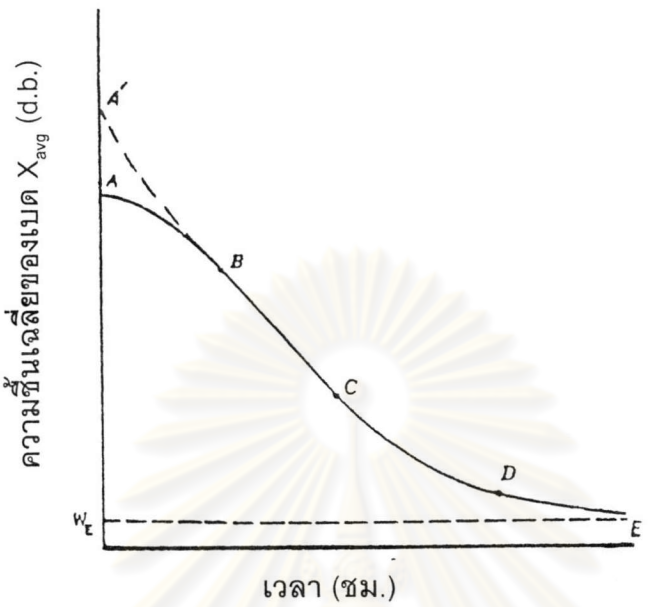
บทที่ 3

ทฤษฎีการอบแห้ง

3.1 ความรู้พื้นฐานของการอบแห้ง [14]

การอบแห้งด้วยลมร้อนเป็นวิธีลดความชื้นในวัสดุชื้นโดยให้สื่อกลาง (Medium) ที่เฉื่อย, ความชื้นต่ำ (ต่ำกว่าความชื้นอิ่มตัว) และอุณหภูมิสูงไหลมาสัมผัสกับวัสดุชื้น เมื่อวัสดุชื้นได้รับความร้อนก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้น และระเหยความชื้นออกมาสู่สื่อกลางที่ไหลผ่านไป ทำให้ชั้นวัสดุมีความชื้นลดลง สาเหตุที่วัสดุชื้นระเหยความชื้นออกไปได้เพราะความดันไอ (Vapor pressure) ของความชื้นในวัสดุมีค่าสูงกว่าความดันย่อย (Partial pressure) ของความชื้นในสื่อกลาง วัสดุชื้นจะระเหยความชื้นออกไปจนกระทั่งความดันทั้งสองสมดุลกัน จึงไม่ระเหยออกไปอีก นั้นคือวัสดุชื้นมีความชื้นสมดุลกับความชื้นสื่อกลาง โดยทั่วไปสื่อกลางและความชื้นไม่จำเป็นต้องหมายถึงลมร้อนกับน้ำเสมอ แต่อาจหมายถึงคู่อื่นก็ได้ เช่น ไนโตรเจนกับเบนซีน เป็นต้น

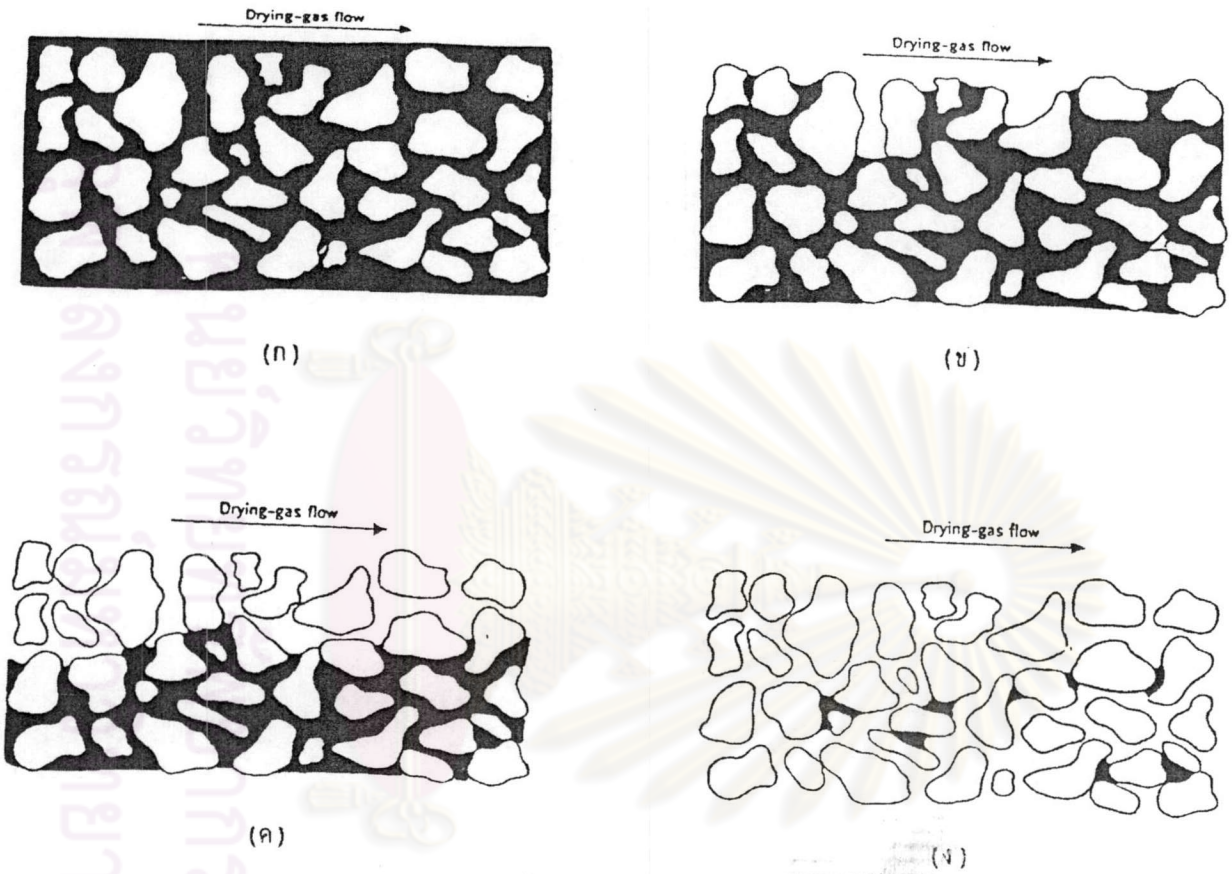
พฤติกรรมของการอบแห้งทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกันคือ เมื่ออบแห้งวัสดุชื้นด้วยลมร้อนปริมาณมากที่มีอุณหภูมิ, ความชื้นและความเร็วคงที่ ทันทีที่ลมร้อนสัมผัสกับวัสดุชื้นอุณหภูมิของวัสดุชื้นจะค่อยๆ เปลี่ยนแปลงจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) ที่สภาวะคงที่อุณหภูมิวัสดุชื้นจะมีค่าคงที่ ถ้าเป็นการอบแห้งด้วยวิธีสัมผัสกับลมร้อนโดยตรง (Direct heating) อุณหภูมิวัสดุชื้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน ถ้าเป็นการอบแห้งด้วยวิธีให้ความร้อนทางอ้อม (Indirect heating) ร่วมด้วย อุณหภูมิวัสดุชื้นจะมีค่าอยู่บนเส้นความชื้นอิ่มตัวระหว่างอุณหภูมิกระเปาะเปียกกับกระเปาะแห้งของลมร้อน เนื่องจากในช่วงนี้อัตราการอบแห้งของวัสดุชื้นมีค่าคงที่ จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งคงที่ (Constant drying rate period) ช่วงนี้จะสิ้นสุดเมื่อความชื้นของวัสดุชื้นลดลงจนเท่ากับความชื้นวิกฤต หลังจากนั้นอุณหภูมิที่ผิวหน้าของวัสดุชื้นจะเพิ่มขึ้น และอัตราการอบแห้งจะช้าลงเรื่อยๆ จึงเรียกช่วงนี้ว่าช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling drying rate period) และในที่สุดอัตราการอบแห้งจะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อความชื้นในวัสดุสมดุลกับความชื้นในลมร้อน ซึ่งเป็นความชื้นต่ำสุด (ความชื้นสมดุล) ของวัสดุภายใต้เงื่อนไขการอบแห้งนั้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในชั้นวัสดุกับเวลาและอัตราการอบแห้งกับความชื้นในวัสดุ มีแสดงอยู่ในรูปที่ 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในการอบแห้งวัสดุชื้นภายใต้เงื่อนไขของลมร้อนที่มีอุณหภูมิ,ความชื้น และความเร็วคงที่ [14]

รูปที่ 3.2 เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งซึ่งได้มาจากรูปที่ 3.1 [14]

ในรูปที่ 3.1 และ 3.2 เส้น AB หรือ A′B เป็นช่วงที่วัสดุชื้นอยู่ในสภาวะที่ไม่คงที่ (Unsteady state) กำลังปรับตัวเพื่อเข้าสู่สภาวะคงที่ที่จุด B ถ้าอุณหภูมิแรกเริ่มของวัสดุชื้นมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของวัสดุชื้นที่จุด B อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุชื้นจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ไปตามเส้น AB ในทางตรงข้ามถ้าอุณหภูมิแรกเริ่มของวัสดุชื้นนั้นสูงกว่าอุณหภูมิของวัสดุชื้นที่ B อัตราการอบแห้งและอุณหภูมิของวัสดุชื้นจะค่อยๆ ลดลงเรื่อยๆ ไปตามเส้น A′B ต่อมาช่วง BC เป็นช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่ ในช่วงที่ผิวหน้าของวัสดุชื้นทั้งหมดจะเปียกน้ำ (มีฟิลม์ของน้ำห่อหุ้มอยู่โดยรอบ) ดังรูปที่ 3.3 ก. และอุณหภูมิของวัสดุชื้นจะมีค่าคงที่ (ซึ่งขึ้นอยู่กับวิธีการให้ความร้อนแก่วัสดุชื้น) เช่น กรณีที่ให้ความร้อนโดยตรง อุณหภูมิของวัสดุชื้นจะเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของลมร้อน เนื่องจากน้ำที่อยู่ภายในวัสดุชื้นจะเคลื่อนที่มาแทนที่น้ำที่ระเหยออกไปกับการพาของกระแสลมร้อนได้ทัน ในช่วงนี้โครงสร้างภายในของวัสดุชื้นไม่มีผลต่ออัตราการอบแห้ง กลไกของการถ่ายเทน้ำจากภายในวัสดุ ออกมาที่ผิวหน้าของวัสดุนั้นมีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุชื้น เช่น วัสดุที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นเส้นใย (Fibrous) หรืออสัณฐาน (Amorphous) การถ่ายเทของน้ำจะเป็นลักษณะการแพร่, วัสดุชื้นที่มีอัตราส่วนช่องว่างที่เปิดกว้าง (Large open void space) การถ่ายเทของน้ำจะถูกควบคุมด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิว เป็นต้น เนื่องจากการถ่ายเทน้ำด้วยการแพร่มีอัตราการถ่ายเทช้ามาก วัสดุชื้นที่มีการถ่ายเทน้ำโดยวิธีนี้จะมีช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่สั้นมากหรืออาจไม่มีเลย ที่จุด C ผิวหน้าของวัสดุเริ่มปรากฏว่ามีน้ำห่อหุ้มไม่สม่ำเสมอ และเรียกจุดนี้ว่าความชื้นวิกฤต (Critical moisture content) ในช่วง CE นั้นอัตราการอบแห้งของวัสดุชื้นจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในวัสดุและลักษณะการถ่ายเทน้ำ ในช่วง CD ซึ่งเรียกว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงแรก (First falling rate period) ในช่วงนี้ผิวหน้าของวัสดุชื้นเริ่มมีน้ำห่อหุ้มน้อยลงทุกที (ดูรูปที่ 3.3 ข) เนื่องจากอัตราการถ่ายเทน้ำจากภายในเนื้อวัสดุออกมาที่ผิวหน้าของวัสดุช้ากว่าอัตราการระเหยน้ำออกจากผิวหน้าของวัสดุ จนกระทั่งถึงจุด D ทั่วทั้งผิวหน้าของวัสดุจะไม่มีฟิลม์ของน้ำเหลืออยู่เลย เมื่อวัสดุมีความชื้นต่ำกว่าจุด D ในรูปที่ 3.2 (ช่วง DE) การระเหยทั้งหมดจะต้องเกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุก่อน ในขณะที่ความชื้นของวัสดุมีค่าลดลงระยะทางสำหรับการนำความร้อนและการแพร่ ของมวลก็จะมากขึ้น จนกระทั่งวัสดุมีความชื้นเท่ากับความชื้นสมดุล (จุด E) ซึ่งจะไม่เกิดการอบแห้งอีกต่อไป ช่วงการอบแห้งช่วงนี้เรียกว่าช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงที่สอง (Second falling rate period) (ดูรูปที่ 3.3 ค) เมื่อไม่มีการอบแห้งเกิดขึ้นอีก การกระจายตัวของความชื้นจะมีลักษณะดังในรูปที่ 3.3 ง



รูปที่ 3.3 การกระจายความชื้นในวัสดุระหว่างการอบแห้งในช่วงต่างๆ [14]

(ก) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วคงที่

(ข) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงแรก

(ค) ช่วงการอบแห้งที่ความเร็วลดลงช่วงสอง

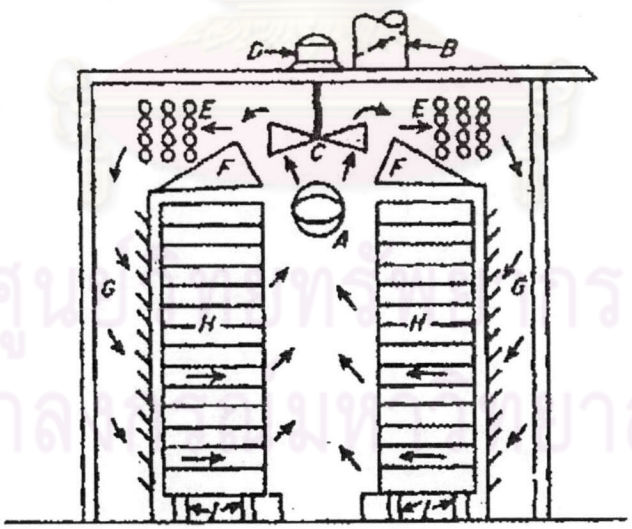
(ง) เมื่อสิ้นสุดการอบแห้ง

เส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้ง (Drying characteristic curve) นั้นขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวัสดุชื้น, วิธีการอบแห้งและเงื่อนไขของการอบแห้ง (เช่น อัตราการป้อนความร้อน (Heating rate) เป็นต้น) ยกตัวอย่างทรายที่อบแห้งเป็นชั้นนิ่งบนสายพานที่กำลังเคลื่อนที่ ย่อมมีลักษณะเฉพาะของการอบแห้งแตกต่างจากทรายที่อบแห้งอยู่ในเครื่องอบแห้งแบบหมุน (Rotary dryer) เป็นต้น

3.2 ชนิดของเครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรม [15]

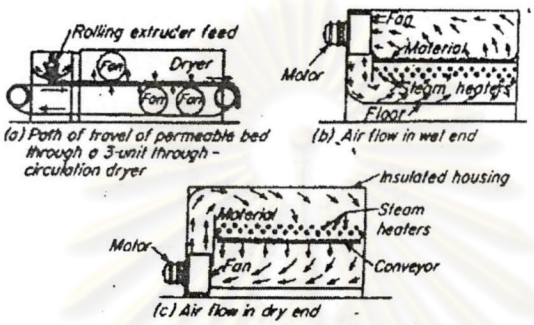
เครื่องอบแห้งที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนมากมีดังต่อไปนี้

3.2.1 **เครื่องอบแห้งแบบถาด** (Tray dryer) ลักษณะทั่วไปจะเป็นดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเครื่องอบแห้งมีลักษณะเป็นห้องสี่เหลี่ยมภายในจะวางรถเข็นที่มีลักษณะเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นก็จะวางถาดหรือตะแกรงเพื่อใส่วัสดุที่จะทำการอบ โดยจะมีพัดลม (C) ทำหน้าที่หมุนเวียนอากาศ และชุดให้ความร้อน (Heater: E) เป็นแหล่งพลังงาน และมีแผ่นบัฟเฟอร์ (Baffle: G) ทำหน้าที่กระจายลมไปบนแต่ละตะแกรง อากาศชื้นจะถูกปล่อยออกที่ปล่อง (B) และอากาศใหม่จะเข้ามาในช่อง A ซึ่งเครื่องอบแห้งชนิดนี้จะเหมาะกับการอบแห้งปริมาณน้อยๆ และผลิตภัณฑ์ที่อบโดยมากจะเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง เช่น เวชภัณฑ์หรือยา



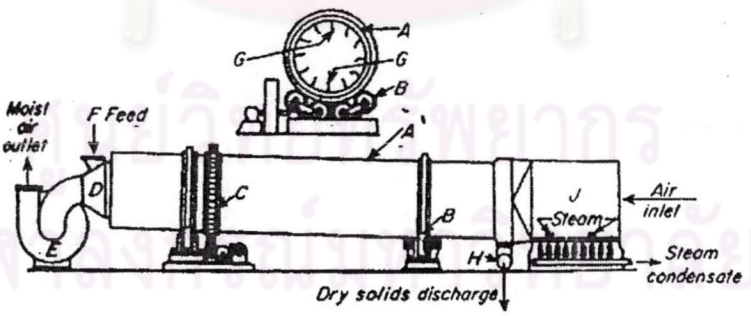
รูปที่ 3.4 เครื่องอบแห้งแบบถาด (Tray Dryer) [15]

3.2.2 **เครื่องอบแห้งแบบสายพานลำเลียง** (Screen – Conveyor Dryer) โดยทั่วไปจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.5 โดยความหนาของชั้นวัสดุประมาณ 1 ถึง 6 นิ้ว วัสดุจะถูกทำให้แห้งแบบช้าๆ ไปตามสายพาน ในห้องอบจะประกอบไปด้วยชุดของพัดลมและแท่งความร้อน (Heater) แยกจากกันเป็นชุดๆ โดยในรูปที่จะมีทั้งหมดสามชุด ซึ่งในการทำงานแต่ละชุดอาจมีค่าอุณหภูมิและความชื้นที่ต่างกันได้ ซึ่งขึ้นกับความเหมาะสม



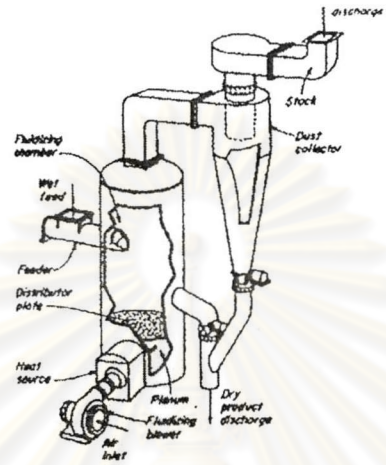
รูปที่ 3.5 เครื่องอบแห้งแบบไหลผ่านชนิดสายพานลำเลียง
(Through-circulation screen-conveyor dryer) [16]

3.2.3 **เครื่องอบแห้งแบบหมุน** (Rotary Dryer) มีลักษณะดังรูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งชนิดนี้จะมีลักษณะภายในเป็นทรงกระบอกหมุนที่มีลมร้อนไหลผ่าน อัตราการอบแห้งจะสูง และต้องใช้ปริมาณอากาศร้อนมาก ความเร็วรอบของการหมุนจะต้องพอเหมาะเพื่อให้การตกของวัสดุดีที่สุด



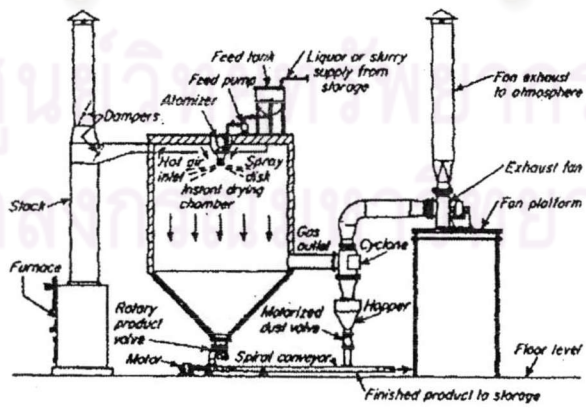
รูปที่ 3.6 เครื่องอบแห้งแบบหมุน : A คือ ส่วนอบแห้ง (Dryer shell), B คือ ลูกกลิ้งที่รองรับส่วนอบแห้งที่หมุน, C คือ เกียร์ขับ, D คือ ปล่องปล่อยอากาศทิ้ง, E คือ พัดลมดูดอากาศทิ้ง, F คือ ส่วนป้อน, G คือ ลิฟติ้งไฟท์ (Lifting flights), H คือ ส่วนที่เอาวัสดุออก และ J คือ ส่วนสร้างอากาศร้อน [16]

3.2.4 **เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบด** (Fluidized-bed dryer) จะใช้กับวัสดุที่มีขนาดเล็ก ลมร้อนจะเป็นตัวทำให้วัสดุลอยตัว และเคลื่อนไหวในอากาศได้ วัสดุที่ถูกอบแห้งจะมีน้ำหนักลดลงเรื่อยๆ และจะถูกพาออกไปแยกจากอากาศร้อนที่ไซโคลน ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.7



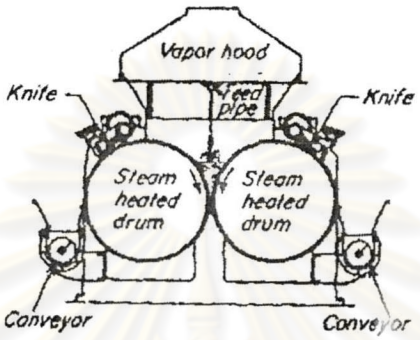
รูปที่ 3.7 เครื่องอบแห้งแบบฟลูอิดไดซ์เบดแบบต่อเนื่อง [15]

3.2.5 **เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย** (Spray dryer) เป็นเครื่องอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเมื่ออบแห้งแล้วจะได้วัสดุที่เป็นผงนำไปละลายได้ง่าย การอบแห้งจะใช้การพ่นสารละลายเป็นฝอยไหลสวนทางหรือไหลตามกับลมร้อน มักใช้อบแห้งวัสดุที่ต้องการผลิตภัณฑ์เป็นผงละเอียดขนาด 50 ไมโครเมตร ถึงโตสุด 500 ไมโครเมตร เช่น ผงซักฟอก



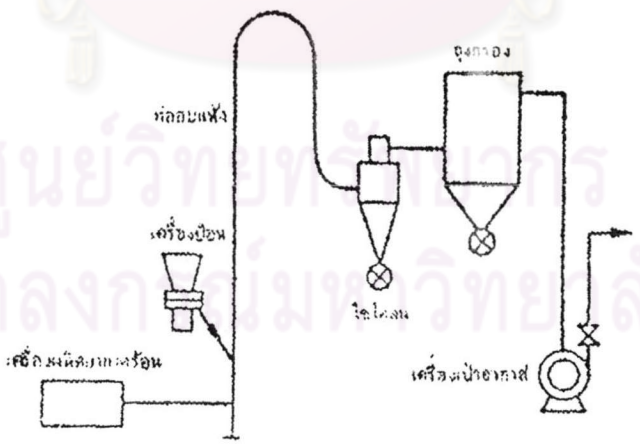
รูปที่ 3.8 เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray dryer) [15]

3.2.6 **เครื่องอบแห้งแบบดรัม** (Drum dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกปิดที่หมุนได้ ภายในทรงกระบอกจะมีแหล่งให้ความร้อน วัสดุที่จะถูกอบแห้งมีลักษณะเป็นของเหลวข้น (Slurry) เกาะเป็นชั้นฟิลม์ที่ผิวนอก วัสดุที่แห้งจะติดที่ผิวนอกทรงกระบอกซึ่งจะมีใบมีดขูดวัสดุออก



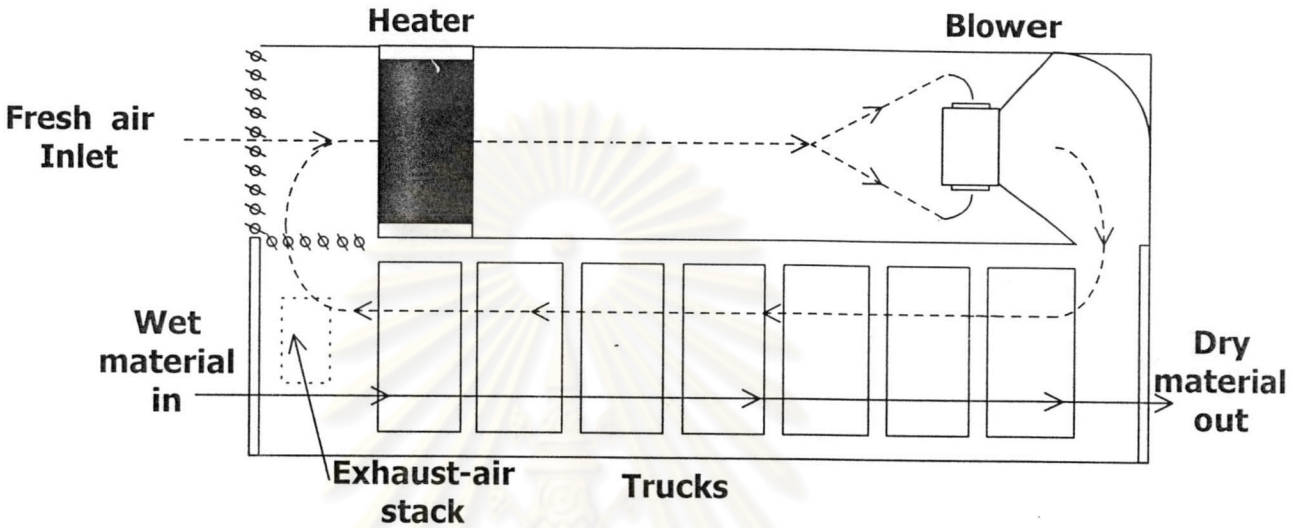
รูปที่ 3.9 เครื่องอบแห้งแบบดรัม (Drum dryer) [16]

3.2.7 **เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม** (Pneumatic conveying dryer) เป็นเครื่องอบแห้งที่ใช้กับวัสดุที่เป็นผงหรือฝุ่นที่สามารถถูกพาไปกับลมร้อนได้ง่าย การอบแห้งจะเกิดขณะที่วัสดุถูกพาไปกับลมร้อน และแยกวัสดุออกจากลมร้อนที่ไซโคลน

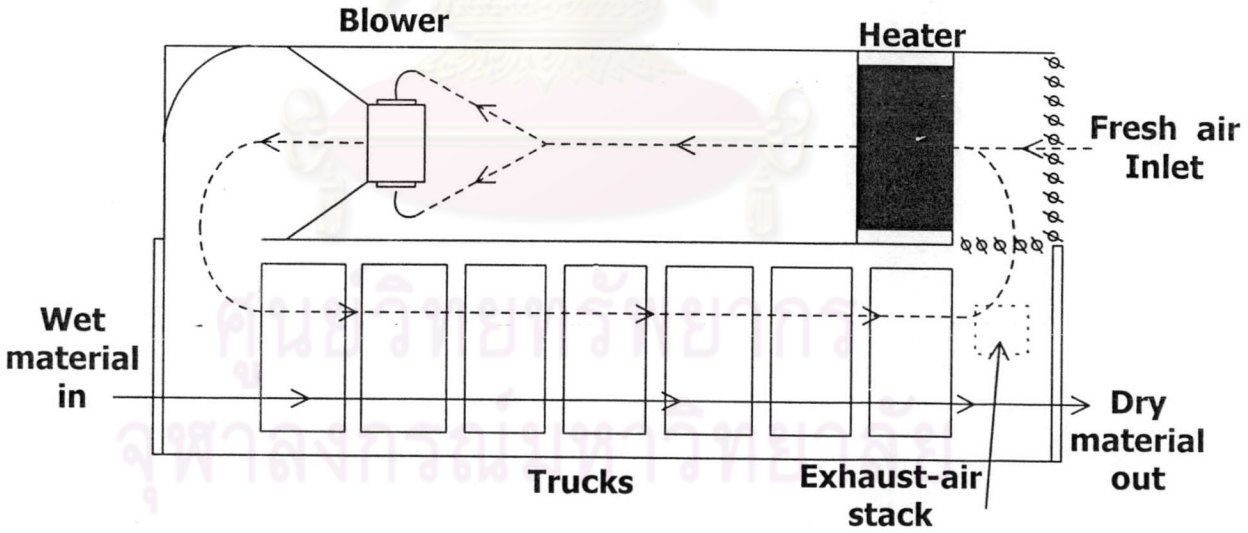


รูปที่ 3.10 เครื่องอบแห้งแบบพาหะลม (Pneumatic conveying dryer) [16]

3.2.8 **เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์** (Tunnel dryers) เป็นเครื่องอบแห้งแบบต่อเนื่องซึ่งมีลักษณะคล้ายเครื่องอบแห้งแบบถาด แต่วัสดุจะมีการเคลื่อนที่ไปด้วยระหว่างการอบ ซึ่งมีทั้งแบบไหลสวนทาง และไหลขนาน ดังรูปที่ 3.11



a) แบบไหลสวนทาง



b) แบบไหลขนาน

รูปที่ 3.11 เครื่องอบแห้งแบบอุโมงค์ (a เป็นแบบไหลสวนทางและ b เป็นแบบไหลขนาน)

[17]

นอกจากนี้ก็ยังมีเครื่องอบแห้งอีกหลายชนิดที่ไม่กล่าวถึง เช่น แบบแช่แข็ง (Freeze dryer), แบบอินฟราเรด (Infrared dryer), แบบไดอิเล็กทริค (Dielectric dryer), แบบไมโครเวฟ (Microwave dryer) เป็นต้น

3.3 หลักการพื้นฐานของการเลือกเครื่องอบแห้ง [16]

มีหัวข้อสำหรับการพิจารณาก่อนทำการเลือกประเภทเครื่องอบแห้งดังนี้

3.3.1 หัวข้อเกี่ยวกับคุณภาพของผลิตภัณฑ์อบแห้ง ได้แก่

- การเสื่อมคุณภาพเนื่องจากความร้อน เราสามารถกำหนดอุณหภูมิสูงสุดของวัสดุที่ยอมรับได้ในระหว่างการอบแห้ง ซึ่งเป็นเงื่อนไขการออกแบบอันแรกเกี่ยวกับการกำหนดอุณหภูมิของลมร้อน โดยทั่วไปแล้วขีดของการเสื่อมคุณภาพจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของวัสดุในระหว่างอบแห้งและเวลาที่ใช้ในการอบแห้ง
- รูปทรงและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คุณค่าทางการค้า
- การทำให้ผลิตภัณฑ์มีมลทิน เช่น มีกลิ่นไหม้ติด

3.3.2 หัวข้อเกี่ยวกับความสามารถในการอบแห้งและโครงสร้างของเครื่องอบแห้ง

- คุณสมบัติอบแห้งของวัสดุเปียกชื้น เพื่อใช้ในการตั้งเงื่อนไขของการอบแห้งให้เหมาะสม
- คุณสมบัติการเกาะติดของวัสดุ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดการเก็บวัสดุ
- การขับน้ำออกล่วงหน้า โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายของการขับน้ำออกจากวัสดุโดยเครื่องมือกลจะต่ำกว่าค่าใช้จ่ายของการเดินเครื่องอบแห้งมาก

3.3.3 หัวข้อเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายรวมของการอบแห้ง

3.4 สมการพื้นฐานการอบแห้ง [18]

สมการพื้นฐานที่ใช้ในการอบแห้งไม่ว่าจะเป็นเครื่องอบแห้งชนิดใดก็ตามสามารถที่จะคำนวณค่าต่างๆ ที่เกี่ยวข้องได้จากสมการพื้นฐานได้แก่ดุลมวลสาร ดุลพลังงาน รอบระบบและสมการอัตราการอบแห้ง รอบระบบซึ่งประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ ในรูปที่ 3.12 และสมการดังนี้

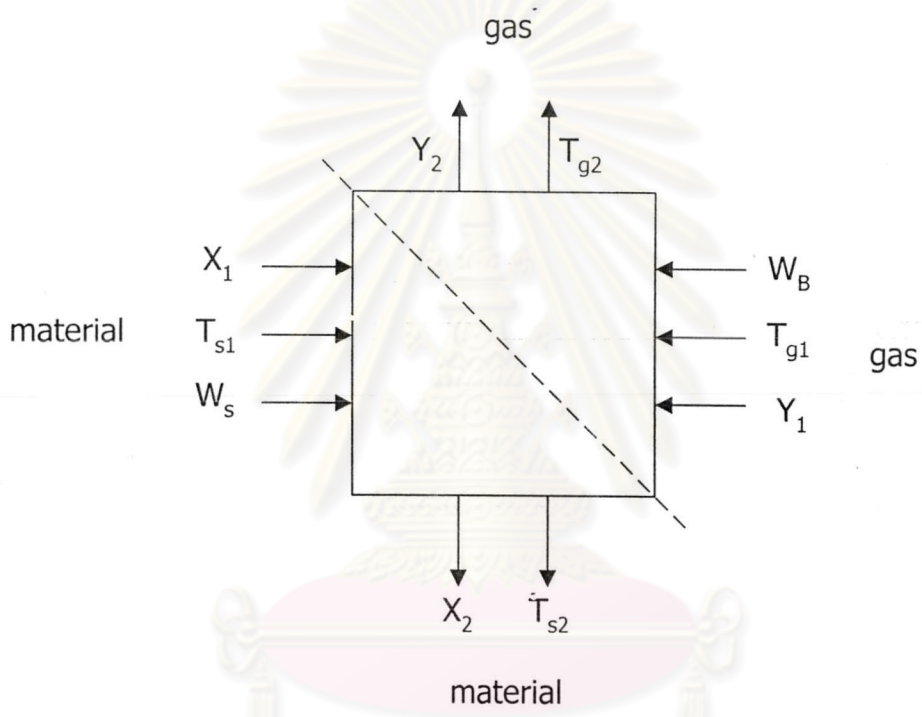
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการดุลมวลสาร

ดุลมวลของน้ำในวัฏภาคของแข็ง

(อัตราการสะสมน้ำในวัสดุชื้น) = (อัตราการไหลเข้าของน้ำในวัสดุชื้น)-(อัตราการไหลออกของน้ำในวัสดุชื้น)-(อัตราการระเหยออกจากวัสดุชื้น)

$$\frac{dM_s X}{d\theta} = W_s(X_{in} - X_{out}) - RM_s \qquad \text{.....(3.1)}$$



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของข้อมูลที่ใช้ในการคำนวนเกี่ยวกับเครื่องอบแห้ง [18]

ดุลมวลของน้ำในวัฏภาคของก๊าซ

(อัตราการสะสมไอน้ำในลมร้อน) = (อัตราการไหลเข้าของไอน้ำในลมร้อน)-(อัตราการไหลออกของไอน้ำในลมร้อน) + (อัตราการระเหยน้ำออกจากวัสดุชื้น)

$$\frac{dM_G H}{d\theta} = W_G(H_{in} - H_{out}) + RM_s \qquad \text{.....(3.2)}$$

สมการดุลพลังงาน

ดุลพลังงานในวัฏภาคของของแข็ง

(อัตราการสะสมพลังงานความร้อนในวัสดุชื้น) = (อัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนในวัสดุชื้น) – (อัตราการไหลออกของพลังงานความร้อนในวัสดุชื้น) + (อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากลมร้อนเข้ามา) – (อัตราของพลังงานความร้อนที่ใช้ไปในการระเหยน้ำ)

$$\frac{dM_s(C_s + C_w X)T_s}{d\theta} = W_s[(C_s + C_w X_{in})T_{\sin} - (C_s + C_w X_{out})T_{sout}] + UaV(T_{Gout} - T_{sout}) - RM_s(\lambda_R + C_v T_{Gout}) \quad \text{.....(3.3)}$$

ดุลพลังงานในวัฏภาคของก๊าซ

(อัตราการสะสมพลังงานความร้อนในลมร้อน) = (อัตราการไหลเข้าของพลังงานความร้อนในลมร้อน) – (อัตราการไหลออกของพลังงานความร้อนในลมร้อน) – (อัตราการถ่ายเทพลังงานความร้อนจากลมร้อนไปสู่วัสดุชื้น) + (อัตราของพลังงานความร้อนที่ไหลเข้ามาพร้อมกับไอน้ำที่ระเหยออกจากวัสดุชื้น)

$$\frac{dM_G i_G}{d\theta} = W_G(i_{Gin} - i_{Gout}) + UaV(T_{Gout} - T_{sout}) + RM_S(\lambda_R + C_v T_{Gout}) \text{.....(3.4)}$$

สมการอัตราการอบแห้งในงานวิจัยนี้จะได้จากการทำการทดลอง สมการพื้นฐานเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับเครื่องอบแห้งชนิดต่างๆ ต่อไป รายละเอียดจะอยู่ในบทต่อๆ ไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย