

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กุหลาบ

กุหลาบ (*Rosa hybrida*) เป็นดอกไม้ในตระกูล Rosaceae กุหลาบมีมานานประมาณ 30 ล้านปีมาแล้ว โดยมีทั้งหมดประมาณ 200 สายพันธุ์ ส่วนมากมีถิ่นกำเนิดในทวีปเอเชีย กุหลาบจัดเป็นพืชหลายฤดู (perennial) ที่มีเนื้อแข็ง (สมเพียร, 2532) ลักษณะทั่วไปกุหลาบเป็นไม้ดอกประเภทไม้พุ่มผลัดใบ มีลำต้นตั้งตรงหรือเลื้อย ใบสีเขียวเข้มเป็นมันและมีรอยย่นเล็กน้อย ดอกมีทั้งดอกชั้นเดียวและดอกซ้อน การจำแนกกุหลาบสามารถแยกตามสีดอก เช่น สีแดง สีชมพู สีเหลืองหรือมีมากกว่าสองสี ดังภาพ 2.1 (สมพงษ์, 2548) และสามารถแบ่งแยกตามลักษณะการเจริญเติบโต คือ กุหลาบตัดดอก กุหลาบพวง กุหลาบพุ่ม กุหลาบหนู กุหลาบเลื้อยและกุหลาบยืนต้น ดังภาพ 2.2 (เกียรติเกษตร, 2534)



ภาพ 2.1 การจำแนกกุหลาบตามลักษณะสีของดอก

ที่มา: <http://www.photomazza.com>. (2552)



ภาพ 2.2 การจำแนกกุหลาบตามลักษณะการเจริญเติบโต

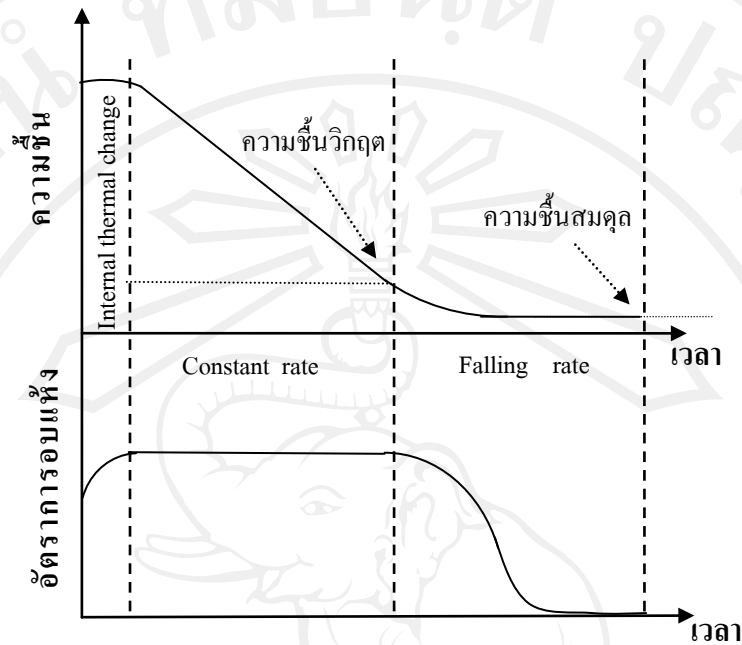
ที่มา: <http://www.photomazza.com>. (2552)

ปัจจุบันกุหลาบเป็นที่นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย ในประเทศไทยแหล่งที่ปลูกกุหลาบที่สำคัญ ได้แก่ เชียงใหม่ เชียงราย หนองคาย นครปฐม กรุงเทพมหานคร ราชบุรี ปทุมธานี สมุทรสาคร สมุทรปราการ นนทบุรี อุบลราชธานี ขอนแก่น และสงขลา (สำนักวิจัยเศรษฐกิจการเกษตร, 2541) ทำให้กุหลาบมีการซื้อขายกันเป็นอันดับต้นๆของโลกและด้วยคุณสมบัติเด่นหลายประการ มีหลายชนิด หลายพันธุ์ สามารถใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ทั้งดอกสด และการแปรรูป เช่น การทำดอกไม้แห้ง การเป็นวัตถุดิบสำหรับสกัดน้ำมันหอมระเหย ผสมลงในบุนหาร้าไป (potpourri) และผลิตภัณฑ์สปา เนื่องจากกุหลาบสามารถควบคุมการออกดอกได้ง่าย ส่งผลให้มีราคาสูง เพราะสามารถทำให้กุหลาบออกดอกได้ตรงกับเทศกาลต่าง ๆ ได้ (สมเพียร, 2532) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกลีบกุหลาบแห้งยังเป็นที่ต้องการของต่างประเทศ คือ ประเทศญี่ปุ่นและสหรัฐอเมริกา พบว่ามีความต้องการเพิ่มมากขึ้นทุกปี จากตัวเลขการส่งออกของไม้ดอกและช่อดอกที่นำมาย้อมหรือฟอกสี มีมูลค่าการส่งออกที่เพิ่มขึ้นคิดเป็นอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.7 ต่อปี ตั้งแต่ปี 2544 -2551 (กรมศุลกากร, 2551) กลีบดอกกุหลาบแห้งเป็นสิ่งที่นำมาเพิ่มความสวยงามและให้กลิ่นกับผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ

การอบแห้งดอกไม้ไม่มีหลายกรรมวิธี เช่น การอบแห้งด้วยแสงแดด การใช้วิธีบรรจุใส่ถุง พร้อมกับสารดูดความชื้น การใช้ซิลิกาเจล และการอบแห้งด้วยไมโครเวฟ เป็นต้น ซึ่งวิธีดังกล่าวทำให้สีของกลีบดอกคล้ำลงและกลีบกุหลาบเหี่ยวยุบ อีกทั้งยังใช้เวลาอบแห้งนาน จึงมีผลต่อถึงคุณภาพและมูลค่าของกลีบกุหลาบแห้ง ความชื้นเป็นสิ่งที่สำคัญที่มีผลเสียต่อผลิตภัณฑ์ในการเกิดเชื้อรา อีกทั้งสิ่งที่ได้ควรมีความใกล้เคียงกับกลีบสด รวมถึงรูปร่างหรือลักษณะการหดตัวหลังจากการอบแห้ง (Shin and Bhowmik, 1995)

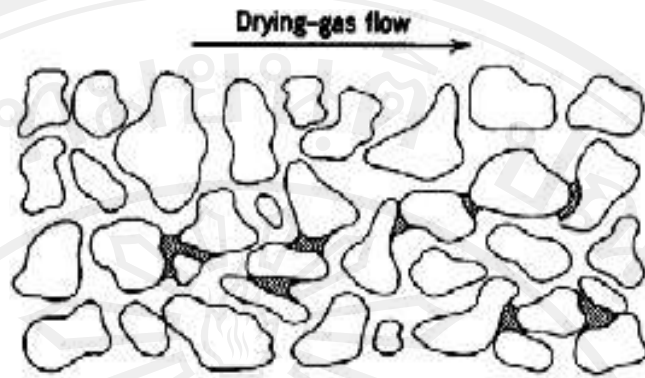
2.2 พื้นฐานการอบแห้ง

การอบแห้ง เป็นการกำจัดความชื้นออกจากผลิตภัณฑ์ กล่าวคือ น้ำภายในผลิตภัณฑ์ ส่วนใหญ่การอบแห้งมักใช้ลมร้อนเป็นตัวกลางในการทำให้น้ำระเหยและเอาความชื้นออกไป การอบแห้งมีวัตถุประสงค์เพื่อการเก็บรักษาและถนอมผลิตภัณฑ์ โดยการลดปริมาณความชื้นจนถึงระดับที่สามารถป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ (รุ่งนภา, 2536) กลไกที่เกิดขึ้นในการอบแห้งด้วยอากาศร้อน คือ การถ่ายเทความร้อนและมวลระหว่างผลิตภัณฑ์กับอากาศร้อน โดยมีแรงขับเคลื่อนจากความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นทำให้ความชื้นระเหยไปกับอากาศ ในขณะเดียวกันไอน้ำเคลื่อนที่ออกมาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอน้ำ มี 2 ลักษณะ คือ การเคลื่อนที่ด้วยแรงคาพิลลารี (capillary) ซึ่งเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนสูง และลักษณะที่ 2 คือ การเคลื่อนที่โดยการแพร่จะเกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ที่มีความพรุนต่ำ เมื่อการอบแห้งผ่านไประยะหนึ่ง เกิดการหดตัวของผลิตภัณฑ์ทำให้แรงคาพิลลารีหมดไป ความชื้นจึงต้องเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (สุคนธ์ชื่น, 2539)



ภาพ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการอบแห้งและความชื้นในผลิตภัณฑ์กับเวลาการอบแห้ง

จากภาพ 2.3 การอบแห้งสามารถแบ่งออกได้ 3 ช่วง คือ ช่วงแรกของการอบแห้งที่มีการเปลี่ยนแปลงความร้อนภายในผลิตภัณฑ์ (internal thermal change) ซึ่งบริเวณผิวผลิตภัณฑ์จะปรับตัวให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อนที่เป็นตัวกลาง ทำให้อัตราการอบแห้งในช่วงนี้จะต่ำ จากนั้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และเข้าสู่ช่วงที่ 2 คือ เมื่อบริเวณผิวของผลิตภัณฑ์ที่เปียกชุ่มไปด้วยน้ำและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ทำให้อัตราการระเหยความชื้นที่ผิวจะเท่ากับอัตราการเคลื่อนที่ของน้ำภายในผลิตภัณฑ์ออกมาสู่ผิวเป็นไปอย่างอิสระด้วยอัตราเร็วคงที่ จึงเรียกว่า ช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (constant rate period) จนกระทั่งการระเหยของน้ำที่ผิวผลิตภัณฑ์หมดไป อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะเริ่มสูงขึ้นประกอบกับการหดตัวของผลิตภัณฑ์ ทำให้น้ำที่เหลือภายในผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่มายังผิวอย่างช้า ๆ จึงมีการระเหยความชื้นค่อนข้างยาก เรียกช่วงนี้ว่า อัตราการอบแห้งลดลง (falling drying rate) และเมื่อความชื้นของลมร้อนที่ใช้ในการอบแห้งเท่ากับความชื้นของผลิตภัณฑ์ ความชื้นจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ออกมาได้ ดังภาพ 2.4 ความชื้นที่อยู่ในผลิตภัณฑ์ช่วงสุดท้ายของการอบแห้ง คือ ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) และการเปลี่ยนจากอัตราการอบแห้งคงที่เป็นอัตราการอบแห้งลดลง ความชื้นของผลิตภัณฑ์นั้นเรียกว่า ความชื้นวิกฤต (critical moisture content) ดังภาพ 2.3



ภาพ 2.4 ช่วงเวลาสิ้นสุดการอบแห้ง

ที่มา : Foust *et al.*, (1980)

2.2.1 ความชื้น

ความชื้นในผลิตภัณฑ์ คือ ปริมาณของน้ำหรือของเหลวที่มีแทรกในเนื้อวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ (สมชาติ, 2540) สามารถเอาออกได้ด้วยพลังงานความร้อนหรือพลังงานกลเมื่อเทียบกับมวลวัสดุชิ้นหรือแห้ง สามารถพิจารณาได้ 2 แบบ คือ

ก. ความชื้นมาตรฐานเปียก (wet basis) ดังสมการ (2.1)

$$M_{w.b} = \frac{m_{wp}}{m_{wp} + m_{pd}} \quad (2.1)$$

เมื่อ $M_{w.b}$ คือ ความชื้นในผลิตภัณฑ์ฐานเปียก, $\frac{g_{water}}{g_{drysolid}}$

m_{wp} คือ มวลของความชื้นในผลิตภัณฑ์, g

m_{pd} คือ มวลของผลิตภัณฑ์แห้ง, g

ข. ความชื้นมาตรฐานแห้ง (drying basis) แสดงดังสมการ (2.2)

$$M_{d.b} = \frac{m_{wp}}{m_{pd}} \times 100 \quad (2.2)$$

เมื่อ $M_{d.b}$ คือ ความชื้นในผลิตภัณฑ์ฐานแห้ง, $\frac{g_{water}}{g_{drysolid}}$

ค. ความชื้นสมดุล (equilibrium moisture content) หมายถึง ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในสภาวะสมดุล ไม่เกิดการระเหยความชื้นออกสู่ภายนอก อัตราการอบแห้งมีค่าเท่ากับศูนย์ กล่าวคือ ความดันไอกายในผลิตภัณฑ์เท่ากับความดันไอกวอากาศที่อยู่รอบ ๆ จึงทำให้อุณหภูมิจนของผลิตภัณฑ์เท่ากับอุณหภูมิจนของอากาศ โดยทั่วไปค่าความชื้นสมดุลขึ้นอยู่กับชนิดของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิ และความชื้นสัมพัทธ์ ในการศึกษากระบวนการอบแห้งความชื้นสมดุลมีความสำคัญมากในการวิเคราะห์หาค่าความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์

2.2.2 การถ่ายเทมวลและความร้อนในกระบวนการอบแห้ง

การศึกษากระบวนการอบแห้งสามารถสร้างแบบจำลองในรูปแบบสมการจลนพลศาสตร์อบแห้งกึ่งทฤษฎี (Semi-theoretical drying kinetic equation) โดยการสมมติว่าอัตราการอบแห้งภายใต้สภาวะคงที่แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของความชื้นในผลิตภัณฑ์และความชื้นสมดุล ข้อสมมุติฐานดังกล่าวคล้ายกับกฎการเย็นตัวของนิวตัน สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_{eq}) \quad (2.3)$$

จัดรูปแบบสมการสามารถเขียนได้ว่า

$$\frac{dM}{(M - M_{eq})} = -k dt \quad (2.4)$$

อินทิเกรตสมการ (2.4) โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้น $M(0) = M_0$ จะได้ค่าของสมการดังนี้

$$\ln\left(\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}\right) = -kt \quad (2.5)$$

$$MR = \left(\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}}\right) = \exp(-kt) \quad (2.6)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ของการอบแห้ง, s^{-1}

ค่าคงที่ของการอบแห้ง (k) เป็นคุณสมบัติเฉพาะของสมการหนึ่งๆ ซึ่งอยู่ในช่วงสภาวะอากาศอบแห้งและผลิตภัณฑ์อบแห้งที่ทำการทดลองเท่านั้น สมการกึ่งทฤษฎีนี้สามารถใช้ได้ดี

ต่อเมื่อผลิตภัณฑ์มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลอง และการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างแบบจำลอง สำหรับการอบแห้งผลิตภัณฑ์ในช่วงอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วของอากาศอบแห้งหนึ่งๆ ของการอบแห้งซึ่งพบว่าสามารถใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งได้ดี แต่มีข้อจำกัดในเรื่องเงื่อนไขในการอบแห้งเพื่อให้ตรงกับสภาวะการทดลองที่ต้องการ จึงได้มีผู้ศึกษาและสร้างสมการการอบแห้งไว้หลายสมการที่ได้จากการทดลอง ซึ่งเรียกว่า สมการจลนพลศาสตร์อบแห้งแอมไพริคัล (Empirical drying equation) ได้แก่ แบบจำลองชั้นบางสองเทอม (Thin-layer the two-term model) แบบจำลองของแฮนเดอร์สันและเพบีส (Henderson and Pabis model) แบบจำลองของลิวอิส (Lewis's model) แบบจำลองของเพจ (Page model) และแบบจำลองเพจที่มีการปรับปรุง (Modified Page model) ได้ถูกใช้อย่างกว้างขวาง ดังนี้

Sharaf-Eldeen, Blaisdell, and Hamdy (1980) ได้นำเสนอแบบจำลองชั้นบางสองเทอมเพื่อทำนายอัตราการอบแห้งของเปลือกข้าวโพด ที่สัมผัสกับอากาศได้อย่างเต็มที่ ซึ่งแบบจำลองนี้ต้องให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ และต้องสมมุติค่าการกระจายที่คงที่ เขียนได้ดังสมการนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = a \exp(-kt) + b \exp(-gt) \quad (2.7)$$

เมื่อ

k และ g คือ สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการทดลอง

a และ b คือ ค่าคงที่

t คือ เวลา, s

แบบจำลองของแฮนเดอร์สันและเพบีส ได้มาจากเทอมแรกของการแก้สมการทั่วไปของกฎข้อที่สองของฟิคส์ ได้อธิบายว่า บางครั้งจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นระหว่างการอบแห้งสามารถแทนได้โดยการประมาณค่าในรูปของอนุกรมอนันต์ (infinite series) ดังสมการ (2.8) แบบจำลองนี้ใช้ได้ดีในการทำนายการอบแห้งของข้าวโพด ข้าวสาลี และถั่วลิสง ความชันของแบบจำลองนี้ (สัมประสิทธิ์, k) มีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพในการแพร่เมื่อกระบวนการอบแห้งอยู่ในช่วงอัตราการอบแห้งลดลง และการแพร่ของของเหลว เป็นตัวควบคุมกลไกการอบแห้ง

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = a \exp(-kt) \quad (2.8)$$

และมีการเพิ่มค่าคงที่ (c) อีกหนึ่งค่า ซึ่งอยู่ในรูปแบบของแบบจำลองของลอการิทึมทำให้สมการนี้สามารถทำนายจลนพลศาสตร์ของความชื้นได้ดียิ่งขึ้นดังสมการนี้

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = a \exp(-kt) + c \quad (2.9)$$

แบบจำลองของเพจ Page (1949) เป็นการปรับปรุงแบบจำลองของ Lewis เพื่อแก้ไขจุดบกพร่อง แบบจำลองนี้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อให้เกิดความแม่นยำในการทำนายการอบแห้งโดยการเพิ่มค่าคงที่ n (ค่าคงที่ของแบบจำลอง) สามารถทำนายการอบแห้งได้ดีกับอาหารและวัสดุเกษตรหลายชนิด เช่น ธัญพืช ข้าวกล้อง ถั่วขาว เมล็ดข้าวโพด และข้าวบาร์เลย์ (Kaleemullash and Kailappan, 2006) ดังสมการ (2.10)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt^n) \quad (2.10)$$

ในปี 1981 White และคณะ ทำการปรับปรุงสมการเพจเล็กน้อย พบว่าใช้ได้ดีในการอธิบายจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งป๊อปคอร์น เรียกสมการนี้ว่า แบบจำลองของเพจที่มีการปรับปรุง (modified Page model) ดังสมการ (2.11)

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp((-kt)^n) \quad (2.11)$$

การทำนายจลนพลศาสตร์การเปลี่ยนแปลงความชื้นด้วยแบบจำลองดังกล่าวข้างต้น ค่าคงที่หรือพารามิเตอร์ต่างๆ ของสมการความชื้นสมดุลใช้เทคนิคของการวิเคราะห์แบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) โดยการประเมินเปรียบเทียบค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่า R^2 (coefficient of determination) ที่สูงที่สุด ค่า χ^2 (reduced chi-square) และ ค่า RMSE (root mean square error) ที่ต่ำที่สุด เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง ดังนี้

- ค่า R^2 เป็นค่าที่บ่งบอกถึงตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการที่สามารถทำนายตัวแปรตามได้มากน้อยเพียงใดโดยที่ค่านี้จะไม่ขึ้นอยู่กับทิศทางของความสัมพันธ์ของตัวแปรอิสระ ซึ่ง R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ถ้าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าตัวแปรอิสระทั้งหมดในสมการสามารถทำนายตัวแปรตามได้ดี สามารถคำนวณดังสมการ (2.12)

$$R^2 = \frac{\sum (MR_{\text{exp}} - MR_p)}{\sum MR_{\text{exp}}^2 \sum MR_p^2} \quad (2.12)$$

- ค่า χ^2 คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความคลาดเคลื่อนของตัวแปรตามที่ได้ทำนายได้กับค่าจริงที่ได้จากการทดลองในรูปกำลังสอง หากค่า χ^2 แสดงถึงค่าที่ทำนายได้จากสมการมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง สามารถคำนวณดังนี้

$$\chi^2 = \frac{\sum (MR_{\text{exp}} - MR_p)^2}{N - z} \quad (2.13)$$

- ค่า RMSE เป็นค่าที่สามารถประเมินความแม่นยำระหว่างค่าที่ทำนายได้จากสมการและค่าที่ได้จากการทดลอง โดยที่ค่า RMSE ที่เข้าใกล้ศูนย์แสดงว่ามีความแม่นยำในการทำนายมากสามารถคำนวณดังสมการ (2.14)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum (MR_p - MR_{\text{exp}})^2 \right]^{1/2} \quad (2.14)$$

เมื่อ

MR_{exp} คือ อัตราส่วนความขึ้นผลิตภัณฑ์ได้จากการทดลอง, เศษส่วน

MR_p คือ อัตราส่วนความขึ้นผลิตภัณฑ์ได้จากการทำนาย, เศษส่วน

N คือ จำนวนชุดข้อมูลในการทดลอง (number of experimental data)

z คือ จำนวนค่าคงที่หรือพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (number of parameter in model)

Gunhan, El (2005) ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการอบแห้งของใบกระวาน (*Laurus nobilis L.*) ใช้ใบกระวานที่มีขนาดเท่ากันทั้งหมด (ความยาว 90-100 มม. และความกว้าง 30-40 มม.) อบแห้งที่ความเร็วลมคงที่ 1.5 m/s โดยทดลองจากค่าความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิที่ช่วง 5%-25% และที่ช่วง 40°C-60°C ตามลำดับ จากนั้นนำความชื้นสมมูลมาพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทั้งหมด 15 สมการ พบว่า สมการของ Page เป็นแบบจำลองที่ดีที่สุดในการทำนาย

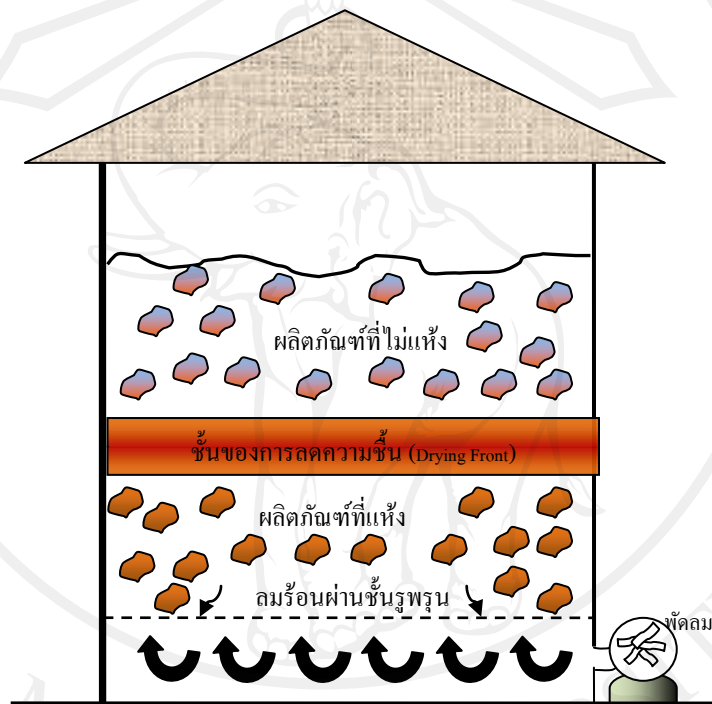
Arslan and Musa (2007) ได้เปรียบเทียบการอบแห้งใบโรสแมรี่ (*Rosmarinus officinalis L., Lamiaceae*) โดยใช้วิธีอบแห้งแบบพลังงานจากแสงอาทิตย์ ตู้อบความร้อน (50°C) และตู้อบไมโครเวฟ (700 W, 2450 MHz) พบว่า การอบแห้งแบบตู้อบไมโครเวฟสามารถลดเวลาการอบได้มากกว่าการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ถึง 99% เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้หลังจากการอบแห้งการอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ มีค่าความสว่าง (L^*) สูงกว่าการอบแห้งด้วยตู้อบไมโครเวฟ และตู้อบความร้อนตามลำดับ เมื่อพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการอบแห้งทั้ง 3 แบบ จากค่าความชื้นสมมูล ทำให้ทราบว่าแบบจำลองลอการิทึม (logarithm model) และแบบจำลองของ Midilli and Küçük (Midilli *et al.*, 2003) แสดงค่าทางสถิติ (R^2 , RMSE และ χ^2) ที่ดีที่สุดกับการอบแห้งแบบใช้พลังงานแสงอาทิตย์และตู้อบความร้อน แบบจำลองของเพจ แบบจำลองของเพจที่มีการปรับปรุงและแบบจำลองของ Midilli and Küçük มีค่าทางสถิติดีที่สุดกับการอบแห้งใบโรสแมรี่ด้วยตู้อบไมโครเวฟ

สุภาวดีและคณะ (2551) ศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้งชากุหลาบด้วยเทคนิคสเปาเต็ดแบบไม่ติดและแบบติดกราฟท์ทิวบ์ และหาแบบจำลองที่ดีที่สุด ซึ่งพบว่าแบบจำลองเพจที่มีการปรับปรุงซึ่งมีค่า R^2 สูงที่สุดและค่า RMSE และ χ^2 ต่ำที่สุด นั้นเป็นแบบจำลองที่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์การอบแห้งได้ดีที่สุด

อัจฉราพร (2552) ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งกลีบดอกกุหลาบ โดยทำการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองของ Lewis, Henderson และ Pabis และ Page สัมประสิทธิ์ในแต่ละแบบจำลองได้คำนวณโดยใช้ข้อมูลจากการอบแห้งกลีบดอกกุหลาบที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 456 มาตรฐานแห้ง ด้วยตู้อบความร้อนแบบถาดที่อุณหภูมิ 50 °C ความเร็วลม 0.5 เมตรต่อวินาที พบว่าแบบจำลองของ Page ให้ผลดีที่สุดในการทำนายจลนพลศาสตร์การอบแห้งกลีบดอกกุหลาบสำหรับกระบวนการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 °C

2.3 เครื่องอบแห้ง

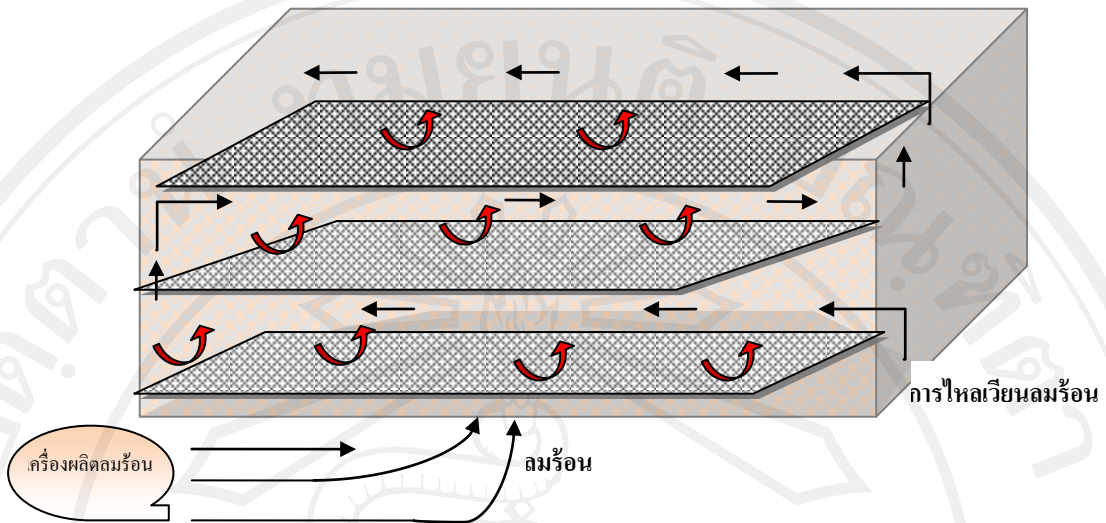
ก) เครื่องอบแห้งแบบถัง มักใช้ในการอบแห้งวัตถุดิบทางการเกษตรต่างๆไป โดยนำวัตถุดิบมาวางไว้ในห้องอบแห้ง ดังภาพ 2.5 จากนั้นใช้ลมร้อนผ่านจากด้านล่าง ลมร้อนจะทำให้วัตถุดิบที่อยู่ด้านล่างแห้งก่อน ส่วนวัตถุดิบที่ยังไม่แห้งจะอยู่ด้านบน ซึ่งจะได้รับความร้อนจากวัตถุดิบที่แห้งแล้ว โดยมีชั้น (layer) กั้นกลาง เรียกว่า ชั้นของการลดความชื้น (drying front) (Boyd and Welch, 1980)



ภาพ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบถัง

ดัดแปลงจาก : สมชาติ (2540)

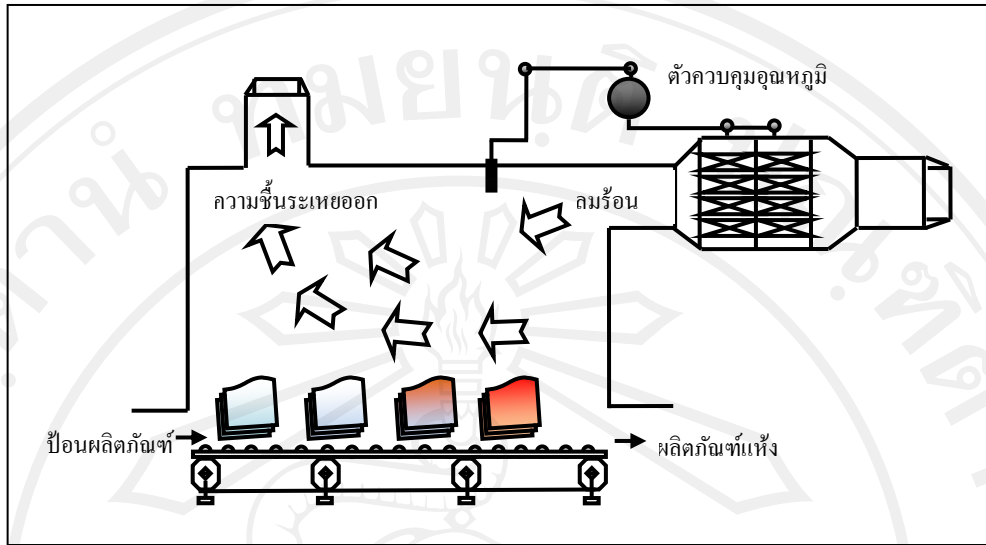
ข. เครื่องอบแห้งแบบถาด เป็นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมักใช้กับพืชผักผลไม้ มีลักษณะเป็นชั้นๆ ประกอบกัน ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งจะถูกนำมาเรียงบนชั้น และมีลมร้อนหมุนเวียนอยู่ภายใน เครื่องอบแห้ง ใช้วิธีการให้ลมผ่านขดลวดร้อน จึงเป็นวิธีที่ประหยัดพลังงานกว่า 50% เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพมากกว่าอบแห้งแบบถัง ดังภาพ 2.6



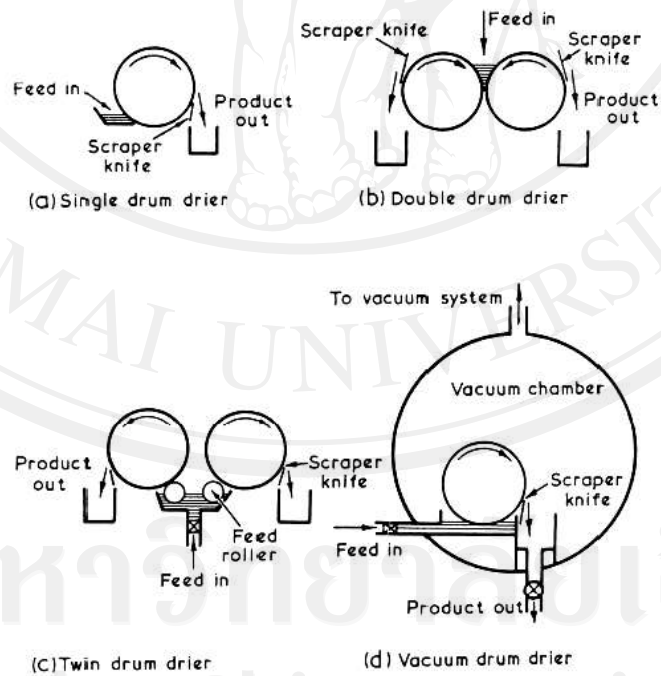
ภาพ 2.5 เครื่องอบแห้งแบบถาด
ดัดแปลงจาก : สมชาติ (2540)

ค. เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ เป็นเครื่องอบแห้งที่ได้พัฒนามาจากเครื่องอบแห้งแบบถาด ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารขนาดใหญ่ที่ต้องการผลิตกันอย่างต่อเนื่อง โดยผลิตภัณฑ์ที่ต้องการอบแห้งจะถูกเรียงบนชั้นแต่ละอัน ดังภาพ 2.7 ซึ่งจะถูกลำเลียงผ่านอุโมงค์ร้อนที่มีอากาศร้อนไหลสวนทางหรือตามทาง ของการลำเลียง ผลิตภัณฑ์จะถูกอบแห้ง เมื่อเคลื่อนที่ถึงบริเวณปลายทางของอุโมงค์

ง. เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง มักใช้ในการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นของเหลวที่มีปริมาณของแข็งอยู่สูง มีลักษณะข้นหนืด เพื่อให้เป็นของแข็งหรือบดเป็นผงต่อไป มีการทำงานโดยวัตถุคิบจะเคลื่อนที่ผ่านลูกกลิ้ง ดังภาพ 2.8 ที่มีอุณหภูมิสูง จะเกิดการถ่ายเทความร้อนบริเวณลูกกลิ้ง จากนั้นจะมีใบมีดขูด เพื่อขูดเอาผลิตภัณฑ์ ที่แห้งแล้วออกจากลูกกลิ้ง เพื่อนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการต่อไป

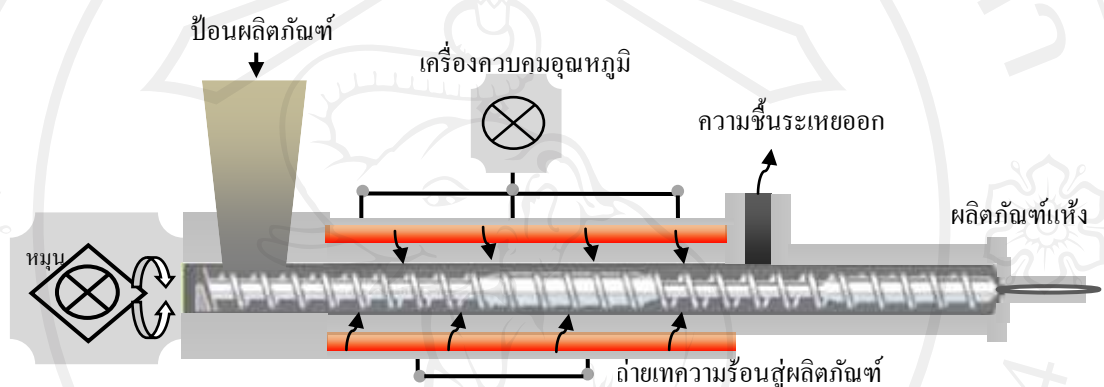


ภาพ 2.7 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์
ดัดแปลงจาก : สมชาติ (2540)



ภาพ 2.8 เครื่องอบแห้งแบบลูกกลิ้ง
ที่มา : สมชาติ (2540)

จ. เครื่องอบแห้งแบบสกรู ใช้ในการอบแบบต่อเนื่อง มีการสัมผัสทางอ้อมกับตัวให้ความร้อน ประกอบด้วยสกรูหมุนอยู่ในตัวถัง ดังภาพ 2.9 และมีตัวถังอีกชั้นทำหน้าที่หล่อด้วยไอน้ำ เมื่อของแข็งถูกป้อนเข้าด้านหนึ่ง และถูกขับเคลื่อนไปข้างหน้าด้วยการหมุนของสกรู ไอน้ำที่เกิดขึ้นจะถูกคูดอกทางท่อที่อยู่ด้านบนของตัวถัง เครื่องอบแบบนี้เหมาะสำหรับอบของแข็งที่ละเอียดมากหรือติด เป็นระบบปิดที่สามารถทำให้เป็นสุญญากาศได้ จึงทำให้ใช้กับระบบที่ต้องการสารละลายที่ควบแน่นได้ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

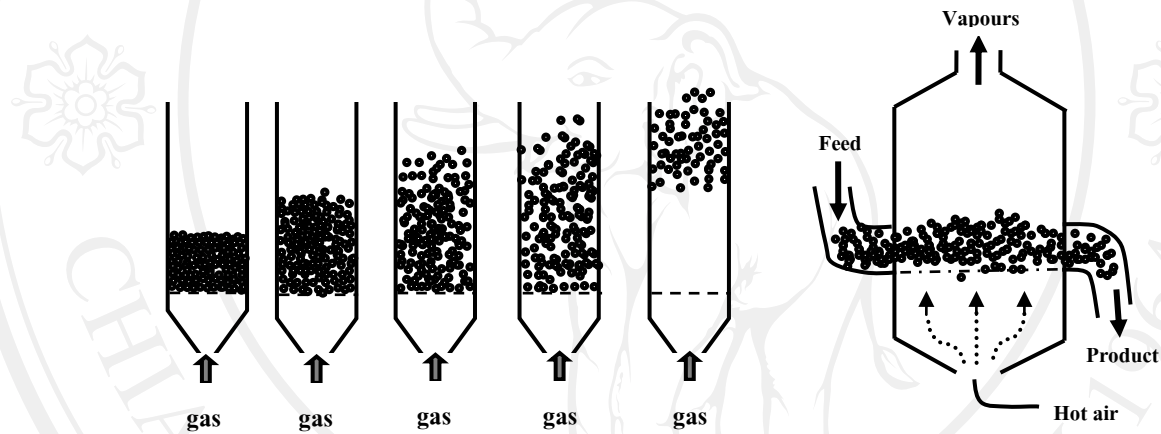


ภาพ 2.9 เครื่องอบแห้งแบบสกรู (screw conveyor dryer)

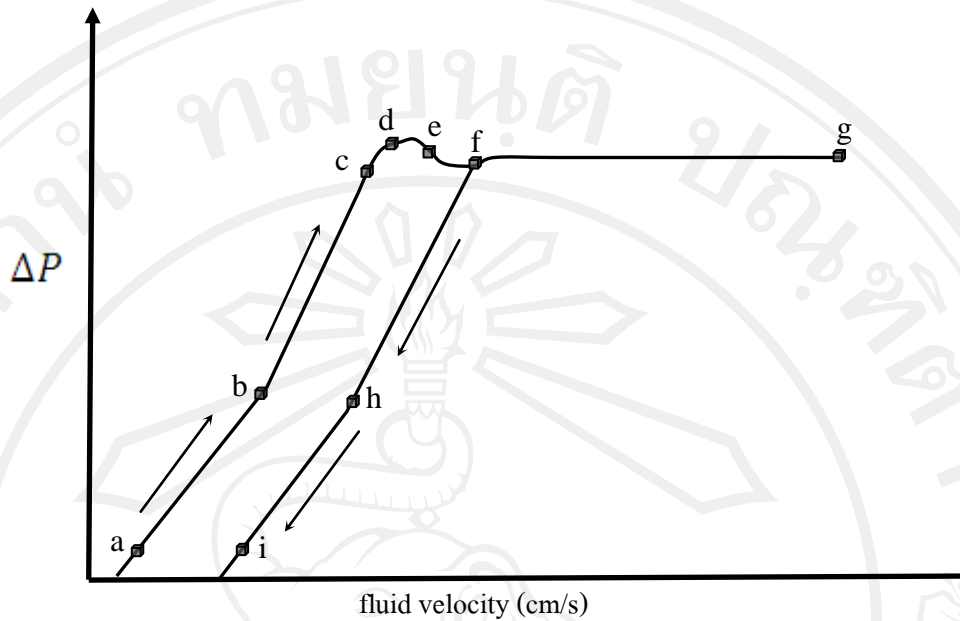
ดัดแปลงจาก : สมชาติ (2540)

ฉ. เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้ได้ดีกับวัสดุของแข็งที่มีลักษณะเป็นเม็ดหรือเป็นชิ้นสัมผัสกับของไหล เม็ดหรืออนุภาคของแข็งจะมีคุณสมบัติคล้ายของไหล ดังภาพ 2.10 เริ่มจากวางอนุภาคของแข็งไว้บนตะแกรงหรือตัวกระจายในหอทดลอง และให้ของไหลหรือก๊าซไหลผ่านขึ้นไปทางด้านล่างของตัวกระจายที่รองรับ และไหลผ่านชั้นอนุภาคของแข็งและขยับตัวลอยไปพร้อมกับของไหล หรือเรียกว่าชั้นเบด และแยกตัวเป็นอิสระในที่สุด พฤติกรรมจึงคล้ายของไหล จึงเรียกอนุภาคของแข็งในสภาวะนี้ว่า ฟลูอิดไดซ์เซชัน (fluidization) ขณะที่ของไหลไหลผ่านเบดด้วยความเร็วที่ต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (minimum fluidization velocity, U_{mf}) เบดจะอยู่ในสภาวะนิ่ง (fixed bed) ในกรณีที่อนุภาคชนิดเดียวกัน (mono particle system) พบว่าความชันของกราฟความดันตกคร่อมขณะนั้นมีความเท่ากับ 1 ดังภาพ 2.11 (สมศักดิ์, 2528) ตามเส้น ab และเมื่อเพื่อความเร็วของไหลให้สูงขึ้นพบว่าความชันมีค่าเท่ากับ 2 ดังเส้นกราฟ bc ซึ่งที่จุดดังกล่าว ความเร็วของไหลมีค่าใกล้เคียงกับความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดซ์เซชัน อนุภาคของแข็งเกิดการขยับตัวและจัดเรียงให้เป็นระเบียบ ความดันตก

คร่อมเบดขณะนั้นมีค่ามากที่สุด คือ จุด cd เมื่ออนุภาคจัดเรียงตัวแล้วความดันลดคร่อมเบดจะลดลงมาอยู่ที่จุด e ซึ่งต่ำกว่าความดันลดคร่อมเบดที่เกิดฟลูอิดไดเซชัน จากนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจนถึงจุด f แล้วคงที่ไปจนถึงจุด g เมื่อลดความเร็วของไหลจนถึงจุด f ซึ่งจะพบว่าความดันลดคร่อมเบดมีค่าคงที่ แต่เมื่อลดความเร็วของไหลให้มึ้นน้อยกว่าที่จุด f แล้ว ความดันลดคร่อมเบดมีค่าลดลงดังเส้นที่ ih และ hi ตามลำดับ ซึ่งเมื่อทำการทดลองใหม่จากเบดเดิม พบว่ากราฟความดันลดตกคร่อมปรากฏดังเส้น ih และ hf เหมือนเดิม ซึ่งได้ผ่านการจัดเรียงอนุภาคแล้ว เมื่อทำการทดลองจึงไม่ต้องเสียพลังงานในการจัดเรียงอีก กราฟความดันลดตกคร่อมจึงปรากฏดังเส้น ihf ซึ่งที่จุด f นี้เรียกว่าจุดความเร็วต่ำสุดของฟลูอิดไดเซชัน ดังภาพ 2.11



ภาพ 2.10 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชันเบด



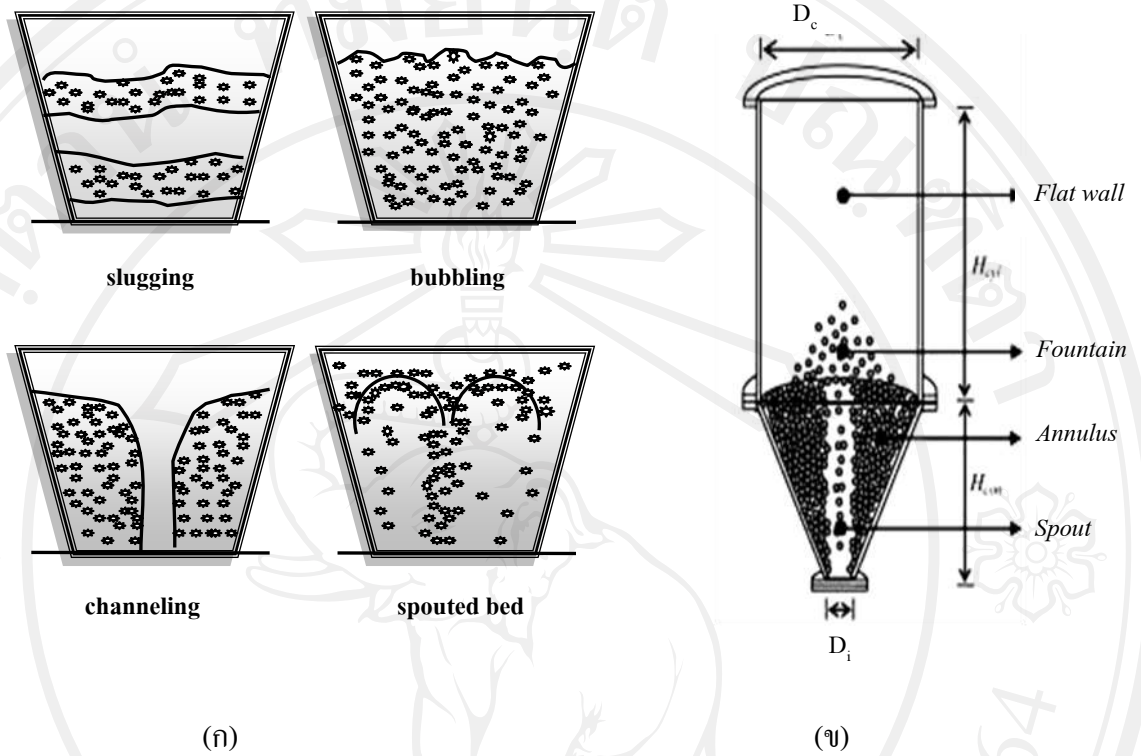
ภาพ 2.11 ความสัมพันธ์ของความดันลดคร่อมเบดและความเร็วของไหล
คัดแปลงจาก : สมศักดิ์ (2528)

กรณีสภาวะการผสมของอนุภาคของแข็ง ส่วนใหญ่มักมีขนาดอนุภาคไม่สม่ำเสมอ อาจเป็นของผสมของอนุภาคของแข็งชนิดเดียวกันแต่มีขนาดแตกต่างกัน หรือของผสมของอนุภาคสองชนิด จากการทดลองของ Fan และคณะ (1985) พบว่าสภาวะการผสมของแข็งของอนุภาคของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดสามวัฏภาคนั้น ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ ความเร็วของแก๊ส ความเร็วของเหลว ชนิดของอนุภาคของแข็ง และอัตราส่วนในการผสมของอนุภาคของแข็ง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวอาจทำให้เกิดการแยกชั้น (complete segregation) การผสมกันบางส่วน (partial intermixing) หรือการผสมกันอย่างทั่วถึง (complete intermixing) ทั้งนี้สำหรับระบบอนุภาคผสมของแข็งในฟลูอิดไดซ์เบดสองวัฏภาค (ของแข็ง-ของเหลว และ ของแข็ง-แก๊ส) ที่มีความแตกต่างของขนาดหรือความหนาแน่นนั้น พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือความหนาแน่นมากอยู่บริเวณด้านล่างของคอลัมน์ในบริเวณเหนือตัวกระจายแก๊ส และที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นน้อยจะอยู่ด้านบนของคอลัมน์ แต่สำหรับระบบอนุภาคผสมของแข็งระหว่างอนุภาคขนาดเล็กและความหนาแน่นมากกับอนุภาคขนาดใหญ่และความหนาแน่นน้อยนั้น พบว่า สภาวะการผสมของอนุภาคของแข็งกับความเร็วของไหล และสัดส่วนผสมอนุภาคของแข็ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า solid layer inversion (Epstein, 1997)

2.4 เทคนิคสเปาเต็ดเบด (spouted bed technique)

สเปาเต็ดเบด เป็นปรากฏการณ์ที่มีลักษณะการเกิดอยู่ในกลุ่มเดียวกับการเกิดฟลูอิดไดซ์เซชัน (fluidization) ดังภาพ 2.12(ก) เทคนิคสเปาเต็ดเบดได้รับการนำเสนอและศึกษาโดย Marthur and Gishler ที่ The National Research of Canada ในปี 1950 สำหรับการอบแห้งข้าวสาลี จากนั้นได้มีการศึกษาและประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลาย สเปาเต็ดเบดซึ่งประกอบด้วยหอทดลองที่บรรจุอนุภาคของแข็ง ดังภาพ 2.12(ข) เมื่อของไหล (ส่วนใหญ่จะใช้แก๊ส) ถูกเป่าเข้าไปในแนวตั้งทางด้านล่างของหอทดลอง ผ่านรูตรงกลางของฐานกรวย (conical base) มีการกระจายของไหลที่ไหลผ่านชั้นอนุภาค หรือที่เรียกว่า เบด (bed) ถ้าอัตราการไหลของของไหลสูงพอจะทำให้บริเวณส่วนตรงกลางเกิดการเคลื่อนที่ของอนุภาค ดังนั้นอนุภาคจะพุ่งขึ้นเป็นลำอย่างรวดเร็วเกิดเป็นโพรงขึ้นภายในเบดของอนุภาค เรียกลักษณะนี้ว่า สเปาต์ (spout) ซึ่งจะมีการเปลี่ยนแปลงของมวลและความร้อนเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว สำหรับเม็ดหรืออนุภาคของแข็งหลังจากขึ้นไปจนมีความสูงเหนือผิว เบดของบริเวณวงแหวนหรือแอนนูลัส (annulus) จะตกลงมาเป็นลักษณะน้ำพุ (fountain) ลงบนแอนนูลัส จากนั้นจะเคลื่อนที่ลงข้างล่างอย่างช้า ๆ ภายในเบดที่เกาะตัวอย่างหลวม ๆ ในขณะที่ของไหลเคลื่อนที่ขึ้นไปในลำสเปาต์นั้นจะมีของไหลบางส่วนไหลแทรกซึมเข้าไปในแอนนูลัสและเคลื่อนที่ผ่านขึ้นไปสวนทางกับเบดของแข็งที่เคลื่อนที่ลงมา เม็ดของแข็งจะถูกลำเลียงเข้าไปในลำสเปาต์อีกครั้ง เพื่อเคลื่อนที่ขึ้นไปเหนือเบด การไหลของของแข็งจึงมีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นแบบหมุนวน (cyclic)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะหมุนเป็นวงรอบสม่ำเสมอซึ่งตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคอย่างไม่เป็นแบบแผนคล้ายกับของเหลวที่กำลังเดือดในฟลูอิดไดซ์เบด ทำให้ปฏิกิริยาเป็นแบบไหลสวนทางระหว่างอนุภาคของแข็งและของไหล ซึ่งต้องใช้เครื่องฟลูอิดไดซ์เบด 2 ชุดมาต่อขนานกัน และมักใช้กับอนุภาคของแข็งจำพวกเป็นผง ดังนั้นจึงต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นสำหรับภาชนะบรรจุและเครื่องแยกผงออกจากก๊าซ การใช้เทคนิคสเปาเต็ดเบดจึงนำมาแก้ไขปัญหาดังที่กล่าวข้างต้น ซึ่งปัจจุบันใช้ในหน่วยปฏิบัติการทางวิศวกรรมต่าง ๆ โดยเฉพาะการอบแห้งวัสดุหรือผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนหรือถูกทำลายด้วยความร้อนได้ง่าย เช่น ธัญพืช หรือผักผลไม้ชนิดต่าง ๆ



ภาพ 2.12 (ก) ลักษณะการเกิดฟองก๊าซในฟลูอิดไดซ์เบด

(ข) ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสเปาต์เบดที่ใช้ในการทดลอง

คัดแปลงจาก : Rodrigo (2009)

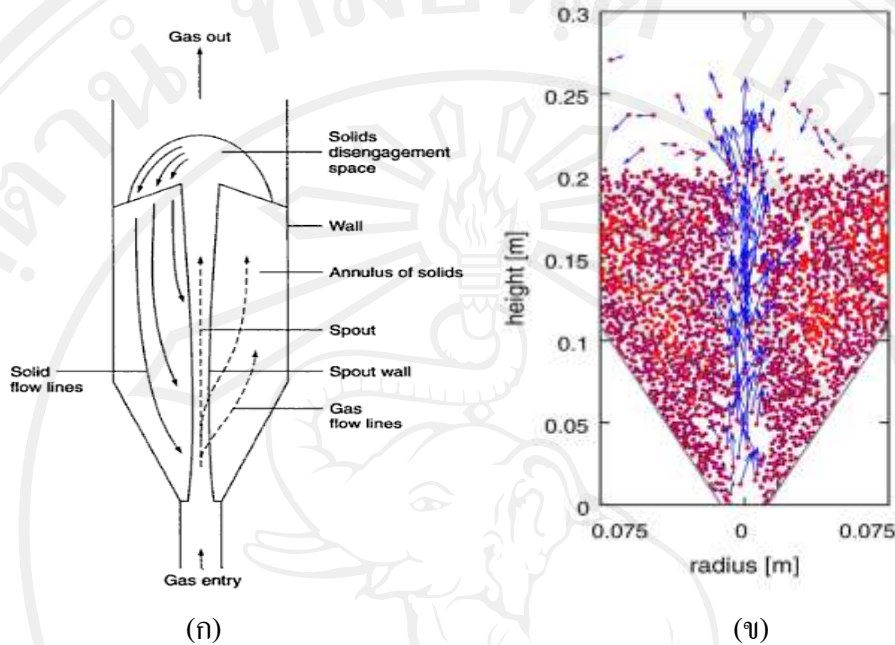
2.4.1 ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสเปาเต็ดเบด

การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในสเปาเต็ดเบดต่างจากในฟลูอิดไดซ์เบด ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากด้านล่างหอตกลงไปยังผิวของเบด แล้วเคลื่อนที่ลงมาตรงด้านล่างหอตกลงบริเวณด้านบน ด้วยความเร็วของไหลเดียวกัน จะเกิดการสัมผัสระหว่างของไหลกับอนุภาคของแข็งที่คิดว่าเป็นกรณีของฟลูอิดไดซ์เบด (Takeuchi, 2008) ดังภาพ 2.13 เนื่องจากที่ด้านล่างหอตกลงของสเปาเต็ดเบดเป็นรูปกรวยนั้นสามารถกำจัดจุดอับหรือจุดที่อนุภาคเกิดการสะสมและไม่มีการไหลเวียน ซึ่งจะพบมากในกรณีของฟลูอิดไดซ์เบดที่มีด้านล่างหอตกลงที่แบน การเคลื่อนที่ที่สามารถพิจารณารายละเอียด ดังนี้

ก) บริเวณเกิดสเปาต์ บริเวณนี้อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่จากส่วนรอบนอกของแอนนูลัส แล้วลอยไปตามกระแสของของไหลด้วยความเร็วที่สูง อนุภาคของแข็งมีอัตราเร่งสูงมากที่บริเวณทางเข้าของของไหลแล้วค่อย ๆ ช้าลงจนถึงผิวเบด การสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรที่มีในเบดเพื่อหาความเร็วของอนุภาคของแข็งในบริเวณที่เกิดสเปาต์จึงทำได้ยาก พบว่าความเร็วของอนุภาคของแข็งในสเปาต์ขึ้นอยู่กับความเร็วของไหลบริเวณทางเข้า ความลึกของเบด และคุณสมบัติของอนุภาค

ข) บริเวณแอนนูลัส อนุภาคของแข็งเคลื่อนที่ลงตรงบริเวณแอนนูลัส ความเร็วตรงส่วนบนเร็วกว่าตรงส่วนล่างเป็น 2 เท่า เพราะเกิดจากน้ำหนักของอนุภาคใกล้กับบริเวณที่เกิดสเปาต์ เพราะความเร็วของของไหลที่สวนทางขึ้นมา ส่วนความเร็วตรงกลางจะเร็วกว่า ดังนั้นความเร็วอนุภาคในบริเวณแอนนูลัสจะมีลักษณะเป็นแบบพาราโบลากับการไหลของของไหลในหอตกลงที่สวนทางกันอยู่

ค. การไหลของของไหลภายในเบด แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนที่มีความเร็วสูง จะเป็นส่วนของสเปาต์ อีกส่วนหนึ่งคือส่วนรอบ ๆ สเปาต์หรือส่วนที่ใกล้กับผนังหอตกลงมีขนาดความเร็วในการเคลื่อนที่ต่ำพอที่จะทำให้เบดอยู่ในลักษณะแบบบาง หรือหลวม ๆ ความเร็วของของไหลวัดได้จากความแตกต่างของความดัน โดยสมมติว่าเบดบริเวณรอบ ๆ มีความเร็วใกล้เคียงกับความเร็วที่ใช้ในฟลูอิดไดซ์เบดที่ต่ำสุดหรืออาจทำการวัดโดยใช้เครื่องมือวัดโดยตรงจากของไหลที่ออกจากบริเวณทางเข้าที่มีความเร็วสูง ส่วนใหญ่อยู่ที่บริเวณสเปาต์ อีกส่วนแยกเข้าไปในส่วนแอนนูลัส สัดส่วนที่แยกไปมีมากขึ้นตามความสูงของเบด ความเร็วของของไหลในสเปาต์จะลดลงตามความสูงของเบดในบริเวณรอบ ๆ จะมีความเร็วตรงข้ามกับบริเวณสเปาต์ จึงทำให้ความเร็วของของไหลจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบด



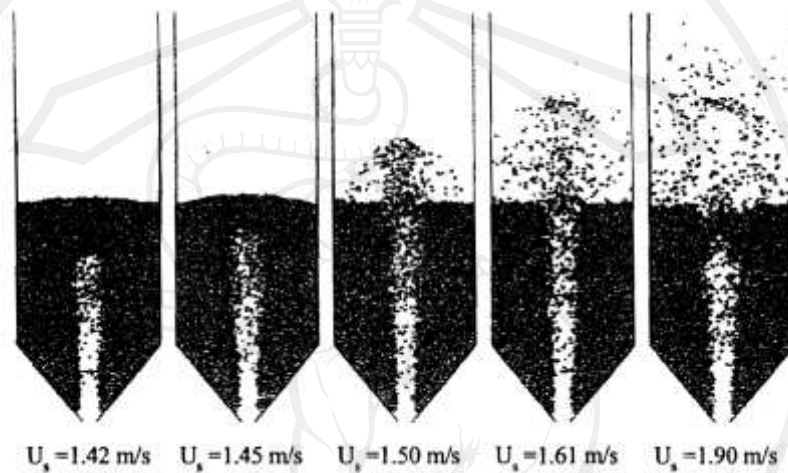
ภาพ 2.13 ลักษณะการเคลื่อนที่ในสเปาตัดเบด : (ก) อนุภาค, (ข) ของไหล (แก๊ส)

ที่มา : ภาพ (ก) Richardson and Harker (2002)

ภาพ (ข) Takeuchi (2008)

ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอนุภาคเมื่อเริ่มต้นจากการป้อนความเร็วของของไหลอย่างต่อเนื่องเข้าสู่เบดที่หยุคนี้ ของไหลจะเริ่มดันให้อนุภาคลอยตัวคล้ายโพรง จนกระทั่งความเร็วของของไหลมีค่าสูงพอและเอาชนะแรงเสียดทานหรือแรงต้านที่เกิดกับอนุภาคของแข็งด้วยกัน ลำสเปาต์ที่เกิดขึ้นจะผ่านผิวหน้าเบดได้ จุดนี้เมื่อวัดค่าความดันภายในเบดมีค่าที่สูง และเมื่อเพิ่มความเร็วของไหลต่อไปอีกความสูงของอนุภาคที่ลอยขึ้นก็สูงขึ้นจนทั่วเบดเป็นฟลูอิดไดซ์เซชัน และอนุภาคที่ตกบริเวณรอบนอกผิวเบด จะไหลสู่ด้านล่างหอดทดลองในขณะเดียวกันอนุภาคภายในเบดจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเนื่องจากการไหลที่มีลักษณะหมุนวน ทำให้อนุภาคสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ลำสเปาต์ได้ง่าย ดังภาพ 2.14 ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ (solid particle velocity) สามารถคำนวณดังสมการ (2.15) เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคภายในลำสเปาต์ที่มีความเร็วสูง และมีค่าไม่เท่ากันทั่วทั้งเบด ดังนั้นจำเป็นต้องแบ่งขอบเขตการคำนวณความเร็วของอนุภาคในแนวระนาบเบดหรือแกนสเปาต์ (R-position) และการคำนวณความเร็วของอนุภาคในแนวตั้งฉากกับเบด (Z-position)

$$\text{ความเร็วของอนุภาค} = \frac{\text{ระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในขอบเขตที่กำหนด}}{\text{เวลาที่อนุภาคใช้เคลื่อนที่ในขอบเขตที่กำหนด}} \quad (2.15)$$



ภาพ 2.14 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ความเร็วของไหลที่ป้อนเข้าไปแตกต่างกัน
ที่มา : Kawaguchi (2000)

2.4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมเบดและอัตราการไหลของไหล (สมศักดิ์, 2528)

การเปลี่ยนแปลงความดันตกคร่อมเบด ซึ่งสามารถหาค่าความเร็วต่ำสุดของการเกิดสเปาต์มักแปรผันตามความสูงของเบด แต่ความดันตกคร่อมเบดลดลงเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดขยายขึ้น หากเบดสูงที่มากเกินไปทำให้ไม่สามารถเกิดสเปาต์ ดังการทดลองของ Mathur and Gishler (1955) ได้ทดลองกับหอตลอดทรงกระบอกที่มีลักษณะคล้ายกรวยและมีขนาดหอตลอด (D_c) 15, 22.5 และ 30 ซม. มุมของกรวย 85 องศา และ 88 องศา ในการทดลองนี้ใช้ข้าวสาลี เม็ดอ่อน และถั่วขนาด 0.6-3.2 มม. ทำการอบแห้งด้วยความแตกต่างของความสูงเบด พบว่าความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเบดกับความเร็วต่ำสุดของการเกิดสเปาต์เบด สามารถเขียนดังสมการ (2.16)

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (2.16)$$

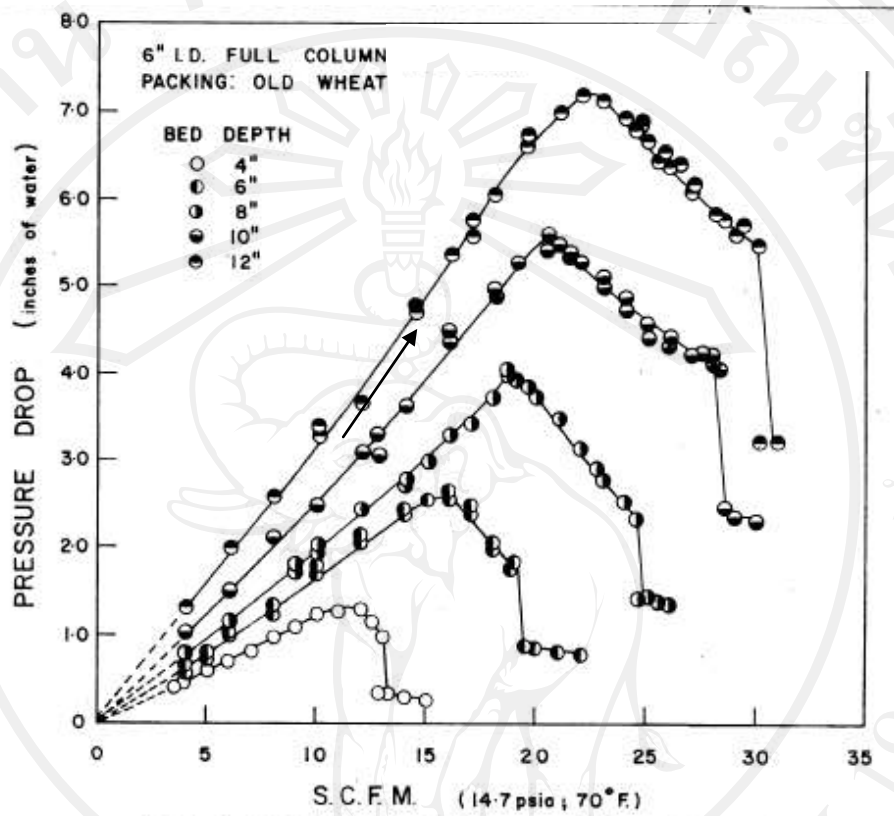
- เมื่อ D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อส่งแก๊สตรงกรวย
 D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทดลอง
 d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
 g_c คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง
 H คือ ความสูงของท่อทดลอง
 ρ_f คือ ความหนาแน่นของอากาศ
 ρ_s คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

ต่อมา Leva (1977) ทำการศึกษาตามสภาวะดังได้กล่าวข้างต้น พบว่าผลการทดลองนั้น สอดคล้องกับข้อเสนอของ Mathur and Gishler และได้เสนอว่าความเร็วต่ำสุดที่จะทำให้เกิด สเปาต์ นั้นควรอยู่ในรูปของสมการ (2.17)

$$U_{ms} = \left(\frac{d_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^n \sqrt{\frac{2g_c H(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}} \quad (2.17)$$

- ค่า n คือตัวแปรตามขนาดของท่อส่งแก๊ส และมุมตรงกรวย ดังนี้
 $n = 0.23$ เมื่อ D_i มีขนาด 5 ซม.. ถึง 10 ซม.. มุมตรงกรวย 45°
 $n = 0.13$ เมื่อ D_i มีขนาด 5 ซม.. ถึง 10 ซม.. มุมตรงกรวย 65°
 $n = 1/3$ เมื่อ D_c มีขนาด 15 ซม.. มุมตรงกรวยตั้งแต่ 45° ถึง 85°

และถ้า D_c มีขนาด 60 ซม.. ขึ้นไป ค่าของ n ไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้ว่ามุมของกรวยจะ เปลี่ยนไปที่ตาม ดังการทดลองของ Lama *et al.* (1975) ซึ่งใช้เม็ดทรายและข้าวสาลีเป็นอนุภาคใน สเปาต์เต็ดเบด เพื่อศึกษาปรากฏการณ์เกิดสเปาต์ จึงสรุปได้ว่า การเกิดสเปาต์ได้อย่างสมบูรณ์จะ ขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ คือ ขนาดอนุภาคของแข็ง มุมของกรวย ขนาดทางเข้าลมที่ไหลเข้าเบด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเบด อัตราการไหลของแก๊ส และความสูงของเบด ความเร็วต่ำสุดของสเปาต์ เต็ดเบด ดังภาพ 2.15



ภาพ 2.15 เปรียบเทียบความดันตกคร่อมเบดกับความเร็วมวลผ่านทางเข้าเบด
ที่มา : Lama *et al.* (1975)

จากการทดลองของ Mathur *et al.* (1978) ได้พบว่า ความดันตกคร่อมของสเปาเต็ดเบดมีค่าต่ำกว่าฟลูอิดไดซ์เบดที่มีความสูงที่เท่ากัน โดยทั่วไปค่าความดันตกคร่อมเบดของสเปาเต็ดเบดจะมีค่าประมาณ 0.64 - 0.75 เท่าของฟลูอิดไดซ์เบดและค่าความดันตกคร่อมที่ต้องการให้เกิดลำสเปาต์ครั้งแรกจะมีค่ามากกว่าค่าความดันตกคร่อมสำหรับการรักษาความเสถียรของลำสเปาต์ เพราะต้องการใช้ความดันที่สูงเพื่อเอาชนะแรงเสียดทาน จนกระทั่งเกิดเป็นลำสเปาต์ได้ อนุภาคจะเกาะตัวกันอย่างเบาบางซึ่งทำให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็ว ต่อมา Manurung *et al.* (1964) จึงได้เสนอความสัมพันธ์ระหว่างความดันตกคร่อมสูงสุดของสเปาต์ เพื่อเอาชนะแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคด้วยกัน พบว่าความสัมพันธ์ของมิติต่าง ๆ แสดงได้ในรูปของเทอมไร้มิติดัง สมการ (2.18)

$$\frac{\Delta P_m}{H \rho_p g} = \left[\frac{6.8}{\tan \gamma} \times \left(\frac{D_i}{d_p} \right) + 0.80 \right] - 34.4 \times \left(\frac{d_p}{H} \right) \quad (2.18)$$

เมื่อ ΔP_m คือ ความดันลดคร่อมสูงสุดของสเปาต์

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

และค่าความดันลดคร่อมของสเปาต์ขณะเสถียร เป็นค่าความดันต่ำสุดที่ต้องใช้สำหรับการหมุนพัดลมเพื่อให้อนุภาคภายในเบดรักษาสภาพการเกิดสเปาต์ไว้ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าความดันลดคร่อมสูงสุดของสเปาต์ที่มีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{\Delta P_s}{H\rho_p g} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0.81 \times (\tan \gamma)^{1.5}}{\phi^2} \times \left(\frac{D_c \times d_p}{D_i} \right)^{0.78} \times \left(\frac{D_c}{H} \right) \right)} \quad (2.19)$$

เมื่อ ΔP_s คือ ความดันลดคร่อมของสเปาต์ขณะเสถียร

ϕ คือ ความเป็นทรงกลมของอนุภาค

โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดมีค่าเท่ากับ 150 มม. เส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออากาศเข้ามีค่าตั้งแต่ 90 – 150 มม. ความสูงของเบดตั้งแต่ 200-100 มม.

Markowski and Kaminski (1983) พบว่าเครื่องอบแห้งแบบสเปาต์เต็ดเบดมีค่าเสถียรของค่าสเปาต์จึงมีค่าน้อยตาม และเมื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ในสมการไร้หน่วยได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{\Delta P_s}{\rho_p g U_{ms}^2} = 0.19 \times \left(\frac{H}{d_p} \right)^{2.35} \times \left(\frac{D_c}{H} \right)^{0.56} \times \left(\frac{D_i}{H} \right)^{2.39} \quad (2.20)$$

โดยที่อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของเบดกับความสูงเบด (D/H) อยู่ในช่วง 1.47 – 4.38 อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอากาศเข้าเบดกับความสูงของเบด (D_i/H) อยู่ในช่วง 0.43-1.66 และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคกับความสูงเบด (d_p/H) อยู่ในช่วง 3.57 - 16.66

2.4.3 การถ่ายเทความร้อนภายในสเปาต์เต็ดเบด (ประเสริฐ, 2550)

การศึกษาการถ่ายเทความร้อนจะมีผลมาจากการกระจายอุณหภูมิของของไหลและอุณหภูมิของอนุภาคภายในสเปาต์เต็ดเบด โดยพิจารณาการถ่ายเทความร้อน ดังนี้

ก) การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับอนุภาค ซึ่งขึ้นอยู่กับสมบัติทางกายภาพของอนุภาค หรือปฏิกิริยาทางเคมีระหว่างอนุภาคด้วยกัน และความร้อนที่เกิดจากแรงต้านทานระหว่างการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มาสัมผัสกัน โดยการถ่ายเทความร้อนแบบนี้จัดเป็นการนำความร้อนจากของไหลสู่อนุภาคโดยตรง

ข) การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับผนังห่อทดลอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เหนือผิวเบดสูงทำให้ความร้อนสามารถแพร่กระจายจากผนังห่อทดลองเข้าหรือออกจากอนุภาคได้ จะมีทั้งการนำและการพาความร้อน เพราะการเคลื่อนที่ของอนุภาคตรงบริเวณแอนนูลัสที่ใกล้กับผนังห่อทดลองเป็นไปอย่างช้าๆ และทางเข้าของของไหลที่ไปทางด้านบนด้วยความเร็วช้าเช่นกัน ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจึงมีน้อยมาก การคิดจนวนกันความร้อนจึงสามารถป้องกันการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเนื่องจากสิ่งแวดล้อมได้

ค) การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคกับของไหล (แก๊ส) เนื่องจากปริมาณของไหลที่ผ่านเบดแต่ละส่วนไม่เท่ากันจึงทำให้อุณหภูมิของไหลแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน หากจะหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในสภาวะไม่คงตัว (unsteady state heat transfer) ระหว่างอนุภาคกับของไหล จึงสมมติให้ความร้อนที่ถ่ายเทจากของไหลเป็นการถ่ายเทความร้อนโดยการพาเงื่อนไขเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอนุภาคที่สม่ำเสมอจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อมีความต้านทานภายในที่น้อยมากจึงไม่สนใจ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในอนุภาคจะมีค่าน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในของไหลที่อยู่รอบ ๆ มาก ซึ่งต้องมีการพิจารณาจากเลขบีโธต์ (Biot number, Bi) เพราะเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เป็นอัตราส่วนของความต้านทานจากการนำความร้อนกับความต้านทานจากการพาความร้อน ดังสมการ (2.21)

$$Bi = \frac{h_s d_p}{k_s} \ll 0.1 \quad (2.21)$$

เมื่อ

h_s คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนระหว่างแก๊สและอนุภาค, $W/(m \cdot ^\circ C)$

k_s คือ สภาพนำความร้อนของอนุภาค, $W/(m \cdot ^\circ C)$

เนื่องจากความต้านทานภายในของอนุภาคมีค่าน้อยมากจึงสามารถตัดทิ้งได้ เมื่อเปรียบเทียบกับความต้านทานภายนอก ส่วนค่า L แสดงถึงความยาวลักษณะเฉพาะ (characteristic length)

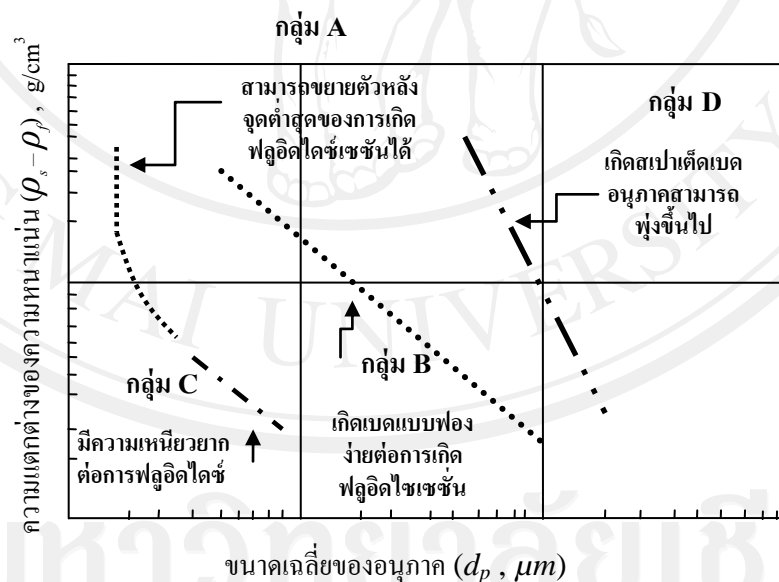
ง) การถ่ายเทความร้อนบริเวณสเปาต์ มาจากอนุภาคที่ลอยตัวสัมผัสกับลำสเปาต์ และการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคกันเอง แต่จะมีการถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างรวดเร็วตรงรอยต่อระหว่างสเปาต์และบริเวณแอนนูลัส เนื่องจากความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น และลดลงต่อไปจนถึงผนังหอตลอด การถ่ายเทความร้อนภายในบริเวณจึงมีความซับซ้อน แต่ในการศึกษาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงเป็นสมการอีมพิริคัลในรูปของเลขนัสเซิลต์ (Nusselt number, Nu) หรือการทำสมดุลพลังงานระหว่างความร้อนและมวล โดยการถ่ายเทความร้อนในบริเวณต่างๆภายในสเปาต์ได้

จ) การถ่ายเทความร้อนที่บริเวณแอนนูลัส ไม่มีความสม่ำเสมอเนื่องมาจากปริมาณของไหลที่ผ่านเบด แต่ละส่วนของแอนนูลัสมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้อุณหภูมิของไหลในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกันออกไป ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนที่ได้มักจะเป็นค่าเฉลี่ยของเบดทั้งหมด

เทคนิคสเปาต์เบดแบบดั้งเดิมมีข้อจำกัดต่าง ๆ มากมาย เช่น มีปริมาณความจุจำกัด มีความดันลดคร่อมเบดมากเกินความจำเป็น เมื่อพิจารณาในด้านของการถ่ายเทความร้อนและมวล ความสูงของเบดสูงสุดที่สามารถเกิดสเปาต์เบดได้ (maximum spoutable bed height) ที่มีค่าต่ำ และในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนมักจะเกิดเกรเดียนต์อุณหภูมิของอากาศในแนวรัศมีกับเชิงมุม การขยายขนาดสเปาต์เบดเพื่อนำไปใช้ในเชิงอุตสาหกรรมจึงทำได้ลำบาก ดังนั้นจึงเกิดแนวความคิดที่จะปรับปรุงเทคนิคสเปาต์เบด เพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ โดยการศึกษาของนักวิจัย เพื่อพัฒนาให้เทคนิคสเปาต์เบดสามารถประยุกต์ให้เกิดประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมมากที่สุด

2.5 การพัฒนาเทคนิคสเปาต์เบดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาพฤติกรรมระหว่างอนุภาคของแข็งหรือของเหลว กับของไหล (แก๊ส) ในสเปาเต็ดเบด มีผลต่อการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพการใช้งานดียิ่งขึ้น รวมถึงการออกแบบประดิษฐ์เครื่องมือ มีความสำคัญต่อระบบอุตสาหกรรมเป็นอย่างมาก ตัวอย่างอุตสาหกรรมที่ใช้เทคนิค สเปาเต็ดเบด เช่น อุตสาหกรรมยา (Jono, 2000; Olazar, 1996) เตาปฏิกรณ์ในอุตสาหกรรมพลาสติก ถ่านหิน และยาง (Arabiourrutia, 2007; Elordi *et al.*, 2007) การอบแห้ง (Izadifar, 2003; Nagaraju *et al.*, 1997; Shuhama, 2003) เทคนิคสเปาเต็ดเบดจากที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เป็นเทคนิคที่มีความคล้ายกับเทคนิคฟลูอิดไดเซชันตรงที่ของไหลสัมผัสกับอนุภาคโดยตรง แต่เทคนิคสเปาเต็ดเบดสามารถประยุกต์ใช้กับอนุภาคประเภท เจลดาร์ทชนิดดี (Geldart type D) ซึ่งเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นมาก และจัดอยู่ในประเภทที่ไม่สามารถใช้กับฟลูอิดไดเซชันได้ (Geldart, 1973) โดยการทดลองในการจัดประเภทอนุภาคของ Geldart มีการแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม คือ A, B, C และ D ดังภาพ 2.16 ที่ใช้ค่าความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างอนุภาคกับของไหล และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเป็นเกณฑ์

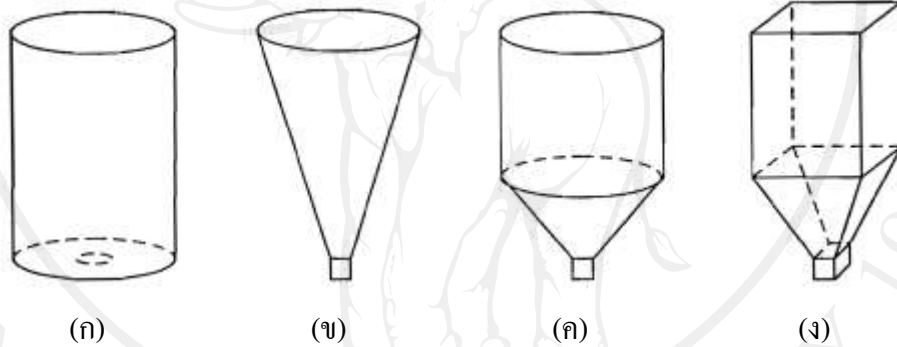


ภาพ 2.16 การแบ่งประเภทอนุภาคตามวิธี Geldart

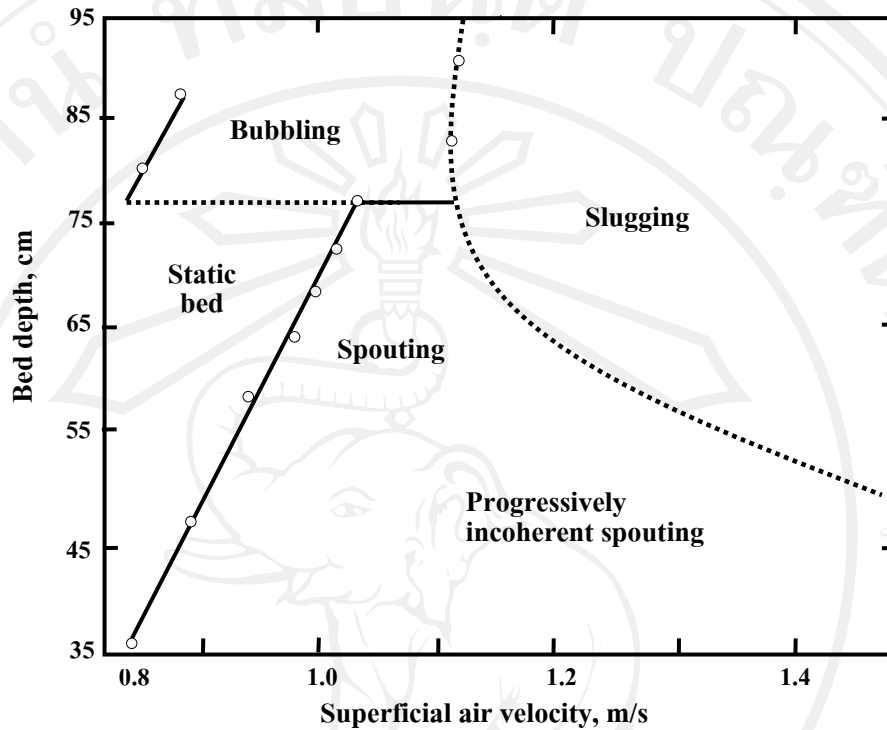
ดัดแปลงจาก : Geldart *et al.*, (1973)

โครงสร้างของสเปาเต็ดเบดได้ถูกพัฒนาและศึกษาหลังจากการเสนอแนวคิดของ Mathur และ Gishler (1955) ดังภาพ 2.17 จากรูปทรงกระบอกที่ศึกษาโดย Lim and Grace (1957) ซึ่งพบว่า

บางบริเวณอนุภาคไม่สามารถสัมผัสกับของไหลได้อย่างทั่วถึง โดยเฉพาะบริเวณรอบ ๆ ใต้ฐานด้านล่างของเบด ต่อมา Nikolaev and Golubev (1964) ได้ศึกษาการทำนายจลพลศาสตร์ของไหลและของแข็งภายในสเปาเต็ดเบดรูปทรงกรวยด้วยการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่เข้า และความสูงของเบดในช่วง 0.09 ถึง 0.15 m พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วลมที่เข้าไปนั้นมีผลต่อการเกิดสเปาต์ โดยที่ความดันลดคร่อมเบดขณะการเกิดสเปาต์นั้นคงที่ และเมื่อเบดหนึ่งมีความสูงเพิ่มขึ้น ลักษณะการเกิดสเปาต์จึงขึ้นอยู่กับความเร็วลม ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการทดลองของ Mathur and Gishler (1955)



ภาพ 2.17 ลักษณะโครงสร้างทั่วไปของสเปาเต็ดเบด : (ก) รูปทรงกระบอกฐานราบ , (ข) รูปทรงกรวย, (ค) รูปทรงกระบอกฐานทรงกรวย และ (ง) รูปแบบสองมิติ



ภาพ 2.18 ลักษณะการไหลของอนุภาคและการเปลี่ยนแปลงความสูงเบตต่อความเร็วลม
ที่มา : คัดแปลง จาก Mathur และ Gishler (1955)

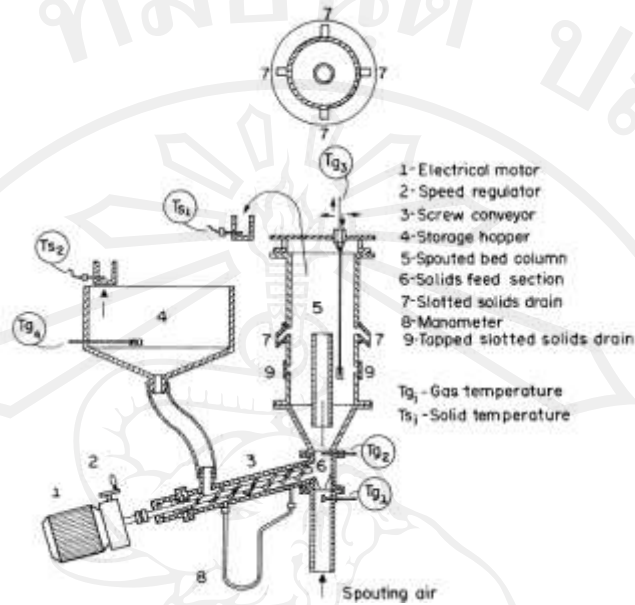
เมื่อพิจารณา ภาพ 2.18 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดคร่อมเบตและความเร็วลมที่เพิ่มขึ้น ในสเปาเต็ดเบตฐานกรวยสามารถแบ่งช่วงการเกิดสเปาต์ได้เป็น 4 ช่วง ได้แก่ เบตที่หยุดนิ่ง (fixed bed regime) เบตของการเกิดสเปาต์อย่างสมบูรณ์ (stable spouting regime) เบตที่มีการเปลี่ยนแปลง (transition regime) และเจ็ตสเปาต์จิ่ง (jet spouted regime) ต่อมา Olazar และคณะ (1994) พบว่า ความเอียงของมุมกรวยมีผลต่อรูปร่างสเปาต์ที่เกิดขึ้น โดยค่ามุมเอียงที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 33° ถึง 45° แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากมีพื้นที่ความจุอนุภาคน้อย และไม่นิยมในระดับอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงนำความรู้ที่ได้นี้ประยุกต์ใช้กับสเปาเต็ดเบตทรงกระบอกฐานทรงกรวย หรือแบบสองมิติ ที่นิยมใช้กันทั่วไปในปัจจุบัน

Clafin และ Fane (1984) ศึกษาสเปาเต็ดเบตรูปทรงกระบอกฐานทรงกรวยซึ่งได้พัฒนาจากข้อจำกัดของรูปแบบทรงกรวย จากการเปรียบเทียบจลนพลศาสตร์การไหลและการถ่ายเทความร้อนของอนุภาคโดยภายในมีการติดคราฟท์ทิวบ์ เพื่อประสิทธิภาพในการอบแห้งของข้าวสาลี

พบว่า การเพิ่มกราฟท์ทิวบ์นั้นสามารถให้ของไหลและอนุภาคสัมผัสได้ดีกว่าแบบที่ไม่มีการติดกราฟท์ทิวบ์ การหมุนเวียนระหว่างอนุภาคกับของไหลมีความเป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น มีผลทำให้เกิดการสเปาต์อย่างมีเสถียรภาพและความดันคร่อมเบดลดลง จึงมีการศึกษาประสิทธิภาพการติดกราฟท์ทิวบ์ให้กับสเปาต์เบดกันอย่างแพร่หลาย

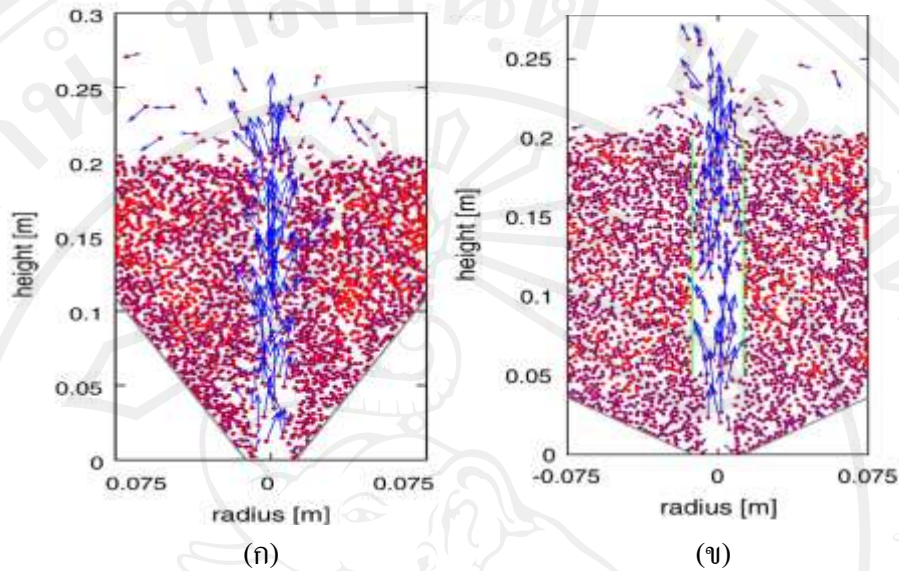
ในปี 2001 Freitas และ Freire ได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคและของไหลภายในลำสเปาต์ เพื่อพัฒนาสมการสำหรับเทคนิคสเปาต์เบดที่มีการติดกราฟท์ทิวบ์ ดังภาพ 2.19 โดยมีการอบแห้งอย่างต่อเนื่อง และป้อนอนุภาคที่ทำจากลูกแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.6 มม. จากบริเวณด้านล่างของหอคดลอง ความสูงของเบดที่ 0.25 และ 0.35 ม. อัตราการไหลโดยปริมาตรของไหลที่เข้ามามีค่าเท่ากับ 0.035, 0.042 และ 0.047 m³/s และอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่ 0.018, 0.028 และ 0.038 kg/min ที่อุณหภูมิ 80 °C จากการทดลองพบว่าความร้อนจะแปรผันตามความเร็วและอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลของอนุภาคกับของไหลภายในบริเวณสเปาต์

Swasdisevi และคณะ (2004) ได้ใช้เทคนิคการจำลองการไหลของอนุภาคและของไหลในสเปาต์เบดแบบสองมิติที่มีกราฟท์ทิวบ์อยู่ใน อาศัยการคำนวณแบบดิสครีตเอลิเมนต์ ใช้กับอนุภาคที่ใกล้เคียงกับข้าวโพด ผลการคำนวณความเร็วต่ำสุดของการเกิดสเปาต์และความดันลดคร่อมเบด ซึ่งมีผลสอดคล้องกับ Kalwar (1991) และ Kalwar (1992) คือ ความเร็วต่ำสุดที่ทำให้เกิดสเปาต์เบดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับความสูงของลำของไหล (entrainment zone) (ระยะห่างระหว่างทางเข้าของลมร้อนกับกราฟท์ทิวบ์) เนื่องจากอนุภาคที่ไหลผ่านลำสเปาต์และปริมาณของการกระจายตัวของไหลเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มตามความกว้างและพื้นที่หน้าตัดของบริเวณที่เกิดสเปาต์ มีผลทำให้อัตราการไหลเวียนเพื่อให้เกิดการนำพาอนุภาคด้วยของไหล (pneumatic transport) เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ในส่วนของความดันลดคร่อมเบด พบว่า ของไหลส่วนใหญ่ 90% จะไหลผ่านกราฟท์ทิวบ์ ดังนั้นผลรวมของความดันลดคร่อมเบดเป็นผลมาจากความสูงของกราฟท์ทิวบ์ และความหนาแน่นของอนุภาคบริเวณสเปาต์จะเกิดอย่างสม่ำเสมอ ส่วนความดันคร่อมเบดจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามความเร็วของของไหล จึงแปรผันตรงตามของระดับความสูงของลำของไหล เพราะความหนาแน่นของอนุภาคในช่องกราฟท์ทิวบ์เพิ่มขึ้น ดังนั้นการถ่ายเทความร้อน ทำให้เกิดการไหลเวียนของอนุภาค เกิดการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคและลมร้อนดียิ่งขึ้น เมื่อใช้อัตราการไหลของลมร้อนต่ำกว่าแบบไม่ติดกราฟท์ทิวบ์ ทำให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูงขึ้น (Freitas and Freire, 2001) ดังภาพ 2.19



ภาพ 2.19 แสดงลักษณะสเปาเต็ดเบดที่มีการติดตั้งกราฟท์ทิวบ์
ที่มา : Freitas and Freire (2001)

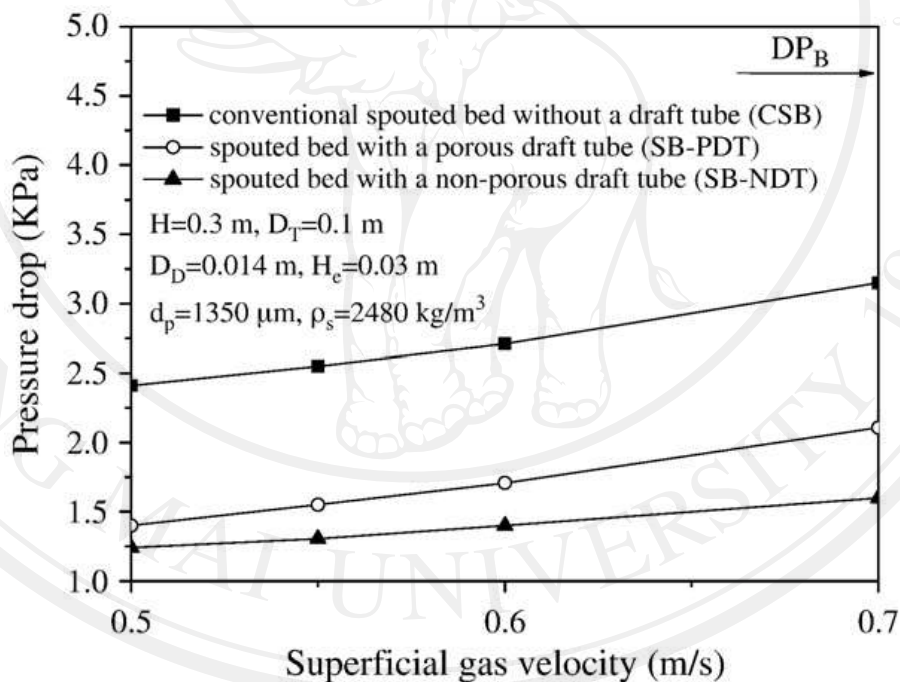
Takeuchi (2008) นำวิธีการคำนวณแบบดิสครีตเอลิเมนต์ ใช้กับสเปาเต็ดเบดรูปทรงกระบอกฐานกรวย เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์การไหลของแก๊สภายในที่เกิดขึ้นในสเปาเต็ดเบดที่ติดตั้งกราฟท์ทิวบ์และไม่ติดตั้งกราฟท์ทิวบ์แบบ 3 มิติ (ดังภาพ 2.20) พบว่าการใช้กราฟท์ทิวบ์สามารถกำจัดจุดที่อับ หรือเรียกว่า dead zone จึงทำให้การไหลเวียนดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับฟลูอิดไดซ์เบด และสเปาเต็ดเบดแบบดั้งเดิม จะเห็นได้ว่าทิศทางการเคลื่อนที่นั้น มีความเป็นระเบียบมากกว่า สเปาเต็ดเบดที่ไม่มีการติดตั้งกราฟท์ทิวบ์ การติดตั้งกราฟท์ทิวบ์ในสเปาเต็ดเบดในปัจจุบันได้นำมาประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่ใช้กระบวนการทางเคมี เช่น การผลิตยาและการสลายสารไฮโดรคาร์บอน



ภาพ 2.20 ทิศทางการไหลของแก๊ส : (ก) ไม่ติดกราฟท์ทิวบ์ , (ข) ติดกราฟท์ทิวบ์
ที่มา : Takeuchi (2008)

ในการศึกษาของ Ishikura (2003) ทดลองผสมอนุภาค 2 ชนิด คือ ลูกแก้วขนาดเล็ก และขนาดใหญ่ เพื่อศึกษาข้อมูลทางจลนพลศาสตร์ของของไหล สภาวะการทำงานและตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบต่าง ๆ โดยการติดกราฟท์ทิวบ์แบบมีรูพรุน และนำผลเปรียบเทียบกับกราฟท์ทิวบ์แบบไม่มีรูพรุน ซึ่งได้กล่าวข้อจำกัดของกราฟท์ทิวบ์แบบไม่มีรูพรุน ในกรณีการใช้ของไหลซึ่งเป็นแก๊สในกระบวนการอบแห้ง ของไหลนี้ได้ทำหน้าที่ในการให้ความร้อนและพาความร้อนระเหยออกไป ดังนั้นเกิดการสัมผัสกันอย่างทั่วถึงระหว่างของไหลและอนุภาคของแข็งได้ดีขึ้น กราฟท์ทิวบ์ที่ไม่มีรูพรุนจะไปขัดขวางการไหลผ่านของของไหลไปสู่อนุภาค ในส่วนที่บริเวณแอนนูลัสยังสามารถลดประสิทธิภาพในการสัมผัสกัน อาจขึ้นอยู่กับสัมผัสกันของของไหลและอนุภาค รวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนบริเวณแอนนูลัส และบริเวณลำสเปาต์ การใช้กราฟท์ทิวบ์แบบมีรูพรุนจึงสามารถลดข้อจำกัดดังกล่าว แล้วยังสามารถทำให้การกระจายความร้อนไปในแนวรัศมี เนื่องจากอัตราการแพร่กระจายของอนุภาคนั้นเพิ่มมากขึ้นตามรัศมีของรูพรุน

ต่อมา Wang (2010) ได้ศึกษาพฤติกรรมการไหลของแก๊สและอนุภาคในสเปาเต็ดเบดที่ติดตั้งกราฟท์ทิวบ์แบบรูพรุน ในสภาวะการทดลองเดียวกับ Ishikura (2003) เพื่อทำนายความดันลดคร่อมเบดที่เกิดขึ้น งานวิจัยนี้ได้สนับสนุนข้อดีในการใช้กราฟท์ทิวบ์แบบรูพรุน ซึ่งมีผลสอดคล้องกับ Ishikura ดังภาพ 2.21 ความดันลดคร่อมเบดในกราฟท์ทิวบ์แบบรูพรุนสูงกว่าแบบไม่มีรูพรุน เนื่องจากอัตราการไหลของแก๊สบริเวณแอนนูลัสและอัตราการกระจายของอนุภาคนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วของแก๊ส อีกทั้งยังเป็นผลของความพรุนที่ผ่านกราฟท์ทิวบ์ไปยังอนุภาค การสัมผัสจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างอนุภาคและแก๊สดียิ่งขึ้น ดังนั้นการควบคุมการไหลเวียนและจัดระเบียบของอนุภาคในการไหลเวียนจึงกว่ากราฟท์ทิวบ์แบบไม่มีรูพรุน



ภาพ 2.21 ความดันลดตกคร่อมเบดของสเปาเต็ดเบดที่มีการติดตั้งกราฟท์ทิวบ์แบบมีรูพรุน
ที่มา : Wang (2010)

สุภาวดีและคณะ (2551) ทำการศึกษาจลนพลศาสตร์และผลของปัจจัยต่างๆ ที่มีต่อการอบแห้งซากุหลาบด้วยเทคนิคสเปาเต็ดเบค แบบไม่ติดและแบบติดกราฟท์ทิวบ์ ในการทดลองอบแห้งซากุหลาบโดยเทคนิคสเปาเต็ดเบคแบบไม่ติดกราฟท์ทิวบ์ นั้นใช้ความเร็วลม 2.5 3.5 และ 3 m/s อุณหภูมิของลมร้อนคือ 45 55 และ 65 °C ทำการทดลอง 3 ซ้ำที่แต่ละสภาวะ ทั้งนี้เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาการอบแห้งโดยเทคนิคสเปาเต็ดแบบติดกราฟท์ทิวบ์ จากผลการทดลองพบว่าความเร็วลมที่ 3 m/s และอุณหภูมิ 65 °C จะใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด จากนั้นได้ทำการศึกษาผลของขนาดและความสูงจากทางเข้าลมร้อนของ กราฟท์ทิวบ์ที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง โดยขนาดที่ใช้คือ 0.26 0.43 และ 0.60 เท่าของขนาดหอททดลอง และระยะความสูงของทางเข้าลมร้อนคือ 1 2 และ 3 นิ้ว พบว่าการติดกราฟท์ทิวบ์ลดเวลาในการอบแห้งลงไปได้ประมาณร้อยละ 28 และขนาดของกราฟท์ทิวบ์เท่ากับ 0.26 เท่าของขนาดหอททดลอง และระยะความสูง 2 นิ้ว จากทางเข้าลมร้อนใช้เวลาในการอบแห้งสั้นที่สุด

2.6 การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นการกำจัดความชื้นที่มีการใช้มายาวนาน เป็นวิธีการที่มีต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อย ต่อมามีการปรับปรุงวิธีการตากแห้งโดยใช้แสงอาทิตย์ โดยอาศัยหลักการเกี่ยวกับวัตถุที่มีสีและสามารถสะสมความร้อน เช่น วัตถุที่มีสีดำซึ่งสามารถดูดและเก็บความร้อนได้ดีมาก การอบแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์จึงเป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการของปรากฏการณ์เรือนกระจก โดยมีการนำความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศมาให้ความอบอุ่นยังพื้นโลก มาใช้ประโยชน์ในการประดิษฐ์เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (วิจิตร, 2524)

Szulmayer (1971) ได้ให้นิยามการอบแห้งด้วยการใช้พลังงานแสงอาทิตย์ว่า เป็นกระบวนการผสมผสานระหว่างการตากแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์กับการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งควบคุมการไหลของกระแสลม การทำเช่นนี้จะเป็นการปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ตากแห้งด้วยแสงอาทิตย์ อีกทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการอบแห้ง เครื่องอบแห้งที่มีการพัฒนาโดยอาศัยหลักการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบตู้ และใช้แสงแดดเป็นพลังงานความร้อนให้กับตู้อบ ซึ่งมีความเหมาะสมกับประเทศไทยที่ไม่ต้องเสียต้นทุนพลังงาน ปัจจุบันได้มีการพัฒนาการใช้แผงพลังงานแสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้กับตู้อบแสงอาทิตย์ ทำให้สามารถอบแห้งผลิตภัณฑ์ได้รวดเร็วขึ้น

2.6.1 ประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ (สมชาติ, 2540)

ในปัจจุบันเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถแบ่งออกได้หลากหลายประเภท แต่จากการสำรวจ สามารถสรุปการแบ่งประเภทของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ ได้ดังนี้

ก) แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง (direct type) มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วนคือ ช่องอากาศเข้า ใช้วัสดุทำเป็นหลังคาและช่องระบายอากาศ รังสีจากดวงอาทิตย์จะทะลุผ่านหลังคาไปสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบแห้งโดยตรง การระเหยน้ำออกจากวัสดุเกิดขึ้นจากความร้อนที่ได้รับจากแสงอาทิตย์และอากาศภายในสามารถระบายออกไปทางช่องระบายอากาศ ซึ่งเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง ยังสามารถแบ่งประเภทตามรูปแบบการไหลของอากาศ ได้ดังนี้

- การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ การเคลื่อนที่ของอากาศตามธรรมชาติ สามารถเกิดขึ้นได้เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ กล่าวคือ อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความหนาแน่นต่ำกว่าอากาศที่มีอุณหภูมิต่ำทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศ เครื่องอบแห้งแบบนี้มีต้นทุนต่ำ ดูแลรักษาง่าย แต่มีข้อจำกัด คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของสารมีค่าน้อย ทำให้มีประสิทธิภาพในการอบแห้งต่ำ

- การไหลของอากาศแบบบังคับ คือ การใช้พัดลมช่วยในการไหลเวียนของอากาศ ทำให้อากาศมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งแต่มีข้อจำกัดคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของพัดลมและเรื่องของการดูแลรักษาพัดลม

ข. แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยทางอ้อม (indirect type) เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วย ส่วนรับรังสีแสงอาทิตย์ พัดลมและห้องอบแห้ง ส่วนของห้องอบแห้งนั้นจะป้องกันไม่ให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาสัมผัสกับวัสดุที่นำมาอบโดยตรง ซึ่งการอบแห้งจะอาศัยความร้อนจากพื้นที่รับแสงเป็นหลัก คือ ส่วนรับแสงจะทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ จากนั้นจึงไหลผ่านไปยังวัสดุในห้องอบแห้ง แบ่งตามประเภทตามรูปแบบการไหลของอากาศ ได้ดังนี้

- การไหลของอากาศแบบธรรมชาติ ลักษณะการไหลของอากาศจะเป็นไปตามธรรมชาติ เครื่องอบแห้งประเภทนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ พื้นที่รับแสง ห้องอบแห้ง ช่องระบายอากาศ จุดเด่นของเครื่องอบแห้งนี้ คือ ห้องอบแห้งจะทำด้วยวัสดุทึบแสงที่ป้องกันแสงอาทิตย์ผ่านทะลุได้

- การไหลของอากาศแบบบังคับ การบังคับอากาศทำได้โดยการใช้พัดลม คือ การใช้พัดลมช่วยให้อากาศเคลื่อนที่ ทำให้อากาศมีสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลของสารสูง ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการอบแห้งแต่มีข้อเสียคือ ต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นในส่วนของพัดลมและเรื่องของการดูแลรักษา

ค. แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยผสม (mixed type) เป็นการนำหลักการของเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ แบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง และแบบรับรังสีดวงอาทิตย์โดยอ้อมมาใช้ร่วมกันคือ ได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์โดยตรงและได้จากอากาศร้อนที่ไหลผ่านส่วนที่รับรังสี

- การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบธรรมชาติ จะมีทั้งแบบมีปล่องระบายอากาศ แบบไม่มีปล่องระบายอากาศ จะใช้ช่องระบายอากาศซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของเครื่องอบทำหน้าที่ระบายอากาศภายในเครื่องอบสู่ภายนอก

- การไหลของอากาศร้อนเป็นแบบถูกบังคับ เพื่อให้การไหลของอากาศมีสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลของสารสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการอบแห้งนั้นดียิ่งขึ้น

ง. แบบ green house เครื่องอบแห้งประเภทนี้มีลักษณะคล้ายบ้านหรือโรงเรือน มีจุดเด่นคือหลังคาจะปิดด้วยวัสดุโปร่งแสงเช่น กระจกหรือพลาสติกใส เพื่อให้แสงอาทิตย์ผ่านเข้ามาในเครื่องอบ และมีช่องให้อากาศได้ระบายออกได้ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่และถ่ายเทอากาศภายในโรงเรือนดีขึ้น

Balladin and Headley (1999) ได้ศึกษาการอบแห้งกลีบกุหลาบด้วยแสงอาทิตย์ ที่อุณหภูมิประมาณ 30 °C ใช้เวลา 2 วัน จนถึงความชื้นโดยน้ำหนักแห้งที่สมดุลเท่ากับ 25.2% จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 581% และใช้เครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ซึ่งใช้เวลาเพียง 16 ชั่วโมงในการอบจนถึงความชื้นสมดุล เพื่อการทดสอบหาคุณสมบัติทางชีวภาพและทางเคมีของกลีบดอกกุหลาบ

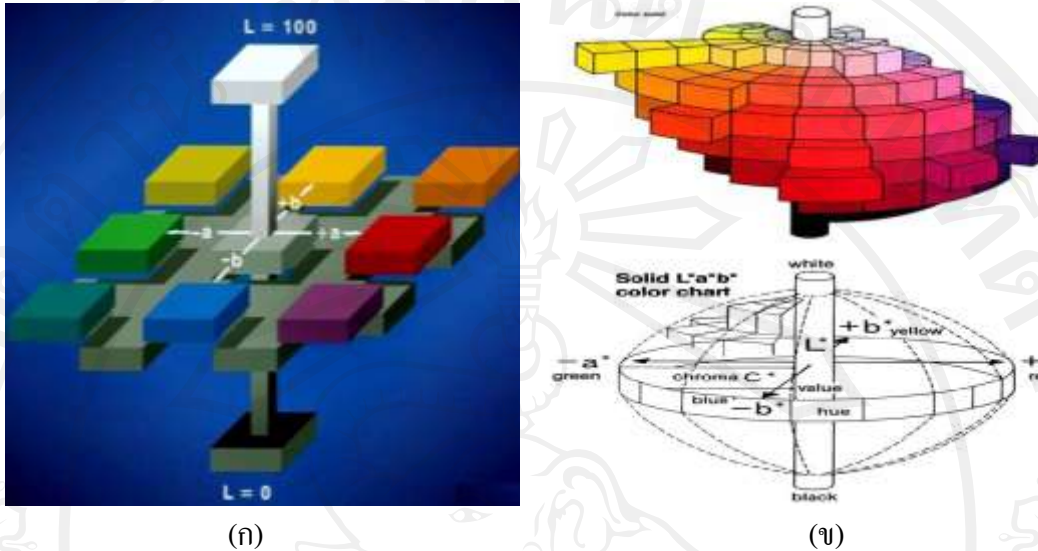
อัจฉราพร (2552) ทำการทดลองเปรียบเทียบการอบแห้งกลีบดอกกุหลาบโดยใช้เครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุน รายงานว่าเมื่อนำกลีบดอกกุหลาบความชื้นประมาณร้อยละ 80 มาอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งทั้ง 3 ชนิด หลังการอบแห้งจะเหลือความชื้นเฉลี่ยเท่ากับ 6.69 6.59 และ 4.37 (มาตรฐานเปียก) ตามลำดับ โดยค่าความชื้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ไม่มี

ความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) แต่ค่าความชื้นที่ได้จากการอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถังหมุนมีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากค่าความชื้นที่ได้จากเครื่องอบแห้งอีก 2 ชนิด ซึ่งมีค่าความชื้นอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือน้อยกว่าร้อยละ 7

2.7 สีและการวัดค่าสี (color and measurement)

สีแสดงถึงคุณภาพของผลิตภัณฑ์โดยตรง สามารถใช้เป็นปัจจัยในการจัดแบ่งชั้นคุณภาพและกำหนดราคา เมื่อวัตถุดิบที่ใช้ผ่านขบวนการแปรรูปต่าง ๆ เช่น การใช้ความร้อน ความเย็น สารเคมี และการสกัด ทำให้สีเปลี่ยนไปซึ่งการเปลี่ยนแปลงบางอย่างไม่เป็นที่ต้องการของตลาด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องควบคุมเพื่อให้ได้สีตามที่ต้องการ สามารถใช้สีเป็นปัจจัยในการควบคุมผลผลิตทางการเกษตร เพื่อนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ จนกระทั่งออกสู่ท้องตลาด

ระบบที่ใช้ในการประเมินคุณลักษณะทางด้านสีของผลิตภัณฑ์ที่นิยมใช้ เป็นการพัฒนาของบริษัท Hunter lab ในอเมริกา คือระบบสี hunter (hunter color system) ระบบจะวัดสีในรูปค่าสี L, a และ โดยมีความหมายค่า L (lightness) เป็นค่าความสว่างมีค่าตั้งแต่ 0 - 100 เข้าใกล้ศูนย์เป็นสีมืดและตรงข้าม ค่า L เข้าใกล้ 100 แสดงถึงค่าสีที่มีความสว่างมาก ค่า a แสดงความเป็นสีแดงหรือความเป็นสีเขียว หากค่า a เป็นบวกแสดงความเป็นสีแดง และค่า a เป็นลบแสดงถึงความเป็นสีเขียว ส่วนค่า b เป็นค่าที่แสดงความเป็นสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน โดยค่า b เป็นบวกแสดงความเป็นสีเหลือง และค่า b เป็นลบแสดงความเป็นสีน้ำเงิน นอกจากนี้ยังมีองค์กรที่มีบทบาทในการกำหนดมาตรฐานด้านสีคือ Commission International de l'Eclairage (CIE) ได้พัฒนาระบบสีที่เรียกว่า ระบบ CIE ซึ่งมีการอธิบายถึงค่าสีเหมือนในการใช้ระบบสี hunter แตกต่างกันที่สูตรการคำนวณค่าสี แต่พื้นฐานการคำนวณของทั้งสองระบบล้วนคำนวณค่าจากระบบ X-Y-Z ทั้งสิ้น แสดงดังภาพ 2.22



ภาพ 2.22 แสดงการอธิบายของระบบสี : (ก) ระบบสี hunter lab และ (ข) ระบบสี CIE

ที่มา : www.hunterlab.com (2009)

ซึ่งการบรรยายสีพื้นในระบบ CIE Lab ในรูปสามมิติ ดังภาพ 2.22x อุปกรณ์วัดสีที่นิยมใช้ใน ปัจจุบันคือ สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดสี โดยใช้แสงจากแหล่ง ประดิษฐ์ (illuminant) คือ แสงที่แต่งค่าความเข้มแสง (intensity) หรืออุณหภูมิของสี (color temperature) แล้วตัวอย่างของแหล่งแสงประดิษฐ์ ได้แก่ D65 – แสงเที่ยงวัน (noon daylight), A- แสงส้มจากหลอดทั้งสแตน, C – แสงกลางวันเฉลี่ย (average daylight) และ CWF – แสงขาวเย็นจาก หลอดฟลูออเรสเซนต์ (cooled white fluorescent) อุปกรณ์วัดสีสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่นและยี่ห้อที่ นิยมใช้ได้แก่ ของ Hunter lab, Nikon และ Minolta ซึ่งสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ปัจจุบันมีการพัฒนา สามารถบอกค่าสีได้หลายสเกลในเครื่องเดียว เช่น X-Y-Z, L-a-b และ L*-a*-b* รวมไปถึง CMYK (Crayon Magenta-Yellow-Black) ซึ่งเป็นระบบสีที่นิยมในงานวิจัย

อัจฉราพร (2552) ได้วัดสีของกลีบดอกกุหลาบหลังการอบแห้งจากเครื่องอบแห้งพลังงาน แสงอาทิตย์ เครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถาดหุ้ม มีค่า L* (ความสว่าง) เท่ากับ 34 28 และ 39 ตามลำดับ โดยค่า L* ของสีกลีบดอกกุหลาบที่ได้จาก เครื่องอบแห้งทั้ง 3 ชนิด มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$) มีค่า Chroma เท่ากับ 37 38 และ 46 ตามลำดับ โดยค่า Chroma ที่ได้จากการอบด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถาดหุ้มมี ความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งไฟฟ้า

แบบถาด และมีค่า Hue Angle เท่ากับ 11.9 และ 13 ตามลำดับ โดยค่า Hue Angle ที่ได้จากการอบด้วยเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถาดมีความแตกต่างทางสถิติ ($p \leq 0.05$) จากเครื่องอบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาด เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่า พบว่า กลีบดอกกุหลาบที่ผ่านการอบด้วยเครื่องอบแห้งไฟฟ้าแบบถาดจะให้สีของกลีบดอกกุหลาบอบแห้งคล้ำกว่าการอบด้วยเครื่องอบพลังงานแสงอาทิตย์และเครื่องอบแห้งไมโครเวฟสุญญากาศแบบถาด

จากการทบทวนเอกสารมีรายงานว่า การสูญเสียความชื้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีจากสีแดงเป็นสีน้ำเงินม่วง (bluing) จะเกี่ยวข้องกับรงควัตถุ anthocyanin และ carotenoid ซึ่งจะเห็นได้ชัดในดอกกุหลาบพันธุ์สีแดง การเกิด bluing เกิดจากการสูญเสียสมดุลของน้ำ ทำให้เกิดการสลายตัวของโปรตีนจึงมีการสะสมแอมโมเนียภายในเซลล์ เป็นสาเหตุให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ภายใน cell sap ของกลีบกุหลาบ จนมีสภาพเป็นด่าง ทำให้ anthocyanin ซึ่งไม่คงตัวต่อสภาพความเป็นด่างจึงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน ดังนั้นจึงทำให้กลีบดอกกุหลาบสีแดงเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินม่วง (Parup and Molnar, 1972)