บทที่ 2
หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อิฐก่อสร้าง

2.1.1 ความหมายและประโยชน์ใช้งาน [13]

อิฐ (brick) เป็นวัสดุเซรามิกใช้งานก่อสร้างชนิดหนึ่ง มีรูปร่างเป็นก้อนทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ด้วยขนาด กว้าง – ยาวและหนาตามขนาดมาตรฐาน ทั้งที่เป็นอิฐเนื้อตัน(solid) หรือ อิฐโพรง/โปร่ง(hollow) มีผิวเรียบหรือหยาบ เนื้อมีสีแดงอิฐตามธรรมชาติ หรืออาจเป็นอิฐเคลือบสี (glazed brick) ประโยชน์ในการใช้งาน เพื่อการก่อสร้าง ตัวอาคารหรือตึก , บ้าน , โรงเรือน , บ่อน้ำ, สระว่ายน้ำ นับเป็นวัสดุก่อสร้างหลักใช้เป็นอิฐปูพื้น ก่อผนัง ตั้งเสาเป็นโครงสร้าง บางครั้งใช้อิฐเป็นไส้ในแล้วฉาบผิวนอกด้วยซีเมนต์ รวมทั้งการก่อฐานปูพื้น แล้วเทคอนกรีตทับ นอกจากนี้ยังใช้อิฐเพื่องานตกแต่งในที่ต่างๆ

2.1.2 ประเภทของอิฐก่อสร้าง

อิฐเป็นผลิตภัณฑ์ที่เก่าแก่ประเภทหนึ่งของโลก จากการค้นคว้าประวัติจากอายุของสิ่งก่อสร้างปรักหักพังในประวัติศาสตร์ คาดว่ามีการเผาอิฐมาตั้งแต่ประมาณเมื่อ 7,000 ปีก่อน การจำแนกชนิดของอิฐเป็น 7 ประเภท ได้แก่

1) อิฐธรรมดา (common bricks) หรืออิฐก่อผนังธรรมดา (ordinary wall brick)
2) อิฐปูพื้น – ปูทางเดิน (paving brick)
3) อิฐประดับ หรืออิฐโชว์ (facing brick) ทำผนังของอาคารโดยไม่ฉาบซีเมนต์
4) อิฐก่อผนังรับน้ำหนัก (bearing wall brick) ใช้ในส่วนรับน้ำหนัก บางครั้งจะเรียกว่า อิฐวิศวกรรม (engineering brick)
5) อิฐก่อผนังไม่รับน้ำหนัก (non-bearing wall brick)จะมีความหมายถึงอิฐธรรมดาที่เกี่ยวกับ facing brick และ common bricks ทั่ว ๆ ไป
6) อิฐประเภทต่างๆ ได้พยายามทำให้อิฐมีน้ำหนักเบา เรียกว่า อิฐเบา (light-weight brick) โดยทำเป็นอิฐกลาง (hollow brick) หรือ อิฐรู (perforated brick) ตรงข้ามกับความหมายของอิฐตัน (solid brick) ซึ่งจะเป็นอิฐหนัก (heavy brick)
7) อิฐเคลือบ (glazed brick) เพื่อความงามหรือเพื่อปกป้องผิวอิฐให้ทนต่อบรรยากาศความเป็นกรด-ด่าง และทำความสะอาดง่าย ส่วนใหญ่เป็นอิฐก่อผนังชนิด facing brick

2.1.3 การทำอิฐ (Brick making)

อุตสาหกรรมอิฐ เป็นอุตสาหกรรมที่ยังคงทำกันอยู่จนถึงปัจจุบัน ความต้องการอิฐเพื่อการก่อสร้างยังมีความสำคัญ และยังคงขยายเพิ่มเติม เนื่องจากมีการนำเอาเทคนิคใหม่ ๆ มาเสริมและปรับปรุงของเก่า และสิ่งสำคัญยิ่งก็คือ มีการแข่งขันพัฒนาอิฐให้มีรูปแบบ สีสัน และมีผิวหน้าแบบใหม่ ๆ ออกมาสู่ผู้รับเหมาก่อสร้างบ้านและอาคารกันตลอดเวลา บางครั้งจะเห็นว่าอิฐกลายเป็นสินค้าแฟชั่นไปแล้ว แต่ความดั้งเดิมของมันก็ยังคงมีอยู่ ผู้อาศัยหลายคนยังชอบอิฐสมัยก่อนมาสร้างบ้านด้วยรสนิยมดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การนำเอาอิฐมาใช้เพื่องานก่อสร้าง จะคำนึงถึงในเรื่องต่าง ๆ เป็นต้นว่า

- อิฐให้ความรู้สึกมั่นคงและแข็งแรงเมื่อมองจากภายนอก
- อิฐให้ความรู้สึกสงบ ต้อนรับขับสู้และอารมณ์ที่ผ่อนคลาย
- อิฐช่วยเก็บเสียง และเป็นฉนวนความร้อนหรือเย็นที่ดีเยี่ยม
- อิฐมีความแข็งแรง ทนทานนานนับศตวรรษ และไม่ต้องการดูแลรักษาพิเศษ

โรงงานทำอิฐมักอยู่ใกล้แหล่งดิน และวัตถุดิบอย่างอื่นที่เหมาะสม สีสันและเนื้อดินนานาชนิดมาจากการรวบรวมและเสาะหาแหล่งดิน(clay) และวัตถุดิบ เช่น ดินดาน (shales) ที่นำมาเก็บกองไว้ในที่แหล่งเก็บ (storage) ดินและดินดานบางชนิดขนมาจากต่างถิ่น นำวัตถุดิบไปตากแห้งแล้วบด จากนั้นนำมาผสม ทั้งที่เป็นการผสมแห้งหรือผสมเปียก ทำการคัดขนาด หากมีขนาดโตกว่าตะแกรงร่อนจะนำกลับไปบดให้เล็กลง นำไปเก็บรักษาพร้อมทั้งปรับความชื้นให้เหมาะสมกับการขึ้นรูปต่อไป กระบวนการผลิตอิฐจะมี 2 ระบบ แตกต่างกันที่วิธีการขึ้นรูป (forming method) วิธีหนึ่งขึ้นรูปโดย การกด – อัด – กระแทก (pressing) โดยปล่อยผงดินความชื้น 8 %ลงในแบบพิมพ์โลหะ (metal mould) แล้วอัดด้วยพิมพ์ (die) ได้ก้อนอิฐผิวเรียบ เป็นชนิดอิฐตัน (solid brick) มีน้ำหนักมาก นิยมนำไปทำเป็นอิฐก่อผนังและเป็นอิฐใช้สำหรับเพื่อการรับน้ำหนักได้ดี (bearing wall brick) อีกระบบหนึ่ง ขึ้นรูปด้วยการรีด (extrusion) วิธีนี้ผลิตอิฐได้เร็วทำให้กำลังการผลิตได้สูงและวิธีนี้ยังสามารถผลิตอิฐได้ทั้งเป็นอิฐตันและอิฐกลวง(hollow brick) อิฐมีช่องรูมาก(perforated brick) ทั้งนี้ก็เพื่อการลดน้ำหนักของอิฐ ทั้งยังทำให้เกิดสมบัติเป็นฉนวนความร้อนได้อีกด้วย หากทำการออกแบบอิฐกลวงหรืออิฐมีช่องรู ได้โครงสร้างของรูปแบบอิฐที่ดี จะยังสามารถใช้เป็นอิฐก่อสร้างรับน้ำหนักได้ดีด้วยเช่นกัน

การผลิตอิฐระบบรีดยังมีการแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิด คือ ระบบการรีดด้วยดินเปียกอ่อน (solf clay) มีปริมาณน้ำหรือค่าความชื้น 14% หรือสูงกว่า ระบบดินเหนียวหนืด (stiff clay) ความชื้นประมาณ 8% ซึ่งต้องทำการรีดด้วยแรงอัดสูงขึ้น วิธีหลังจึงได้ก้อนอิฐแข็งแรงในตัวและมีเนื้อแน่นสะดวกต่อการจับต้อง นำมาเรียงบนรถเข้าตู้อบแห้งและนำไปเผาได้ต่อเนื่องในระยะเวลา

หนึ่ง เพราะอิฐที่ไม่เปียกมากและไม่นิ่มเกินไป สามารถย่นระยะเวลาในการผลิต และประหยัดเชื้อเพลิงได้มากกว่า ทั้งในขั้นตอนการอบแห้งและการเผา ส่วนอิฐระบบเปียกปริมาณความชื้นสูง จะใช้แรงอัดรีดได้ต่ำกว่า เป็นการลดพลังงานและพลังงานไฟฟ้าได้ระดับหนึ่งแต่อิฐที่รีดออกมาจะมีความอ่อน นิ่ม เสียรูปทรงหรือบิดเบี้ยวได้ง่าย และเกิดตำหนิได้ง่ายเมื่อจับต้องขนย้าย (handling) ซึ่งถ้าหากมีการจับต้องอิฐบ่อยครั้งมากเท่าใด ความเสียหายจะยิ่งมากขึ้น ประเมินว่าความเสียหายเนื่องมาจากการจับต้องหลาย ๆ ครั้ง ตลอดการผลิตอาจมีผลเสียหายได้สูงถึงร้อยละ 30 – 40 ของจำนวนผลิตต่อวัน ควรออกแบบระบบการทำงานให้จับต้องน้อยที่สุด ทั้งนี้ระบบการขนส่งจะใช้เป็นระบบสายพาน (conveyors) จะยิ่งดี

2.1.4 สมบัติของอิฐก่อสร้างสามัญที่ใช้งานในประเทศไทย [14]

อิฐก่อสร้างสามัญ มีลักษณะเป็นก้อนสี่เหลี่ยมผืนผ้า ผิวไม่สู้เรียบทำด้วยมือหรือเครื่องจักร วัสดุที่ใช้ทำได้แก่ ดินเหนียวหรือดินโคลนผสมกับวัสดุอื่น ๆ เช่น แกลบ ทราย ขี้เลื่อย เผาไฟจนสุกทั้งก้อน

ตาราง 2.1 แสดงขนาดความกว้าง ความยาว ความหนา และความคลาดเคลื่อนที่ยอมให้ของอิฐก่อสร้างสามัญ

ประเภทอิฐ	ขนาดมาตรฐาน (ซม.)			ความคลาดเคลื่อน (ซม.)		
	กว้าง	ยาว	หนา	กว้าง	ยาว	หนา
ก้อนเล็ก	6.5	14	4	+ 0.3	+ 0.5	+ 0.2
ก้อนใหญ่	9	19	4	+ 0.3	+ 0.5	+ 0.2

ตาราง 2.2 ความต้านทานแรงอัด

ชั้นคุณภาพ	ความต้านทานแรงอัดต่ำสุด (เมกาปาสคาล)		ร้อยละการดูดกลืนน้ำสูงสุด	
	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน	เฉลี่ย 5 ก้อน	แต่ละก้อน
ก	21.0	17.0	17.0	20.0
ข	17.0	15.0	22.0	25.0
ค	10.0	9.0	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด

2.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตอิฐสามัญ [15]

ดินเอิร์ทเทนแวร์ เป็นดินที่พบโดยทั่วไปในธรรมชาติ ส่วนมากมีเปอร์เซ็นต์ของเหล็กค่อนข้างสูง เผาในอุณหภูมิ 950 – 1100 องศาเซลเซียส เมื่อเป็นวัตถุดิบมีสีน้ำตาลอ่อน สีน้ำตาลแก่และเทาแก่ นิยมใช้ผลิตประเภทอิฐมอญ อิฐโปร่ง ท่อระบายน้ำ กระเบื้องมุงหลังคา โดยเฉพาะอย่างยิ่งมีความเหนียวมาก ติดเหนียวแน่น ในการนำไปใช้ส่วนมากนิยมผสมทราย หรือดินเชื้อ มีสารจำพวกด่างมาก (alkalines) ในประเทศเรานิยมใช้ทำผลิตภัณฑ์พวกกระถางต้นไม้ ครก ประเภทหม้อข้าว หม้อแกงในสมัยก่อน

ดินแดงในแหล่งธรรมชาติทั่วไปบนผิวโลกมีผลวิเคราะห์ทางเคมีที่แตกต่างกันไป โดยบางแหล่งมีทรายปนในเนื้อดิน บางแหล่งมีความเหนียวและเนื้อละเอียด ปริมาณแร่ธาตุในแต่ละแหล่งแตกต่างกันไป ซึ่งเมื่อภายหลังการเผาจะมีสีที่แตกต่างกัน เช่น สีเหลือง สีส้มนวล สีแดง สีแดงเข้ม และน้ำตาลเป็นต้น ถ้าเนื้อดินมีแร่เหล็กประเภทออกไซด์หรือออกซิไดซ์ (oxidized) และไฮเดรท (hydrated) เนื้อดินภายหลังการเผาจะมีสีส้มแดงสวยงาม แต่ถ้าในเนื้อดินมีแร่เหล็กประเภทซัลไฟด์ (sulfide) เนื้อดินจะเกิดจุดดำ ๆ ของแร่เหล็กภายหลังการเผา จุดดำ ๆ ของแร่เหล็กในเนื้อผลิตภัณฑ์หรือเนื้ออิฐที่เผาแล้ว เมื่อมีเหล็กซัลไฟด์ถูกออกซิเจนในอากาศจะเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กลายเป็นกรดซัลฟูริกหรือกำมะถัน ซึ่งทำให้เนื้อดินมีสีดำเป็นจ้ำ ๆ (scum) ขึ้นภายหลัง ในกรณีเดียวกันถ้าเนื้อดินมีปริมาณของยิปซัมปนอยู่ ซึ่งเป็นเกลือซัลเฟตของแคลเซียม เนื้อดินก็จะเกิดสีคล้ำเป็นจ้ำ ๆ ภายหลังการเผาเช่นกัน ถ้าในเนื้อดินแดงมีปริมาณของหินปูนมากกว่าร้อยละ 30 แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิต่ำกว่า 800 องศาเซลเซียส ดินจะยุบตัวหลังการเผา เนื่องจากแคลเซียมเกิดการสลายตัวในรูปผลึกที่อุณหภูมิดังกล่าว ดังนั้นเพื่อป้องกันปฏิกิริยาการยุบตัวของผลิตภัณฑ์ ควรเผาในอุณหภูมิ 900 – 1050 องศาเซลเซียส จึงจะปลอดภัยสำหรับเนื้อดินเทอราคอตตา เพราะเกลือซัลเฟตจากแคลเซียม จะมาเกาะรวมตัวกับซิลิกาและอะลูมินาในอุณหภูมิที่สูงกว่า 900 องศาเซลเซียส แต่ถ้าเผาเกิน 1100 องศาเซลเซียส หินปูนในเนื้อดินจะทำหน้าที่เป็นตัวหลอมละลาย ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์หรืออิฐที่ทำจากดินแดง เกิดการหดตัวอย่างรวดเร็ว ผลิตภัณฑ์มีขนาดเล็กลงมากไม่ได้ขนาดมาตรฐานเดิม การเผาเนื้อดินเทอราคอตตาคุมได้ยาก ถ้าแม้บางครั้งจะเผาในเตาเดียวกัน แต่คุณภาพของผลิตภัณฑ์มีสีและผิวความมันวาวไม่สม่ำเสมอกัน โดยปกติในดินแดงโดยทั่วไปมีปริมาณของหินปูนร้อยละ 10 – 20 แร่ยิปซัมในดินแดงจะเปลี่ยนรูปผลึกเป็นแคลเซียมซัลเฟตที่อุณหภูมิประมาณ 200 องศาเซลเซียส และตามทฤษฎี แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากในดินแดง มีสารที่มีมลทินในปริมาณสูง จึงทำให้เนื้อดินเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1200 องศาเซลเซียส ส่วนแมกนีเซียมซัลเฟตในดินแดงจะเกิดปฏิกิริยาในอุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของแร่ยิปซัม แต่ไม่พบบ่อยนัก [16]

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

เนื้อดินเอิร์ทเทนแวร์เป็นดินที่ถูกพัดพาไปจากแหล่งกำเนิด (sedimentary clay) มีความทนไฟต่ำประมาณอุณหภูมิ 950 – 1100 องศาเซลเซียส ใช้กันมากสำหรับช่างปั้นในสมัยแรก เนื่องจากเป็นดินที่ช่วยลดอุณหภูมิ (flux) อยู่มาก รวมทั้งมีสารประกอบของเหล็กอยู่มากด้วย ซึ่งไม่ค่อยใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเนื้อผลิตภัณฑ์สีขาวและเผาในอุณหภูมิสูง จะใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ไม่คำนึงถึงสีของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ทำอิฐก่อสร้างชนิดต่าง ๆ ทำภาชนะหม้อดิน กระถางต้นไม้ และใช้ทำกระเบื้องประดับชนิดไม่เคลือบ เป็นต้น บางครั้งจะพบดินเอิร์ทเทนแวร์ ในลักษณะดินดาน (shale) ซึ่งเกิดจากการทับถมอยู่ในแอ่งน้ำ เมื่อมีระยะเวลาผ่านไปประกอบกับปฏิกิริยาทางเคมีและความกดดันของดินซึ่งทับถมกันอัดให้อนุภาคของดินเหล่านั้นติดอยู่ในสภาพแข็งแรง เรียกว่า ดินดานนั่นเอง มีลักษณะแข็งคล้ายหิน

การใช้ดินดานต้องขุดขึ้นมาแล้วนำไปบดให้เป็นผงละเอียดนั้นต้องเอาก้อนหินเล็ก ๆ ออกไปเหลือแต่ผงดินเท่านั้น เนื่องจากก้อนหินเล็ก ๆ เหล่านั้นอาจจะเป็นผลเสียภายหลัง เช่น ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้ภายหลัง เนื้อดินเอิร์ทเทนแวร์มีความพรุนตัว (porosity) เฉลี่ยประมาณร้อยละ 5 – 15 เนื่องจากมีตัวช่วยลดอุณหภูมิ (flux) ต่าง ๆ อยู่มาก จะทำให้เกิดลักษณะการสุกตัว (vitreous) เป็นเนื้อดินเดียวกันในอุณหภูมิที่ต่ำ ถ้าเผาอุณหภูมิเกิน 1000 – 1150 องศาเซลเซียส จะทำให้ผลิตภัณฑ์ยุบตัวได้ ดินเอิร์ทเทนแวร์ชนิดเดียวกันเกิดในลักษณะในแหล่งเดียวกัน แต่อยู่คนละตำแหน่งก็จะมีส่วนประกอบทางเคมีเปลี่ยนแปลงไปได้ โดยทั่วไปแล้ว ดินเอิร์ทเทนแวร์มักจะประกอบด้วยสารซัลเฟต (sulphate) ละลายน้ำได้ และจะออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ในขณะที่แห้ง เมื่อเผาผลิตภัณฑ์เหล่านั้นจะเกิดจุดขาว ๆ หรือฝ้าขาว ๆ อันเนื่องจากสารประกอบซัลเฟต ผลเสียอันนี้จะแก้ไขได้โดยการเติมสารประกอบแบเรียมคาร์บอเนต (barium carbonate)ประมาณร้อยละ 2

แหล่งดินเอิร์ทเทนแวร์มีอยู่ทั่วไปทุกจังหวัด ได้แก่ ดินท้องนา ดินพื้นบ้านทั่วไปที่นำมาใช้ทำผลิตภัณฑ์พื้นบ้านไฟต่ำ เช่น ดินปากเกร็ด ดินอยุธยา ดินสิงห์บุรี เป็นต้น [17]

2.3 หลักการและกลไกการอบแห้ง [18]

การอบแห้งเป็นการเคลื่อนตัวของน้ำในผลิตภัณฑ์ สามารถเกิดขึ้นที่ผิวของผลิตภัณฑ์จากการระเหย (evaporation) น้ำที่อยู่ภายในของผลิตภัณฑ์ต้องเลื่อนตัวมาที่พื้นผิวจากการซึมผ่าน หรือเลื่อนผ่านรูพรุนที่เชื่องโยงกัน กระบวนการทั้งสองคือการระเหยและการซึมผ่านไปสู่พื้นผิว โดยการเร่งความเร็วด้วยการให้ความร้อน ยิ่งกว่านี้ อัตราการระเหยของน้ำจากพื้นผิวจะถูกเร่งจากความชื้นต่ำที่โอบล้อมและการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอากาศที่สัมผัสกับพื้นผิว

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 14 พ.ย. 2556
เลขทะเบียน 248733
เลขเรียกหนังสือ

2.3.1 กลไกการอบผลิตภัณฑ์ให้แห้ง [19]

ในผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ ๆ จะมีน้ำประกอบอยู่ 4 รูปแบบด้วยกันคือ

1. น้ำที่ถูกดูดซับอยู่ที่ผิวของอนุภาคของวัตถุดิบ (adsorbed water)
2. น้ำที่เป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบแห้ง (shrinkage water)
3. น้ำซึ่งถูกขังอยู่ในช่องว่างในผลิตภัณฑ์ (pore water)
4. น้ำซึ่งประกอบอยู่ในโครงสร้างของผลึกวัตถุดิบ (crystal lattice water)

ผิวของแข็งทุกชนิดมีความสามารถดูดซับน้ำ ซึ่งอาจจะมีความหนาเพียงหนึ่งโมเลกุลหรือมากกว่า และการสะสมในเนื้อของแข็งจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง และอยู่ในรูปของหลอดเล็ก ๆ ปริมาณของน้ำที่ถูกดูดซับขึ้นกับความดันไอของน้ำในอากาศ ดังนั้นเนื้อผลิตภัณฑ์เมื่อแห้งจะค่อยๆ ดูดซับน้ำในอากาศจนถึงจุดสมดุล พวกดินขาวซึ่งมีเม็ดหยาบจะดูดซับได้น้อย พวกบอลเคลย์จะดูดซับความชื้นได้มากกว่าดินขาวเนื่องจากจะมีเม็ดละเอียดกว่า

ปริมาณของน้ำที่ทำให้ผลิตภัณฑ์หดตัวเมื่ออบผลิตภัณฑ์แห้ง น้ำปริมาณนี้เป็นน้ำส่วนที่แยกอนุภาคของดินออกจากกันในขณะที่ดินนั้นยังคงสภาพความเหนียวอยู่ น้ำปริมาณนี้จะมีจำนวนโมเลกุลอยู่ในช่วง 200 โมเลกุล ดังนั้นเมื่อน้ำปริมาณนี้ถูกขจัดออกไปในระหว่างการอบแห้ง จะเป็นสาเหตุทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการหดตัว

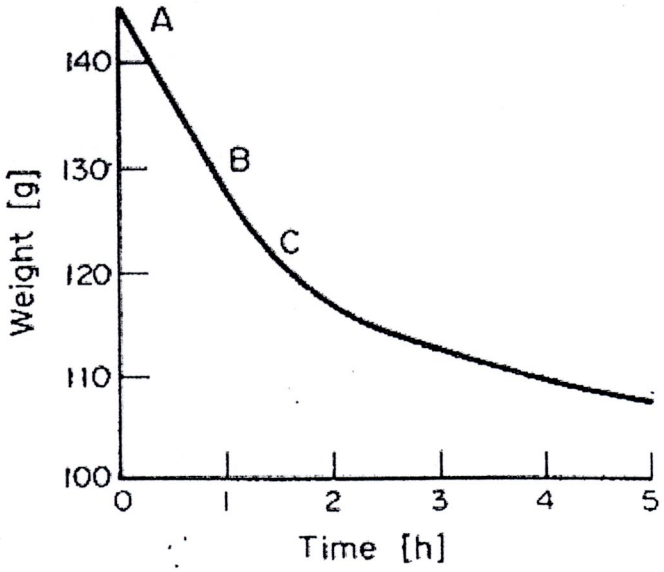
น้ำที่ถูกขังอยู่ภายในช่องว่างของผลิตภัณฑ์ น้ำปริมาณนี้จะมีมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบมีการกระจายดีมากน้อยเพียงใด นอกจากนี้ก็ขึ้นกับการอัดตัวกันของอนุภาควัตถุดิบ คือ อัดตัวกันได้แน่นขนาดไหน ขนาดของอนุภาคของวัตถุดิบถ้าใหญ่หรือหยาบ โอกาสที่จะมีช่องว่างในเนื้อผลิตภัณฑ์ก็มีมากและช่องว่างมีขนาดใหญ่ ฉะนั้นน้ำจะมีโอกาสถูกขังอยู่ในช่องว่างมากตามไปด้วย อนุภาคขนาดเล็กหรือละเอียดก็จะให้ผลที่ตรงข้ามกับที่กล่าวมา

น้ำในผลึกของแร่ มักจะพบในแร่พวกที่หนึ่งเซลล์ประกอบด้วยเนื้อเยื่อสามชั้น น้ำจะแทรกอยู่ระหว่างชั้นและเป็นเหตุให้แร่นั้นมีการขยายตัวตามแกน C เมื่อน้ำนี้ถูกขจัดออกไปตอนอบแห้งจะทำให้ผลึกกลับคืนสู่ขนาดเดิม ซึ่งเป็นสาเหตุของการหดตัว ในเบนโทไนท์จะพบปรากฏการณ์แบบนี้และมีเปอร์เซ็นต์การหดตัวสูง เพราะว่ามีแร่พวกหนึ่งเซลล์มีชั้นเนื้อเยื่อที่เป็นโครงสร้างของดินทับซ้อนกันสามชั้น ในผลิตภัณฑ์เซรามิกทั่วไปมีแร่ดินพวกนี้มาเกี่ยวโยงน้อยมาก ผลการหดตัวเนื่องจากแร่พวกนี้จึงมีไม่มาก น้ำในผลึกของแร่มีแรงยึดค่อนข้างสูง การขจัดจึงค่อนข้างยาก น้ำชนิดนี้จะหมดไปในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอบแห้ง

2.3.2 ผลของสภาวะภายนอกต่อการอบแห้ง

(Effect of external condition on drying) [20]

การอบแห้งเริ่มจากขณะที่อิฐเปียกภายใต้สภาวะคงที่ (อุณหภูมิ,ความชื้นสัมพัทธ์และความร้อนของลมร้อน) สามารถแบ่งได้หลายขั้นตอน ถ้าเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของอิฐเท่ากับเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง จะได้กราฟ Drying curve ที่มีลักษณะดังภาพที่ 1 ระหว่างการอบแห้งในช่วงแรก อัตราการระเหยของน้ำ (ความชันของ curve ระหว่างจุด A และ B) จะคงที่ แต่เมื่อน้ำระเหยออกไปเรื่อย ๆ ณ จุด B อัตราการระเหยน้ำจะเริ่มลดลงและควรจะทำต่อเนื่องต่อไปเพื่อไล่น้ำออกให้หมด



รูป 2.1 Typical drying-curve

โดยทั่วไป การเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์จะเป็นเส้นโค้งเรียบ ซึ่งสามารถแปลในแต่ละจุดแตกต่างกัน (หรือคำนวณความชันของมวลที่หายไปของอิฐ) เป็นเปอร์เซ็นต์ความชื้นที่มีอยู่ รูปที่ 2 แสดงพฤติกรรมของการอบแห้งในเทอมของการอบแห้งจริง (actual drying) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์ความชื้น

การอบแห้งต้องการอุณหภูมิมาใช้งาน เพื่อให้ความชื้นหรือน้ำเคลื่อนออกจากเนื้อดิน ในสภาพเป็นการระเหย (evaporation) หรือการแผ่กระจาย (diffusion) โดยความร้อนจะทำงาน (function) ในลักษณะเป็นการพาความร้อน การแผ่รังสีความร้อน และการนำความร้อน ซึ่งพบว่าจะทำงานทั้ง 3 ลักษณะงานไปพร้อมกัน กล่าวคือ

การพาความร้อน (Convection of heat)

ได้พบว่าการอบแห้งผลิตภัณฑ์ดิบทางเซรามิกทั่วไปให้มีการกระทำอบแห้ง ด้วยใช้กระแสความร้อนให้ไหลผ่านหรือหมุนวนวิ่งผ่านผิวของวัสดุมีความชื้น (passing and circulating of warm air over the surface of the mois article) ทำให้กระแสลมอุ่นหรือลมร้อนทำงาน 2 อย่าง โดยทำงานอย่างแรก คืองานจ่ายความร้อน เพื่อทำให้น้ำเคลื่อนตัวและระเหยออกไป และหน้าที่ทำงานอีกอย่างหนึ่ง ช่วยให้เกิดการเคลื่อนตัวของน้ำถูกกวาดออกจากผิววัตถุและสามารถนำส่งออกสู่ภายนอกระบบการอบแห้งได้ง่าย ทั้งนี้โดยมีอากาศเป็นตัวกลางและมีอากาศร้อนซึ่งเป็นตัวจ่ายความร้อนให้กับวัตถุ ยิ่งการพาความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงมากเกินไป จะเป็นผลเสียต่อการอบแห้ง จึงต้องให้ความระวังปริมาณความร้อนให้เหมาะสม ซึ่งอาจใช้อุณหภูมิลมร้อนแตกต่างกันในช่วงเวลาของงานการอบแห้ง โดยแบ่งคร่าว ๆ เป็น 3 ช่วง ช่วงแรก เมื่อวัตถุที่มีความชื้นสูงในระยะเริ่มต้นอบแห้ง ต่อไปเป็นช่วงกลางเมื่อปริมาณน้ำภายนอกผลิตภัณฑ์ระเหยออกไปแล้ว และช่วงสุดท้าย เป็นช่วงการอบแห้ง ที่อาจใช้ความร้อนสูงขึ้น เพื่อไล่น้ำที่ยังคงค้างหมดไปหรือให้เหลือน้อยที่สุด ที่ไม่เป็นผลเสียกับการเผาในขั้นตอนต่อไป

การแผ่ความร้อน (Radiation of heat)

ความร้อนประเภทนี้เป็นความร้อนเกี่ยวกับการส่งผ่านจากชิ้นงานหนึ่งไปสู่ชิ้นงานหนึ่ง (heat – transferred by radiation) ในความหมายของการแผ่ความร้อนคือ การเคลื่อนตัวของความร้อนด้วย (electro – magnetic radiation wave) จากวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปสู่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า วัตถุที่มีผนังร้อนจะสามารถถ่ายเทแผ่ความร้อนหรือพลังงานความร้อนสู่สิ่งรอบข้าง (surrounding) ยิ่งการกระจายความร้อนสู่วัตถุมากเท่าใด ก็สามารถแผ่ความร้อนจากวัตถุนั้นได้มากอีกเช่นกัน

มีสูตรคำนวณค่าพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาจากตัวแผ่ความร้อน (radiator / heater) มีค่ากำลัง 4 ของอุณหภูมิ ตัววัตถุที่รองรับความร้อนจากการแผ่ มีสูตรคำนวณ

$$E = \delta T^4 \qquad (2.1)$$

เมื่อ E = พลังงานความร้อนที่ถูกแผ่ออกมา (heater)

δ = ค่าคงที่ Stefan Boltzmann

T = อุณหภูมิของวัสดุ

และ Rate of heat transfer ในกรณีการแผ่ความร้อนจะเป็น 3 – 4 เท่าสูงกว่าการพาความร้อน จากการศึกษาทดลองได้พบว่า การแผ่ความร้อนจะทำให้เกิดการลดลงของความชื้นมากเกินไป จนมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสียหายในระหว่างการอบแห้ง

การนำความร้อน (Conduction of heat)

หมายถึงการเคลื่อนตัวของความร้อนผ่านในวัตถุ จากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังที่อุณหภูมิต่ำกว่า มีสูตรการคำนวณไว้ดังนี้

$$Q = K A \frac{dt}{dx} \qquad (2.2)$$

เมื่อ Q = ปริมาณความร้อนเคลื่อนที่โดยการนำความร้อน

A = พื้นที่หน้าตัดของความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน

dt/dx = อัตราส่วนของอุณหภูมิต่อพื้นที่

K = ค่าการนำความร้อนของวัสดุใดๆ

การนำความร้อน ยังอาจคำนึงถึงการถ่ายเทความร้อนมาจากผิวสัมผัสของวัตถุอื่น ดังกรณีเมื่อจัดวางผลิตภัณฑ์อบแห้งบนชั้นวาง(pallets) ที่มีลมร้อนวิ่งผ่านทำให้ความร้อนจากชั้นวางสามารถเป็นตัวนำจ่ายความร้อนให้กับผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าชั้นวางเป็นโลหะ จึงมีผลทำให้ตัวผลิตภัณฑ์ได้รับอุณหภูมิจากกระแสลมร้อน แตกต่างจากบริเวณของผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับเนื้อโลหะชั้นวาง ถ้าหากชั้นวางเป็นวัตถุไม่นำความร้อนเช่น ไม้ ก็จะมีผลน้อยต่อการนำความร้อน

อัตราการอบแห้ง (Drying rate) [21]

อัตราการอบแห้ง หมายถึง มวลของไอของของเหลวที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ผิวที่เกิดการระเหยต่อหน่วยเวลา

การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักสารชื้นต่อเวลา ระหว่างการอบแห้งแสดงดังรูป 2.1 และอัตราการแห้งเทียบกับปริมาณความชื้นที่มีในสารชื้นแสดงไปดังรูป 2.2 แสดงขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการอบแห้งจากการทำผลต่างของข้อมูลดังรูป 2.2 ทำให้สารชื้นแห้งประกอบด้วย 3 ช่วงเวลาหรือการแห้งตัวที่แตกต่างกันดังนี้

ระยะที่ 1 ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant-rate period) จุด A – B ช่วงการเหนี่ยวนำเบื้องต้น (initial induction period) โดยระยะเวลาที่สารชื้นที่อุณหภูมิต่ำปรับสภาพตัวเอง โดยการรับความร้อนสัมผัส(sensible heat) จากตัวกลางให้ความร้อน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจนกระทั่งถึงจุดที่ค่าความดันไอของของเหลวที่มีในสารชื้นมีค่าสูงกว่าความดันย่อยของไอตัวกลาง ทำให้แห้ง ของเหลวจึงจะเริ่มเกิดการระเหยเป็นไอได้และเริ่มถูกถ่ายเทเข้าไปในกระแสตัวกลางทำให้แห้ง b – c ช่วงเวลาที่ช่วงการแห้งที่อัตราการแห้งของสารมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลาและปริมาณความชื้นในสาร ซึ่งจะได้แก่ช่วงของกราฟที่เป็นเส้นตรงขนานกับแกนความชื้น เรียกอัตราการแห้งนี้ว่า อัตราการอบแห้งคงที่ (constant drying rate ; R_c) การแห้งในช่วงนี้มีพฤติกรรมคล้ายกับการ

ระเหยของของเหลวบริสุทธิ์ ดังนั้น ชนิดของสารจึงไม่มีผลต่อการแห้งแต่อย่างใด แต่ธรรมชาติของของแข็งและธรรมชาติความชื้นในสารจะเป็นสิ่งกำหนดจุดสุดท้ายของช่วงอัตราการแห้งคงที่นี้ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงกลไกการแห้งหรือกลไกการถ่ายเทมวลนี้เรียกว่า จุดวิกฤต (critical point) ความชื้นที่สารมีอยู่ ณ จุดวิกฤตนี้เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content ; X_C)

ระยะที่ II ช่วงอัตราการแห้งลดลง (falling rate period) จุด C – E เป็นช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง ซึ่งแสดงด้วยกราฟที่ลาดเอียงลง เมื่อความชื้นในสารลดลง นั่นคืออัตราการแห้งหรือการระเหยของความชื้น ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่เหลืออยู่ในสาร และนอกจากนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของของแข็งด้วย อัตราการแห้งในช่วงนี้จะขึ้นอยู่กับกลไกการถ่ายเทมวลสารในของแข็ง

ระยะที่ III ช่วงอัตราการแห้งลดลง (second falling rate period) จุด E – D ความชื้นในผลิตภัณฑ์ยังเกิดการเคลื่อนอย่างช้า ๆ โดยการแพร่และจุด D การอบแห้งหยุด เมื่อถึงจุดสมดุลสามารถหยุดการอบแห้งได้

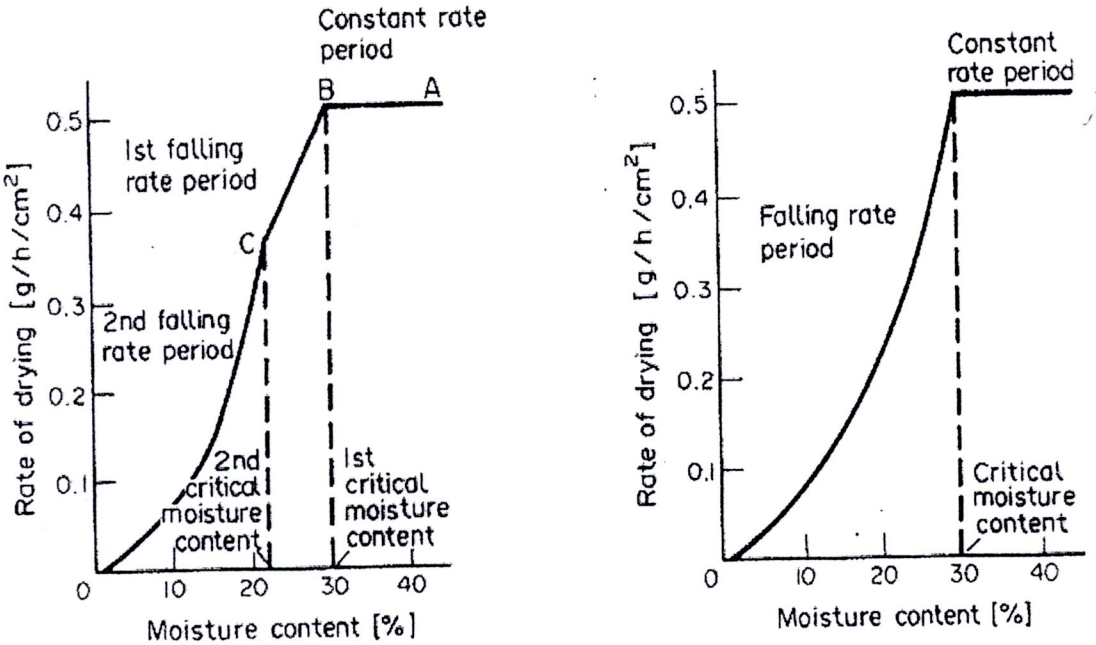
อัตราการอบแห้งสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$R = -\frac{1}{A}\frac{dm}{d\theta} \qquad (2.3)$$

เมื่อ R = อัตราการอบแห้ง $kg/m^2.s$

A = พื้นที่ผิวที่เกิดการระเหย m^2

$\frac{dm}{}$ = มวลของของเหลวที่ระเหยออกจากสารต่อหน่วยเวลา kg/s



รูป 2.2 Drying rate curve

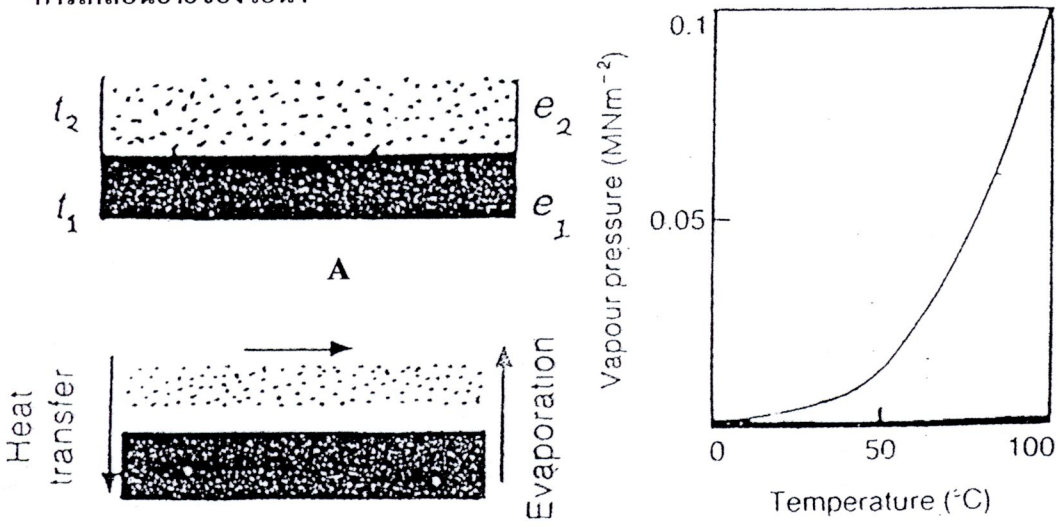
2.3.3 การระเหยของน้ำ [22]

การระเหยของน้ำในกระบวนการตากแห้ง ส่วนแรกที่จะพิจารณาการเกิดการระเหยของน้ำ คือ บริเวณผิวชิ้นงาน ซึ่งยังคงมีปริมาณน้ำอยู่เต็มผิวโดย ในที่นี้น้ำบริเวณผิวของชิ้นงานมีอุณหภูมิเป็น t_1 ซึ่งผิวของชิ้นงานนี้จะสัมผัสกับผิวภายนอกโดยตรง ซึ่งมีอุณหภูมิเป็น t_2 ดังรูปที่ 2.3 (A) จากรูปค่าความดันไอของน้ำที่ความดันบรรยากาศแทนด้วย e_2 และค่าความดันไอจากชิ้นงานแทนด้วย e_1 จากกราฟในรูปที่ 2.3 (B) ค่าความดันไอของน้ำที่ความดันบรรยากาศจะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งค่า $e_2 < e_1$ ถึงแม้ว่า $t_2 > t_1$ ก็ตามเพราะว่าค่าความดันไอ e_2 ที่เพิ่มขึ้นยังไม่ถึงจุดอิ่มตัว เพราะฉะนั้นในช่วงนี้อัตราการระเหยน้ำจะขึ้นกับค่า $e_1 - e_2$ เมื่ออุณหภูมิยังคงเพิ่มขึ้นความร้อนก็ยิ่งจะถูกถ่ายเทจากอากาศสู่น้ำมากขึ้น ทำให้น้ำที่เหลือเกิดความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอมากขึ้น และจะค่อย ๆ ระเหยออกจากชิ้นงานอย่างช้า ๆ และเมื่อเวลาผ่านไปมากขึ้น โดยไม่มีการถ่ายเทอากาศและความชื้น ความดันไอ $e_1 = e_2$ การระเหยน้ำก็จะหยุด

ดังนั้นการที่จะให้ $e_2 < e_1$ จำเป็นต้องมีความร้อนและอากาศที่ไหลเวียนมารองรับตลอดเวลา และจะต้องมีไอร้อนและความชื้นบางส่วนไหลออกนอกระบบด้วย ทั้งหมดนี้จะมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น ถ้าให้การไหลของลมร้อนและอากาศไหลผ่านผิวชิ้นงาน ดังรูปที่ 2.3 (C)

สรุปได้ว่าการที่จะให้เกิดการระเหยของน้ำควรประกอบด้วย

1. อุณหภูมิที่สูงพอสำหรับการเกิดความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ
2. อากาศที่มีความชื้นน้อย ($e_2 < e_1$) และความเร็วลมแบบปั่นป่วน (turbulence) และผลของการเคลื่อนย้ายของไอน้ำ



รูป 2.3 แสดงการระเหยของน้ำบนพื้นผิว

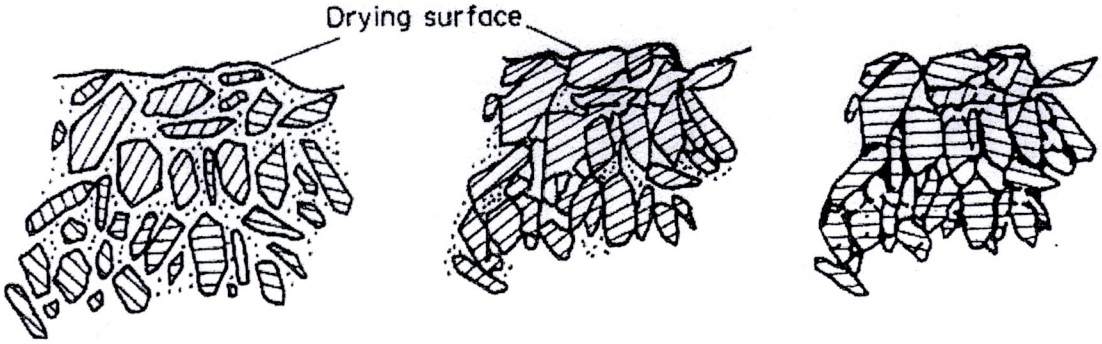
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

2.4 กลไกภายในของการอบแห้ง (Internal mechanism of drying)

2.4.1 การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของดินเหนียวในระหว่างการอบแห้ง

(Volume changes of plastic bodies during drying) [23]

เมื่อนำดินเหนียวผสมน้ำ ให้มีความเหนียวคงที่ โดยน้ำจะทำให้อนุภาคแยกออกจากกัน โมเลกุลของน้ำปิดอนุภาคของดินและดึงดูดอนุภาคด้วยกลไกของน้ำ เพราะน้ำมีความหนืดสูงและแรงดันไอต่ำ เมื่อพิจารณาการยึดเกาะกัน (bound) อย่างแข็งแรงและไม่ยืดหยุ่น จะมีลักษณะของชั้นฟิล์มบางๆ ความหนาไม่เกิน 2- 3 โมเลกุลที่ผิวของอนุภาคดิน ดังรูปที่ 2.4 (A) แสดงการยึดเกาะกันของอนุภาค โดยกำหนดให้จุดสีดำเป็นลักษณะของการยึดเกาะกันของน้ำและพื้นที่สีขาวเป็นลักษณะของน้ำบริเวณพื้นผิว



รูป 2.4 แสดงภาพตัดลักษณะของอนุภาคดินและน้ำที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการอบแห้ง

น้ำเกิดการระเหยจากพื้นผิวของดินเหนียวและเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำจากภายในสู่พื้นผิว ทำให้อนุภาคไม่ยึดเกาะกัน (unbound) และเคลื่อนที่เข้ามาชิดกัน ในช่วงนี้จะเกิดการลดลงของปริมาตรจะเห็นได้จากการคำนวณปริมาณน้ำที่ระเหยไป อย่างไรก็ตามอนุภาคของดินยังมีน้ำยึดเกาะเป็นลักษณะของฟิล์มบาง ๆ เชื่อมต่อกัน ดังรูปที่ 2.4(B) จากนั้นจะเกิดการระเหยของน้ำผ่านไปสู่พื้นผิว โดยเคลื่อนผ่านรูพรุนที่เชื่อมโยงกัน โดยเมื่อเร่งด้วยการให้ความร้อนและเร่งการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วของอากาศที่สัมผัสกับผิวผลิตภัณฑ์ทำให้เกิดการซึมผ่านในระบบการอบแห้ง เมื่อน้ำถูกกำจัดออกจากรูพรุน ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรและเกิดการหดตัว ในช่วงนี้น้ำที่เกาะกันเป็นฟิล์มบางๆ อยู่ในรูพรุนที่เกิดการระเหยและเกิดแรงดันไอภายในรูพรุนลดลง ทำให้ความหนาแน่น (packing density) เพิ่มขึ้น เกิดจากแรงตึงผิวภายในรูพรุน ดังรูป 2.4(C)

บางครั้งมวลขยายตัวเพียงเล็กน้อยในช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง เนื่องจากการขยายตัวของแร่ดินขาว (kaolinitic china clay) และอีกประการหนึ่งคือแรงตึงผิวของน้ำในระบบรูพรุนลดลงจากการกดอัดของผลิตภัณฑ์

2.4.2 การกระจายและเคลื่อนที่ของน้ำภายในเนื้อดิน

(Distribution and movement of moisture) [24]

เป็นพฤติกรรมต่อเนื่องมาจากขั้นตอนที่น้ำภายนอกถูกนำพาออกไปแล้ว ยังคงมีน้ำเหลืออยู่ห่อหุ้มเม็ดอนุภาคดินและยังคงมีฝังตัวอยู่ในช่องว่างหรือการเป็นรูพรุนของเนื้อดิน ทำให้ระบบการอบแห้งในช่วงนี้แบ่งออกเป็น 2 ระยะ (stages)

ระยะแรก ช่วง Constant-rate period เป็นพฤติกรรมวัดเป็นการระเหยของน้ำที่ขณะนั้นฉาบผิวนอกของเนื้อดิน เมื่อน้ำระเหยหลุดออกจากผิว ก็จะมีน้ำจากภายในเนื้อดิน ซึ่งกักขังอยู่ในรูพรุนเก็บน้ำในช่องทางเล็ก ๆ วางตัวอย่างต่อเนื่อง (fine interconnecting channel) ถูกดันออกขึ้นมาแทนที่ โดยการหลุดออกมาของน้ำจะมีสภาพแผ่กระจาย ผ่านรูขึ้นมาสู่ผิวในช่วงสุดท้ายของระยะแรก ประมาณว่ามีน้ำในรูพรุนจำนวนหนึ่งที่สามารถออกมาสู่ผิวนอกของเนื้อดิน

ระยะหลัง ช่วง falling-rate period เป็นการเคลื่อนตัวของน้ำที่ยังคงฝังตัวลึกอยู่ในเนื้อดินยังไม่สามารถออกมาได้ ด้วยเหตุผลนี้ ปริมาณน้ำที่เหลือจะพบว่า มีความเข้มข้นขึ้นและมีความหนืด (viscosity) อาจเป็นเพราะน้ำที่เหลือจะข้นหนืดด้วยมีสารละลายอยู่ในน้ำด้วยหรือไม่ก็มีอนุภาคละเอียดมาก ปะปนในน้ำและอาจมีความดัน (pressure) กดดันภายในช่องรูพรุนด้วยแรงดูดของรูพรุน (capillary force) และเหตุผลอื่น ๆ อีก จึงต้องเพิ่มการกระทำ เพื่อให้น้ำหรือความชื้นที่ยังคงกักขังเคลื่อนตัวออกในรูพรุนออกมาสู่ภายนอก ด้วยการเพิ่มอัตราเร็วของน้ำเคลื่อนที่ นั่นคือต้องให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น เพื่อช่วยให้น้ำมีความหนืดลดลงได้ และช่วยเพิ่มความดันในหลอดรูพรุนให้สามารถเกิดการซึมผ่าน (permeability) ได้ดีขึ้น ซึ่งถ้าเนื้อดินมีความหยาบช่องว่างเป็นรูพรุนจะโตกว่าชนิดเนื้อดินละเอียดจะทำให้ช่องรูพรุนขนาดเล็ก มีความชื้นออกได้ยากกว่า อย่างไรก็ตามหากการกระทำด้วยอุณหภูมิสูงมากเกินไปและมีกระแสลมร้อนเร็วมากไป จนทำให้น้ำในหลอดรูเคลื่อนตัวออกอย่างเร็ว อาจมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรเนื้อดินจนยุบตัวลง ส่งผลทำให้เกิดการบิดเบี้ยวได้ จึงต้องระวังในเรื่องนี้ด้วย

อิทธิพลของอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้ง จะมีผลในการระเหยน้ำ จะทำให้น้ำเป็นไอ (vapour) หรือเป็นของเหลว (liquid) และยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันเกิดขึ้นหลายทาง เช่นว่า แรง capillary , diffusion , gravity , evaporation และ surface tension นอกจากนี้อุณหภูมิยังไปเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของน้ำที่ถูกกักขังในรูพรุนอีกด้วย

2.4.3 การแห้งตัวของเนื้อดินแบ่งออกเป็น 2 ระยะ [25]

1. การระเหยของน้ำออกจากรอบ ๆ เม็ดดินไปทางผิวด้านนอก เม็ดดินเรียงตัวใหม่หดตัวลงและเรียงตัวแน่นชิดกัน การผึ่งแห้งในระยะแรกนี้เนื้อดินหดตัวลงมาก

2. การระเหยของน้ำที่แทรกอยู่ในเม็ดดิน ดินที่มีเม็ดดินเรียงตัวชิดกันแน่น แต่ยังมีน้ำถูกกักขังอยู่ในเม็ดดินระเหยไม่หมดเรียกว่า ดินชื้นแต่แข็งแบบเนยแข็ง (cheese-hard)

การแห้งตัวของเนื้อดินในระยะที่ 2 นี้ แห้งตัวช้าลงมาก น้ำที่อยู่ลึกลงไปจากผิวดินค่อย ๆ ถ่ายเทความชื้นออกจากผิวดินอย่างช้า ๆ ในระยะนี้การหดตัวน้อยหรือไม่มีการหดตัวเพิ่มขึ้นจากเดิม ดินบริเวณผิวด้านนอกจะมีความชื้นน้อยกว่าดินส่วนกลาง

ส่วนใหญ่ชิ้นงานที่ผ่านการผึ่งแห้งมาจนถึงระยะที่ 2 โดยไม่แตกร้าว ก็จะปลอดภัยในขั้นตอนการผึ่งแห้ง การหดตัวของชิ้นงานไม่ได้แห้งอย่างสม่ำเสมอพร้อม ๆ กันทั้งหมด ตัวอย่างเช่น ผนังด้านข้างของแจกันทรงกระบอกที่วางไว้บนชั้นวาง จะแห้งเร็วกว่าส่วนก้นแจกัน ที่วางติดกับแผ่นรอง เนื่องจากด้านข้างสัมผัสกับอากาศถ่ายเทได้โดยรอบ หรือหูแก้วที่บางจะแห้งเร็วกว่าตัวแก้ว เป็นต้น

ปัจจัยในการแห้งตัวของชิ้นงานขึ้นอยู่กับองค์ประกอบดังนี้

1. ความหนาบาง รูปทรง ขนาดและความซับซ้อนของชิ้นงาน (size & shape)
2. อุณหภูมิในห้องอบ
3. แรงลมของอากาศที่หมุนเวียน (ventilation) และอัตราการระบายความชื้นออกจากเตา
4. ความชื้นในอากาศ (moisture) ถ้าความชื้นในบรรยากาศน้อย น้ำในเนื้อดินจะแห้งเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์แตกร้าวได้ง่าย

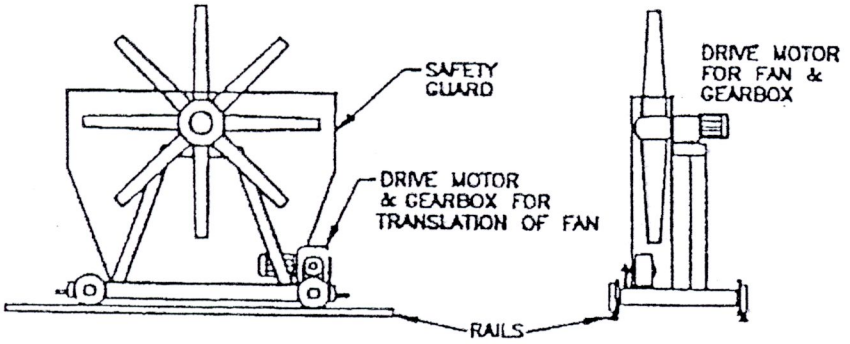
2.5 พัดลมที่ใช้ในการหมุนเวียนของลม [26]

การที่จะทำให้ผลภายในระบบอบแห้งมีการหมุนเวียนที่ดีนั้น สามารถทำได้ได้หลายวิธีในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 3 วิธีการเท่านั้น

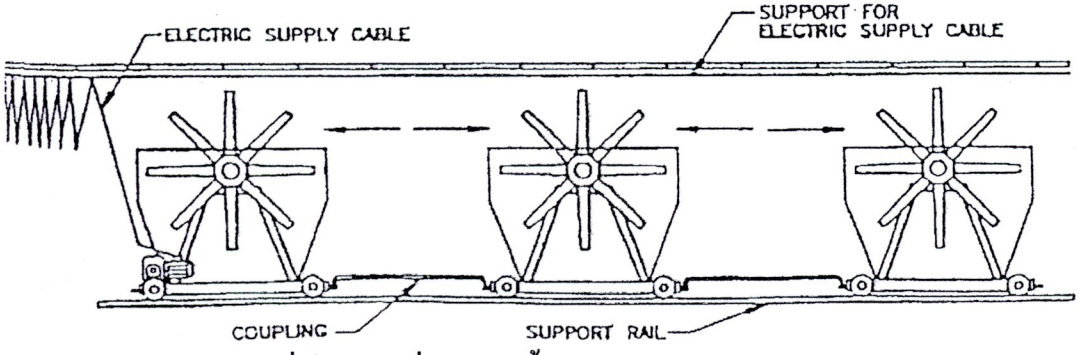
1. Large propeller fan
2. Vertically axial fan
3. Fixed axial fan

1. Large propeller fan

คือพัดลมที่มีใบพัดขนาดใหญ่รอบๆ วงล้อของพัดลม การติดตั้งพัดลมชนิดนี้ มักจะติดตั้งเป็นคู่ๆ พ่วงท้ายกัน พัดลมอันแรกจะมีวงล้อเป็นตัวขับเคลื่อน ขนาดของพัดลมประเภทนี้มีขนาดใหญ่มาก อาจมีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงถึง 4.75 เมตร ประสิทธิภาพในการทำงานต่อชั่วโมง สามารถเป่าลมที่มีความจุประมาณ 160,000 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ข้อดีของพัดลมชนิดนี้คือ สามารถทำให้เกิดลมหมุนเวียนภายในครั้งละมาก ๆ แต่ใช้กำลังขับต่ำทำให้ประหยัดพลังงาน ดังรูปที่ 2.5 , 2.6



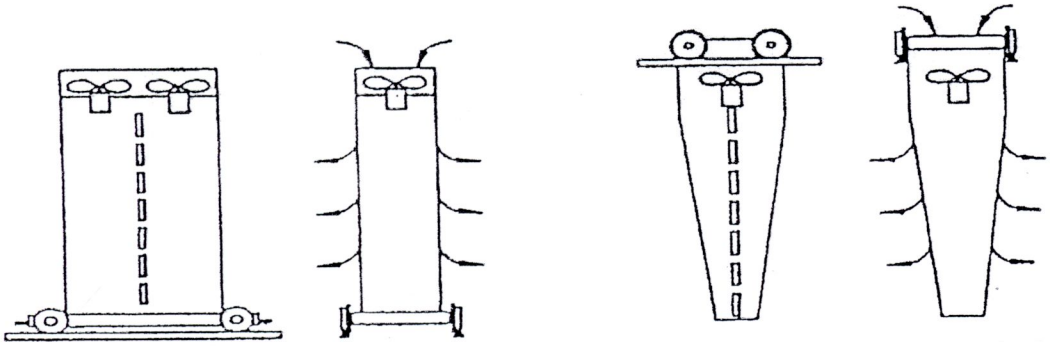
รูป 2.5 แสดงชนิดของพัดลมที่เป็นวงล้อ



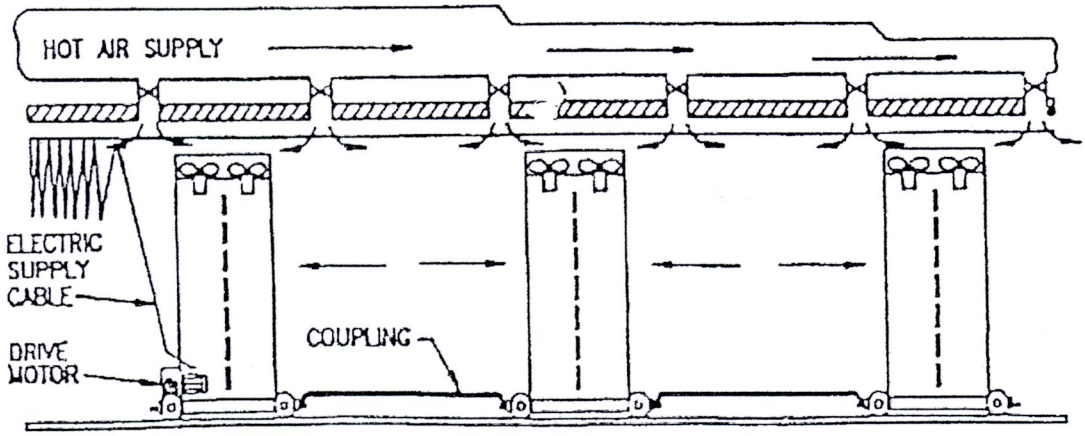
รูป 2.6 แสดงชนิดพัดลมที่เป็นวงล้อที่มีการติดตั้งหลายอัน

2. Vertically axial fan

คือพัดลมที่มีแกนที่ติดตั้งในแนวขนานกับพื้น การทำงานของพัดลมชนิดนี้จะเป่าลมไปในแนวกระจายขนานกับพื้นและมีการไหลวนของกระแสลมลงด้านล่าง ใบพัดของพัดลมจะมีช่องว่างในแนวเอียงลงสู่ด้านล่าง พัดลมจะติดตั้งอยู่ด้านบนหรือหลังคาของห้องอบแห้ง ช่องระหว่างใบพัดอยู่ในแนวเฉียงลง เมื่อมีการหมุนของใบพัดลมจากด้านบนจะถูกบังคับให้ไหลลงด้านล่าง เนื่องจากลมร้อนมักไหลขึ้นสู่ด้านบน ระบบสายไฟและระบบไฟฟ้าต่างๆ จึงต้องออกแบบให้มีระบบป้องกันความร้อน มีการเว้นช่องระหว่างฉนวนความร้อนที่หลังคา เพื่อเป็นตำแหน่งของสายไฟ ในการติดตั้งบางครั้งจะติดตั้งเป็นคู่ เช่นเดียวกับชนิดแรก พัดลมตัวแรกจะเป็นตัวขับเคลื่อน ส่วนพัดลมอีกตัวเป็นตัวพ่วงจากตัวแรก ทั้งสองตัวจึงทำงานพร้อมๆ กัน ดังรูปที่ 2.7 , 2.8



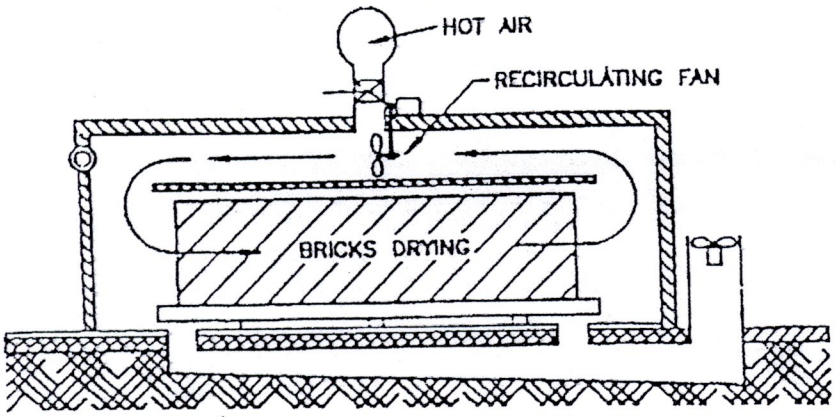
รูป 2.7 แสดงรายละเอียดของพัดลมชนิด Axial fan



รูป 2.8 แสดงรายละเอียดของพัดลมชนิด Axial fan หลายอัน

3. Fixed axial fan

คือพัดลมที่กำหนดตำแหน่งที่แน่นอน ตำแหน่งที่กำหนดไว้คือบริเวณด้านบนของห้องอบแห้ง หน้าท่อลมร้อน ออกแบบเพื่อติดตั้งพัดลมที่ตำแหน่งนี้เพื่อควบคุมลมร้อนที่จะเข้าออกห้องอบแห้ง ถ้าไม่ต้องการให้มีลมร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งจะปิดช่อง Damper กั้นลมร้อนไม่ให้เข้าเมื่อเปิดลมร้อนผ่านเข้าสู่ห้องอบแห้ง พัดลมจะเข้าเป่าให้เกิดการหมุนเวียนของลมอย่างเต็มที่ดังรูปที่ 2.9



รูป 2.9 แสดง Axial fan ที่ติดตั้งด้านบน

2.6 ห้องอบแห้ง (Drying chamber) [27]

โดยปกติห้องอบแห้งที่ใช้กันอยู่แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ ห้องอบพิมพ์และห้องอบผลิตภัณฑ์ มีระบบการทำงานแบบเดียวกัน แต่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการอบแตกต่างกัน ห้องอบพิมพ์ใช้งานจะอบที่อุณหภูมิประมาณ 45 องศาเซลเซียส ระยะเวลา 1 คืน ส่วนห้องอบผลิตภัณฑ์โดยทั่วไปถ้าเป็นผลิตภัณฑ์ถ้วยชามธรรมดาไม่หนามากจะอบที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส การทำงานของห้องอบต้องควบคุมปัจจัย 3 อย่างให้เหมาะสมกับรูปทรงของผลิตภัณฑ์คือ

1. อุณหภูมิ
2. ลมหมุนเวียนในห้องอบ
3. อัตราความชื้นที่ถูกระบายออกจากผลิตภัณฑ์ และอัตราความชื้นที่ถูกระบายออกจากห้องอบ (moisture gradient) จะต้องควบคุมให้มีความสัมพันธ์กันทุกอย่าง

<u>ห้องอบแบ่งตามระบบการใช้งานเป็น 2 แบบคือ</u>

1. ห้องอบแบบทำงานเป็นครั้ง
2. ห้องอบแบบทำงานต่อเนื่อง (continuous tunnel dryer)

โรงงานขนาดเล็กส่วนใหญ่ไม่ได้ทำห้องอบพิมพ์ ผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็กสามารถแห้งอย่างรวดเร็วได้โดยไม่มีปัญหา แต่ผลิตภัณฑ์ขนาดใหญ่จะต้องคอยระวังในการผึ่งแห้งโดยเฉพาะในช่วง

ที่อากาศร้อนจัด ต้องคลุมพลาสติกไว้ทั้งหมด โรงงานที่ไม่มีตู้อบส่วนใหญ่อบแห้งพิมพ์และผลิตภัณฑ์โดยวางไว้ใกล้ ๆ บริเวณเตาเผาที่มีความร้อน

2.6.1 ห้องอบพิมพ์หรือผลิตภัณฑ์

เป็นห้องอบที่สร้างขึ้นโดยเฉพาะในการอบพิมพ์และอบผลิตภัณฑ์ มีระบบควบคุมอากาศร้อน (hot air) วางเป็นท่อกระจายความร้อนขนาดใหญ่ใต้ระดับพื้นห้อง และเปิดช่องพื้นไว้เป็นระยะให้ความร้อนขึ้นมา ขนาดของห้องสามารถบรรจุรถเข็นผลิตภัณฑ์ได้หลายคัน มีระบบพัดลมเป่ากระจาย ความร้อนที่มีกำลังสูงติดตั้งอยู่ใกล้บริเวณพื้นห้อง ผนังฝั่งตรงข้ามจะติดพัดลมดูดระบายความชื้นออกที่ด้านบน และควรมีหัวฉีดสำหรับพ่นละอองน้ำ (dehumidifier) เพื่อช่วยให้ผลิตภัณฑ์แห้งตัวช้าลงขณะที่ให้ความร้อนในการอบสูง สามารถควบคุมอุณหภูมิความร้อน ระดับความแรงของพัดลมหรือกระแสลมที่หมุนเวียนในห้องอบ และระดับความชื้นภายในห้องอบให้สัมพันธ์กับระดับการอบแห้งของผลิตภัณฑ์ในแต่ละระยะ

2.6.2 เตาอบแบบต่อเนื่อง

ใช้หลักการเดียวกับเตาเผาแบบอุโมงค์ คือรถดึงผลิตภัณฑ์ดินดิบเข้าทางด้านหนึ่ง และเลื่อนผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งเสร็จแล้วออกอีกทางหนึ่ง ลมร้อนควรจะผ่านไปในทิศทางเดียวกับรถเข็นที่เลื่อนเข้าไป ห้ามสวนทิศทางเพราะผลิตภัณฑ์จะค่อย ๆ เย็นตัวลงเมื่อผ่านบริเวณที่ให้ความร้อนไปแล้ว มีปล่องระบายความชื้นอยู่ใกล้ปลายทาง เพื่อให้อุณหภูมิลดลงก่อนออกจากเตาอบ

ตำหนิที่เกิดจากการอบแห้งผลิตภัณฑ์มี 3 สาเหตุคือ

1. ตำหนิที่เกิดจากสาเหตุที่มีลมโกรกหรือโดนพัดลม ในขณะที่อากาศร้อนจัด ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปเสร็จใหม่ๆ ตำหนิของการผึ่งแห้งมักจะเกิดในระยะที่ 1 ของการหดตัว เนื่องจากน้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์เร็วเกินไป ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปทรงซับซ้อนจะต้องยืนระยะเวลาในการผึ่งแห้งนานขึ้น หรือคลุมด้วยพลาสติกเพื่อลดอัตราการแห้งตัวให้ช้าลง

2. การอบในตู้อบอย่างเร่งรีบ เนื่องจากตู้อบมีอุณหภูมิสูงเกินไป กระแสลมหมุนเวียนในตู้อบเร็วเกินไป การระบายความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์จึงเป็นไปอย่างรวดเร็ว ทำให้การระบายความชื้นออกได้ไม่เท่ากันตามส่วนต่าง ๆ ของผลิตภัณฑ์ ส่วนที่แห้งตัวก่อนจะดึงตัวหรือหดตัวมากกว่าส่วนที่ชื้น ถ้าดึงตัวมากจะเกิดการแตกร้าวในบริเวณตรงข้ามกับส่วนที่ชื้น การแห้งตัวที่ไม่สม่ำเสมอ (uneven drying) เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการบิดเบี้ยวอีกด้วย

3. ความหนาที่ไม่สม่ำเสมอของชิ้นงานเป็นจุดอ่อนที่ก่อให้เกิดสาเหตุการแตกร้าวได้ เช่น บริเวณก้นหนามากแต่ด้านข้างบาง หรือผลิตภัณฑ์บางมากเกินไป นอกจากนี้ยังเกิดขึ้นเพราะการออกแบบรูปทรงชิ้นงานที่ไม่เหมาะสม

2.6.3 ห้องอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar drying chamber) [28]

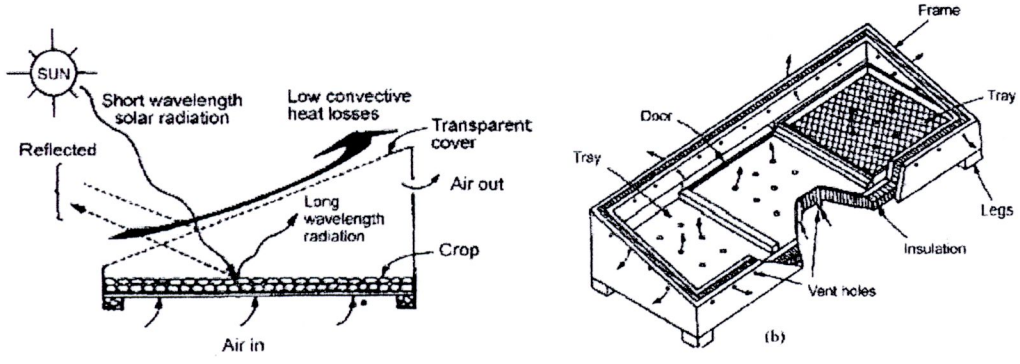
หลักการทำงาน

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์สามารถ แบ่งออกเป็นกลุ่มๆ คือ เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง (direct solar dryer) , เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีทางอ้อม (indirect solar dryer)และเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบพิเศษ (specialized solar dryer) โดยหลักการทำงานของแต่ละรูปแบบจะขึ้นอยู่กับกระบวนการรับพลังงานแสงอาทิตย์และการแปลงพลังงานความร้อน โดยมีหลักการดังนี้

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรงเป็นการไหลของอากาศร้อนแบบธรรมชาติ การเคลื่อนที่ของอากาศเกิดขึ้นจากความแตกต่างของอุณหภูมิ เนื่องจากอากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำ ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ แต่สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสารมีค่าน้อยทำให้สัมประสิทธิ์การอบแห้งต่ำ

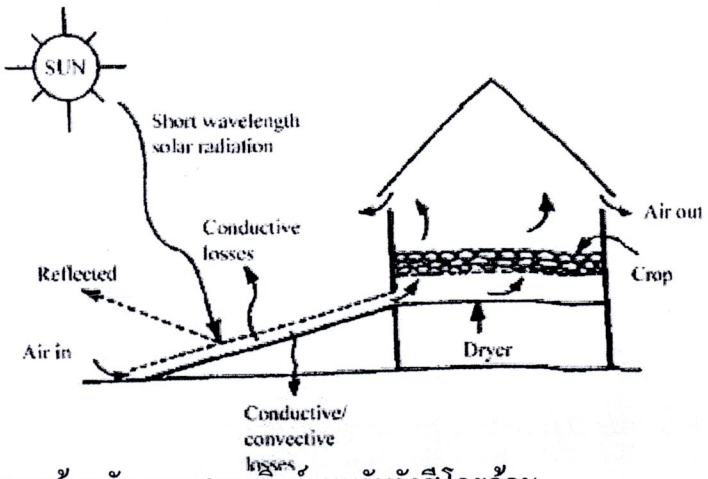
การทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง โดยรังสีจากแสงอาทิตย์ตกกระทบลงบนกระจกและเกิดการสะท้อนกลับสู่อากาศและส่องผ่านไปยังภายในเครื่องอบแห้ง และ Crop ดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ ทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.10



รูป 2.10 หลักการทำงานของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรง

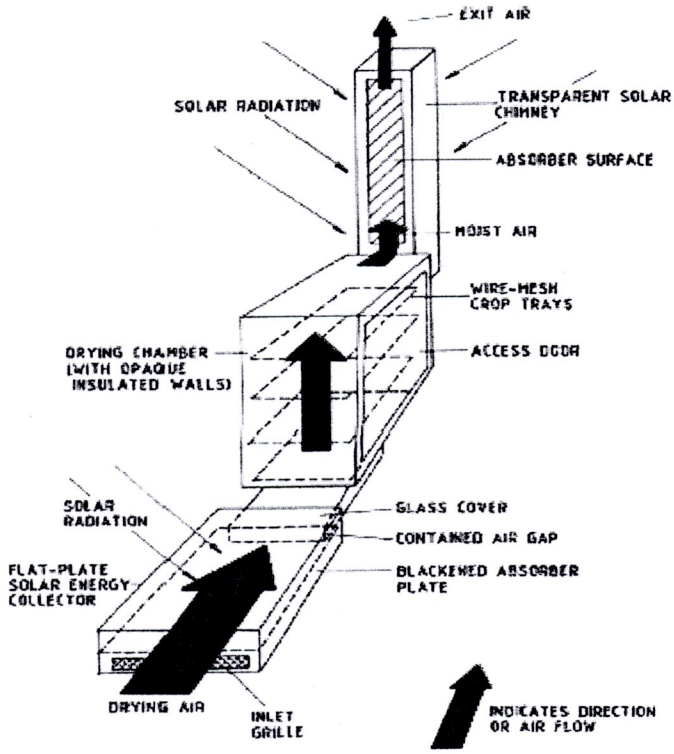
เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยอ้อม

เครื่องอบแห้งนี้ประกอบด้วย ส่วนรับพลังงานแสงอาทิตย์ พัดลมและห้องอบแห้ง ห้องอบแห้งนั้นจะป้องกันมิให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยตรง การอบแห้งจะอาศัยความร้อนจากพื้นที่รับแสงเป็นหลัก คือส่วนรับแสงจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศแล้วจึงไหลผ่านไปยังวัสดุในห้องอบแห้ง ดังรูปที่ 2.11



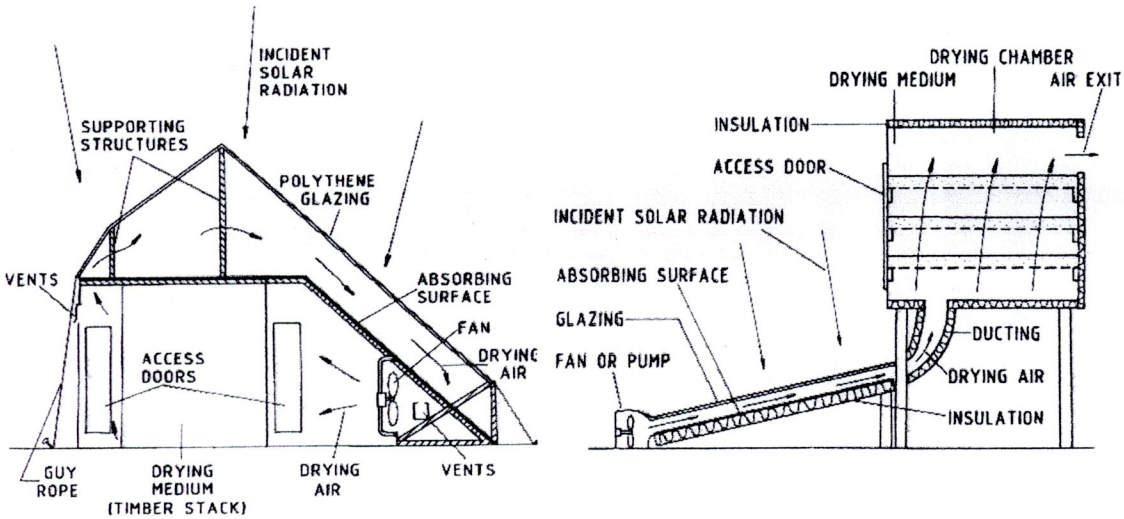
รูป 2.11 เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยอ้อม

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยอ้อมประเภทการไหลของอากาศร้อนเป็นแบบธรรมชาติ (passive type) เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ พื้นที่รับแสง , ห้องอบแห้งและช่องระบายอากาศ แต่มีจุดเด่นที่ห้องอบแห้งจะทำด้วยวัสดุทึบแสงที่ป้องกันแสงอาทิตย์ทะลุผ่านได้ ดังรูปที่ 2.12



รูป 2.12 เครื่องอบแห้งแบบ Typical distributed natural circulation solar energy

เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยอ้อมประเภทการไหลของอากาศร้อนเป็นแบบถูกบังคับ การบังคับอากาศทำได้โดยการใช้พัดลม คือใช้พัดลมช่วยให้อากาศเคลื่อนที่ ทำให้อากาศเคลื่อนที่ อากาศมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลสารสูง เพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้ง ลักษณะห้องอบแห้งดังรูปที่ 2.13



รูป 2.13 เครื่องอบแห้งแบบ Typical distributed-type active solar energy dryer

2.6.4 การพิจารณาออกแบบห้องอบแห้ง (Consideration of dryer design) [29]

การพิจารณาออกแบบห้องอบแห้งนั้นได้มีหลายปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องทั้งเรื่องของรูปทรงของห้องอบแห้ง ชนิดและตำแหน่งของแหล่งความร้อน ตลอดทั้งการกำหนดทิศทางของกระแสลมร้อน จากปัจจัยดังกล่าวก็ได้นำมาเป็นส่วนในการออกแบบห้องอบแห้งซึ่งได้อธิบายดังนี้

รูปทรงของตู้อบแห้ง (Shape of dryer)

รูปทรงของห้องอบแห้งที่พบเห็นโดยทั่วไปไม่ว่าจะเป็นห้องอบแบบต่อเนื่องหรือไม่ต่อเนื่องก็ตามก็มักจะพบในลักษณะรูปทรงสี่เหลี่ยม

แหล่งความร้อน (Source of heat)

ในเรื่องของความร้อนในกระบวนการอบแห้งมีหลักที่สำคัญ 3 หัวข้อเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้ง ประสิทธิภาพการอบแห้ง รวมทั้งผลเสียที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการอบแห้ง ดังนี้

1. ชนิดของแหล่งให้ความร้อน เชื้อเพลิงหรือแหล่งให้ความร้อนที่ใช้ในการอบแห้งโดยทั่วไปจะแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ

เชื้อเพลิงจากการเผาไหม้ ซึ่งได้จากการเผาไหม้ของ ฟืน น้ำมัน ถ่านหินและแก๊ส ซึ่งเชื้อเพลิงแต่ละชนิดก็มีข้อดี ข้อเสียแตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิ ควัน และความสม่ำเสมอของการให้ความร้อน โดยจะแสดงลักษณะของการเชื้อเพลิง ดังนี้

ฟืน : เป็นเชื้อเพลิงที่หาง่ายในท้องถิ่นมีราคาถูกแต่ไม่สะดวกในการขนส่งและเก็บรักษา ลักษณะของเชื้อเพลิงที่ได้จากฟืนจะได้จากการเผาไหม้ ซึ่งจะทำให้เกิดควันไฟและเขม่าจากการเผาไหม้ทุกครั้ง อุณหภูมิไม่ค่อยสูง และควบคุมปริมาณความร้อนยาก เนื่องจากปริมาณฟืนที่เติมลงไปในแต่ละครั้งไม่สามารถควบคุมให้คงที่ได้ เป็นเชื้อเพลิงที่ต้องการออกซิเจน (O_2) ในการเผาไหม้มาก ดังนั้นระบบภายในห้องอบจึงเปิดสู่อากาศภายนอกมาก ทำให้เชื้อเพลิงชนิดนี้จะมีการสูญเสียความร้อนไปกับอากาศมาก โดยทั่วไปแล้วห้องอบแห้งที่ใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิงจะพบในอุตสาหกรรมขนาดเล็ก หรืออุตสาหกรรมในครัวเรือน ผลกระทบในการใช้ฟืนเป็นเชื้อเพลิง คือ ส่วนของควัน และเขม่าที่ได้มาจากการเผาไหม้ ถ้าหากไปสัมผัสกับตัวผลิตภัณฑ์โดยตรง ก็จะทำให้เกิดรอยตำหนิบนผิวชิ้นงานได้ ดังนั้น การใช้งานในส่วนของฟืนที่จะให้ผลิตภัณฑ์เกิดผลเสียน้อย มักจะทำในระบบปิด ซึ่งใช้การแผ่ความร้อนแทน

น้ำมัน : จะเป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาแพงกว่าฟืน แต่จากการเผาไหม้มักจะให้เขม่าควัน เช่นเดียวกับการใช้ฟืนซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบมีรอยตำหนิ ค่าความร้อนสามารถควบคุมปริมาณน้ำมันที่ใช้ในการเผาไหม้ ทำให้สามารถควบคุมอัตราการอบได้

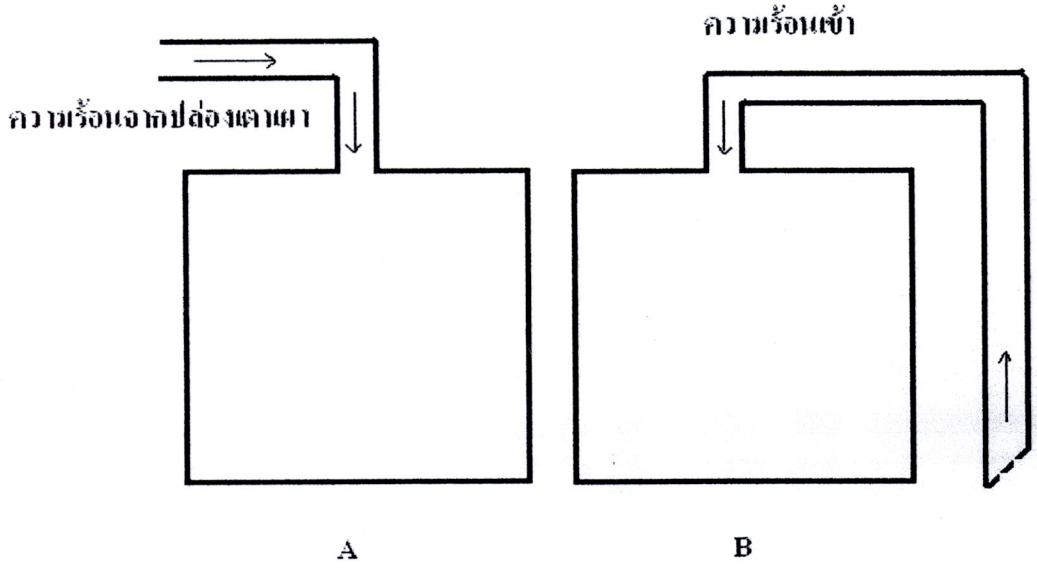
แก๊ส : เป็นเชื้อเพลิงที่บริสุทธิ์ที่สุดในบรรดาเชื้อเพลิงที่เกิดจากการเผาไหม้ เพราะให้เขม่าน้อยมาก สามารถให้ค่าความร้อนสูง สามารถที่จะควบคุมปริมาณความร้อนได้ง่ายที่สุด ทำให้ประสิทธิภาพการอบแห้งที่ดีและสามารถที่จะให้ความร้อนผ่านไปสู่ชิ้นงานได้โดยตรง ทำให้ไม่สูญเสียความร้อนที่จะออกมาสู่ระบบมากเท่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ

ถ่านหิน : ลักษณะคล้ายกับฟืน แต่ให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าและควบคุมได้ง่ายกว่า

2. การกำหนดตำแหน่งของแหล่งให้ความร้อน ตำแหน่งแหล่งจ่ายความร้อนภายในห้องอบสามารถกำหนดในจุดใหญ่ ๆ ได้ 3 จุด คือ

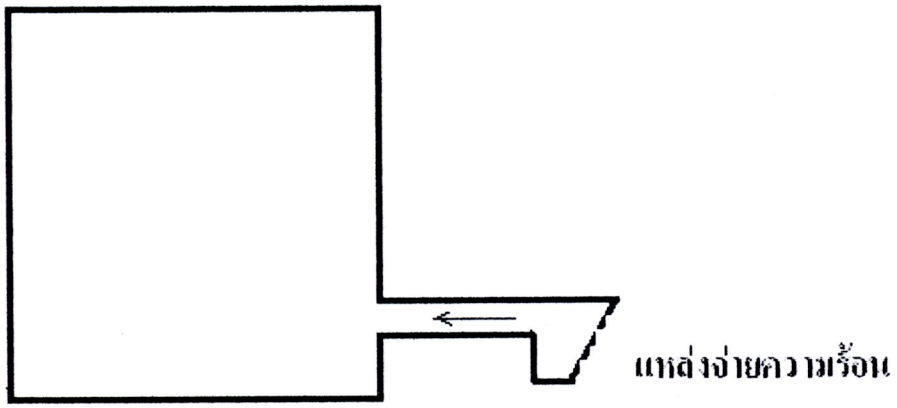
ตำแหน่งหลังคาห้องอบ : ตำแหน่งแหล่งจ่ายความร้อนด้านหลังตู้อบพิจารณาได้ 2 ลักษณะคือ ลักษณะที่ตัวจ่ายความร้อนอยู่ข้างบนโดยตรง ก็จะส่งผ่านความร้อนสู่แหล่งจ่ายความร้อนด้านบนแสดงดังรูปที่ 2.14

ตำแหน่งแหล่งจ่ายความร้อนตรงด้านหลังคาเตาเมื่อพิจารณาแสดงดังรูปที่ 2.14 (A) ชนิดของความร้อนที่ใช้มักจะเป็นความร้อนจากไฟฟ้า ส่วนรูปที่ 2.14 (B) จะทำให้เกิดการสูญเสียความร้อนมากกว่า เนื่องจากต้องมีการส่งผ่านความร้อนทางท่อ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดความสูญเสียออกนอกระบบ แต่ปัญหาที่พบว่าเมื่อวางแหล่งจ่ายความร้อนไว้ส่วนบนจะยุ่งยากในการติดตั้ง



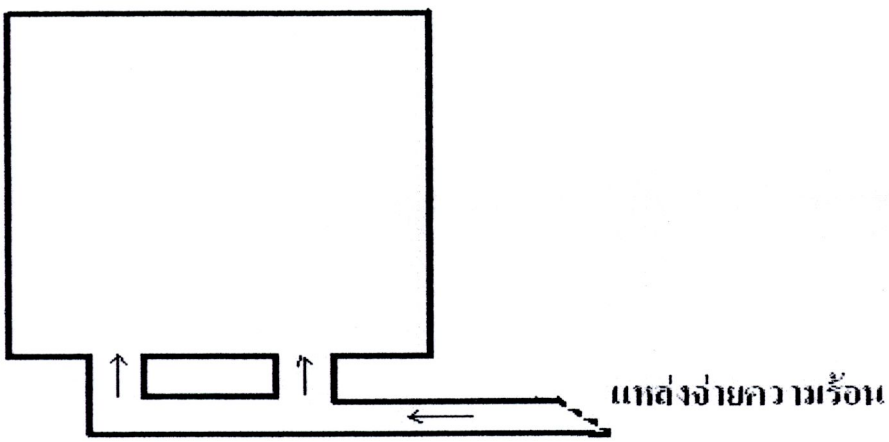
รูป 2.14 แหล่งจ่ายความร้อนเข้าสู่ทางส่วนบนของห้องอบ

ตำแหน่งข้างผนังห้องอบ : การติดตั้งแหล่งจ่ายความร้อนข้างห้องอบจะแสดงในภาพรวมทั้ง 4 ด้าน ซึ่งการติดตั้งจะมีทั้งติดตั้งกับตู้อบหรือติดตั้งห่างจากห้องอบ โดยมีท่อนำความร้อนเข้าสู่ระบบ แสดงดังรูปที่ 2.15



รูป 2.15 ตำแหน่งแหล่งจ่ายความร้อนเข้าสู่ระบบทางด้านข้างห้องอบ

ตำแหน่งข้างล่างห้องอบ : โดยจะมีการติดตั้งแหล่งจ่ายความร้อนทางด้านล่างของห้องอบแห้ง ส่วนมากจะใช้เชื้อเพลิงชนิดที่ไม่มีควันเพราะเป็นการให้ความร้อนเข้าสู่ระบบโดยตรง แสดงดังรูปที่ 2.16



รูป 2.16 ตำแหน่งแหล่งจ่ายความร้อนเข้าสู่ระบบทางด้านล่างห้องอบ

3. อุณหภูมิในการอบแห้ง ในการอบแห้งแต่ละครั้ง อุณหภูมิจะมีความสำคัญมากทั้งควบคุมอัตราการอบและทำให้เกิดการระเหยของน้ำออกจากผลิตภัณฑ์ โดยอุณหภูมิแต่ละช่วงจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบอยู่ที่สภาพต่าง ๆ กันเช่นที่ 30 – 40 องศาเซลเซียส จะเกิดการระเหยของน้ำตรงส่วนผิวชิ้นงานและที่ 60 – 80 องศาเซลเซียส จะเกิดการระเหยของน้ำออกจากเนื้อภายในผลิตภัณฑ์ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ทำให้เกิดความแห้ง แต่ในความเป็นจริงแล้วที่อุณหภูมิทั่วไปก็สามารถทำให้ผลิตภัณฑ์แห้งได้แต่ใช้เวลานาน

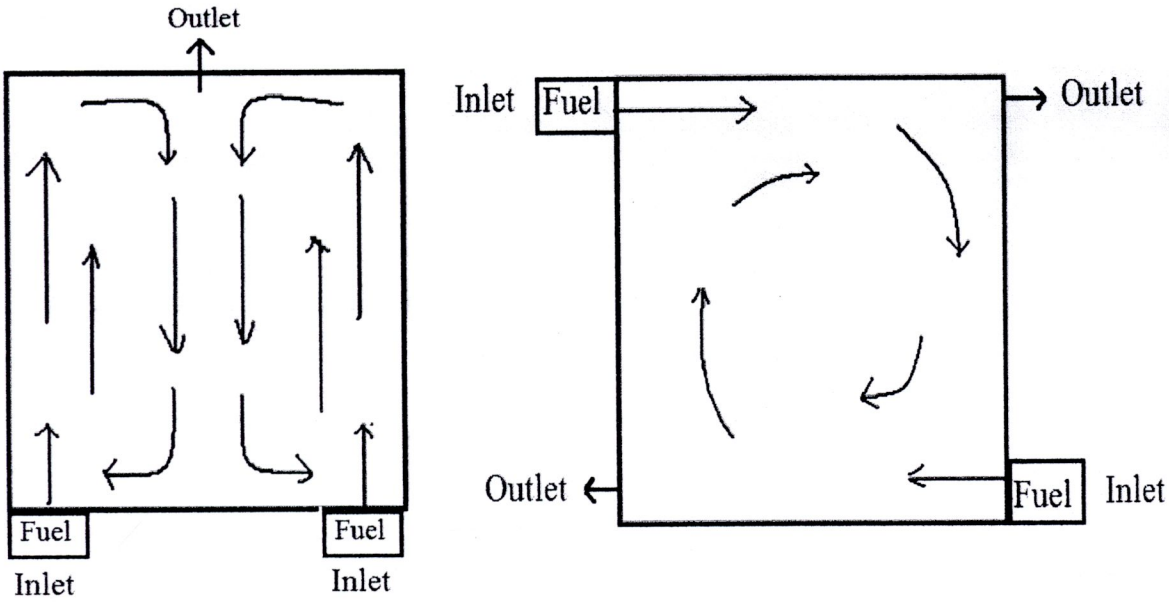
ระบบลมร้อนหมุนเวียน (Hot air circulation system)

ระบบลมร้อนหมุนเวียนได้เข้ามามีบทบาทในการควบคุมการระเหยของน้ำ รวมทั้งเป็นส่วนที่ทำให้การอบแห้งสม่ำเสมอ โดยการใช้ลมร้อนนี้จะช่วยในการกระจายความร้อน ความชื้นและกระจายการระเหยให้เกิดเท่ากันทุกส่วนภายในห้องอบ นอกจากจะเป็นส่วนช่วยกระบวนการอบภายในห้องอบแล้วยังเกี่ยวข้องกับการจ่ายความร้อนและการไล่ความร้อนออกจากห้องอบด้วย

ในการออกแบบห้องอบแห้งแต่ละครั้งจะมีการวางตำแหน่งของช่องทางเดินของลม เพื่อให้เกิดการไหลเวียนและสามารถกระจายได้ทั่วถึง โดยมากมักจะมีการจ่ายกระแสลมไปพร้อมกับความร้อน โดยจะเรียกว่า กระแสลมร้อน ซึ่งจะทำให้ความร้อนไหลและกระจายตัวตามแรงลมที่อัดเข้าไป แต่บางครั้งก็มีการติดตั้งพัดลมอีกตัว โดยจะไม่ต่อเข้ากับแหล่งให้ความร้อน มีเป้าหมายเพื่อ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

ช่วยเพิ่มความสามารถในการกระจายความร้อนให้ดีและรวดเร็วยิ่งขึ้น การติดตั้งตำแหน่งลมร้อนไม่ควรที่จะให้กระแสลมร้อนปะทะกับผลิตภัณฑ์โดยตรง เพราะจะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งล้ม เนื่องจากความแรงของกระแสลมและยิ่งไปกว่านั้นการที่กระแสลมปะทะกับผลิตภัณฑ์โดยตรงนั้น จะทำให้เกิดการระเหยของน้ำบนผลิตภัณฑ์ไม่เท่ากัน ซึ่งบริเวณที่โดนลมร้อนโดยตรงจะเกิดการระเหยมากกว่าเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายคือ การโก่งงอและการแตกหักได้ ดังรูปที่ 2.17



รูป 2.17 ทิศทางการไหลเวียนของลมร้อนในห้องอบ

ระบบระบายความชื้น (Humidity) **และตำแหน่งระบาย**

ในการออกแบบ น้ำที่ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ซึ่งอยู่ในสภาพของไอน้ำจะลอยตัวอยู่ภายในห้องอบ ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปก็ยิ่งมีปริมาณมากขึ้น ในสภาพอากาศที่มีความชื้นสูง การระเหยออกของน้ำจากวัตถุต่าง ๆ ก็จะลดอัตราลงจนไม่มีการระเหยเกิดขึ้นเมื่อเกิดสภาพอิ่มตัวของน้ำ ในสภาพเช่นนี้จะทำให้ผลิตภัณฑ์ที่อบภายในห้องอบไม่แห้ง ซึ่งจะก่อปัญหาได้เมื่ออยู่ในกระบวนการเผา ดังนั้นจึงมีการที่จะระบายความชื้นออก เพื่อให้เกิดกระบวนการอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้

โดยทั่วไปความชื้นจะมีทิศทางการไหลจากที่สูงลงสู่ที่ต่ำในสภาพของไอน้ำหรือจากที่ ๆ มีความดันสูงไปยังที่ ๆ มีความดันต่ำกว่า การระบายความชื้นก็มักจะมีการใช้พัดลมหรือปั๊มลม (blower) ช่วยในการถ่ายเทความชื้นและลมร้อน ซึ่งสามารถกำหนดอัตราการอบแห้งได้และบางครั้งก็จะเปิด-ปิดแผ่นกั้นลมร้อน (damper) ควบคุมปริมาณการระบายได้

การบรรจุเปียกเพื่อการอบแห้ง (Loading of green product)

ในการบรรจุผลิตภัณฑ์เปียกสามารถบรรจุโดยตรงภายในห้องอบหรือแม้แต่การบรรจุในรถที่สามารถลากเข้าออกห้องอบได้สะดวก การบรรจุผลิตภัณฑ์ภายในห้องอบโดยตรงอาจจะยุ่งยากและอาจจะทำให้เกิดความเสียหายได้เพราะเนื่องจากพื้นที่ที่จำกัด ทำให้ไม่สะดวกต่อการจัดวางและอาจจะล่าช้าจากการบรรจุ แต่ถ้าหากใช้รถบรรจุ เป็นการสะดวก เพราะทำให้สามารถบรรจุผลิตภัณฑ์ได้สะดวกและลดปัญหาการเสียหายได้มากกว่า

วิธีการแก้ไขปัญหาการแตกร้าวที่เกิดจากการอบแห้งผลิตภัณฑ์

1. ให้ความร้อนและความชื้นคงที่ในการอบแห้งเพื่อป้องกันการแตกร้าว
2. ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์หนา ๆ ให้ทาไขตรงบริเวณที่แห้งเร็วหรือบริเวณที่มักเกิดรอยร้าว เพื่อยืดเวลาให้แห้งช้าลง
3. วางผลิตภัณฑ์บนแผ่นรองที่มีผิวเรียบ ไม่โค้งงอ
4. เปลี่ยนรูปทรงใหม่ ถ้ามีปัญหาในการแตกร้าวเกินร้อยละ 30
5. เพิ่มวัตถุดิบที่มีความเหนียวเพิ่มขึ้น เช่น ดินเหนียวคุณภาพดี ในกรณีที่ผลิตภัณฑ์แตกหักได้ง่าย

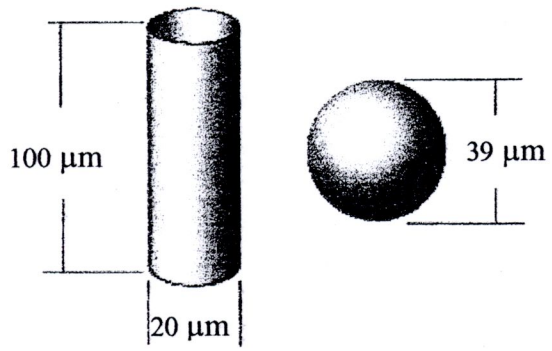
เนื้อดินที่มีปัญหามากต้องระวังให้แห้งช้า ๆ ชิ้นงานในระหว่างการอบแห้งจะต้องไม่บิดเบี้ยวหรือมีรอยแตกร้าวก่อนเผา เพราะหลังจากการเผาจะเห็นการบิดเบี้ยวและรอยแตกร้าวมากขึ้น ไม่ควรวางชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ไว้กลางแจ้งโดนแดดข้างเดียวหรือโดนลมข้างเดียว ชิ้นงานจะเกิดการหดตัวไม่เท่ากัน ควรนำไปไว้ในห้องอบที่ควบคุม ลม ความร้อน และความชื้น เพื่อลดปัญหาบิดเบี้ยวและแตกร้าวก่อนเผา

2.7 การศึกษาลักษณะเฉพาะของวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงาน

2.7.1 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและการกระจายขนาดอนุภาค

(Particle size and particle size distribution) [30]

หลักการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาคแบบการเลี้ยวเบนเลเซอร์ต้องพิจารณาจากรูปร่างของอนุภาค อนุภาคที่มีอยู่ในธรรมชาติส่วนใหญ่จะมีรูปร่างไม่แน่นอน ดังนั้นในการวัดขนาดของอนุภาคสามารถวัดได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมในการหาขนาดอนุภาคในกรณีที่อนุภาคที่มีลักษณะทรงกลม คือ การวัดความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกลม แต่ในกรณีของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (irregular shape) สามารถหาขนาดอนุภาคได้เปรียบเทียบปริมาตรหรือพื้นที่ผิวของอนุภาคที่มีรูปร่างไม่แน่นอนให้สมมูลเทียบเท่ากับของทรงกลมตามทฤษฎี Equivalent spherical theory ดังแสดงรูปที่ 2.18



รูป 2.18 อนุภาคที่มีรูปทรงกระบอกและทรงกลม

ในการหาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคสามารถหาได้หลายวิธีขึ้นกับฐานการคำนวณ เช่น กำหนดให้มีอนุภาคอยู่ 3 ขนาด โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 1 , 2 และ 3 ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่าขนาดของอนุภาคเฉลี่ยได้หลายวิธีตามฐานการคำนวณ แสดงดังต่อไปนี้

$$D_{[1,0]} = \frac{1+2+3}{3} = 2.00 \qquad D_{[2,1]} = \frac{1+4+9}{1+2+3} = 2.33$$

$$D_{[2,0]} = \sqrt{\frac{1+4+9}{3}} = 2.16 \qquad D_{[3,1]} = \sqrt{\frac{1+8+27}{1+4+9}} = 2.45$$

$$D_{[3,0]} = \sqrt[3]{\frac{1+8+27}{3}} = 2.29 \qquad D_{[3,2]} = \frac{1+8+27}{1+4+9} = 2.57$$

$$D_{[4,3]} = \frac{1+16+81}{1+8+27} \quad 2.72$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลียของขนาดอนุภาคตามฐาน $D_{[4,3]}$ Volume mean diameter ซึ่งใช้หาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนเลเซอร์

$$D[4,3] = \frac{1^4+2^4+3^4}{1^3+2^3+3^3} = \frac{1+16+81}{1+8+27} = 2.72 = \frac{\Sigma d^4}{\Sigma d^3}$$

เมื่อ d^4 ขนาดอนุภาค โดยพื้นที่และ d^3 ขนาดอนุภาคโดยปริมาตร

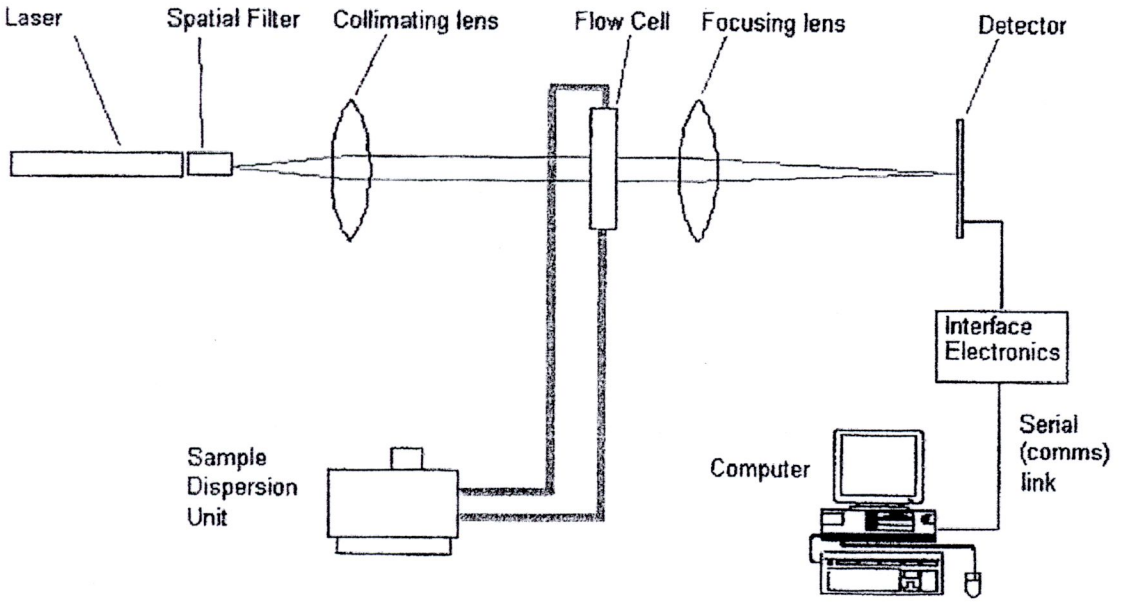
จะพบว่าการคำนวณในฐานที่แตกต่างกันจะให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกัน โดยเทคนิคในการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคแต่ละวิธีจะให้ค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคแตกต่างกันไปดังนี้

$D_{[1,0]}$ Number mean ใช้หาค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคโดยเทคนิคการใช้กล้องจุลทรรศน์ (Microscopy)

$D_{[2,0]}$ Number surface mean	ใช้หาค่าเฉลี่ยของอนุภาคโดยเทคนิค Image analysis
$D_{[3,0]}$ Number volume mean	ใช้หาค่าเฉลี่ยของอนุภาคโดยเทคนิค Electrozone sensing
$D_{[4,3]}$ Volume mean diameter	ใช้หาค่าเฉลี่ยของอนุภาคโดยเทคนิค Laser diffraction

เทคนิคการเลี้ยวเบนของแสง (Laser diffraction)

เทคนิคนี้อาศัยหลักการของการเลี้ยวเบนของแสง (แหล่งกำเนิดเลเซอร์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ เลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน (He-Ne gas laser) ซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 0.63 ไมครอน) เมื่อมีอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในตัวกลางผ่านลำแสงชั่วระยะเวลาหนึ่ง โดยการใช้สมมติฐานของฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer approximation) ความเข้มของแสงที่เกิดการเลี้ยวเบนมีความสัมพันธ์กับปริมาณของอนุภาคในแต่ละขนาด แต่มุมเลี้ยวเบนกลับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของอนุภาค การใช้ตัวกรองแสง เลนส์ และตัวตรวจจับทางแสง ร่วมกับคอมพิวเตอร์ ดังแสดงรูปที่ 2.19 ช่วยให้สามารถประมวลผลจากข้อมูลการเลี้ยวเบนเป็นการกระจายตัวของขนาดอนุภาคได้ เทคนิคนี้ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของวัสดุทดสอบ สิ่งหนึ่งที่ต้องระลึกอยู่เสมอคืออนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินช่วงความสามารถของเครื่องตรวจจับจะไม่ได้รับการบันทึก



รูป 2.19 แบบจำลองของเครื่องวัดขนาดอนุภาคด้วยการเลี้ยวเบนเลเซอร์ [31]

2.7.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่และองค์ประกอบทางเคมี

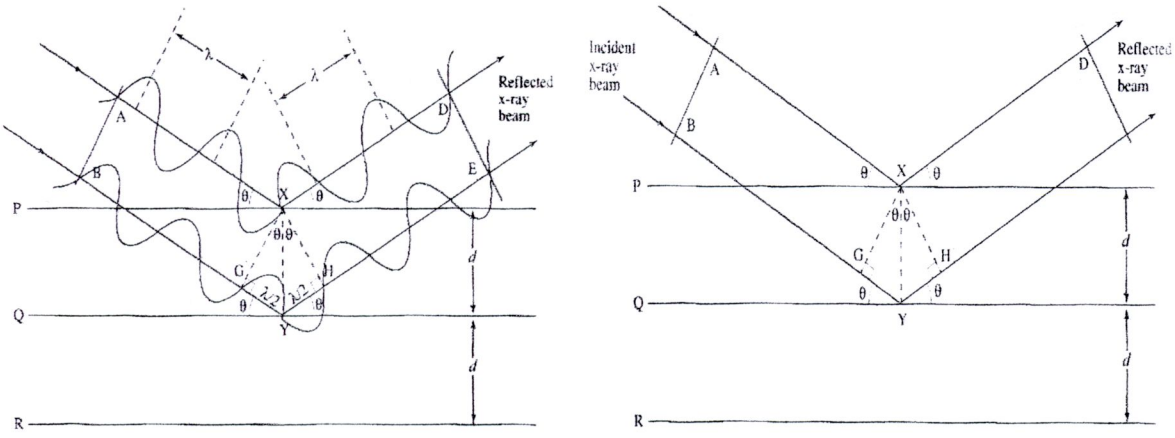
การวิเคราะห์องค์ประกอบทางแร่ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

(X-ray diffraction ; XRD)

หลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [32]

ในช่วงก่อนที่ X – ray ได้ถูกค้นพบ ความรู้ในเรื่องโครงสร้างภายในของๆ แข็งมีน้อยมาก อย่างไรก็ตามความเป็นระเบียบของรูปร่างภายนอกทำให้นักวิทยาศาสตร์เชื่อว่า โครงสร้างภายในของผลึกก็น่าจะเป็นระเบียบด้วย นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ Max Von Laue ได้ให้เหตุผลไว้ว่าถ้าผลึกที่ประกอบด้วยอะตอมเป็นแถวอย่างเป็นระเบียบเมื่ออยู่ใน 3 มิติจะทำให้มันสามารถเลี้ยวเบนรังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ เช่น X – ray ได้

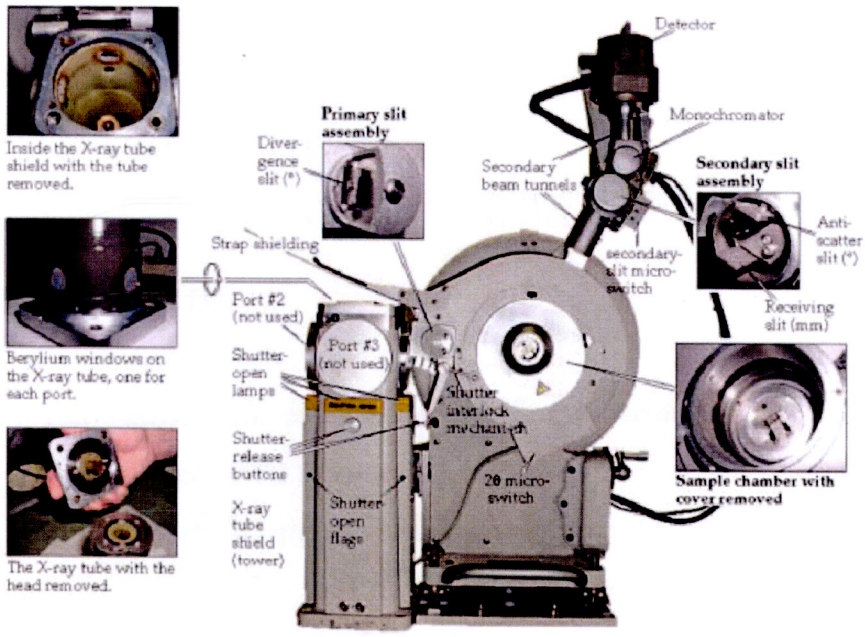
ในปี 1912 Von Laue ได้เอาผลึกของ $CuSO_4$ ไปวางไว้ระหว่าง X – ray source กับแผ่นฟิล์ม ปรากฏว่าตรงกลางของแผ่นฟิล์มเป็นจุดสว่างเนื่องจาก X – ray beam ผ่านทะลุออกไป จุดที่อยู่รอบๆ ของจุดกึ่งกลางจะมีการจัดแบบมีระเบียบ จุดเหล่านี้เกิดจาก X – ray beam เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) Von Laue ได้สร้างสมการเพิ่มเติมจากหลักการของ 3 มิติเกรติง (3dimensional grating) สมการนี้ได้แสดงถึงมุมของการเลี้ยวเบนในรูปเทอมของระยะห่างระหว่างอะตอมกับความยาวคลื่นของ X – ray และได้นำความสนใจของ W.H. Bragg และบุตรชาย W.L. Bragg ที่ประสบความสำเร็จในการใช้ X-ray diffraction หาโครงสร้างของผลึกต่างๆ โดยใช้หลักการสะท้อน (Reflection) ของ X-ray ด้วยระนาบของอะตอม



รูป 2.20 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [33]

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบผิวหน้าของผลึกโดยทำมุม θ บางส่วนของรังสีเอกซ์จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของลำรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นที่ 2 ของอะตอม ซึ่งบางส่วนก็เกิดการกระเจิง และส่วนที่เหลือก็ผ่านเข้าไปยังชั้นที่ 3 ของอะตอม ดังรูปที่ 2.20

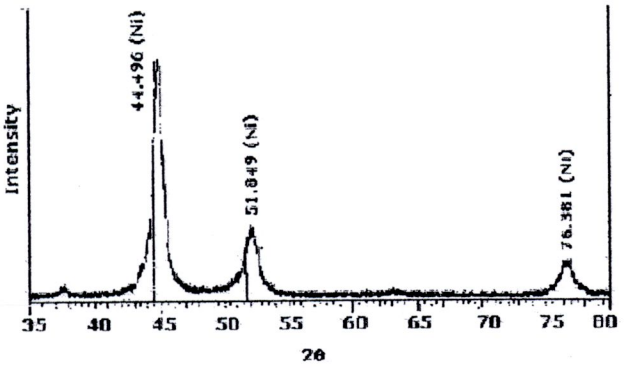
ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน



รูป 2.21 ส่วนประกอบภายนอกของเครื่อง XRD [34]

หลักการทำงานของเครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน

หลักการทำงานของเครื่อง X-ray diffraction เริ่มจากหม้อแปลงกระแสไฟฟ้าแรงสูง (high tension transformer) ทำหน้าที่ปล่อยกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังขั้วแคโทดทำให้ไส้ร้อนขึ้น อิเล็กตรอนไปจับกันหนาแน่นบริเวณไส้ ดังนั้น ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนดเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อิเล็กตรอนวิ่งเข้าชนเป้า (target) ที่ขั้วแอโนด มีการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาผ่านทางหน้าต่างที่ทำด้วยแบริลเลียม (Be window) หลอดรังสีเอ็กซ์ส่วนใหญ่ที่นิยมใช้ Cu ทำเป็นขั้วแอโนด ซึ่งให้ค่าความยาวคลื่น (λ) 1.542 อังสตรอม มีทั้ง K_a และ K_β ในการวิเคราะห์ต้องใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว (monochromatic x-ray) ดังแสดงในรูปที่ 2.21 ดังนั้นจึงต้องใช้แผ่นกรองเบต้า เพื่อกำจัด K_β ให้เหลือเพียง K_a เพียงอย่างเดียวหลังจากนั้น รังสีเอกซ์ K_a จะถูกบีบให้แคบลงโดยไดเวอร์เจนสลิต ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านไดเวอร์เจนสลิตจะตกกระทบลงบนตัวอย่างซึ่งติดไว้กับแกนของโกนิโอมิเตอร์ (goniometer) รังสีที่สะท้อนกลับจากตัวอย่างจะผ่านไปยังรีซีฟวิงสลิต และเข้าไปยังหน่วยรับสัญญาณเพื่อแปลงสัญญาณออกมาในรูปดิฟแฟรกโตแกรม (diffractogram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุม 2θ และค่าความเข้มของรังสี แสดงในรูปที่ 2.22



รูป 2.22 ดิฟแฟรกโตแกรม [35]

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

(X-ray fluorescence ; XRF) [36]

เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายสารเช่นเดียวกับ XRD แต่เป็นการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งธาตุเดียว ๆ ทีละธาตุ (sequencial) หรือวิเคราะห์หลายธาตุพร้อม ๆ กัน (simultaneous) และยังสามารถนำไปวิเคราะห์ทางเคมีได้แทบทุกชนิดของสารตัวอย่างในระดับความเข้มข้นสูงถึงระดับความเข้มข้นต่ำ บางครั้งสามารถวิเคราะห์ได้ถึงระดับ ppm ซึ่งง่ายและทำได้รวดเร็ว

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF มี 2 ระบบ คือ

1. ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (Wavelength dispersion system)
2. ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (Energy dispersion system)

ระบบที่วัดเป็นความยาวคลื่น (Wavelength dispersion system)

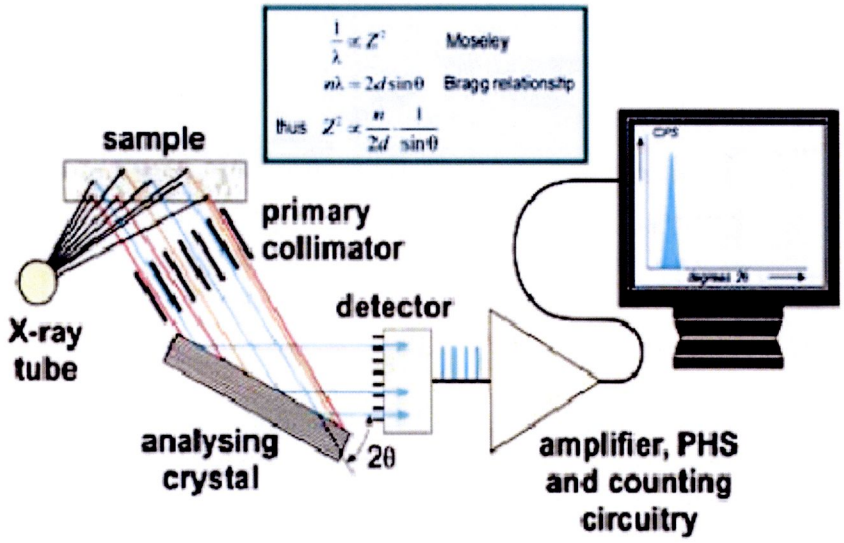
ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง XRF ชนิด Wavelength dispersion system ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ 3 ส่วน ได้แก่

1. X-Ray Generator
2. Spectrometer
3. Data system

หลักการทำงานของเครื่อง XRF ชนิด Wavelength dispersion system

ในการวิเคราะห์สารด้วยเทคนิค XRF ชนิด Wavelength dispersion system เริ่มจาก ลำรังสีเอกซ์ที่ได้จากเครื่อง X-Ray generator (ซึ่งมีหลอดรังสีเอกซ์อยู่) จะถูกส่งไปยังสารตัวอย่าง เพื่อให้เกิดอันตรกิริยากับธาตุต่าง ๆ ในสารตัวอย่าง แล้วเกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ขึ้น ให้เอ็กซ์เรย์ผ่านคอลลิเมเตอร์ (collimators) เพื่อทำให้ลำรังสีเอกซ์เป็นลำขนานและไปในทิศทางที่ต้องการ คือ ไปกระทบกับ Analyzing crystals ซึ่งอยู่ในสเปกโทรมิเตอร์ที่ทำให้เป็นสุญญากาศ

หรือความกดดันต่ำมาก ๆ Analyzing crystals นี้จะทำหน้าที่กระจายหรือแยกรังสีเอกซ์ออกให้มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน คล้ายกับเกรตติงที่ทำหน้าที่แยกแสงในเครื่อง UV-VIS spectroscopy รังสีเอกซ์ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน จะถูกวัดความเข้ม 13 หรือกำลัง (power) ด้วยการสแกน (scan) ของ Detector สัญญาณที่วัดได้จะถูกส่งไปยังเครื่องเก็บข้อมูลแล้วแสดงออกมาเป็นสเปกตรัมด้วยเครื่อง Printer หรือ Recorder แสดงดังรูปที่ 4.23 จากข้อมูลที่เก็บได้ทั้งของสารมาตรฐานและสารตัวอย่าง สามารถนำมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพและปริมาณได้



รูป 2.23 องค์ประกอบของเครื่อง XRF ชนิด Wavelength dispersion system [37]

ระบบที่วัดเป็นพลังงาน (Energy dispersion system)

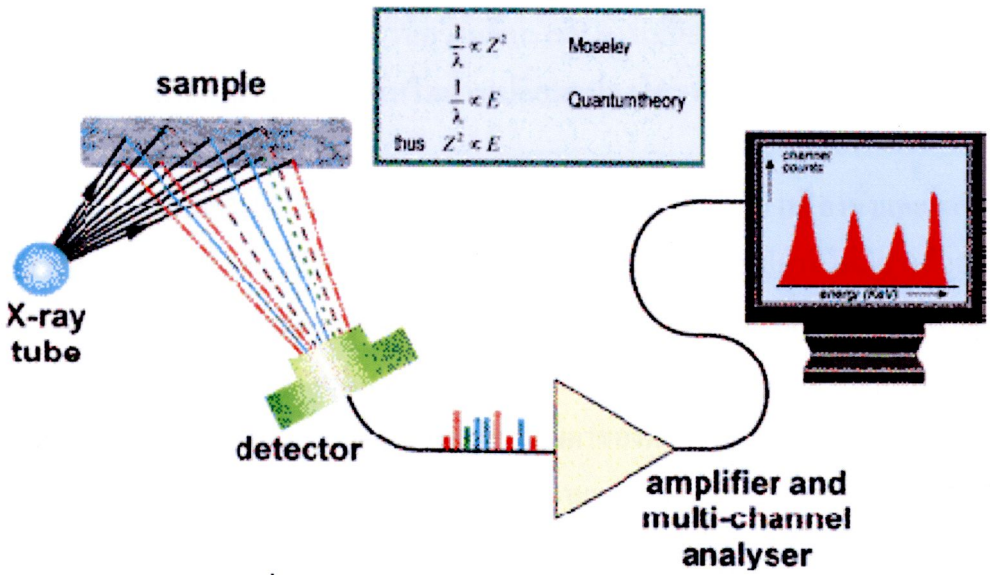
ลักษณะและองค์ประกอบของเครื่อง XRF ชนิด Energy dispersion system เครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ชนิด Energy dispersion system มีหลายส่วนที่คล้ายกับ ชนิด Wavelength dispersion system แต่ในระบบนี้สามารถใช้ธาตุกัมมันตรังสีเป็นตัวที่ทำให้เกิดเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ตามความต้องการ

ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ ชนิด Energy dispersion system

1. หัววัด ซึ่งเป็น Si (Li) หรือ Ge (Li)
2. Detector power supply
3. ระบบ Cooling ซึ่งเป็นไนโตรเจนเหลว เพื่อทำให้ Detector เย็น
4. แหล่งผลิตเอกซ์เรย์ (X-Ray source) ซึ่งอาจใช้ X-Ray Generator หรือ Radioisotope
5. Pre-Amplifier และ Amplifier ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้สามารถวัดได้

6. Multichannel analyzer (MCA) ทำหน้าที่รวบรวมสัญญาณที่ได้จาก Detector และทำการแยกขนาดของพลังงาน โดยพลังงานต่ำ ๆ จะอยู่ในช่อง (channel) ต้น ๆ แต่ถ้าพลังงานสูงขึ้นก็จะถูกเก็บไว้ในช่องที่สูงขึ้น จากนั้นนำสัญญาณที่รวบรวมไปพล็อตกราฟระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์ที่วัดได้กับจำนวนช่องของเครื่อง MCA จะได้เอกซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์สเปกตรัม

7. Data system ประกอบด้วย Computer และ Software เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง เก็บข้อมูลและผลการวิเคราะห์ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์อาจพิมพ์ออกมาโดยใช้ Printer หรือ Plotter ก็ได้ แสดงดังรูปที่ 2.24



รูป 2.24 ส่วนประกอบของเครื่อง XRF ชนิด Energy dispersion system[37]

2.7.3 การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงความร้อน [38]

- **เทคนิคการวิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมทริก TGA** (Thermal gravimetric analysis)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปหลังการเผา การประมวลผลจะแสดงค่าเป็นน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง ณ ช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปนี้อาจเป็นน้ำหนักจริงหรือเป็นน้ำหนักร้อยละเมื่อเทียบกับน้ำหนักเริ่มต้นก็ได้ การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักของสารเมื่อถูกเผาอาจเกิดจากทั้งการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพเช่น การระเหยของความชื้นหรือทางเคมี เช่นการสลายตัวของโครงสร้างผลึก เช่นการเปลี่ยนจากเคโอลิไนต์เป็นเบต้าเคโอลิน โดยการขจัดกลุ่มไฮดรอกซิลออกไป

เครื่อง TGA โดยทั่วไปประกอบด้วยเตาเผาขนาดเล็ก (furnace) เครื่องชั่ง (balance) และภาชนะสำหรับใส่สารที่จะวิเคราะห์(sample pan) มักจะทำจากสารที่มีเสถียรภาพทางความร้อน เช่น อะลูมินา หรืออาจเป็นโลหะที่ทนความร้อนสูง เช่น ทองคำขาว เป็นต้น ในการวิเคราะห์จะใช้

ปริมาณเพียงเล็กน้อยในระดับมิลลิกรัมเท่านั้น ใส่ลงไปในภาชนะรองรับ ปิดผา เพื่อกันการกระเด็นของสารและเจาะรูเพื่อแก๊สที่เกิดขึ้นสามารถหนีออกไปได้ การทดลองอาจทำภายใต้บรรยากาศปกติ หรือภายใต้บรรยากาศออกซิเจนหรือแก๊สเฉื่อย

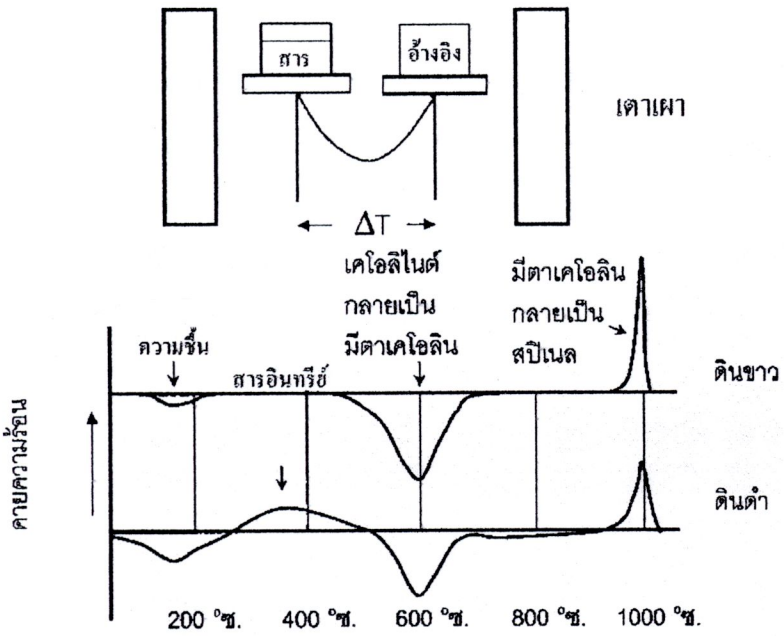
- **เทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอล DTA** (Differential thermal analysis)

เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของสาร ณ อุณหภูมิต่าง ๆ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารรวมอยู่ด้วยเช่น การระเหยของความชื้น การสลายตัวจากโครงสร้างผลึกเคโอลิไนต์เป็นเบต้าเคโอลิน การเผาไหม้ของสารอินทรีย์ หรืออาจจะมีเฉพาะการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน เช่น การเปลี่ยนโครงสร้างของสารอัญรูป เช่น แอลฟาควอตซ์กลายเป็นบีตาควอตซ์หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเบต้าเคโอลินเป็นสปิเนล เป็นต้น

เครื่อง DTA โดยทั่วไปประกอบด้วยเตาขนาดเล็ก 2 เตาที่เหมือนกัน เครื่องชั่งและภาชนะสำหรับใส่สารที่จะวิเคราะห์และตัวอ้างอิง ซึ่งมักเป็นภาชนะสำหรับใส่สารเปล่าที่ไม่มีสารตัวอย่างอยู่ โดยหลักการคือทั้งตัวอ้างอิงและภาชนะที่มีสารตัวอย่างจะได้รับความร้อนจากเตาไปพร้อม ๆ กัน เมื่อถึงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนในสารตัวอย่าง เช่น การดูดความร้อนจะทำให้อุณหภูมิในเตาที่มีสารตัวอย่างต่ำกว่าอุณหภูมิในเตาของตัวอ้างอิงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน (ΔT) ระบบประมวลผลจะทำการบันทึกความแตกต่างนี้และรายงานค่าที่แตกต่าง ณ อุณหภูมิที่เกิดขึ้น สำหรับดินที่มีแร่เคโอลินไนต์ เป็นพื้นฐานจะมีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญคือ

1. ปฏิกิริยาดูดความร้อนที่อุณหภูมิในช่วง 550 – 650 องศาเซลเซียส เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาการขจัดกลุ่มไฮดรอกซิล (dehydroxylation) ของแร่เคโอลินไนต์ในขั้นนี้จะมีการสูญเสียมวลสารร่วมด้วย
2. ปฏิกิริยาคายความร้อนที่ประมาณ 900 องศาเซลเซียส เนื่องจากเบต้าเคโอลินเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างกลายเป็นสปิเนล ขั้นตอนนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงมวลสาร
3. ปฏิกิริยาคายความร้อนที่ประมาณ 1100 องศาเซลเซียสเนื่องจากสปิเนลเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างเป็นมัลไลต์

ถ้าหากดินที่นำมาวิเคราะห์เป็นดินดำหรือดินเหนียว มักมีสารอินทรีย์มาก มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าดินขาว เราจะเห็นปฏิกิริยาดูดความร้อนในการระเหยของน้ำที่เกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคอย่างชัดเจน นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นการคายความร้อนเนื่องจากการออกซิเดชันของสารอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 300 – 500 องศาเซลเซียสอีกด้วย แสดงดังรูปที่ 2.25



รูป 2.25 (ภาพบน) แสดงหลักการของเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอล (ภาพล่าง) ผลการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนของตัวอย่างดินขาวและดินดำ สังเกตว่าดินขาวจะมีผลึกของแร่เคโอลินไนต์ที่สมบูรณ์กว่าและปริมาณมากกว่าดินดำ โดยดูการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนจากเคโอลินไนต์เป็นเบต้าเคโอลินไนต์และเบต้าเคโอลินไนต์กลายเป็นสปิเนล

2.8 การศึกษาสมบัติของอิฐก่อสร้างสามัญ

2.8.1 ความหนาแน่นรวม (Bulk density) [39]

ความหนาแน่น (density) คือ ความหนาแน่นของวัสดุที่สามารถทดสอบทดลองหาค่าได้จริงๆ จากอัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรของสาร ทั้งของแข็งและของเหลว เนื่องมาจากแต่ละโมเลกุลของสารจะมีมวลคงที่ไม่ว่าจะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลวและก๊าซ ความหนาแน่นรวม (bulk density) เป็นสมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของวัสดุ ความหนาแน่นรวมของวัสดุปริมาณมวล (bulk material) ซึ่งเป็นความหนาแน่นที่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุต่างจากความหนาแน่นเนื้อ (solid density) เป็นความหนาแน่นของชิ้นวัสดุ แต่ละชิ้นไม่รวมที่ว่างระหว่างชิ้นวัสดุ ดังนั้นความหนาแน่นรวม จะมีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นเนื้อเสมอ

2.8.2 การหาค่าความชื้น (Moisture content) [40]

ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบ เป็นตัวสำคัญในการพิจารณา เพราะว่ามีการเปลี่ยนแปลงมากแม้จะเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากองค์ประกอบหลายอย่างเช่น

1. สภาวะการขนส่งและการบรรจุ
2. ธรรมชาติทางเคมีและกายภาพของวัตถุดิบ

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

น้ำในวัสดุมีหลายชนิด (1) น้ำที่เกาะติดกับวัสดุ (Mechanical water)
(2) น้ำที่ประกอบอยู่ในวัสดุ (water of constitution) ซึ่งเป็นน้ำที่เป็นส่วนหนึ่งในโมเลกุล เช่น น้ำในอะลูมินาไฮดรอกไซด์ ($Al_2O_3.3H_2O$) หรือน้ำผลึกในบอแรกซ์ ($Na_2B_4O_7.10H_2O$)น้ำที่ประกอบอยู่ในวัสดุปกติจะมีค่าคงที่สำหรับวัสดุชนิดหนึ่ง ๆ แต่ก็อาจเปลี่ยนแปลงไปได้ในสารบางอย่าง เช่น ในบอแรกซ์ที่กล่าวมาแล้ว น้ำที่เกาะติดอยู่ในวัสดุคือน้ำหรือความชื้นบนพื้นผิวหรือน้ำระหว่างอนุภาควัสดุ ถ้าวัสดุอยู่ที่อุ่นและสถานที่แห้ง วัสดุจะสูญเสียน้ำที่เกาะอยู่กับวัสดุ และถ้าวัสดุอยู่ในที่ชื้น วัสดุอาจดูดน้ำเข้าตัว ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่าน้ำที่เกาะติดอยู่กับวัสดุจะมีปริมาณที่ไม่แน่นอน

การหาปริมาณน้ำที่เกาะติดกับวัสดุนี้ หรือบางกรณีการหาน้ำผลึก ทำโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างวัสดุนำไปเข้าอบที่อุณหภูมิ 110 °C (230 °F) จนกระทั่งน้ำหนักคงที่ น้ำหนักหายไปคือน้ำหนักของน้ำในตัวอย่าง เปอร์เซ็นต์ความชื้นของวัสดุอาจให้ขึ้นกับน้ำหนักก่อนอบและหลังอบ นิยมให้ขึ้นกับน้ำหนักหลังอบ [41]

ถึงแม้เมื่อสัมผัสด้วยมือว่ามีความแห้งดี แต่ในดินนั้นก็ยังมีปริมาณความชื้นอยู่ ในการซื้อวัตถุดิบหรือดินทุกครั้ง จะมีค่าความชื้นอยู่ในระดับหนึ่งเสมอ ถ้ามีมากเกินไปผู้ซื้อต้องจ่ายเงินแพงขึ้นเพราะซื้อขายโดยน้ำหนัก การทดสอบความชื้นของวัตถุดิบทุกชนิดที่ใช้ในการเตรียมเนื้อดินทุกวัน ถือเป็นงานประจำของโรงงาน ก่อนที่จะนำวัตถุดิบไปผสมเพื่อเตรียมเนื้อดินตามอัตราส่วน หรือเพื่อการทดสอบเนื้อดินที่เตรียม ให้มีความชื้นพอเหมาะในการขึ้นรูปวิธีต่าง ๆ

2.8.3 การทดสอบค่าความแข็งแรง (Strength) [42]

- **ความเค้นแรงดัดโค้ง** (Bending strength or Modulus of rupture)

การทดสอบค่าความแกร่งแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

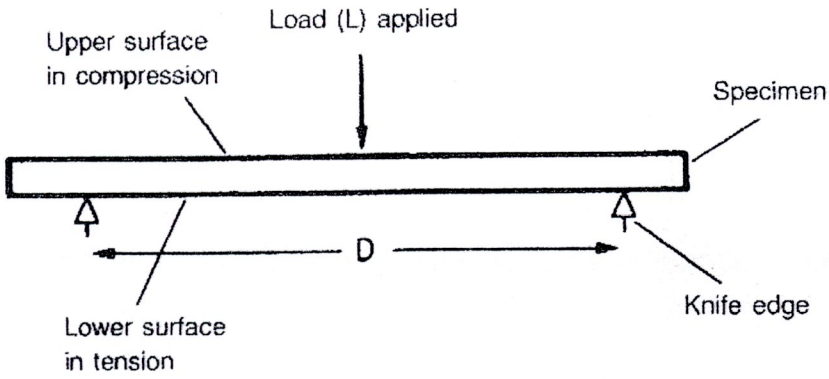
1. การทดสอบความแกร่งก่อนเผา (green strength)
2. การทดสอบความแกร่งหลังการเผา(fired strength)

การทดสอบความแกร่งก่อนเผา

การทดสอบความแกร่งก่อนเผาเป็นการหาค่าความเหนียวและความละเอียดของเนื้อดินทางอ้อม เนื้อดินที่มีความละเอียดมากจะมีความแกร่งสูง ดินที่ขุดพบในแหล่งใหม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกับมาตรฐานเดิม ถ้ามีผลใกล้เคียงมากก็สามารถนำมาใช้แทนกันได้อย่างปลอดภัย

การเตรียมตัวอย่างเพื่อการทดสอบจะต้องทำตามกรรมวิธีการผลิตด้วย ตัวอย่างเช่น ดินที่ปั้นด้วยมือ ควรอัดแท่งทดสอบด้วยมือ ดินเครื่องสุขภัณฑ์ที่เป็นดินหล่อ ควรเทแท่งทดสอบด้วยวิธี

หล่อน้ำดิน และเนื้อดินสำหรับอัดกระเบื้อง แท่งทดสอบก็ควรใช้วิธีอัดด้วยแรงดันสูงใกล้เคียงกัน เพื่อผลการทดลองที่ได้มาตรฐาน



รูป 2.26 แผ่นทดสอบวางบนลิ่มปลายแหลม 2 จุด และแรงกดทางด้านบนของแผ่นทดสอบ

ตารางที่ 2.3 แสดงความแกร่งของเนื้อดินชนิดต่าง ๆ ก่อนเผา

ความแกร่งของเนื้อดินก่อนเผา (MOR)		
เนื้อดิน	**ปอนด์ / ตร.นิ้ว**	**กก. / ตารางซม.**
เอิร์ทเทนแวร์	450 – 650	32 – 46
สโตนแวร์	600	56
โบนไชน่า	350 – 450	25 – 32
กระเบื้องบุผนัง	300	21

การทดสอบความแกร่งหลังการเผา

แผ่นทดสอบที่ขึ้นรูปด้วยวิธีต่าง ๆ เมื่อนำไปเผาพร้อมผลิตภัณฑ์ จากตารางการเผาจริงเสร็จแล้ว ให้นำมาทดสอบความแกร่งหลังการเผาได้ ความแข็งแกร่งของเนื้อดินภายหลังการเผาอาจจะมีน้ำเคลือบ หรือไม่มีน้ำเคลือบก็ได้ แต่ต้องทำตามขั้นตอนตามมาตรฐานเดิม เพื่อการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในครั้งก่อน ๆ

- **ความเค้นต่อแรงอัด**(Compressive strength) [43]

Compressive strength คือ ความแข็งแรงของวัตถุที่สามารถทนได้ เมื่อถูกกระทำด้วยแรงกดหรือแรงอัด (compression) จนกระทั่งปริมาณ แรงขนาดหนึ่งวัตถุทนไม่ได้และเกิดการยุบตัวหรือแตกหักในที่สุด

แรงเค้นอันเกิดจากแรงอัดที่ให้กับชิ้นงานทดสอบ ซึ่งทำให้ชิ้นงานเกิดการหดตัวหรืออัดตัวภายใต้แรงอัดนั้น ชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดนี้ต้องมีลักษณะสั้นและมีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าความยาว เนื่องจากการทดสอบแรงอัดกับชิ้นทดสอบที่มีความยาวจะเกิดการโค้งงอด้านข้าง ซึ่งมีรูปแบบการเกิดไม่แน่นอนจากการเสียรูปแบบยืดหยุ่น โดยปกติชิ้นทดสอบที่ใช้ในการทดสอบแรงอัดมักเตรียมเป็นทรงกระบอก อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของชิ้นทดสอบต้องพิจารณาอย่างระมัดระวัง เนื่องจากความคงรูปของชิ้นทดสอบจะลดลง ความสูงหรือความยาวของชิ้นงานจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน ถ้าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางค่อนข้างน้อยจะทำให้ความแข็งแรงปรากฏของชิ้นงานเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากแรงเสียดทานระหว่างหน้าสัมผัสของชิ้นงานกับแท่งทดสอบ ซึ่งหน้าสัมผัสนี้จะทำให้ชิ้นทดสอบไม่สามารถเลื่อนได้ตลอดหน้าสัมผัส ทำให้เหมือนว่าวัสดุมีความแข็งอัดเพิ่มขึ้น

2.8.4 การศึกษาโครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

(Scanning electron microscope ; SEM) [44]

เป็นเทคนิคที่เกิดจากการคิดค้นเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพในการมองเห็นวัตถุของกล้องจุลทรรศน์ให้สามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพได้มากขึ้นกว่าเดิม โดยการประยุกต์นำเอาอิเล็กตรอน ที่มีช่วงคลื่นสั้นกว่าคลื่นแสงมาใช้แทนคลื่นแสงและใช้เลนส์สนามไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่จะมาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นก็จะมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ให้เป็นสัญญาณภาพที่ปรากฏบนจอรับภาพต่อไป เทคนิคนี้มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขา เช่น วัสดุศาสตร์ ไมโครอิเล็กทรอนิกธรณีวิทยา ชีววิทยา และการแพทย์ ซึ่งมีจุดเด่นที่สำคัญ 3 ประการ ได้แก่

1. สามารถให้ภาพที่มีความชัดลึกสูง (High depth of field)
2. สามารถให้กำลังแยกแยะเชิงสูง (High spatial resolution)
3. สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy dispersive spectrometry (EDS) และ Wavelength dispersive spectrometry (WDS) เพื่อเป็นข้อมูลเชิงเคมี โดยเครื่องมือที่ใช้เรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope)

ส่วนประกอบของ SEM

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูป 2.28 และมีส่วนประกอบสำคัญอยู่ในท่อสุญญากาศ โดยหน้าที่ของส่วนประกอบแต่ละอันมีรายละเอียดดังนี้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบปืนอิเล็กตรอน (electron gun) โดยทั่วไปใช้ขดลวดทังสเตน อิเล็กตรอนที่ใช้ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด คือ อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

2. เลนส์รวมแรง (condenser lens) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนมีขนาด และความเข้มข้นเหมาะสมกับตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดที่สุดที่กำลังขยายที่ต้องการ การลดขนาดของลำอิเล็กตรอนจะช่วยเพิ่มขนาดของกำลังขยาย

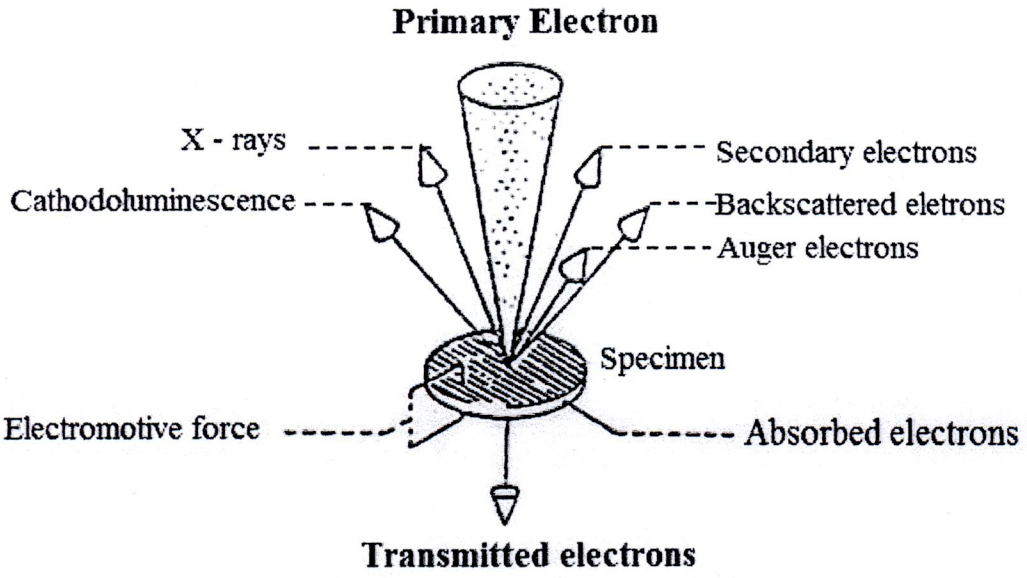
3. ขดลวดสำหรับการส่องกราด (scanning coil) ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนเคลื่อนในแนวนอนและแกนตั้งบนระนาบของตัวอย่าง

4. เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นเลนส์ที่ทำให้อิเล็กตรอนเกิดภาพขั้นต้น อาศัยอำนาจสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก สามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายความคมชัดของภาพได้ โดยการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าในขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

5. ตัวตรวจวัดอิเล็กตรอน (detector) ตัวเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าหรือสัญญาณภาพ โดยเก็บสัญญาณแต่ละจุดจากปลายอิเล็กตรอน ปรากฏเป็นภาพบนจอภาพ

หลักการทำงานของ SEM

เมื่อจากการผ่านลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ภายใต้ภาวะสุญญากาศ ผ่านชุดเลนส์รวมแสง (condenser lens) ซึ่งทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอน(electron beam)ให้มีขนาดแคบลง เพื่อเป็นการเพิ่มความเข้มของอิเล็กตรอนจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะวิ่งสู่เบื้องล่างผ่านเลนส์วัตถุ (objective lens) ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับลำอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้มีจุดโฟกัสบนผิวตัวอย่างพอดี และลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบผิววัตถุหรือตัวอย่างจะมีขนาดในช่วง 5 ถึง 200 นาโนเมตร โดยมีชุดขดลวดควบคุมการส่องกราด (scanning coil) ของลำอิเล็กตรอน ทำหน้าที่ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนบนพื้นผิวที่ระดับต่างๆทำให้เกิดการปลดปล่อยสัญญาณชนิดต่างๆ ออกมา ดังแสดงในรูป 2.27



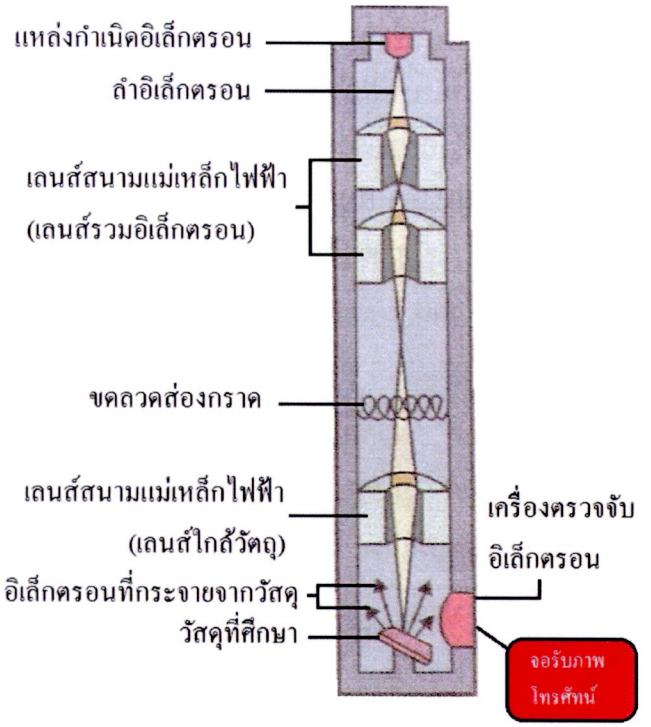
รูป 2.27 การเกิดอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง[45]

สัญญาณที่ได้จากสัญญาณอิเล็กตรอนชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้น คือ

1. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนพลังงานต่ำประมาณ 3-5 อิเล็กตรอนโวลต์ เกิดที่ผิวระดับไม่ลึก (ไม่เกิน 10 นาโนเมตร) โดยเกิดกับธาตุที่มีแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวอิเล็กตรอนต่ำ

2. สัญญาณภาพจากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (backscattered electron) เป็นกลุ่มอิเล็กตรอนที่เสียพลังงานให้กับอะตอมในชิ้นงานเพียงบางส่วนและกระเจิงกลับออกมา ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ เกิดที่พื้นผิวระดับลึกกว่า 10 นาโนเมตร โดยเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

3. สัญญาณภาพจากรังสีเอกซ์ ชนิดที่เป็นรังสีเอกซ์เฉพาะตัว เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีพลังงานสูงกว่า โดยการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานมากพอจนหลุดออกจากวงจรออกมา ทำให้อิเล็กตรอนต้องรักษาสมดุลของโครงสร้างภายในอะตอม โดยการดึงอิเล็กตรอนจากชั้นโคจรถัดไปเข้ามาแทนที่ และต้องลดพลังงานภายในเนื่องจากอิเล็กตรอนที่ถูกดึงมาแทนที่มีระดับพลังงานสูงกว่า เพื่อทำให้ตัวเองมีพลังงานเท่ากับชั้นโคจรที่เข้ามาแทนที่ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีความยาวคลื่นเฉพาะในแต่ละธาตุ จึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการวิเคราะห์ธาตุตามลำดับพลังงานของตัวอย่างได้ทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพ



รูป 2.28 แผนภาพขององค์ประกอบกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [46]

2.8.5 การวัดพื้นที่ผิวและขนาดของรูพรุน ด้วยวิธีบีอีที (BET) [47]

พื้นที่ผิว (Surface area) ของสาร เป็นสมบัติทางภาพภาพที่มีความสำคัญต่อการนำไปใช้ประกอบการพิจารณาเพื่อนำสารนั้นไปพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีคุณภาพตามที่ต้องการหรือตามที่มาตรฐานกำหนด การวัดพื้นที่ผิวภายในวัสดุที่มีความพรุนทำได้โดยการศึกษาการดูดซับของแก๊สไนโตรเจนหรือแก๊สอื่นที่มีขนาดเล็ก เช่น อาร์กอน โดยใช้ประโยชน์จากไอโซเทอร์มของการดูดซับทางกายภาพ หรือวิธีบีอีที (BET ย่อมาจาก Brunauer- Emmett-Teller Method) ที่อุณหภูมิของแก๊สเหลว (ในที่นี้เป็นอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวหรืออาร์กอนเหลว) ซึ่งขึ้นอยู่กับการดูดซับ โดยจะหาจำนวนโมเลกุลที่ใช้เพื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถสามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวภายในได้ การดูดซับของ N_2 ดังรูป จะเกิดได้เร็วในช่วงแรกโดยจะเพิ่มตามความดัน จนกระทั่งถึงจุดเปลี่ยนแปลง ซึ่งเส้นกราฟจะราบ แสดงถึงปรากฏการณ์ที่การดูดซับบนพื้นผิวแบบชั้นเดียว จะเกิดการควบแน่นของไนโตรเจนในรูพรุนทำให้ปริมาตรของการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

$$\frac{P}{V(P_O - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1)P}{V_m C P_O} \qquad (2.5)$$

สมการที่แสดงความสัมพันธ์ของปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดันย่อยต่างๆ และปริมาตรที่ถูกดูดซับแล้ว สมการของบีอีที แสดงในสมการ

เมื่อ P คือ ความดันย่อยของแก๊สไนโตรเจน

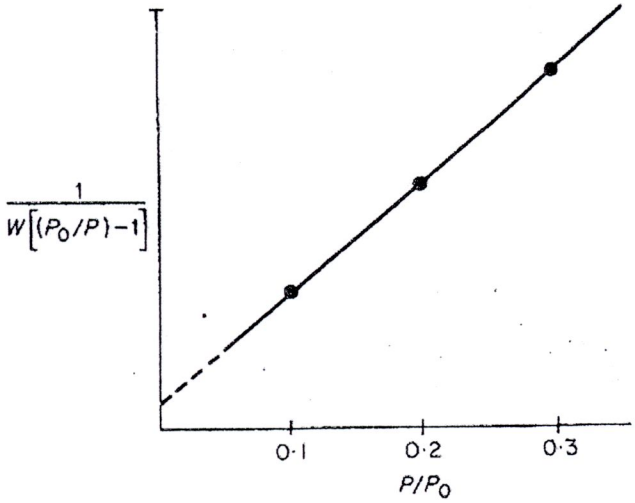
P_o คือ ความดันอิ่มตัวของแก๊สไนโตรเจน ณ อุณหภูมิที่ศึกษา

V คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ความดัน P

V_m คือ ปริมาตรที่ถูกดูดซับที่ทำให้เกิดการปกคลุมชั้นเดียว

C คือ ค่าคงที่

สมการนี้เขียนให้อยู่ในรูปของกราฟเส้นตรง $Y = a + bx$ เมื่อให้ X เป็น P/P_o, Y เป็น $P/V(P_o-P)$, a คือจุดตัดแกน Y เป็น $1/V_mC$ และเทอม b ความชัน เป็น $(C-1) / V_mC$ จากนั้นทำการเขียนกราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอีที ดังรูป 2.29



รูป 2.29 กราฟที่ได้จากการคำนวณในรูปเส้นตรงของสมการบีอีที [48]

จากสมการของบีอีที สามารถคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะของสารได้ โดยนำค่าปริมาตรของแก๊สไนโตรเจนที่ใช้ในการคลุมผิวของสาร หรือค่า V_m ที่ได้จากสมการ 2.5 ไปคำนวณหาจำนวนโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล แล้วจึงนำไปคำนวณหาพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้สมการ ดังนี้

$$S_{sp} = N_A.a_{max}.S_o/W$$

โดยที่ S_{sp} คือ พื้นที่ผิวจำเพาะของสาร (หน่วยเป็นตารางเมตรต่อกรัม), N_A คือเลขอาโวกาโดร (6.02×10^{23}) (หน่วยเป็นโมเลกุลต่อกรัมโมล), a_{max} คือ จำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับในสภาพ 1 ชั้นโมเลกุล (เท่ากับ $V_m/22414$)

S_o คือพื้นที่ผิวหน้าตัดของโมเลกุลของแก๊สที่ถูกดูดซับ (1.62×10^{-20}) (หน่วยเป็นตารางเมตร) และ W คือน้ำหนักของสารหรือตัวดูดซับ (หน่วยเป็นกรัม)