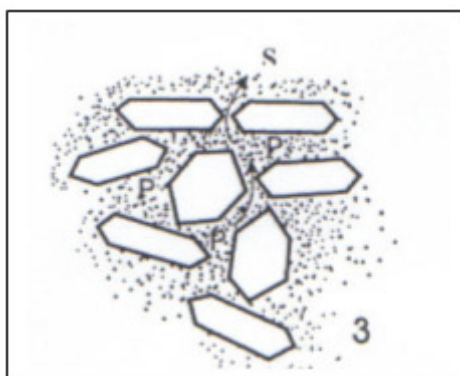
1. ดินเปียกจะมีรูพรุน (Pore) ขนาดใหญ่ที่อยู่ระหว่างเลเยอร์ (Layer) ของเนื้อดิน ในรูพรุนนี้จะเป็นที่น้ำหล่อเลี้ยงอยู่จะทำให้ดินมีความเหนียว



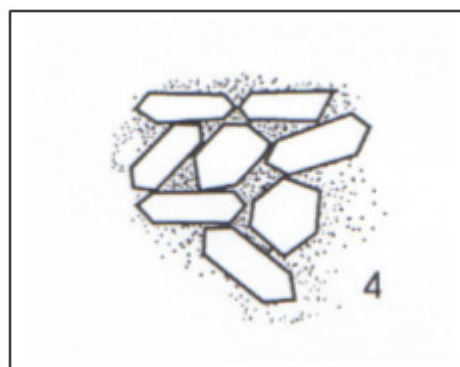
2. น้ำที่ระเหยออกจากรูพรุนเมื่อผ่านกระบวนการตาก โดยน้ำจะระเหยออกไปข้างนอกผ่านทางผิวหน้า (Surface) ทำให้ดินเกิดการหดตัวเนื่องจากช่องว่างรูพรุนระหว่างเลเยอร์แคบลง



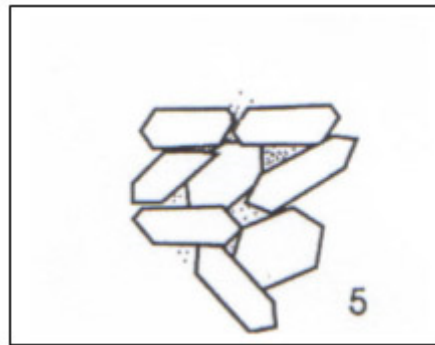
3. ช่องว่างของรูพรุนจะแคบลงทำให้เนื้อดินจะเกิดการหดตัวมากขึ้นและที่ตำแหน่งผิวหน้าจะเริ่มแห้ง



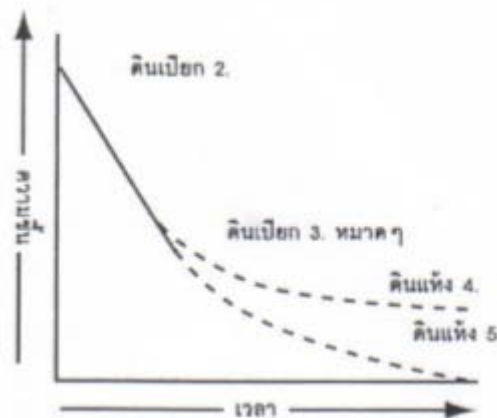
4. ผิวหน้าของชั้นงานที่แห้งนั้นจะยังมีรูพรุนและน้ำอยู่ ลักษณะนี้เนื้อดินจะแห้งเฉพาะผิวหน้าแต่ภายในไม่แห้ง



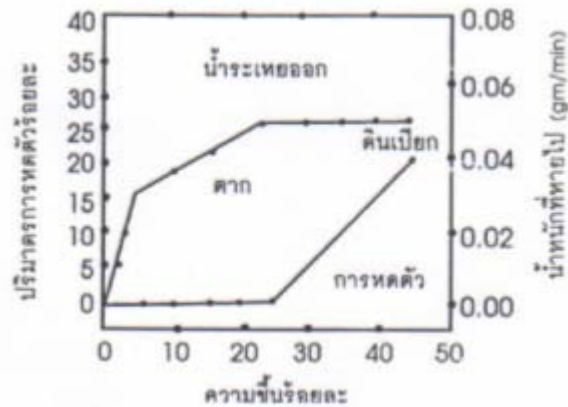
5. ผิวหน้าของเนื้อดินแห้ง รูพรุนภายในดินไม่มีน้ำเหลืออยู่ในรูพรุนจะมีเฉพาะอากาศดินขณะนี้ จะแห้งสนิท (Bone-Dry clay) ดินจะหดตัวเต็มที่ขณะนี้สามารถนำไปทดสอบการหดตัวเพื่อแห้ง ได้และทดสอบการรับน้ำหนักของดิน



ภาพที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเนื้อดินปั้นเมื่อได้รับการผึ่งให้แห้ง
(ที่มา : โคมล รักษ์วงศ์, 2538, หน้า 57-58)



ภาพที่ 2.4 การตากเนื้อดินปั้นจากเนื้อดินเปียก ดินแห้งหนาๆ จนกระทั่งดินแห้ง เมื่อใช้เวลากตาก นานมากขึ้นจะส่งผลทำให้ความชื้นลดลง (ที่มา : โคมล รักษ์วงศ์, 2538, หน้า 59)



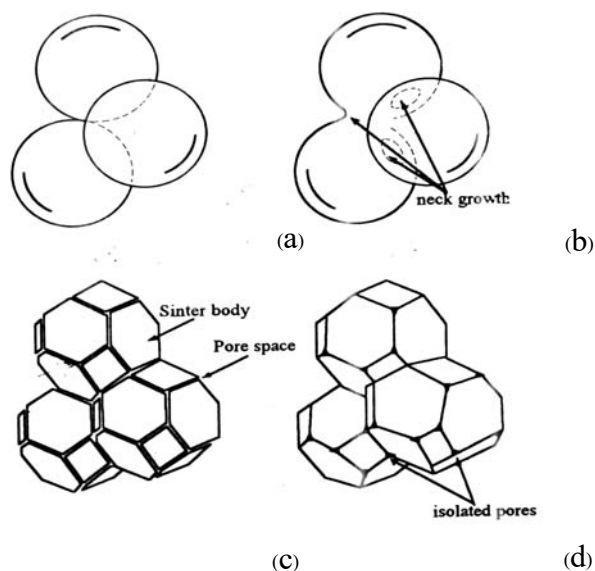
ภาพที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของดินที่ผ่านกระบวนการตากแห้ง
(ที่มา : โกลม รักษ์วงศ์. 2538: 59)

2.3 กระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างการเผา

กระบวนการเผา (sintering) คือ กระบวนการที่ทำให้อนุภาคของวัสดุติดหลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกันทำให้เกิดพันธะยึดเหนี่ยวต่อกันซึ่งการซินเทอร์นั้นเป็นกระบวนการที่สำคัญที่จะช่วยกำหนดลักษณะสมบัติของชิ้นงาน โดยกลไกที่เกิดขึ้นในขั้นตอนกระบวนการเผาแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ

- 1 ขั้นเริ่มต้น (initial stage) อนุภาคจะเริ่มเกิดการขยับตัวเพื่อให้มีพื้นที่สัมผัสกับอนุภาคที่อยู่ข้างเคียงให้มากที่สุด จากนั้นรอยเชื่อมต่อระหว่างอนุภาค (neck) จะเริ่มเกิดขึ้นที่จุดสัมผัส
- 2 ขั้นตอนระหว่างกลาง (intermediate stage) ในระหว่างขั้นตอนนี้จะเกิดการโตขึ้นของรอยต่อระหว่างอนุภาค ทำให้รูพรุนและช่องว่างที่อยู่ระหว่างอนุภาคลดลง ชิ้นงานเกิดการหดตัว ในขณะที่จุดศูนย์กลางของอนุภาคก็เริ่มเกิดการเคลื่อนที่เข้าหากัน
- 3 ขั้นตอนที่สุดท้าย (final stage) ในขั้นตอนนี้รูพรุนภายในชิ้นงานเริ่มเกิดการเคลื่อนที่ออกไปสู่ภายนอกชิ้นงาน และระบบของชิ้นงานจะมีพลังงานพื้นผิว (surface energy) ลดลง โดยลักษณะของเกรนที่มีขนาดเล็กจะโดนเกรนที่มีขนาดใหญ่หลอมรวมไปด้วยกัน

โดยขั้นตอนในการเกิดกระบวนการซินเทอร์แสดงดังภาพที่ 2.6



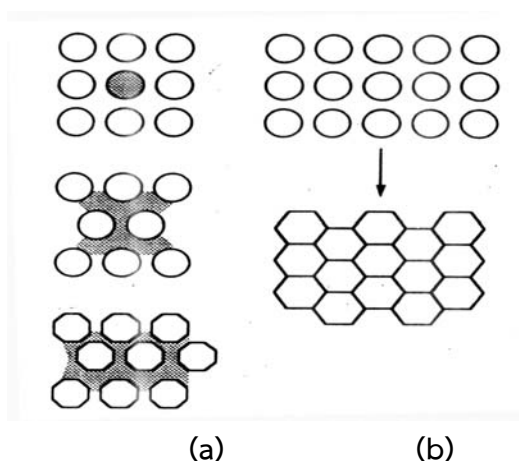
ภาพที่ 2.6 ขั้นตอนในกระบวนการเผา (a) ขั้นตอนเริ่มต้น (b) และ (c) ขั้นตอนกลาง และ (d) ขั้นตอนสุดท้าย

สามารถจำแนกชนิดของการกระบวนการเผาได้เป็นสองชนิดคือ

1. การหลอมรวมวัฏภาคของเหลวขณะเผา (liquid phase sintering)

การหลอมรวมวัฏภาคของเหลวขณะเผา (Liquid phase sintering) คือ ลักษณะของกระบวนการเผาที่ทำให้เนื้อสารบางส่วนหรือทั้งหมดที่อยู่ในสภาพของของเหลว โดยลักษณะของการเกิดวัฏภาคของของเหลวนั้นเป็นกลไกที่สำคัญในกระบวนการเผาสาร เนื่องจากจะทำให้เกิดลักษณะการจัดเรียงตัวของอนุภาคได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้กลไกในการเคลื่อนที่เข้าหากันของอนุภาค (diffusion) เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นแล้วข้อดีของการเกิดวัฏภาคของเหลวในขณะเกิดกระบวนการเผาสามารถช่วยให้กระบวนการเผาชิ้นงานเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและมีอุณหภูมิในการเผาที่ต่ำลง กระบวนการเกิดวัฏภาคของเหลวขณะเผานั้นมี 3 กระบวนการ ได้แก่

- 1 การเกิดวัฏภาคของของเหลว (liquid formation) คือ ขั้นตอนกระบวนการเกิดวัฏภาคของของเหลวในระหว่างกระบวนการเกิดซินเทอร์
- 2 การจัดเรียงตัวของอนุภาค (particle rearrangement) วัฏภาคของของเหลวที่เกิดขึ้นในกระบวนการข้างต้นจะทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นทำให้อนุภาคสามารถที่จะเกิดการการจัดเรียงตัวใหม่ได้อย่างรวดเร็ว
- 3 การตกผลึกของสารละลาย (solution reprecipitation) เป็นขั้นตอนสุดท้ายเมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการเกิดเฟสของเหลวขณะเผากับการเกิดเฟสของแข็ง แสดงดังภาพที่ 2.7



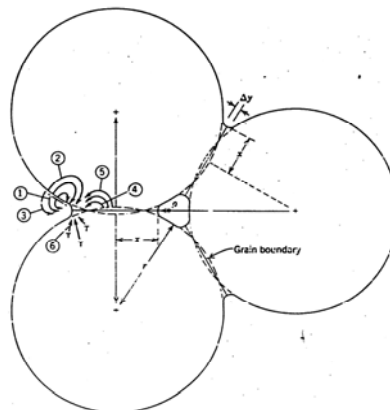
ภาพที่ 2.7 การเปรียบเทียบลักษณะการเกิดซินเทอร์ริงแบบ (a) Liquid phase sintering และ (b) Solid state sintering

2 การเกิดวัสดุภาคของแข็งขณะเผา (solid state sintering)

กระบวนการเผาสารที่มีลักษณะของการเกิดวัสดุภาคของแข็งเพียงอย่างเดียว โดยจะเกิดจากการที่อนุภาคเกิดการแพร่ (diffusion) ในบริเวณพื้นผิวซึ่งเกิดจากความแตกต่างของระดับพลังงานที่อยู่บนพื้นผิวของอนุภาค การเกิดวัสดุภาคของแข็งมีขั้นตอนดังนี้

- 1 การแพร่ที่บริเวณพื้นผิว (surface diffusion) โดยอะตอมของสารจะเกิดการแพร่จากบริเวณพื้นผิวไปยังจุดรอยต่อ (neck) ของอนุภาค
- 2 การแพร่ของแลตทิซ (lattice diffusion) อะตอมจะเกิดการแพร่จากแลตทิซไปยังรอยต่อของอนุภาค
- 3 การระเหย (vapor transportation) อะตอมจะเกิดการระเหยจากพื้นผิวไปยังบริเวณรอยต่อของอนุภาค
- 4 การแพร่ที่บริเวณขอบเกรน (boundary diffusion) อะตอมจะแพร่จากบริเวณขอบเกรนไปยังรอยต่อของอนุภาค
- 5 และ 6 การแพร่ของแลตทิซเหมือนกรณีข้อสอง โดยขั้นตอนที่เกิดขึ้นแสดงดังภาพที่

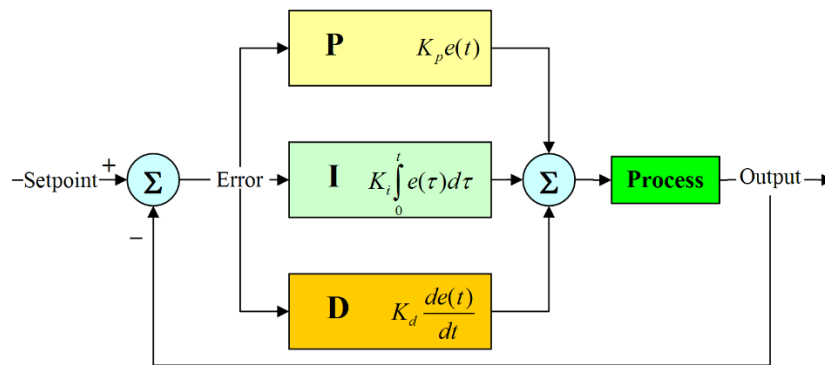
2.8



ภาพที่ 2.8 ขั้นตอนการเกิด Solid state sintering

2.4 ระบบการควบคุมชนิด PID

ระบบการควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID controller) เป็นระบบการควบคุมชนิดแบบป้อนกลับที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยค่าที่ถูกนำไปใช้ในการคำนวณนั้นเป็นค่าความผิดพลาดที่ได้มาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ (set point) ตัวควบคุมระบบจะพยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้า (input) ของกระบวนการ โดยค่าตัวแปรของระบบ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนไปตามลักษณะเฉพาะของระบบ

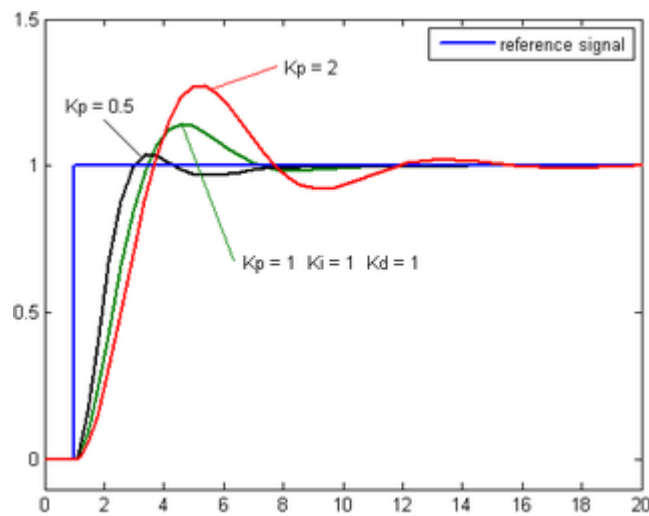


ภาพที่ 2.9 แผนภาพ block ของการควบคุมแบบ PID

ที่มา: <http://8760engineeringblog.blogspot.com/2013/01/linearizing-pid-loop-control.html>

สำหรับวิธีคำนวณของระบบควบคุม PID นั้นขึ้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปรจำนวน 3 ค่า คือ ค่าสัดส่วน, ปริพันธ์ และ อนุพันธ์ ค่าสัดส่วนกำหนดจากผลของความผิดพลาดในปัจจุบัน, ค่าปริพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของผลรวมความผิดพลาดในอดีต, และค่าอนุพันธ์กำหนดจากผลบนพื้นฐานของอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดในระบบ โดยค่าน้ำหนักที่เกิดจากการรวมกันของค่าทั้งสามค่านี้จะถูกใช้สำหรับการปรับเปลี่ยนกระบวนการ ซึ่งการปรับค่าคงที่ในระบบควบคุม PID นั้นตัวควบคุมจะสามารถปรับรูปแบบการควบคุมให้เหมาะกับที่ระบบควบคุมต้องการได้ การตอบสนองของตัวควบคุมจะอยู่ในรูปของการเคลื่อนไหวตัวของตัวควบคุมจนถึงค่าความผิดพลาด ค่าโอเวอร์ชูต (overshoots) และค่าการแกว่งของระบบ (oscillation) วิธีการควบคุมแบบ PID ไม่ได้เฉพาะเจาะจงว่าจะเป็นระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุดหรือสามารถทำให้กระบวนการมีความเสถียรแน่นอน โดยการประยุกต์สำหรับการใช้งานเพียงหนึ่งถึงสองรูปแบบโดยขึ้นอยู่กับกระบวนการเป็นสำคัญ ระบบควบคุม PID มักจะถูกเรียกว่าการควบคุมแบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าใช้รูปแบบใด ในการควบคุมของระบบควบคุม PID โดยเรียกชื่อของระบบควบคุมนี้ตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ:

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$



ภาพที่ 2.10 กราฟ PV ต่อเวลา, K_p กำหนดเป็น 3 ค่า (K_i และ K_d คงที่)

เมื่อ P_{out} , I_{out} , และ D_{out} เป็นผลของสัญญาณขาออกจากระบบควบคุม PID จากแต่ ละพจน์ซึ่งนิยามตามเทอมของแต่ละสัดส่วน (บางครั้งเรียก อัตราขยาย) โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลง เป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาด การตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความ ผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p , หรือ ที่เรียกว่า อัตราขยาย สัดส่วนเทอมของสัดส่วนจะเป็นไปตามสมการ:

$$P_{out} = K_p e(t)$$

เมื่อ P_{out} : ค่าสัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

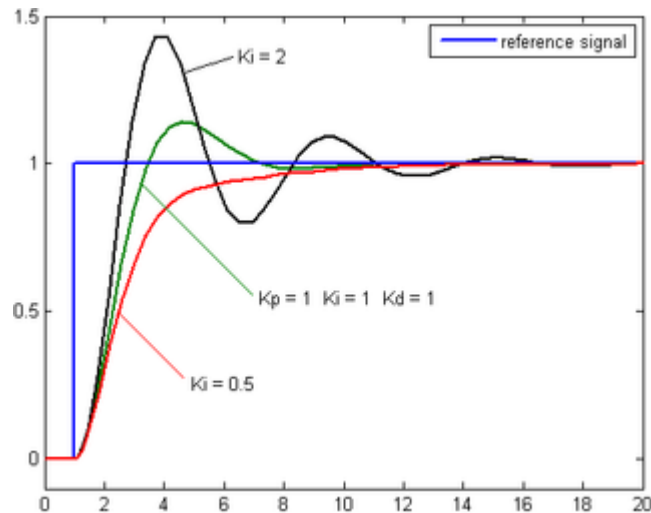
K_p : อัตราขยายสัดส่วน, ตัวแปรปรับค่าได้

e : ค่าความผิดพลาด = $SP - PV$

t : เวลา

ผลของอัตราขยายในสัดส่วนที่มีค่าสูงส่งผลให้ค่าความผิดพลาดจะเกิดการเปลี่ยนแปลงมาก ขึ้นเช่นกัน แต่ถ้ามีค่าที่สูงมากจนเกินไประบบควบคุมจะเกิดความไม่เสถียรได้ แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อผลของอัตราขยายมีสัดส่วนที่ต่ำจะส่งผลทำให้ระบบควบคุมจะมีการตอบสนองต่อกระบวนการ น้อยลงตามไปด้วย

ผลจากพจน์ค่าปริพันธ์ (*reset*) ซึ่งเป็นสัดส่วนของขนาดค่าความผิดพลาดและระยะเวลาที่ เกิดขึ้นของความผิดพลาด โดยเป็นผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงระยะเวลา (ปริพันธ์ของความ ผิดพลาด) จะทำให้ค่าออฟเซต (*offset*) เกิดการสะสมค่าที่ควรจะเป็นในครั้งก่อนหน้า ความผิดพลาด สะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ซึ่งขนาดของผลของพจน์ปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยาย ปริพันธ์, K_i .



ภาพที่ 2.11 กราฟ PV ต่อเวลา, K_i กำหนดเป็นสามค่า (K_p และ K_d คงที่)

พจน์ปริพันธ์จะเป็นไปตามสมการ:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

เมื่อ I_{out} : ข้อมูลสัญญาณขาออกของพจน์ปริพันธ์

K_i : อัตราขยายปริพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

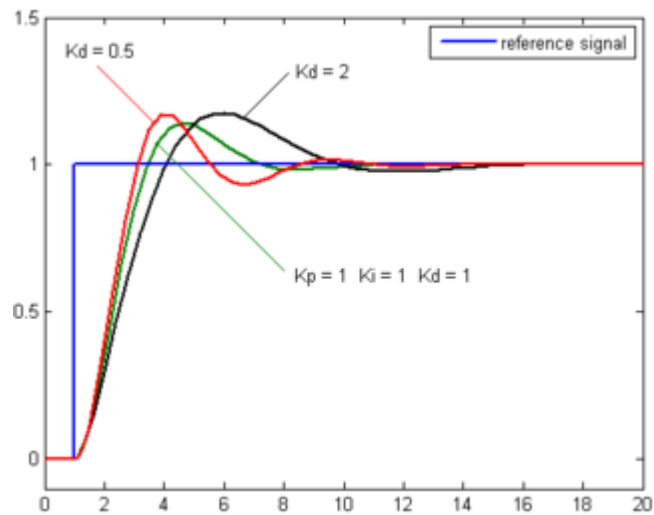
e : ค่าความผิดพลาด = $SP - PV$

t : เวลา

τ : ตัวแปรปริพันธ์หุ่น

พจน์ปริพันธ์ (เมื่อรวมกับพจน์สัดส่วน) จะทำให้เกิดการเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการ และทำให้ค่าความผิดพลาดที่เหลือเกิดน้อยที่สุด โดยเกิดจากการใช้เพียงค่าพจน์สัดส่วนแต่อย่างไรก็ตามพจน์ปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้ระบบควบคุมเกิดโอเวอร์ชูตได้

อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดจากกระบวนการสามารถคำนวณหาได้จากค่าความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา (ค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งที่สัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_i ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์ K_d



ภาพที่ 2.12 กราฟ PV ต่อเวลา, สำหรับ K_d 3 ค่า (K_p และ K_i คงที่)

พจน์อนุพันธ์เป็นไปตามสมการ:

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

เมื่อ D_{out} : ค่าสัญญาณขาออกของพจน์อนุพันธ์

K_d : อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้

e : ค่าความผิดพลาด = $SP - PV$

t : เวลา

ในพจน์อนุพันธ์จะถูกใช้เป็นการชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุมและด้วยผลจากพจน์นี้จะช่วยทำให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นพจน์อนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจพจน์ปริพันธ์และทำให้เกิดความเสถียรของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุมจะเกิดขึ้นไว้มากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาดและสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ถ้าสัญญาณรบกวนและอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

ผลรวม

พจน์สัดส่วน, ปริพันธ์, และอนุพันธ์ จะนำมารวมกันเป็นสัญญาณขาออกของการควบคุมแบบ PID กำหนดให้ เป็นสัญญาณขาออก สมการสุดท้ายของวิธี PID คือ: $u(t)$

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุทัศน์ จันบัวลา และคณะ (2551) ได้ทำการศึกษาการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์อิฐดินเผาบริเวณพื้นที่จังหวัดสิงห์บุรี จากผลการวิจัยพบว่าธาตุที่มีอยู่ในดินจากท้องถิ่นซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่สุดสำหรับผลิตอิฐมอญ โดยการเลือกส่วนผสมอย่างจากแหล่งผลิตชุมชนจำนวนสามแหล่งผลิมาวิเคราะห์ พบว่าวัตถุดิบจากทั้งสามแหล่งที่มีส่วนประกอบของธาตุที่ใกล้เคียงกันโดยธาตุที่เป็นส่วนประกอบหลักซึ่งมีมากที่สุดคือซิลิกาซึ่งธาตุซิลิกาจะเป็นส่วนประกอบที่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้สุกตัวได้เร็วและมีความแข็งแรงโดยมีมากที่สุดประมาณร้อยละ 60 รองลงมา คือ อะลูมิเนียมที่ทำให้อิฐมีความสามารถในการทนความร้อนสูง และธาตุเหล็กซึ่งเป็นธาตุที่ทำให้เกิดสีแดงของอิฐมอญหลังการเผา

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติของอิฐกับเกณฑ์มาตรฐาน

สมบัติ	แหล่งผลิตที่ 1	แหล่งผลิตที่ 1	แหล่งผลิตที่ 1	มพช.	มอก.
				601 - 2547	77 - 2545
ความสามารถในการรับแรงอัด (MPa)	10.00	9.81	6.15	ไม่ต่ำกว่า 7	ไม่ต่ำกว่า 10
ร้อยละของการดูดซึมน้ำ	15.45	18.36	17.30	ไม่เกิน 25	ไม่เกิน 22

โดยปกติแล้วสาเหตุที่ทำให้คุณภาพของอิฐไม่ดีเท่าที่ควรทั้งนี้เนื่องจากส่วนผสมของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตคือดินจากท้องถิ่นและถ้าแกลบยังมีความไม่สม่ำเสมอในการผลิตทำให้สมบัติของอิฐมอญที่ได้มีความไม่สม่ำเสมอซึ่งส่งผลต่อคุณภาพของอิฐ เนื่องจากผู้ผลิตอาศัยวิธีการกะประมาณด้วยสายตาในเรื่องของสัดส่วนหรือปริมาณส่วนผสมของวัตถุดิบ

จากผลการวิจัยเพื่อการปรับปรุงสมบัติและคุณภาพของอิฐมอญที่ผลิตในพื้นที่จังหวัดสิงห์บุรีให้มีคุณภาพดี โดยศึกษาถึงส่วนผสมวัตถุดิบในด้านความเหมาะสมที่ใช้ในการผลิต ซึ่งถือเป็นการกระบวนกรที่ทำได้โดยง่าย โดยที่ผู้ผลิตชุมชนไม่จำเป็นต้องมีการลงทุนเพิ่มเติมซึ่งเพียงแค่ปรับปรุงสัดส่วนให้เหมาะสมเท่านั้น ซึ่งจากเดิมที่ผู้ผลิตอิฐชุมชนผลิตกันอยู่จะอาศัยเพียงแค่การสังเกตและการกะประมาณด้วยสายตา หรือจากการใช้ประสบการณ์ที่เคยทำมา ในการวิเคราะห์ถึงความเหมาะสมของวัตถุดิบ พบว่าวิธีการกะประมาณนี้ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในกระบวนการผลิตซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอิฐดินเผา นอกจากนี้ผู้ผลิตยังทดสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตโดยอาศัยวิธีดั้งเดิม คือ การใช้วิธีเอาอิฐที่ผลิตได้มากระทบกันแล้วฟังเสียงที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดความไม่แน่นอนในคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ และในการวิจัยยังศึกษาถึงอุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสมที่ส่งผลให้คุณภาพของอิฐมอญดีที่สุดด้วย

การศึกษาส่วนประกอบของวัตถุดิบที่เหมาะสมนั้นได้ทำการศึกษาถึงส่วนผสมที่ผู้ผลิตในจังหวัดสิงห์บุรีใช้ในการผลิต คือ ดินจากท้องถิ่น และแกลบ ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ลักษณะดินซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต พบว่าธาตุซิลิกาที่เป็นส่วนประกอบหลักของดินทำให้ดินที่ผ่านกระบวนการเผานั้นมีความแข็งแรง นอกจากนี้วัตถุดิบอีกชนิดหนึ่งก็คือ แกลบ โดยทั่วไปแกลบ

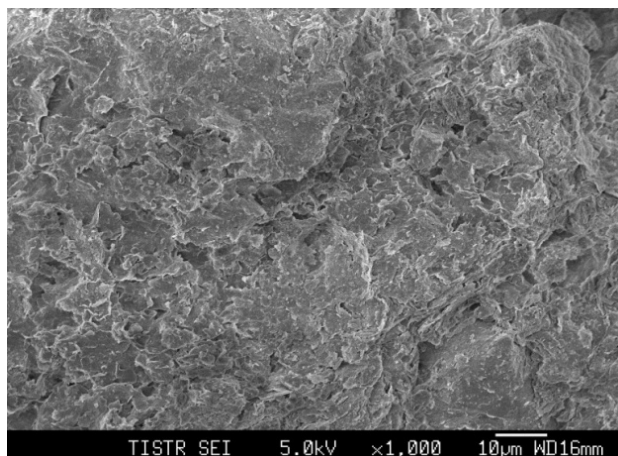
เมื่อผ่านการเผาแล้วจะให้สารประกอบซิลิกาออกมาซึ่งจะทำให้ดินที่เดิมแกลบหรือเถ้าแกลบเข้าไปสุกตัวได้เร็วและมีความแข็งแรงเชิงกลมากขึ้น แต่ที่ผู้ผลิตนิยมใช้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมก็เพื่อให้สามารถขึ้นรูปดินได้ง่ายขึ้นเท่านั้น การใช้เถ้าแกลบผสมถ้าใช้ในปริมาณที่น้อยเกินไปจะทำให้อิฐมอญที่ได้มีความแข็งแรงลดลงและทำให้เกิดการขึ้นรูปได้ยาก แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรงลดลง เนื่องจากเมื่อผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เถ้าแกลบเกิดการระเหยออกไปทำให้อิฐเกิดช่องว่างส่งผลทำให้เกิดความพรุนตัว ดังนั้นอุณหภูมิในการเผาจึงเป็นสิ่งสำคัญในการกำหนดคุณภาพของอิฐมอญด้วย

จากผลการวิจัย พบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมของวัตถุดิบระหว่างเถ้าแกลบกับดินจากท้องถิ่น คือ การใช้เถ้าแกลบ 3 ส่วน และใช้ดิน 5 ส่วน หรือคิดเป็นอัตราส่วนเท่ากับ 0.6 โดยปริมาตร โดยอัตราส่วนนี้ทำให้สมบัติของอิฐมอญที่ได้นั้นมีคุณภาพที่ดีที่สุดเนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งของปริมาณส่วนผสมที่เหมาะสม เนื่องจากสัดส่วนการใช้เถ้าแกลบน้อยกว่านี้ก็จะทำให้อิฐที่ได้นั้นมีความแข็งแรงลดลง โดยเถ้าแกลบที่ถูกผสมเข้าไปทำให้กระบวนการเผาอิฐเกิดการสุกตัวได้รวดเร็วยิ่งขึ้น แต่ถ้าใช้ในปริมาณที่มากก็จะส่งผลทำให้อิฐมอญมีความพรุนตัวสูงจนเกินไป เนื่องจากเกิดการระเหยของเถ้าแกลบทำให้สมบัติของอิฐด้อยลงไปด้วย จากผลการวิจัยพบว่าชิ้นงานวิจัยผ่านมาตรฐานสากล 77-2545 ทุกส่วนผสม ผลการวิจัยที่ได้โดยการเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงผลของส่วนผสมต่อสมบัติของอิฐมอญ

อัตราส่วนเถ้าแกลบต่อดิน (โดยปริมาตร)	ความสามารถในการรับแรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm^3)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ	ร้อยละความพรุนตัว
0.2	12.58	1.57	22.69	35.57
0.4	13.24	1.66	18.13	29.82
0.6	14.30	1.79	14.44	25.88
0.8	13.02	1.53	19.60	30.17

เมื่อวิเคราะห์ถึงโครงสร้างในระดับจุลภาคพบว่าเพื่อเพิ่มเถ้าแกลบมากขึ้นจะทำให้ขนาดเกรนของชิ้นงานอิฐมอญมีขนาดโตขึ้นและมีความพรุนตัวมากขึ้นตามไปด้วยโดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่มีอัตราส่วนระหว่างเถ้าแกลบต่ออิฐเท่ากับ 0.6 แสดงดังภาพที่ 2.13



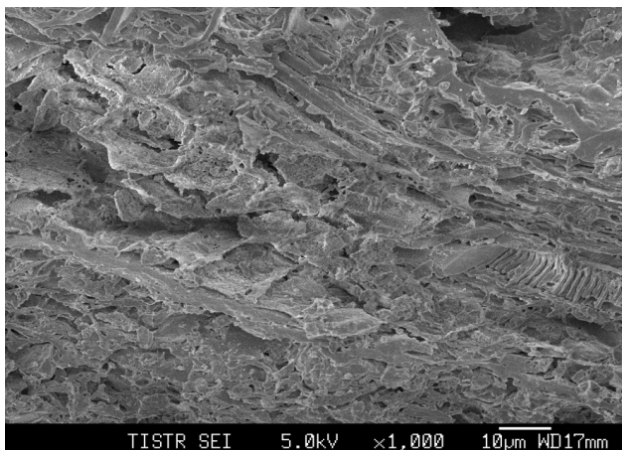
ภาพที่ 2.13 โครงสร้างของชิ้นงานอิฐมอญที่มีอัตราส่วนระหว่างเถ้าเคลบต่ออิฐดินเผาเท่ากับ 0.6

เมื่อศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมโดยการใช้อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ อัตราส่วนระหว่างเถ้าเคลบต่อดินจากท้องถิ่นเท่ากับ 0.6 และพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการเผา คือ 850 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากถ้าอุณหภูมิต่ำกว่านี้จะทำให้การเกาะกันของอนุภาคดินน้อยลงเนื่องจากอุณหภูมิเผาต่ำไป แต่ถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่านี้จะทำให้เกิดการระเหยตัวของเถ้าเคลบทำให้อิฐมีความพรุนตัวสูงนั่นเอง โดยพบว่าชิ้นงานวิจัยผ่านมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม 77-2545 เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิตั้งแต่ 850 – 950 องศาเซลเซียส โดยผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงผลของอุณหภูมิเผาต่อสมบัติของอิฐมอญ

อุณหภูมิเผา (องศาเซลเซียส)	ความสามารถใน การรับแรงอัด (MPa)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	ร้อยละการดูดซึมน้ำ	ร้อยละความพรุน ตัว
800	9.87	1.61	20.77	33.41
850	14.30	1.71	16.85	28.73
900	11.00	1.64	21.11	34.57
950	10.20	1.61	21.82	35.22

และเมื่อศึกษาถึงโครงสร้างจุลภาคพบว่าถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นขนาดของเกรนชิ้นงานอิฐมอญจะมีขนาดโตขึ้น และมีความพรุนตัวสูงขึ้นไปด้วยโดยโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 2.14

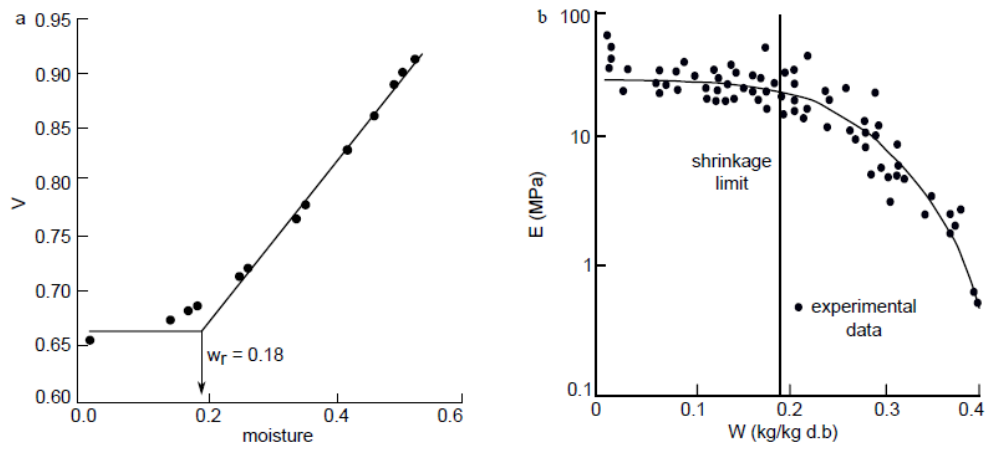


ภาพที่ 2.14 โครงสร้างของชิ้นงานอิฐมอญที่เผาที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส

จากผลการวิจัยที่ได้เมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่มีอยู่เดิม พบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้มีสมบัติที่ดีกว่า คือ มีค่าความสามารถในการรับแรงอัดที่สูงขึ้นจากเดิม คือ 6.15 MPa 9.81 MPa และ 10 MPa เพิ่มขึ้นเป็น 14.30 MPa โดยมีค่าร้อยละการดูดซึมน้ำเท่ากับร้อยละ 14.4 ซึ่งดีกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีในท้องถื่นและผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้และมีสมบัติตามที่มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกำหนดไว้ จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์อิฐดินเผา โดยมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีมูลค่าทางการตลาดเพิ่มขึ้นไปด้วย

J.B. Silva และคณะ (2011) ได้ดำเนินการศึกษาการอบแห้งอิฐดินเผา โดยการอบแห้งอิฐดิบในเตาอบภายใต้ภาวะที่ควบคุมความเร็วของอากาศ อุณหภูมิของอากาศและความชื้นของอากาศ การทดสอบการอบแห้งจะดำเนินการอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งน้ำหนักของอิฐมีค่าคงที่ โดยทำการดูปริมาณความชื้นของแต่ละตัวอย่างด้วยการนำตัวอย่างเก็บไว้ภายใต้ภาวะอากาศแห้ง (dry air) เป็นเวลา 48 ชั่วโมงภายในเตาอบ ในการทดสอบจะดำเนินการภายใต้ภาวะความดันบรรยากาศ จากการศึกษาการอบแห้งและพลศาสตร์ความร้อนพบว่าอุณหภูมิของอากาศมีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยแห้งเป็นอย่างมาก

K. Khalili และคณะ (2014) ศึกษาถึงอิทธิพลของกระบวนการอบแห้งที่ส่งผลต่อวัสดุที่มีรูพรุน จากการศึกษาพบว่าขั้นตอนในการอบแห้งของวัสดุที่มีรูพรุนนั้นเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อกระบวนการผลิตวัสดุกลุ่มนี้ จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองของการหดตัวและความเครียดของอิฐ ซึ่งสามารถทำนายการแตกร้าวและการเสียรูปทรงของอิฐได้ อิฐดินเผาจะมีสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงไปในระหว่างกระบวนการอบแห้งเนื่องจากปริมาณความชื้นที่เปลี่ยนแปลงจากการทดลองแสดงในภาพที่ 14 พบว่าความแข็งแรงของ Young's โมดูลัสขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น โดยมีค่าเพิ่มมากขึ้นถึงประมาณ 100 MPa ที่ปริมาณความชื้นเป็น 0 kg/kg d.b การเพิ่มขึ้นของค่าโมดูลัสจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในขณะที่ปริมาณความชื้นลดลงจาก 0.4-0.2 kg/kg d.b



ภาพที่ 2.15 a) การเปลี่ยนแปลงปริมาตรต่อปริมาณความชื้น และ b) ค่าโมดูลัสต่อฟังก์ชันของความชื้น