หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

กลไกของการแห้ง

การแห้ง (drying) เป็นที่เข้าใจโดยทั่วไปว่าเป็นการระเหยของเหลวออกจากวัตถุเพื่อให้ได้วัตถุแห้งที่มีความชื้นแน่นอนปริมาณหนึ่ง

บทนี้จะกล่าวถึงกลไกของการแห้งทางทฤษฎี[10,11] ตอนท้ายของบทนี้แสดงกราฟของอัตราการแห้งของของแข็งบางชนิดจากการทดลอง[12,17]

การแห้งของของแข็งเชื่อว่ามี 2 กระบวนการที่เป็นพื้นฐานเกี่ยวข้องคือ

ก. การส่งผ่านของความร้อนเพื่อไประเหยของเหลว

ข. การส่งผ่านของมวลในลักษณะของของเหลวและไอ ภายในของแข็งและในลักษณะของไอจากผิว

สองกระบวนการนี้เกิดขึ้นพร้อมกันและองค์ประกอบซึ่งควบคุมอัตราของแต่ละกระบวนการจะเป็นตัวกำหนดอัตราของการแห้ง

ปัญหาการทำให้แห้งในทางการค้า วัตถุประสงค์หลักคือ การให้ความร้อนในลักษณะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด การส่งผ่านความร้อนอาจใช้วิธีการพา, การนำหรือการแผ่รังสี หรือโดยการผสมของกลไกเหล่านี้ ชนิดต่าง ๆ ของเครื่องอบแห้งทางอุตสาหกรรมอาจจะแตกต่างกันในวิธีการส่งผ่านความร้อนไปยังของแข็ง โดยทั่ว ๆ ไปแล้วความร้อนต้องไปยังที่ผิวภายนอกของของแข็งก่อนแล้วจึงเข้าไปภายใน แต่มีข้อยกเว้นที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการทำให้แห้งด้วยกระแสไฟฟ้าที่มีความถี่สูง โดยความร้อนเกิดขึ้นภายในของแข็งทำให้อุณหภูมิภายในสูงกว่าที่ผิว ดังนั้นจึงทำให้ความร้อนไหลจากภายในของแข็งมายังผิวภายนอก

ในการทำให้แห้ง การส่งผ่านของมวลอยู่ในลักษณะของเหลวหรือไอภายในของแข็งและในลักษณะของไอจากผิวภายนอก การเคลื่อนที่ภายในของแข็งเป็นผลมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของของเหลวในของแข็ง ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติ(ทางเคมีและฟิสิกส์) ของของแข็ง

4.1 เงื่อนไขภายในและภายนอกของการแห้ง

การศึกษาถึงวิธีการแห้งอาจจะขึ้นกับกลไกภายในของการไหลของของเหลว หรือขึ้นกับผลของเงื่อนไขภายนอกของอุณหภูมิ, ความชื้น, การไหลของอากาศ เป็นต้น

4.1.1 กลไกภายในของการไหลของของเหลว การไหลของของเหลวภายในอาจเกิดจากกลไกมากมายหลายอย่าง ขึ้นกับโครงสร้างของของแข็ง กลไกที่เป็นไปได้คือ

ก. การแพร่ในของแข็งที่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด

ข. การไหลผ่านรูเล็ก ๆ (capillary flow) ในของแข็งที่เป็นรู

ค. การไหลเนื่องจากการหดตัวและความแตกต่างของความดัน

ง. การไหลเนื่องจากการกลั่นตัว-การกลายเป็นไอ

จ. การไหลเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

ฉ. การไหลเนื่องจากความต่างศักย์ทางไฟฟ้าคือ อิเลคโทร-ออสโมซิส (electro-osmosis)

ช. การไหลเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิคือ การแพร่เนื่องจากความร้อน (thermal diffusion)

แม้ว่าที่เวลาอันหนึ่งอาจจะมีกลไกมากกว่าหนึ่งอย่างที่มีผล แต่ว่ามักจะมีเพียงอย่างเดียวเท่านั้นที่เด่น อย่างไรก็ตามกลไกที่ต่างกันอาจจะเด่นที่เวลาต่างกัน

4.1.2 ตัวแปรภายนอก ที่สำคัญคือ อุณหภูมิ, ความชื้น, การไหลของอากาศ, สภาวะของซับดิวิชั่น (subdivision) ของของแข็ง, การปั่นป่วนของของแข็ง, วิธีการรองรับของแข็งและการสัมผัสกันระหว่างผิวที่ร้อนกับของแข็งที่เปียก ตัวแปรทั้งหมดเหล่านี้ไม่จำเป็นต้องเกิดพร้อมกันในหนึ่งปัญหา

4.2 ช่วงเวลาของการแห้ง

การแห้งของของแข็งมักบอกเป็นเปอร์เซนต์ความชื้นในของแข็ง มี 2 แบบ คือ

ก. ใช้ของเปียกเป็นพื้นฐาน (wet basis)

ข. ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน (dry basis)

เปอร์เซนต์ความชื้นที่ใช้ของเปียกเป็นพื้นฐาน หาได้โดยเอาน้ำหนักน้ำที่มีอยู่ในของแข็งหารด้วยน้ำหนักทั้งหมดของของแข็ง

$$\text{เปอร์เซนต์ความชื้น (wet basis)} = \left(\frac{W_w}{W_w + W_d}\right) \times 100 \ (\%)$$

เมื่อ W_w = น้ำหนักของน้ำ

W_d = น้ำหนักของวัตถุแห้ง

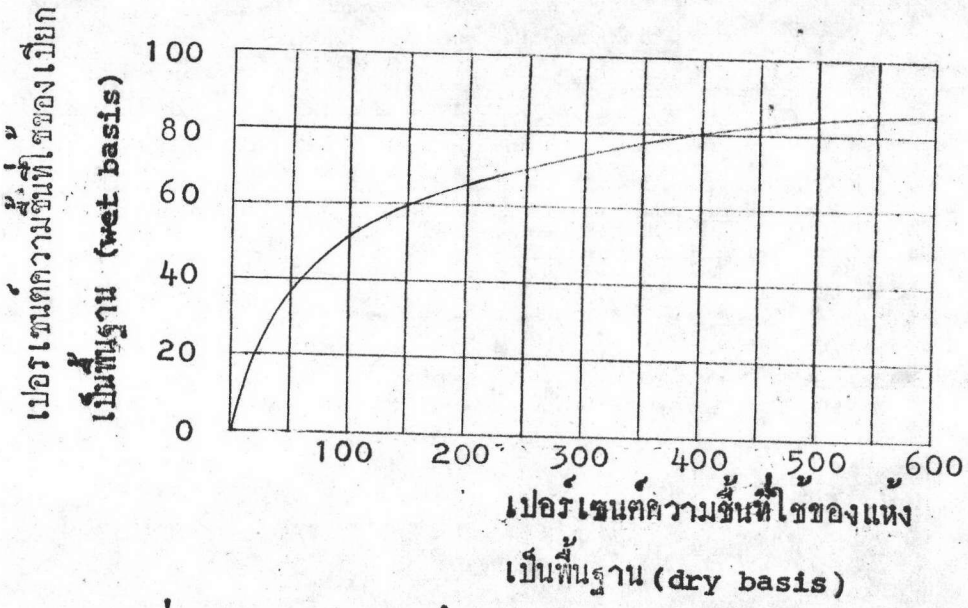
เปอร์เซนต์ความชื้นที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน หาได้โดยเอาน้ำหนักน้ำหารด้วยน้ำหนักของวัตถุแห้ง

$$\text{เปอร์เซนต์ความชื้น (dry basis)} = \left(\frac{W_w}{W_d}\right) \times 100 \ (\%)$$

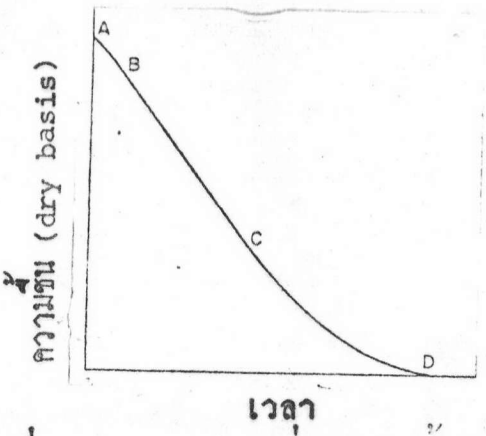
สังเกตได้ว่าในสมการที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน ตัวหารของสมการมีค่าคงที่โดยไม่ขึ้นกับปริมาณความชื้นในของแข็ง ดังนั้นการบอกเปอร์เซนต์ความชื้นที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐานจึงมีประโยชน์ในสมการการแห้งรูปที่ 4.1[10] เป็นกราฟระหว่างเปอร์เซนต์ความชื้นที่ใช้ของเปียกเป็นพื้นฐานและที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน

การทำให้ของแข็งแห้งโดยการทดลอง ข้อมูลที่นำมาใช้มักเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับเวลา โดยนำมาเขียนเป็นกราฟระหว่างความชื้น (dry basis) W กับเวลา θ ดังรูป 4.2[10] จากกราฟแสดงถึงกรณีทั่วไปเมื่อของแข็งที่เปียกสูญเสียความชื้นครั้งแรกโดยการระเหยจากผิวที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำ ติดตามด้วยการระเหยจากผิวที่อิ่มตัวที่มีพื้นที่ค่อย ๆ น้อยลง และถึงขั้นสุดท้ายเมื่อน้ำระเหยจากส่วนในของของแข็ง

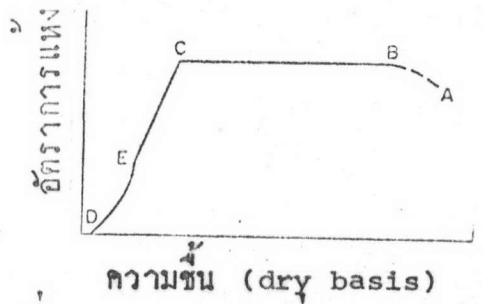
แม้ว่ารูปที่ 4.2 แสดงถึงว่าอัตราการแห้งขึ้นกับการแปรค่า ของเวลาหรือความชื้นในของแข็ง การแปรค่านี้สามารถแสดงให้ชัดเจนขึ้นโดยกราฟหรือโดยดิฟเฟอเรนชิเอท (numerically differentiate) เส้นกราฟและเขียนกราฟระหว่าง $dW/d\theta$ กับ W ดังรูปที่ 4.3[10] หรือ $dW/d\theta$ กับ θ ดังรูปที่ 4.4[10] เส้นกราฟเหล่านี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแห้งไม่ใช่กระบวนการที่ราบเรียบติดต่อกันที่กลไกเพียงอย่างเดียวสามารถควบคุมได้ตลอด รูปที่ 4.4 แสดงถึงว่า แต่ละช่วงของการแห้งใช้เวลาเท่าไร



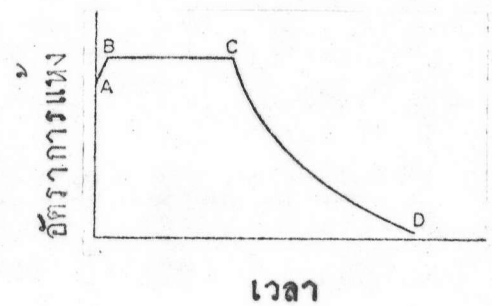
รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างเปอร์เซนต์ความชื้นที่ใช้ของเปียกเป็นพื้นฐานและที่ใช้ของแห้งเป็นพื้นฐาน (10)



รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างความชื้นกับเวลา[10]



รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างอัตราการแห้งกับความชื้น[10]



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างอัตราการแห้งกับเวลา[10]

เส้น BC ของกราฟแต่ละรูปแทนช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่ (constant-rate period) ในรูปที่ 4.2 เส้น BC เป็นเส้นตรงที่มีความชัน dW/dθ คงที่ ซึ่งจะกลายเป็นเส้นตรงในแนวราบในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4

เส้น CD ในรูปที่ 4.2 กำหนดให้เป็น ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลง (falling rate period) (เช่นเดียวกับ CD ในรูปที่ 4.3 และ 4.4) และเป็นช่วงที่มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องในช่วงสุดท้ายของวัฏจักรการแห้ง (drying cycle) จุด E ในรูปที่ 4.3 แสดงถึงจุดที่ผิวภายนอกของของแข็งไม่อิ่มตัวโดยสิ้นเชิง (completely unsaturated) และเป็นจุดเริ่มต้นที่อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในของแข็งเป็นตัวควบคุมอัตราการแห้ง จุด C เป็นเวลาที่อัตราการแห้งคงที่สิ้นสุดลง และเป็นจุดเริ่มต้นของอัตราการแห้งลดลง จุดนี้กำหนดให้เป็น ความชื้นที่จุดวิกฤต (critical moisture content) เส้น AB เป็นช่วงเวลาเริ่มต้น (warming-up period) อาจจะมีความสำคัญหรือไม่สำคัญในกระบวนการแห้ง

4.2.1 ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่ การแห้งดำเนินไปโดยการแพร่ของไอจากผิวที่อิ่มตัวด้วยไอน้ำของวัตถุผ่านชั้นบาง ๆ ของอากาศนิ่ง (stagnant-air film) ไปยังสิ่งแวดล้อม การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในของแข็งเร็วเพียงพอที่จะรักษาสภาพอิ่มตัวที่ผิว และอัตราการส่งผ่านความร้อนไปยังผิวจะควบคุมอัตราการแห้ง อัตราการส่งผ่านมวลสมดุลย์กับอัตราการส่งผ่านความร้อนและอุณหภูมิของผิวที่อิ่มตัวยังคงคงที่ กลไกของการเคลื่อนที่ของความชื้นไม่ขึ้นกับธรรมชาติของของแข็งนั้น

แม้ว่าอุณหภูมิที่ผิวยังคงคงที่ แต่ระดับของอุณหภูมิขึ้นกับวิธีการส่งผ่านความร้อนไปยังผิว ถ้าความร้อนส่งผ่านโดยการพาอย่างเดียวเท่านั้น อุณหภูมิที่ผิวจะเข้าใกล้อุณหภูมิกระเปาะเปียก แต่ถ้าความร้อนส่งผ่านโดยการนำ, การแผ่รังสีหรือการผสมของทั้งสองอย่างรวมกับการพา อุณหภูมิของผิวจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกและจุดเดือดของน้ำ ภายใต้เงื่อนไขเหล่านี้อัตราการส่งผ่านความร้อนเพิ่มขึ้นและอัตราการแห้งจะสูงขึ้น ถ้าความร้อนส่งผ่านโดยการนำอย่างเดียว อุณหภูมิที่ผิวจะเข้าใกล้อุณหภูมิจุดเดือดมากกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ในกรณีเช่นนี้อัตราการแห้งจะสูงกว่าการแห้งโดยการพาความร้อนที่อุณหภูมิเดียวกัน

เมื่อความร้อนทั้งหมดที่ใช้ในการระเหยในช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่ได้มาจากกาซร้อน จะมีการสมดุลย์ระหว่างอัตราการส่งผ่านความร้อนไปยังวัตถุและอัตราการระเหยของไอจากผิว ซึ่งเขียนเป็นสมการ[10] ได้ดังนี้

$$\frac{dw}{d\theta} = \frac{h_t A(t - t_s)}{\lambda} = k_g A(p_s - p)$$

เมื่อ $\frac{dw}{d\theta}$ = อัตราการแห้ง, กรัมต่อชั่วโมง

h_t = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนทั้งหมด, จูลต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร ต่อองศาเซลเซียส

A = พื้นที่ที่มีการส่งผ่านความร้อนและการระเหย, ตารางเมตร

λ = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอที่อุณหภูมิ t_s, จูลต่อกรัม

k_g = สัมประสิทธิ์การส่งผ่านมวล, กรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตรต่อบรรยากาศ

t = อุณหภูมิกาซ(กระเปาะแห้ง), องศาเซลเซียส

t_s = อุณหภูมิของผิวที่มีการระเหย, องศาเซลเซียส

p_s = ความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิผิว t_s, บรรยากาศ

p = ความดันย่อยของไอน้ำในกาซ, บรรยากาศ

กรณีที่ $h_t = h_c$ โดย h_c เป็นสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนโดยการพาอย่างเดียว จะได้ว่า t_s ภายใต้สภาพสมดุลย์ก็คืออุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศและ p_s คือความดันไอที่อุณหภูมินี้ ถ้ามีความร้อนเนื่องจากการแผ่รังสีเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น $h_t = h_c + h_r$ โดย h_r คือสัมประสิทธิ์การแผ่รังสีและ t_s จะมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก ถ้าความร้อนมายังผิวโดยการพาและการนำจะเกิดผลแบบนี้เช่นกัน

จากสมการของอัตราการแห้งข้างต้นจะเห็นว่าขนาดของอัตราการแห้งคงที่นี้ขึ้นกับองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ

1. สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนหรือมวล

2. พื้นที่ที่สัมผัสกับตัวกลางที่ทำให้แห้ง

3. ความแตกต่างของอุณหภูมิหรือความชื้นระหว่างกาซร้อนและผิวเปียกของของแข็ง

องค์ประกอบเหล่านี้เป็นตัวแปรภายนอก กลไกภายในของการไหลของของเหลวไม่มีผลต่ออัตราการแห้งคงที่

ผลส่วนใหญ่ของความเร็วอากาศอยู่ที่ h_c และ k_g เนื่องจากอัตราการส่งผ่านความร้อนและมวลในช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่ส่วนใหญ่ขึ้นกับอัตราการแพร่ของความร้อนและไอ ผ่านชั้นอากาศบางที่ผิวของของแข็ง และความเร็วอากาศเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อความหนาของชั้นอากาศบางนี้ อิทธิพลของทิศทางการไหลของอากาศที่มีต่อสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน h_c และต่ออัตราการแห้ง $\frac{dw}{d\theta}$ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1[11]

ตารางที่ 1 แสดงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนโดยการนำ (h_c) และอัตราการแห้ง ($\frac{dw}{d\theta}$) ในช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่

ทิศทางการไหลของอากาศ	h_c	$\frac{dw}{d\theta}$
ขนานกับผิวระนาบ	$0.0128\ G^{0.8}$	$\frac{0.0128G^{0.8}\ A(t - t_w)}{\lambda}$
ตั้งฉากกับผิวระนาบ	$0.37\ G^{0.37}$	$\frac{0.37\ G^{0.37}\ A(t - t_w)}{\lambda}$

G = ความเร็วมวลของอากาศแห้ง; กรัมต่อชั่วโมงต่อตารางเมตร

t_w = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศแห้ง, องศาเซลเซียส

4.2.2 ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลง กระบวนการแห้งประกอบด้วยระยะซึ่งอัตราการระเหยคงที่และอีกหนึ่งระยะหรือมากกว่านั้นคือ อัตราการแห้งลดลงอย่างต่อเนื่อง ระยะหลังนี้เรียกว่าช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลง ซึ่งเริ่มต้นเมื่อช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่สิ้นสุดลง คือที่ความชื้นที่จุดวิกฤต ถ้าความชื้นสุดท้ายในของแข็งอยู่เหนือความชื้นที่จุดวิกฤต(สำหรับเงื่อนไขของการแห้งบางชนิด) กระบวนการแห้งทั้งหมดจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่อัตราการแห้งคงที่ ในทางตรงกันข้ามถ้าความชื้นเริ่มต้นในของแข็งอยู่ใต้ความชื้นที่จุดวิกฤต กระบวนการแห้งทั้งหมดจะเกิดในช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลง ซึ่งช่วงนี้แบ่งได้เป็น 2 ส่วนคือ

ก. บริเวณของการแห้งของผิวที่ไม่อิ่มตัว

ข. บริเวณที่การเคลื่อนที่ของความชื้นภายในเป็นตัวควบคุม

ในบริเวณแรก ผิวที่กำลังระเหยทั้งหมดไม่สามารถรักษาสภาพอิ่มตัวโดยการเคลื่อนที่ของความชื้นจากภายในของแข็งได้อีกต่อไป ดังนั้นอัตราการแห้งในบริเวณที่ไม่อิ่มตัวจึงลดลง ทำให้อัตราการแห้งที่ผิวทั้งหมดลดลงด้วย ในบางกรณีอัตราการแห้งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับน้ำในของแข็งดังเส้น CE ในรูปที่ 4.3 แต่โดยทั่ว ๆ ไปแล้วอัตราการแห้งขึ้นกับองค์ประกอบหลายอย่างที่มีผลต่อการแพร่ของความชื้นออกจากผิวที่กำลังระเหยและที่มีผลต่ออัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายใน

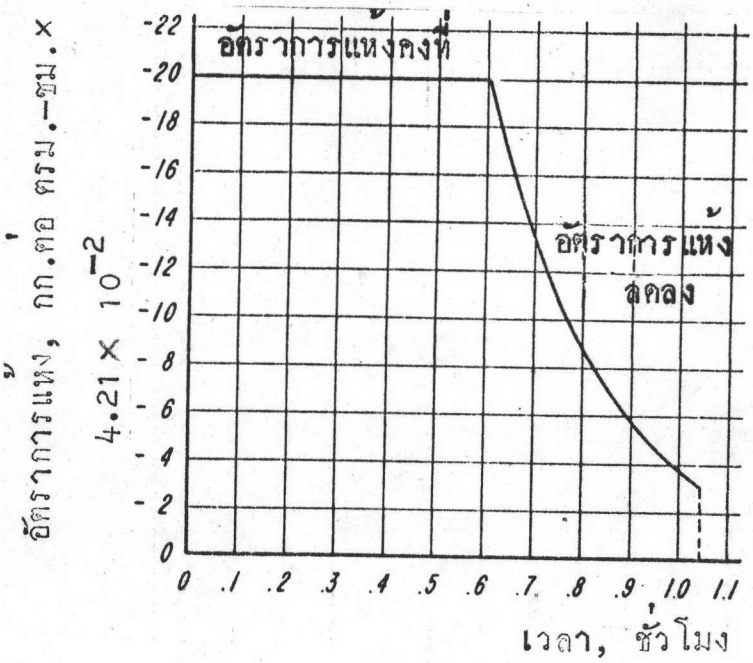
ขณะที่การแห้งดำเนินต่อไป ก็จะมาถึงจุดที่ผิวที่กำลังระเหยไม่อิ่มตัว การระเหยจะเคลื่อนตัวเข้าไปในของแข็ง กระบวนการแห้งเข้าสู่ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลงช่วงที่สอง ซึ่งขณะนี้อัตราการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในจะควบคุมอัตราการแห้ง ตัวแปรภายนอกไม่มีผลอีกต่อไป จากการศึกษาการเคลื่อนที่ของความชื้นภายในพบว่ากลไกควบคุมที่เป็นไปได้มีหลายอย่าง ที่สำคัญคือการแพร่, การดึงดูดของรูเล็ก (capillarity) และผลต่างของความดันเนื่องจากการหดตัว

ที่กล่าวมาแล้วข้างต้นทั้งหมดเป็นการแห้งของของแข็งทางทฤษฎี ของแข็งชนิดไม่มีความชื้น (non - hygroscopic solids) ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลงจะสิ้นสุดเมื่อความชื้นเป็นศูนย์ ตัวอย่างของของแข็งชนิดนี้คือทรายเปียก ของแข็งชนิดมีความชื้น (hygroscopic solids) ช่วงเวลาที่อัตราการแห้งลดลงจะสิ้นสุดเมื่อความชื้นสมดุลย์ (equilibrium moisture content) หมายถึงความชื้นของวัตถุเมื่อสมดุลย์กับความ

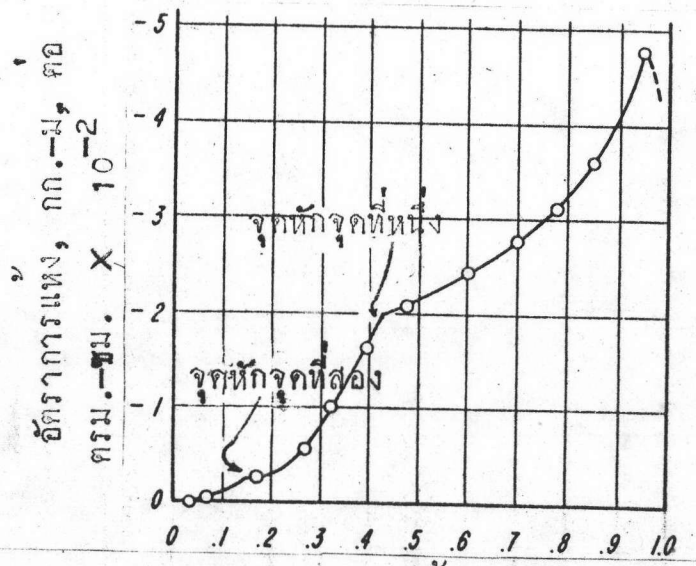
ดันย่อยของไอน้ำของสิ่งแวดล้อม ของแข็งชนิดนี้อาจจะทำให้มีความชื้นต่ำกว่าความชื้นสมดุลย์ได้ ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นอากาศภายในเครื่องอบแห้ง แต่ถ้าเอาออกจากเครื่องอบแห้งของแข็งจะดูดความชื้นกลับจนมีความชื้นสมดุลย์อีก ของแข็งชนิดนี้ได้แก่ผลิตผลที่เป็นอาหาร

การแห้งของของแข็งชนิดมีความชื้นโดยทั่วไปซับซ้อนกว่าชนิดไม่มีความชื้น การทดลองอย่างระมัดระวังอาจจะพบช่วงเวลาสั้น ๆ ของอัตราการแห้งคงที่ในของแข็งชนิดมีความชื้น แต่บ่อยครั้งที่อัตราคงที่นี้ลดลงทันที

รูปที่ 4.5[12] และ 4.6[12] เป็นการแห้งของของแข็งชนิดไม่มีความชื้น และมีความชื้นตามลำดับภายใต้เงื่อนไขภายนอกคงที่คือ อุณหภูมิ, ความชื้นและความเร็วของอากาศ รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการแห้งของทรายเปียก 1 ถาดที่ทำให้แห้งโดยอากาศร้อน รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการแห้งของมันฝรั่ง 1 แผ่นที่ทำให้แห้งโดยอากาศร้อน จากรูปเส้นกราฟของอัตราการแห้งไม่ใช้เส้นที่เรียบ (smooth) แต่จะมีการหักของเส้นหนึ่งหรือสองจุด



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงอัตราการแห้งของทรายเปียก 1 ถาด (12)



รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการแห้งของมันฝรั่ง 1 แผ่น ซึ่งทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (12)