

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำผึ้ง (honey)

น้ำผึ้ง เป็นผลผลิตของน้ำหวานจากดอกไม้และจากแหล่งน้ำหวานอื่นๆ ซึ่งผึ้งงานนำมาเก็บสะสม ผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพบางประการแล้วเก็บสะสมไว้ในรังผึ้ง น้ำผึ้งมีลักษณะที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับน้ำหวานจากดอกไม้ที่ผึ้งเก็บมาทำเป็นน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่ได้จากธรรมชาติจะมีรสหวานจัด มีกลิ่นหอม ไม่มีสีจนกระทั่งมีสีเข้มเกือบดำขึ้นอยู่กับชนิดของดอกไม้ ลักษณะของน้ำผึ้งที่ดีควรมีลักษณะใส มีความข้นหนืดซึ่งแสดงว่ามีน้ำน้อย มีกลิ่นหอมของน้ำผึ้ง และดอกไม้ตามแหล่งที่ได้มา ไม่มีฟองอันเนื่องมาจากการบูด สะอาด ไม่มีไขผึ้งหรือตัวผึ้งผสมอยู่ในน้ำผึ้งจากดอกไม้ที่ต่างชนิดกันยังมีส่วนประกอบของน้ำตาลแตกต่างกันไปด้วย เช่น สัดส่วนของน้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสไม่เท่ากัน ดังนั้นน้ำผึ้งที่มาจากแหล่งต่างๆจะมีสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกัน เช่น สี กลิ่นรส หรือสมบัติในการตกผลึก (สิริวัฒน์ และคณะ, 2528)

2.1.1 ส่วนประกอบทางเคมีและปริมาณสารอาหารในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งเป็นสารละลายน้ำตาลอิมิตัวยิ่งยวด ส่วนประกอบในน้ำผึ้งสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนประกอบหลัก (major constituent) ได้แก่ น้ำตาลชนิดต่างๆ กรด แร่ธาตุ เอนไซม์ และส่วนประกอบย่อย (minor constituent) ได้แก่ วิตามิน ไขมัน โปรตีน สารที่ให้กลิ่น อินฮิบิน (inhibine) จีผึ้ง อินทรีย์ เคมีฟอสเฟต ละอองเกสร Hydroxymethyl furfural (HMF) เป็นต้น น้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำผึ้ง ได้แก่ กลูโคส และฟรักโทส โดยมีปริมาณเท่ากับ 33-35 และ 38-40% ตามลำดับ (Hebbar *et al.*, 2008)

ประเภทของน้ำตาลในน้ำผึ้ง แบ่งเป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. โมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) ได้แก่ กลูโคสและฟรักโทส
2. ไดแซคคาไรด์ (disaccharide) ได้แก่ ซูโครส มอลโทส ไอโซมอลโทส นิจิโรส และโคจิไบออส และไตรแซคคาไรด์ (trisaccharide) ได้แก่ มิลิซิโทส ราฟฟิโนส
3. โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) เป็นน้ำตาลที่มีโมเลกุลซับซ้อน เช่น เดกซ์ทริน

น้ำผึ้งมีเอนไซม์ประกอบอยู่หลายชนิด เอนไซม์สำคัญที่สุดที่พบในน้ำผึ้ง คือ อินเวอร์เทส (invertase) มีหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสในน้ำหวานเป็นน้ำตาลอินเวิร์ต ได้แก่ กลูโคส และ ฟรักโทส (The Nation Honey Board, 2009) น้ำตาลฟรักโทสเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของน้ำผึ้ง โดยผึ้งได้นำตาลซูโครสจากดอกไม้ที่มีความเข้มข้นประมาณ 20% ใช้เอนไซม์เปลี่ยนน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลฟรักโทสและกลูโคสเป็นส่วนใหญ่ซึ่งมีความเข้มข้นประมาณ 80% ดังสมการ 2.1



น้ำผึ้งยังมีเอนไซม์ชนิดไดแอสเทส (diastase) หรืออะไมเลส (amylase) โดยจะทำหน้าที่ย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล เอนไซม์คะตะเลส (catalase) ซึ่งเปลี่ยนเปอร์ออกไซด์ให้เป็นน้ำและออกซิเจน เอนไซม์กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) ทำหน้าที่เปลี่ยนกลูโคสเป็นกลูโคโนแลคโตน กรดกลูโคนิก และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญและทำลายเชื้อโรคได้ (The Nation Honey Board, 2009) นอกจากนี้ เอนไซม์กลูโคสออกซิเดสและคะตะเลสยังถือว่าเป็นเอนไซม์ที่มีสมบัติต้านอนุมูลอิสระ (enzymatic antioxidants) ส่วนสารต้านอนุมูลอิสระอื่นๆที่อยู่ในน้ำผึ้งซึ่งไม่ใช่เอนไซม์ (non-enzymatic antioxidants) ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก ฟลาโวนอยด์ กรดฟีนอลิก อนุพันธ์ของแคโรทีนอยด์ กรดอินทรีย์ ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาล กรดอะมิโน และโปรตีน (Ferreira *et al.*, 2009) และยังพบแอลฟา-โทโคเฟอรอล ซึ่งเป็นรูปแบบหนึ่งของวิตามินอีที่มีสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Ahmed *et al.*, 2007) ทำให้น้ำผึ้งมีสมบัติในการเป็นสารยืดอายุการเก็บของอาหารได้

น้ำผึ้งยังมีสรรพคุณทางยาหลายประการ (ฝ่ายวิชาการ, 2546) เช่น แก้ท้องเดิน ช่วยเร่งให้ลำไส้ที่อักเสบให้มีการฟื้นตัวเร็วขึ้น แก้ช่องคลอดอักเสบจากเชื้อรา (เชื้อแคนดิดา) บำรุงร่างกาย กล้ามเนื้อเป็นตะคริว น้ำผึ้งสามารถใช้ในการรักษาแผลเรื้อรัง นอกจากนี้ยังใช้ผสมยาแก้ไอหรือยาละลายต่างๆ ซึ่งยังมีเกสซ์ตำรับหลายชนิดที่ยังใช้น้ำผึ้งอยู่ (อุดม และสุทธิชัย, 2551)

ในน้ำผึ้งยังมีแร่ธาตุหลายชนิด เช่น เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม โซเดียม ทองแดง โพแทสเซียม และแมงกานีส มีกรดแอมิโนต่างๆ เช่น ไลซีน ฮิสติดีน อาจินิน แอสพาร์ติก ทรีโอนิน เซอรีน กลูตามิก โพรลีน ไกลซีน อะลานิน ซีสตีน วาลีน เมทไทโอนิน ไอโซลิวซีน ไทโรซีน เพนนิอะลานิน และทริพโตเฟน มีละอองเกสรดอกไม้เจือปนอยู่ ซึ่งในละอองเกสรนี้มีสารโปรตีนประมาณ 35% มีวิตามินบี1 บี2 บี6 บี12 วิตามินซี วิตามินดี วิตามินอี และวิตามินเค (แสนนัด, 2537) ส่วนประกอบและสมบัติทางเคมีของน้ำผึ้งแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบและสมบัติทางเคมีของน้ำผึ้ง

| ส่วนประกอบ (%) | ค่าเฉลี่ย |
|----------------|-----------|
| ความชื้น | 17.2 |
| น้ำตาลฟรักโทส | 38.4 |
| น้ำตาลกลูโคส | 30.3 |
| น้ำตาลซูโครส | 1.3 |
| น้ำตาลมอลโทส | 7.3 |
| น้ำตาลอื่นๆ | 1.4 |
| กรด | 0.57 |
| โปรตีน | 0.041 |
| เถ้า | 0.169 |
| ฟิเอช | 3.91 |

ที่มา : พิชัย (2548)

น้ำผึ้งแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางเคมีแตกต่างกันตามชนิดของดอกไม้ที่ให้น้ำหวาน น้ำผึ้งสามารถจัดแบ่งเป็นเกรดที่แตกต่างกันโดยใช้ปริมาณความชื้นเป็นเกณฑ์ น้ำผึ้งที่มีความชื้นต่ำกว่า 21% แสดงว่าเป็นน้ำผึ้งเกรดเอ หากปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งยิ่งมากคุณภาพของน้ำผึ้งยิ่งลดลง (หลวงบุเรศร, 2528) น้ำผึ้งที่มีคุณภาพต่ำ คือ น้ำผึ้งมีความเข้มข้นของน้ำตาลต่ำกว่า 78% (พิชัย, 2548) การจัดเกรดของน้ำผึ้งตามปริมาณของแข็งและความชื้นแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การจัดเกรดของน้ำผึ้งตามปริมาณของแข็งและความชื้น

| เกรดของน้ำผึ้ง | ปริมาณของแข็งต่ำสุด (%) | ปริมาณความชื้น (ฐานเปียก%) |
|----------------|-------------------------|----------------------------|
| เกรด A | 81.4 | 18.6 |
| เกรด B | 81.4 | 18.6 |
| เกรด C | 80.0 | 20.0 |

ที่มา : The Nation Honey Board (2009)

2.1.2 ปัญหาการตกผลึกของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งตกผลึก (crystallized honey) คือ น้ำผึ้งที่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวมาเป็นของแข็งหรือเป็นผลึก สาเหตุมาจากน้ำผึ้งชนิดนั้นมีความหวานมากหรือมีปริมาณกลูโคสมาก โดยน้ำตาลที่ตกผลึกนี้คือ น้ำตาลกลูโคสที่มีประโยชน์เนื่องจากเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยว การชั่งน้ำหนักก่อนผลึกหมายความว่า ปริมาณกลูโคสมากแต่น้ำหรือความชื้นในน้ำผึ้งมีน้อยก็จะตกผลึกได้ง่าย และจะตกผลึกเร็วขึ้นเมื่อเก็บน้ำผึ้งในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งน้ำผึ้งที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C จะทำให้ได้ผลึกที่มีคุณภาพดี หากเก็บที่อุณหภูมิห้อง (20°C) ผลึกที่ได้จะมีลักษณะเป็นเม็ดหยาบ หากเก็บรักษาที่อุณหภูมิปานกลาง ($4-10^{\circ}\text{C}$) จะได้ผลึกที่มีขนาดไม่สม่ำเสมอเกินไป การเก็บรักษาน้ำผึ้งที่อุณหภูมิต่ำจะมีผลทำให้ได้ผลึกขนาดเล็กซึ่งเกิดจากการจำกัดการเคลื่อนที่ของโมเลกุล (Hebber *et al.*, 2008) โดยปกติ น้ำผึ้งทั่วไปไม่ค่อยตกผลึกเพราะมีฟรักโทสมากกว่ากลูโคส ถ้ามีฟรักโทสมากกว่ากลูโคสถึง 1.5 เท่า น้ำผึ้งจะไม่เกิดการตกผลึก (Yong, 2003) การตกผลึกของน้ำผึ้งถือว่าเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ซับซ้อน ซึ่งไม่สามารถควบคุมไม่ให้เกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรักษาได้ การตกผลึกของน้ำผึ้งแม้จะเกิดขึ้นพบว่า การตกผลึกจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นและอัตราส่วนของน้ำตาลกลูโคสในน้ำผึ้ง โดยความเร็วในการตกผลึกของกลูโคสเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงความหนืดที่มักเกิดขึ้นในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิลดลงกลูโคสที่อิมตัวอย่างขวยคั้งจะเกิดการก่อผลึกทำให้ความหนืดของน้ำผึ้งเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของกลูโคสลดลงเป็นผลให้เกิดการรวมตัวเป็นผลึกเพิ่มมากขึ้น (Hebber *et al.*, 2008)

การตกผลึกเป็นตะกอนของน้ำผึ้ง ทำให้ผู้บริโภคเข้าใจว่าเป็นน้ำผึ้งปลอมแต่ถ้าหากสังเกตให้ดีและเปรียบเทียบการตกผลึกอย่างละเอียดระหว่างเกล็ดน้ำตาลกับน้ำผึ้งจะพบว่าไม่เหมือนกัน โดยน้ำผึ้งแท้จะมีรูปแบบของผลึกเป็นเหลี่ยมแท่งที่คม ส่วนผลึกของน้ำผึ้งปลอมที่มีส่วนผสมของน้ำตาลทรายจะมีรูปสี่เหลี่ยมคางหมูซึ่งตรวจสอบได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ผู้บริโภคที่เป็นนักบริโภคน้ำผึ้งบางรายนิยมรับประทานน้ำผึ้งตกผลึก เพราะมีรสชาติและเนื้อสัมผัสแตกต่างจากน้ำผึ้งในรูปของเหลว รวมทั้งง่ายต่อการรับประทาน ด้านการตลาดบางบริษัทผลิตน้ำผึ้งในรูปน้ำผึ้งครีมหรือน้ำผึ้งตกผลึกจำหน่ายแต่ยังไม่แพร่หลาย น้ำผึ้งที่ตกผลึกสามารถแก้ไขให้กลับคืนสภาพเดิมได้ โดยการนำน้ำผึ้งตกผลึกในภาชนะบรรจุไปแช่ในน้ำอุ่นอุณหภูมิไม่เกิน 60°C ถ้าเกินกว่านี้จะทำให้สารอินฮิบิน (inhibine) และอื่นๆที่มีอยู่ในน้ำผึ้งสูญเสียไป (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2550)

การตกผลึกในน้ำผึ้งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพ คือ ความขุ่น แรงยึดเกาะ ความแน่นเนื้อ ความหนืด และความสว่างของสีเพิ่มขึ้น ส่วนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี คือ ทำให้ค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) เพิ่มขึ้น (ขนิษฐา, 2550) การตกผลึกส่งผลให้ความเข้มข้นของกลูโคสในน้ำผึ้งเหลวลดลง เป็นสาเหตุให้ค่า a_w ของน้ำผึ้งเหลวเพิ่มขึ้น และการเพิ่มขึ้นของค่า a_w นี้จะส่งผล

ให้เกิดการเจริญของยีสต์ที่มีอยู่ในน้ำผึ้งได้ และเกิดกระบวนการหมักโดยยีสต์ดังกล่าวที่ทนต่อความเข้มข้นของน้ำตาลสูงๆ ได้ (Zamora and Chirife, 2006) ตัวอย่างของน้ำผึ้งที่ตกผลึกง่าย ได้แก่ น้ำผึ้งดอกลิ้นจี่ น้ำผึ้งดอกทานตะวัน และน้ำผึ้งดอกยางพารา (พิชัย, 2548)

2.1.3 ผลกระทบจากน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งถูกนำไปใช้เป็นส่วนผสมของอาหารมากมายหลายชนิด เพราะนอกจากจะให้คุณค่าทางโภชนาการแล้ว ยังมีสมบัติทางยาให้กับผู้บริโภคได้ด้วย จึงทำให้น้ำผึ้งถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์อาหารเข้า ลูกกวาด แยม ขนมปัง เครื่องดื่ม ผลิตภัณฑ์นม และไอศกรีม รวมถึงการนำไปใช้ในด้านการถนอมอาหาร ตัวอย่างการแปรรูปและการนำน้ำผึ้งไปใช้ประโยชน์ มีดังต่อไปนี้

2.1.3.1 ไวน์น้ำผึ้ง (mead)

โดยธรรมชาติแล้วน้ำผึ้งที่มีปริมาณน้ำในน้ำผึ้งมากกว่า 22% จะเกิดการหมักด้วยยีสต์ในธรรมชาติทำให้เกิดแอลกอฮอล์ขึ้น ถ้ามีการใช้สายพันธุ์ยีสต์ที่ดีและขบวนการหมักที่เหมาะสมจะได้ไวน์ที่มีคุณภาพสูงและรสชาติดี ไวน์ที่มีแอลกอฮอล์สูง (dry wine) จะหมักสารละลายน้ำผึ้งที่มีน้ำตาลมากกว่า 22% เป็นเวลา 3 สัปดาห์ ไวน์หวาน (sweet wine) จะหมักสารละลายที่มีน้ำตาล 25% เป็นเวลา 4 สัปดาห์ (พิชัย, 2548)

2.1.3.2 น้ำผึ้งตกผลึก (granulated honey, crystallized honey, creamed honey)

การทำให้เกิดการตกผลึก คือ การทำให้ผลึกน้ำตาลรวมตัวตกตะกอนเป็นผลึก วิธีการในการทำน้ำผึ้งตกผลึก โดยการอุ่นน้ำผึ้งให้มีอุณหภูมิที่ 71-88°C ประมาณ 2-3 นาที เพื่อกำจัดยีสต์ที่ทำให้เกิดการหมักและการตกผลึกของเดกซ์โทส ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้สัดส่วนของน้ำเพิ่มขึ้นและความร้อนจะทำลายผลึกที่มีขนาดใหญ่ในน้ำผึ้ง จากนั้นทำให้น้ำผึ้งเย็นลงอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิประมาณ 4°C เติมผลึกที่มีหน้าที่เป็นสตาร์ทเตอร์ (starter) เพื่อเหนี่ยวนำทำให้น้ำผึ้งตกตะกอนได้ทั้งหมด และเก็บน้ำผึ้งที่อุณหภูมิ 14°C ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ น้ำผึ้งจะตกผลึกเป็นน้ำผึ้งครีมภายใน 7 วัน (พิชัย, 2548)

2.1.3.3 ผลกระทบที่น้ำผึ้งผง (Honey powder)

การใช้น้ำผึ้งในอุตสาหกรรมอาหารส่วนใหญ่นั้นจะใช้ในรูปของน้ำผึ้งเหลว ซึ่งมักก่อให้เกิดปัญหาในการจัดการเนื่องจากน้ำผึ้งเหลวมีความหนืดสูง (1.36 N s/m^2 ที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้น 21.5%) น้ำผึ้งที่อยู่ในรูปของผงแห้งจึงเป็นรูปแบบทางการค้าที่เหมาะสมในการใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม เนื่องจากมีความสามารถในการไหลที่ดี มีความชื้นต่ำจึงมีน้ำหนักเบา ทำให้ง่ายต่อการจัดการและใช้พื้นที่ในการจัดเก็บน้อยกว่าเมื่อเทียบกับน้ำผึ้งเหลว การใช้น้ำผึ้งผงใน

ส่วนผสมหนึ่งสำหรับการทำผลิตภัณฑ์เค้กและขนมปังพบว่า สามารถดึงดูดความต้องการของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีกลิ่นรส สี กลิ่นหอมระเหย เนื้อสัมผัส และคุณภาพในการเก็บรักษาที่ดี นอกจากนี้ยังมีการใช้น้ำผึ้งผงในผลิตภัณฑ์ ลูกกวาดและขนมหวาน เช่น น้ำผึ้งคาราเมล honey nougat หรือขนมปังฟู (sponges) ซึ่งจะสามารถรักษากลิ่นรสของอาหารที่อาจเสียไปได้เนื่องจากความร้อนในกระบวนการผลิต การนำน้ำผึ้งผงไปใช้ในผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นๆ เช่น ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอางและสบู่ (Herbar *et al.*, 2008)

กระบวนการที่สามารถใช้ในการเปลี่ยนรูปของน้ำผึ้งเหลวส่วนใหญ่ ได้แก่ การอบแห้งแบบลูกกลิ้ง การอบแห้งแบบพ่นฝอย การใช้ไมโครเวฟภายใต้สภาวะสุญญากาศ และการทำแห้งด้วยวิธีแช่เยือกแข็ง โดยต้องมีการเติมสารที่ช่วยในกระบวนการผลิตหรือสารอื่นๆ เพื่อให้ผงที่ได้มีปริมาณความชื้นต่ำและมีความสามารถในการไหลอย่างอิสระ (free-flowing) (The National Honey Board, 2008) ซึ่งผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งผงที่ได้จะมีปริมาณที่แตกต่างกันระหว่าง 50-75% สารที่ใช้ในการอบแห้งของน้ำผึ้งคือสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากอุณหภูมิ glass transition (T_g) ของน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบหลักในน้ำผึ้ง ได้แก่ น้ำตาลกลูโคสและน้ำตาลฟรักโทสมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิการอบแห้ง โดยมีค่าเท่ากับ 5 และ -31°C ตามลำดับ ในขณะที่ค่า T_g ของน้ำผึ้งปกติอยู่ในช่วงระหว่าง -54.14 และ -33.64°C (Ahmed *et al.*, 2007) ซึ่งสมบัติดังกล่าวมีผลทำให้เกิดการเหนียวของน้ำผึ้งและไม่สามารถทำให้แห้งเป็นผงได้โดยตรง จึงต้องมีการเติมสารเพื่อช่วยในการผลิตน้ำผึ้งผงซึ่งได้แก่

น้ำ โดยปกติแล้วน้ำผึ้งจะประกอบไปด้วยน้ำ 20-25% แต่มักมีการเติมน้ำลงไปเจือจางเพื่อให้ง่ายต่อการจัดการในระหว่างการอบแห้ง อย่างไรก็ตาม การเติมน้ำจะต้องไม่มากเกินไป เนื่องจากการขจัดน้ำออกในปริมาณมากจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน น้ำยังทำให้ค่า T_g ของอาหารลดลง โดยน้ำมีค่า T_g เท่ากับ -135°C

อนุพันธ์คาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลสูงและสารให้ความหวาน เช่น มอลโทเดกซ์ทริน สตาร์ช ฟรักโทสคอร์นไซรัป (The National Honey Board, 2008) สารเหล่านี้สามารถเพิ่มค่า T_g ทั้งยังสามารถปรับปรุงรสหวานให้ผลิตภัณฑ์ โดยสามารถเปลี่ยนแปลงรสสัมผัสและสีของผลิตภัณฑ์ได้หากมีการใช้ในปริมาณที่เหมาะสม ซึ่งพิจารณาได้จากความสามารถในการไหลได้อย่างอิสระ รวมทั้งผลิตภัณฑ์นั้นต้องประกอบด้วยน้ำผึ้งในปริมาณสูง พฤติกรรมระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผึ้งจะขึ้นอยู่กับส่วนประกอบแต่ละชนิดที่ใช้ เช่น หากเพิ่มความเข้มข้นของสตาร์ชในสารผสมน้ำผึ้งและสตาร์ชมากขึ้น ระยะเวลาในการอบแห้งจะเพิ่มมากขึ้น (Herbar *et al.*, 1987) ส่วนสารที่ช่วยในกระบวนการผลิต สารที่ช่วยทำให้แห้ง และสารช่วยเพิ่มความจุ ได้แก่ เดกซ์ทริน

แคลเซียมสเตียเรต แคลเซียมไตรฟอสเฟต แมกนีเซียมคาร์บอเนต เลซิธิน แป้งถั่วเหลือง หรือ สตาร์ชข้าวสาลี เป็นต้น (The National Honey Board, 2008)

2.2 การแปรรูปอาหารผง

อาหารผงสามารถแปรรูปได้โดยกระบวนการอบแห้ง การอบแห้ง คือ กระบวนการที่ให้ความร้อนกับวัสดุที่มีความชื้นเพื่อระเหยน้ำออกไปจนกลายเป็นผลิตภัณฑ์ของแข็ง วัสดุที่พึ่งกระบวนการอบแห้งนั้น มีตั้งแต่จำพวกที่มีสภาพเป็นเม็ดผง โคลน แป้งเปียก หรือเป็นของเหลว กระบวนการอบแห้งนี้เป็นตัวอย่างที่เด่นชัดของปรากฏการณ์การถ่ายเทมวลสารและความร้อนในเวลาเดียวกัน โดยมีการเปลี่ยนแปลงสถานะเพราะระเหยน้ำออกไปโดยใช้ความร้อน (Tamon, 2008)

2.2.1 การอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying)

วิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการทำแห้งอีกแบบหนึ่ง ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีในวงการอุตสาหกรรมอาหารมากกว่า 50 ปี การอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีการผลิตอาหารผงที่ได้รับความนิยมอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอบแห้งแบบแช่เยือกแข็ง โดยจะใช้ระยะเวลาและต้นทุนในการผลิตน้อยกว่า ซึ่งมีงานวิจัยจำนวนมากที่ทำการศึกษากการแปรรูปผักและผลไม้ให้อยู่ในรูปแบบของผง เช่น มะขามผง (Truong, 1994) มะนาวผง (Roustapour *et al.*, 2006) ส้มผง (Chegini and Ghobadian, 2005) มะเขือเทศผง (Goula *et al.*, 2004) มะพร้าวผง (Malik, 1995) และนมผง (Nijdam and Langrish, 2005, Birchal *et al.*, 2005) เป็นต้น กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้สามารถทำการผลิตได้คราวละมากๆและกระบวนการผลิตเป็นแบบต่อเนื่อง (พรศักดิ์, 2534) โดยอาศัยหลักการพาความร้อนของอากาศ ซึ่งเป็นวิธีการทำแห้งที่มีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงทำให้น้ำระเหยออกจากอาหารได้อย่างรวดเร็ว เวลาที่ใช้ในการทำแห้งสั้น และได้ผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในรูปของผงแห้ง ซึ่งจะเป็นการลดน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลง ทำให้ง่ายต่อการขนส่งและการเก็บรักษา (พรศักดิ์ และสมยศ, 2533) การอบแห้งแบบพ่นฝอยในเชิงอุตสาหกรรมจะเกี่ยวข้องกับทั้งทางเภสัชภัณฑ์ที่ปลอดภัยจนถึงกระบวนการทางเหมืองแร่ ซึ่งอัตราการป้อนวัตถุดิบจะอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2-3 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง หรือมากกว่า 100 ตัน ต่อชั่วโมง ต่อเครื่อง เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีลักษณะที่ดีหลายอย่าง เป็นเหตุให้การอบแห้งแบบพ่นฝอยมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรม การอบแห้งในทุกวันนี้ ตัวอย่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้อุตสาหกรรมอาหารประเภทต่างๆ เช่น ผลิตภัณฑ์นม ไข่ผง กาแฟผงสำเร็จรูป ผลิตภัณฑ์น้ำผลไม้หรือมะเขือเทศ ผลิตภัณฑ์น้ำส้มหรือน้ำผลไม้ที่มีปริมาณน้ำตาลฟรุกโทสหรือกลูโคสสูง เป็นต้น (Master, 1991)

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (เอกคณัย, 2551)

การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย เริ่มจากอากาศจะถูกดูดผ่านเครื่องกรองและผ่านเครื่องให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (drying chamber) ส่วนตัวอย่างของเหลว (feed) ที่นำมาฉีดพ่นควรมีลักษณะเหลวและไม่ข้นหนืดมาก จากนั้นของเหลวจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดละอองฝอย คือ atomizer เมื่อละอองของอาหารสัมผัสกับอากาศร้อนภายในห้องอบแห้งจะทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็ว และจะได้ผงของผลิตภัณฑ์ตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้ง ส่วนที่หลุดออกมากับอากาศจะถูกแยกโดยใช้ cyclone ซึ่งจะรวมเข้าเป็นผลิตภัณฑ์ผงในที่สุด

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยโดยเครื่อง spray dryer นั้น ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ

1. การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละออง (atomization of feed) โดยอาศัยหัวฉีดพ่นแบบจานเหวี่ยง (rotary atomizer) หรือหัวฉีดพ่นด้วยความดัน (pressure nozzle)

Rotary Atomizer มีความเร็วรอบประมาณ 5,000-10,000 รอบต่อนาที ของเหลวที่ตกลงบนจานหมุนจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละออง ขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 30-120 ไมครอน ซึ่งขนาดอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืด แต่จะแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน

Pressure Nozzles Atomizer อาศัยความดันสูงจากลมหรือแรงดัน ทำให้ของเหลวกระจายเป็นละอองฝอย อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120-250 ไมครอน โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการไหลของของเหลวและความหนืดแต่จะแปรผกผันกับความดัน ขนาดของอนุภาคของเหลวจะใหญ่กว่าที่ได้จากวิธีจานเหวี่ยง

2. การสัมผัสของละอองฝอยกับลมร้อน ทำให้เริ่มเกิดการระเหยของน้ำออกจากละอองของเหลว

3. การระเหยของละอองฝอยขณะเคลื่อนที่ไปกับกระแสลม

4. การแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากกระแสลมร้อน โดยนิยมใช้ไซโคลนทำให้ได้อาหารผงที่มีลักษณะแห้งออกมา

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการอบแห้งแบบพ่นฝอย (เอกคณัย, 2551)

ปัจจัยที่เป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของการผลิตอาหารผงด้วยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่

1. ความหนืด

ของเหลวที่มีความหนืดสูง (อาจเกิดอุณหภูมิของของเหลวที่ลดลง) เมื่อนำไปอบแห้งแบบพ่นฝอยจะทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่สภาวะการพ่นฝอยเดียวกัน และหากมีความหนืดสูง

มากจะทำให้ของเหลวที่ฉีดออกมามีลักษณะคล้ายเส้นด้าย ทำให้อาหารไม่แห้งตามต้องการ ดังนั้นจึงไม่ควรใส่ของเหลวที่มีความหนืดสูงเกินไป

2. อัตราการไหลของของเหลว

ถ้าอัตราการไหลของของเหลวสูงขึ้นจะทำให้ได้ละอองที่หยาบขึ้น และอาหารแห้งมีความชื้นสูงเพราะใช้เวลาที่สัมผัสกับลมร้อนน้อยเกินไป จึงควรควบคุมอัตราการไหลของของเหลวให้เหมาะสม

3. อัตราการไหลของอากาศ

หากอัตราการไหลของอากาศลดลงจะทำให้เวลาที่ละอองอยู่ในห้องอบนานขึ้น ซึ่งจะทำให้ละอองสัมผัสกับอากาศร้อนนานขึ้น และเป็นผลให้ลดความชื้นได้ดีขึ้น แต่หากอัตราการไหลของของเหลวสูงและอัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป เมื่ออุณหภูมิไม่สูงเพียงพอก็อาจทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความชื้นสูงและเกาะติดอยู่กับผนังของห้องอบได้

4. อุณหภูมิอากาศขาเข้า

การเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการระเหยได้ แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นกับการไหลของอากาศด้วย

2.2.2 ข้อดีข้อเสียของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (Master, 1991)

เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นเครื่องที่มีลักษณะพิเศษที่สามารถผลิตผงที่มีขนาดอนุภาคที่มีลักษณะเฉพาะและปริมาณความชื้นที่ได้ไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณความจุของเครื่องหรือความไวต่อความร้อนของผลิตภัณฑ์ ทั้งยังสามารถรักษาลักษณะเฉพาะหรือคุณภาพของผงที่ได้คงที่ตลอดกระบวนการผลิตโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเดินเครื่องเมื่อมีสภาวะการอบแห้งคงที่ นอกจากนี้การทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยจะมีความต่อเนื่องและใช้งานง่าย สามารถดัดแปลงการทำงานโดยการควบคุมแบบอัตโนมัติทั้งหมด โดยใช้เวลาในการตอบสนองต่อการสั่งการอย่างรวดเร็ว คนควบคุมเครื่อง 1 คน สามารถจัดการกับเครื่องที่ควบคุมแบบอัตโนมัติได้มากกว่า 1 เครื่อง ถ้ามีการจัดวางเครื่องอย่างเป็นระบบ ลักษณะที่สำคัญของการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือสามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบที่ไวต่อความร้อนหรือทนทานต่อความร้อน วัตถุดิบอยู่ในรูปสารละลาย, slurry, emulsion ที่อยู่ในรูปของแป้งเปียกหรือที่หลอมเหลวแล้วที่มีความเหนียวที่เหมาะสมจะสามารถทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ โดยไม่ต้องคำนึงว่าจะเกิดสารกักร้อนหรือไม่ สามารถอบแห้งวัตถุดิบในสภาวะการอบแห้งแบบปลอดภัย หรือการอบแห้งวัตถุดิบให้เป็นผง granular, agglomerate หรือ non-agglomerate

ข้อเสียของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ ต้นทุนในการติดตั้งสูง หน่วยการผลิตจะมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องอบแห้งประเภทอื่นๆ ทำให้การสร้างเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีราคาแพง แม้ว่าจะเป็นเครื่องอบแห้งประเภทพาความร้อนแต่ประสิทธิภาพเชิงความร้อนยังต่ำกว่าเครื่องอบแห้งแบบสัมผัสกับอาหาร โดยตรง (direct-contact dryer) นอกจากนี้ยังต้องใช้อุณหภูมิเข้าที่สูงมากหากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิในการหลอมเหลวสูง อากาศเสียที่ปล่อยออกจากเครื่องอบแห้งจะมีปริมาณมาก ซึ่งจะประกอบด้วยความร้อนซึ่งมีคุณภาพต่ำ มีผลในการจัดการความร้อนที่ออกจากอุปกรณ์และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีราคาสูง ดังนั้นอุปกรณ์จะต้องมีการจัดการผงและอากาศที่อึดตัวหรืออยู่ในสถานะใกล้อึดตัว ซึ่งจะต้องมีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น

2.3 ปัญหาระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย

2.3.1 การอบแห้งอาหารที่มีน้ำตาลสูง

การอบแห้งแบบพ่นฝอยของอาหารที่มีน้ำตาลสูง เช่น น้ำผลไม้ น้ำผึ้ง หรืออนุพันธ์ของสตาร์ชบางชนิด เช่น กลูโคสไซรัป มอลโทเดกซ์ทรินที่ค่า DE สูงๆจะทำให้ยาก เนื่องจากน้ำตาลส่วนใหญ่ เช่น กลูโคส ซูโครส และฟรักโทส มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ซึ่งสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะมีอุณหภูมิ glass transition (T_g) ที่ต่ำด้วย กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้อุณหภูมิสูงกว่า T_g มาก ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงเกิดการเหนียวและการเกาะติดได้ง่าย (Bhandari *et al.*, 1997a) ปัญหาการเหนียวของผลิตภัณฑ์น้ำตาลจะมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ T_g ที่ต่ำ โดยของแข็งที่อยู่ในรูปของอสัณฐานจะมีค่าความหนืดสูง ($>10^{12}$ Pa.s) ในขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าความหนืดจะลดลงมากจนถึงค่าวิกฤต (critical viscosity) ที่ประมาณ 10^7 Pa.s ซึ่งเป็นช่วงที่ผลิตภัณฑ์เริ่มเหนียว ค่า critical viscosity จะลดลงเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ความหนืดของอาหารผงจะถึงจุดวิกฤตเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิ T_g ประมาณ $10-20^\circ\text{C}$ (Roos and Karel, 1991) ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิที่ผิวหน้าของอนุภาค (particle) ระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยไม่ควรเพิ่มขึ้นเกินกว่า $10-20^\circ\text{C}$ เหนืออุณหภูมิ T_g การเหนียวของวัตถุดิบเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ T_g โดยวัตถุดิบที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะมี T_g สูง แต่หากวัตถุดิบนั้นมี T_g ต่ำกว่าอุณหภูมิในการผลิตจะมีผลทำให้เกิดการเหนียวและเกาะติดของวัตถุดิบที่ผนังของเครื่องอบแห้ง อาหารที่เหนียวง่าย อนุภาคมีการเกาะติดกันต้องอาศัยการควบคุม T_g หรือใช้อุณหภูมิในกระบวนการผลิตต่ำกว่า T_g ของผลิตภัณฑ์ หรือการเพิ่ม T_g ของผลิตภัณฑ์ด้วยการเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง (Boonyai *et al.*, 2006, Bhandari *et al.*, 1997a)

2.3.1.1 ลักษณะทางกายภาพของน้ำตาลแต่ละชนิดและผลต่อการอบแห้ง

พฤติกรรมการณ์เหนียวของอาหารจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำตาลและอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ สมบัติทางกายภาพของน้ำตาลแต่ละชนิดในอาหารมีผลต่อการอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยสามารถพิจารณาได้จากสมบัติที่สำคัญบางประการ ได้แก่ ความสามารถในการดูดน้ำกลับ (hygroscopicity) ความสามารถในการละลาย (solubility) จุดหลอมเหลว (melting point) อุณหภูมิ T_g (Roos and Karel., 1991) ระหว่างการอบแห้งนั้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์มักใกล้เคียงกับอุณหภูมิของอากาศขาออก (Master, 1991) ผลิตภัณฑ์ที่ไวต่อความร้อนมักกำหนดอุณหภูมิอากาศขาออกในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ประมาณ 60°C ส่วนความสามารถในการละลายของน้ำตาลจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง $30\text{-}80^{\circ}\text{C}$ ความสามารถในการดูดน้ำกลับจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิของกลูโคสและฟรักโทส ในกรณีของฟรักโทสเมื่อพิจารณาสมบัติจะพบว่าไม่อยู่ในสถานะของแข็งอย่างสมบูรณ์ในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะปกติแม้มีความชื้นในระหว่างการอบแห้งที่ต่ำ ทั้งยังคงมีลักษณะที่เหนียวมากและมีการเปลี่ยนรูปในลักษณะของพลาสติก ดังนั้นน้ำตาลฟรักโทสจึงเป็นน้ำตาลที่ทำกรอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ยากที่สุด (Bhandari *et al.*, 1997b)

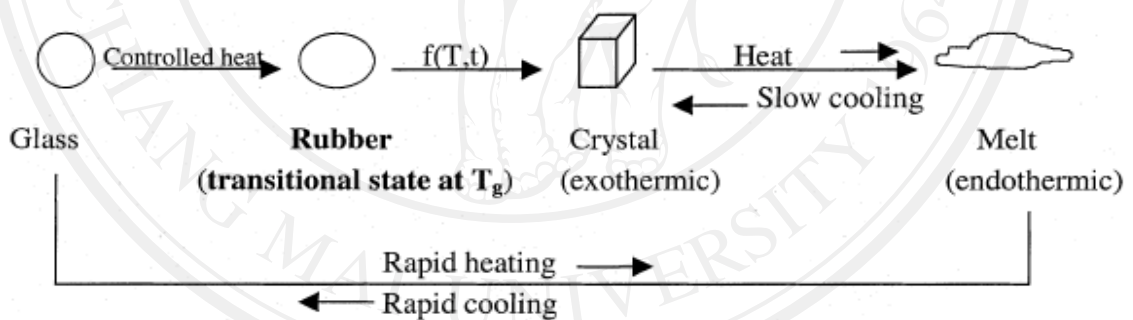
2.3.1.2 Glass transition

Glass transition คือ การเปลี่ยนแปลงสถานะลำดับที่ 2 (second order phase transition) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอาหารจากโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) ไปเป็นลักษณะยางเหนียว (rubbery) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ย้อนกลับได้ การเปลี่ยนแปลงระหว่างการอบแห้งเป็นแบบของเหลวไปเป็นยางเหนียวและเปลี่ยนเป็นของแข็งอสัณฐาน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของอาหารผงระหว่างการเก็บรักษาเป็นแบบของแข็งอสัณฐานไปเป็นยางเหนียว โดยสมบัติทางกายภาพต่างๆของวัสดุจะเกิดการเปลี่ยนแปลง ได้แก่ การเพิ่มปริมาตรที่อิสระ (free volume) การเพิ่มปริมาณความจุความร้อน (C_p) สัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (∞) สัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า และการเปลี่ยนแปลงสมบัติทาง viscoelastic (Genin and Rene, 1995) ปริมาตรอิสระคือ ปริมาตรที่ว่างอยู่เนื่องจากการสร้างของแข็งของโมเลกุล แสดงถึงปริมาตรที่โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ การเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดนี้เป็นผลมาจากอุณหภูมิ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิ T_g จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Differential scanning calorimetry (DSC), Differential thermal analysis (DTA), Thermal mechanical analysis (TMA) เป็นต้น

Glass transition temperature (T_g) หมายถึง อุณหภูมิในการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของอาหารจากโครงสร้างอสัณฐาน (amorphous structure) หรือมีสถานะคล้ายแก้ว (glassy state) ไปเป็นสถานะของเหลวเหนียวคล้ายยาง (rubbery state) หรือย้อนกลับ (Silva *et al.*, 2006) วัสดุที่มี

สถานะคล้ายแก้วอาจถือเป็นสารละลายของแข็งได้ ในสถานะที่ความหนืดของวัสดุคล้ายแก้วจะเท่ากับ 10^{12} Pa s เมื่ออุณหภูมิของวัสดุเพิ่มขึ้นจนถึงจุด T_g วัสดุจะเกิดการเปลี่ยนสถานะเป็น rubbery ซึ่งจะมีความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 10^6-10^8 Pa s ในการวัดค่าความหนืดของวัสดุค่อนข้างทำได้ยากและมักเกิดความผิดพลาดได้ (Bhandari and Howes, 1999)

T_g เป็นสมบัติเฉพาะของวัสดุ amorphous โดยอาหารที่มีลักษณะเป็น amorphous จะเกิดการก่อรูปในสถานะที่ไม่สมดุล (non equilibrium condition) โดยอาจเกิดจากการกำจัดตัวกลางที่กระจายอยู่ล้อมรอบ เช่น น้ำหรือจากการหลอมเหลวโดยความเย็น หรือการทำให้เย็นแบบยิ่งยวด (supercooling) วัสดุนี้จะไม่เกิดการสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้น วัสดุนี้จึงอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรซึ่งจะส่งผลให้เกิดการตกผลึกได้ (Bhandari and Howes, 1999) ที่ค่าความหนืดสูงกว่า 10^{12} Pa s วัสดุ amorphous จะเกิดการเหนียว เนื่องจากในสถานะนี้โมเลกุลจะเกิดการเคลื่อนที่อย่างจำกัด ซึ่งจะมีความสำคัญต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุลเป็นผลึก โดยอัตราการเปลี่ยนแปลงจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณความชื้น ตัวอย่างการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพและการก่อรูปของวัสดุแสดงดังภาพที่ 2.1



ภาพที่ 2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของ amorphous glass จาก rubbery จนกระทั่งเกิดเป็นผลึก (T = อุณหภูมิ, t = เวลา)

ที่มา : Bhandari *et al.*(1997b)

2.3.1.3 ผลของอุณหภูมิ glass transition และพฤติกรรมการเหนียวระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย

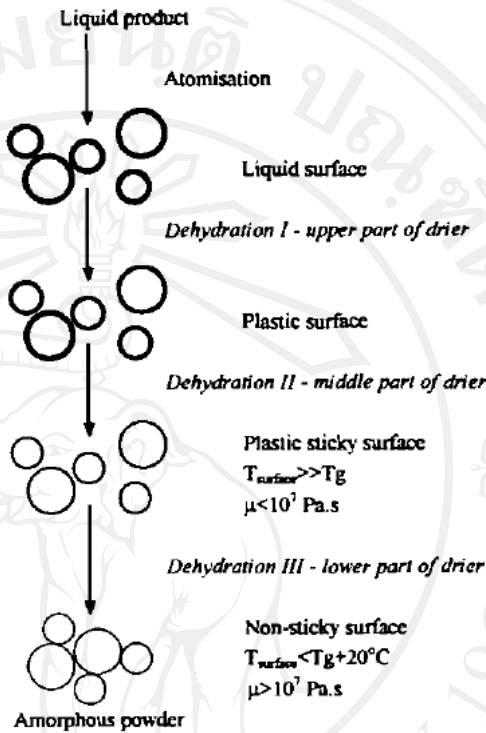
ปัญหาหลักที่มักเกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำผึ้ง คือปัญหาการเหนียว ซึ่งเป็นผลมาจากน้ำผึ้งประกอบด้วยน้ำตาลในปริมาณมาก (70-80%) ระหว่างการทำแห้งผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำตาลสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้อาจยังมีลักษณะเป็น ไซรัป หรือเกิดการเหนียวที่ผนังของ chamber เป็น

ผลให้เกิดการจับตัวกันเป็นก้อนในผนังของ chamber หรือภายในระบบท่อลำเลียงของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ปัญหานี้ทำให้ปริมาณผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้น้อยลงและอาจเกิดปัญหาในการปฏิบัติงานได้ (Roos *et al.*, 1996) การเหนียวของอาหารผงสามารถอธิบายได้ในรูปของการเกาะตัวของผงระหว่างอนุภาค-อนุภาค (cohesion) และการเกาะติดของอนุภาคที่ผนัง (adhesion) การเกาะตัวเป็นสมบัติภายในของผงโดยสามารถวัดได้จากแรงยึดของอนุภาคทั้งสอง ในขณะที่การเกาะติดเป็นสมบัติระหว่างผิวหน้าที่สามารถวัดจากแรงยึดระหว่างอนุภาคกับผิวหน้าของวัตถุอื่นๆ การเกาะตัวกันของผงเป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญในการจับตัวกันเป็นก้อนของผง กลไกการเหนียวของอาหารผง โดยเฉพาะการเกาะตัวของผง สามารถจำแนกได้เป็น 5 กลุ่มหลัก คือ intermolecular and electrostatic, mobile liquid bridges, immobile liquid bridges, solid bridge และ mechanical interlocking โดยสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเหนียวในผลิตภัณฑ์ amorphous ได้แก่ water plasticization ที่ผิวหน้าของอนุภาค และอุณหภูมิที่มากพอจะลดความหนืดที่ผิวหน้าของอนุภาคทำให้เกิดการเกาะตัวของอนุภาคผงและก่อตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Boonyai *et al.*, 2004) พฤติกรรมการเหนียวที่เกิดขึ้นนี้ไม่ขึ้นกับสมบัติของวัสดุเพียงอย่างเดียว แต่ยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้กับระบบการอบแห้ง ซึ่งสามารถลดการเกาะติดของอาหารผงโดยการควบคุมกระบวนการผลิตดังนี้ การควบคุมอุณหภูมิอากาศที่เหมาะสม (Bhandari *et al.*, 1997a) การใช้อากาศเย็นเข้าสู่ส่วนล่างของเครื่องอบแห้ง หรือการหล่อเย็นที่ผนังเครื่องอบแห้ง (Truong *et al.*, 2005)

ความยากในการอบแห้งแบบพ่นฝอยอาหารที่มีน้ำตาลสูงยังเกี่ยวข้องกับลักษณะพื้นฐานทางกายภาพของสารผสมที่มีน้ำตาลซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (ซูโครส 324, กลูโคส 180, ฟรักโทส 180) (Jaya and Das, 2004) การกำจัดความชื้นอย่างรวดเร็วระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีผลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ทั้งที่เป็น amorphous อย่างสมบูรณ์หรือเป็น microcrystalline บางส่วนกระจายในมวลของ amorphous (amorphous mass) การเปลี่ยนแปลงหลักที่เกิดขึ้นในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยแสดงดังภาพที่ 2.2

ในขั้นแรกของการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ การทำให้ของเหลวกระจายตัวเป็นละออง (atomization of feed) โดยปกติแล้วสารละลายเข้มข้นที่ถูกฉีดพ่นจะมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 20-150 μm (Master, 1991) ในขณะที่น้ำเกิดการระเหยตัวถูกละลายที่อยู่ภายในอนุภาคจะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น สถานะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเมื่อผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย จากสารละลายกลายเป็นไฐรับและสุดท้ายในรูปแบบของแข็ง ในระหว่างการอบแห้งนั้นเริ่มแรกอนุภาคของของเหลว (droplet) จะกระจายตัวแยกจากกันอยู่ภายในเครื่องอบในปริมาณมาก โดยไม่เกิดการเกาะตัวกัน (agglomeration) อย่างไรก็ตาม อนุภาคที่มีความชื้นสูงจะสามารถเกิดการเหนียวขึ้นได้ ในส่วนล่างของเครื่องอบอนุภาคจะกลายเป็นของแข็งและไม่ควรเกิดการเหนียวหรือ

การเกาะตัวกันเมื่อความจุของอนุภาคต่อหน่วยพื้นที่ปริมาตรเพิ่มขึ้นอย่างฉับพลัน ตัวอย่างเช่น ในส่วนดักผง (collection) หรือส่วนถ่ายเทผง (conveying dust) เพราะจะทำให้อนุภาคเคลื่อนที่มาชนกันและเกิดการเกาะตัวกันเป็นก้อน



ภาพที่ 2.2 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของหยดอนุภาคระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Dehydration I, II, III แสดงถึงลำดับขั้นของการระเหยน้ำออก μ คือ ความหนืด T_g คือ อุณหภูมิ glass transition $T_{surface}$ คือ อุณหภูมิที่ผิวหน้าของอนุภาค)
ที่มา : Bhandari *et al.* (1997b)

Downton *et al.* (1982) กล่าวว่าหากความหนืดของผลิตภัณฑ์ต่ำกว่าระดับวิกฤติที่ 10^7 Pa.s ผลิตภัณฑ์จะยังคงเป็น ไซรับแม้ว่าจะมีระดับความชื้นที่ต่ำ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ส่วนประกอบภายใน และสถานะในการอบแห้ง พื้นผิวของอนุภาคที่อบแห้งยังคงเป็น plastic เป็นผลให้เกิดการเหนียวติดกับผนังเครื่องอบแห้งหรือเกิดการจับตัวกันของอนุภาค ผลิตภัณฑ์ amorphous ที่ได้รับในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการอาจเป็นได้ทั้ง ไซรับผงที่เหนียวหรือผงที่สามารถไหลได้อย่างอิสระขึ้นอยู่กับสมบัติของอาหารและสถานะการผลิต

T_g ของอาหารที่มีน้ำตาลสูงจะมีค่าต่ำมาก ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำตาลบริสุทธิ์จึงไม่สามารถที่จะทำการผลิตด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้ การอบแห้งบางชนิดที่มีลักษณะเฉพาะจะใช้วิธีการ

อื่นๆที่จะสามารถทำการอบแห้งได้ เช่นการใช้สภาวะอุณหภูมิต่ำ (Freeze drying) แต่วิธีการที่ใช้กันมากในการอบแห้งคือ การเติมสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเข้าไป ซึ่งจะมีผลทำให้ T_g เพิ่มขึ้น Busin *et al.* (1996) ทำการศึกษาผลของ T_g ต่อพฤติกรรมการเหนียวของสารผสมน้ำตาล (ฟรักโทส กลูโคส และซูโครส) และมอลโทเดกซ์ทรินในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยทำการประเมินความยากง่ายในการอบแห้งด้วยปริมาณ recovery ของผลิตภัณฑ์ พบว่าปริมาณ recovery ของผงจะมีความสัมพันธ์กับค่า T_g ในกรณีของสารผสมน้ำตาลกับมอลโทเดกซ์ทริน ซึ่งหากปริมาณ recovery สูง แสดงว่ามีการเกาะติดของผงที่ผนังของเครื่องอบในปริมาณที่น้อย Bhandari *et al.* (1997b) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า T_g และพฤติกรรมในระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยของน้ำตาล และน้ำผลไม้ซึ่งผสมมอลโทเดกซ์ทริน โดยอธิบายในรูปของสมการ (สมการที่ 2.1) เพื่อหาปริมาณสารที่เหมาะสมที่ต้องเติมลงไป ในอาหารที่มีน้ำตาลสูงก่อนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการระบุค่าดัชนีการอบแห้งของสารประกอบแต่ละตัวซึ่งจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการทำให้แห้งโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย

$$\sum_{i=1}^n a_i X_i = Y \quad (2.1)$$

โดย X_i คือ สัดส่วนน้ำหนักของสารประกอบแต่ละตัว a_i คือ ดัชนีที่ระบุเฉพาะในสารประกอบแต่ละตัว Y คือ overall index (ดัชนีโดยรวม) นำค่าต่างๆมาคำนวณโดยหาก $Y < 1$ การอบแห้งจะทำได้ยาก $Y=1$ แสดงถึงการอบแห้งยังสามารถทำได้ และ $Y > 1$ แสดงถึงการอบแห้งสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่ปริมาณ recovery ของผงจะใช้เป็นเกณฑ์มาตรฐานเพื่อแสดงถึงสมรรถภาพในการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Bhandari *et al.*, 1997b)

2.4 สมบัติสำคัญของอาหารผง

2.4.1 ค่าแอกทีวิตี (water activity, a_w)

อาหารทั่วไปมีน้ำเป็นองค์ประกอบอยู่ระหว่าง 7-95% น้ำเป็นส่วนประกอบหลักของอาหารทุกชนิดโดยอยู่ในรูปอิสระ (free water) และน้ำก่อกัมพันธะ (bound water) น้ำอิสระเป็นน้ำที่แทรกอยู่ในช่องว่างของอาหาร มีสมบัติเหมือนน้ำปกติสามารถเป็นตัวทำละลายได้ น้ำอิสระนี้มีส่วนเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีและจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีวิตได้ แต่น้ำส่วนนี้ก็ยังมีสมบัติไม่เหมือนกับน้ำอิสระในธรรมชาติอย่างแท้จริง จึงมักเรียกน้ำอิสระนี้ว่า active water ปริมาณน้ำในอาหารเป็นปัจจัยสำคัญยิ่งที่มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ อาหารแต่ละชนิดจะเสียเร็วหรือช้า นั้นขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์โดยใช้ค่า a_w เป็นดัชนีกำหนดอาหารที่มีปริมาณน้ำมากจัดอยู่ในประเภทที่มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.6-0.9 ได้แก่ แยม ทูเรียนกวน และกึ่งแห้ง เป็นต้น

ส่วนอาหารที่มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.6 ได้แก่ อาหารแห้ง ธัญชาติ นมผง และกาแฟ ซึ่งเกิดการเน่าเสียได้ยาก สามารถเก็บได้เป็นเวลานาน (คณาจารย์, 2540)

ค่าจำกัดความของ a_w คือ อัตราส่วนระหว่างความดันไอของน้ำในอาหาร (P) ต่อความดันไออิ่มตัวของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิเดียวกัน (P_0)

$$a_w = P / P_0 \quad (2.2)$$

Raoult's law กล่าวว่า ตัวถูกละลายจะลดความดันไอของน้ำในอาหารมีผลทำให้ค่า a_w ลดลงไปด้วย อาหารทุกชนิดมีน้ำเป็นองค์ประกอบ สถานภาพของน้ำในอาหารสามารถอธิบายโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในอาหารกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อยู่รอบๆอาหารนั้น อัตราส่วนของตัวเลขทั้งสองนี้คือค่า a_w ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่สัมพันธ์กับค่าความชื้นจำเพาะ (specific moisture content) ของอาหาร เรียกว่า equilibrium relative humidity (ERH)

$$a_w = ERH / 100 \quad (2.3)$$

น้ำในอาหารทำให้เกิดความดันไอซึ่งความดันไอที่เกิดขึ้นจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่มีอยู่ในอาหาร อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น เกลือ และน้ำตาล

อาหารที่มีความชื้นสูงหรือมีปริมาณน้ำมากกว่าส่วนที่เป็นของแข็งจะมีค่า a_w เท่ากับ 1.0 และเมื่ออาหารมีความชื้นต่ำลงหรือมีปริมาณน้ำน้อยกว่าส่วนที่เป็นของแข็งค่า a_w จะต่ำกว่า 1.0 การเปลี่ยนแปลงค่า a_w ที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำแห้งนั้นสามารถนำค่า a_w มาเขียนเส้นกราฟปริมาณความชื้นในอาหารซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในอาหารกับปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศหรือ a_w กราฟนี้เรียกว่า sorption isotherm

a_w มีบทบาทสำคัญมากต่อการแปรรูปและการเก็บรักษาอาหารอบแห้ง โดยมีผลต่อปฏิกิริยาที่ทำให้อาหารเน่าเสีย การเจริญหรือความคงตัวของจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาทางชีวเคมีที่เกิดขึ้นภายในอาหารซึ่งมีความสัมพันธ์กับความคงตัวของอาหาร ดังนั้นจึงใช้ a_w เป็นตัวบ่งชี้หรือทำนายการเสื่อมสลายและการเน่าเสียของอาหาร และเป็นตัวกำหนดการสิ้นสุดอายุการเก็บรักษาของอาหารอบแห้งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์อาหารอบแห้งสามารถเก็บรักษาได้นานและมีความคงตัวดี

2.4.2 Moisture Sorption Isotherm

ค่า Moisture sorption isotherms แสดงถึง ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุล และ a_w ของอาหารที่อุณหภูมิต่างกัน อาหารที่มีปริมาณความชื้นแตกต่างกันจะมีค่า a_w ที่ต่างกัน โดยจะขึ้นอยู่กับปฏิสัมพันธ์ระหว่างน้ำและของแข็งในอาหาร ดังนั้นผลิตภัณฑ์อาหารแต่ละชนิดจะมี

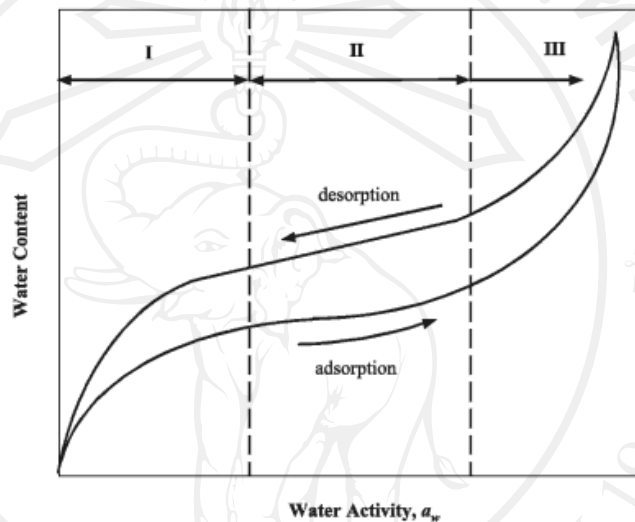
moisture sorption isotherms เฉพาะในแต่ละผลิตภัณฑ์ (Bell and Labuza., 2000) moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่มีประโยชน์สำหรับการวิเคราะห์ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ของน้ำและสารในอาหาร ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ การทำให้แห้ง การผสม การบรรจุผลิตภัณฑ์ในบรรจุภัณฑ์ และการเก็บรักษาอาหาร นอกจากนี้ sorption isotherms สามารถใช้ในการหาลักษณะโครงสร้างของผลิตภัณฑ์อาหารเช่น พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรของรูพรุน ความสามารถในการเป็นผลึก (crystallinity) และการกระจายขนาดของรูพรุน (Debnath *et al.*, 2002) moisture sorption isotherms ยังสามารถใช้ในการทำนายความชื้นสูงสุดในอาหารที่ควรควบคุมในระหว่างกระบวนการทำแห้งและการเก็บรักษา ทำนายการเปลี่ยนแปลงในความคงตัวของอาหาร (Stencl, 2004) และยังสามารถใช้ในการคัดเลือกความคงตัวของกลิ่น สี เนื้อสัมผัส สารอาหาร และความคงตัวทางชีวภาพที่เหมาะสมหรือสูงสุดของอาหาร (Debnath, 2002)

คุณภาพของอาหารส่วนใหญ่ที่ถูกเก็บรักษาโดยการทำให้แห้งนั้นขึ้นอยู่กับปริมาณของความคงตัวทางกายภาพ เคมี และจุลชีววิทยา ซึ่งความคงตัวเหล่านี้เป็นผลหลักของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นสมดุลของวัสดุอาหาร และความสอดคล้องกับค่า a_w ซึ่งค่า water sorption isotherms เหล่านี้มีลักษณะจำเพาะสำหรับอาหารแต่ละชนิด และสามารถนำไปใช้ได้โดยตรงในการแก้ไขปัญหาการออกแบบการผลิตอาหาร การทำนายความต้องการในการใช้พลังงานและวิเคราะห์หาสภาวะการเก็บรักษาที่เหมาะสม (Peng *et al.*, 2007) อาหารที่มีลักษณะเป็นผงมีแนวโน้มที่จะมีลักษณะเหนียวและเกาะตัวกันของผง ซึ่งน้ำเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปัญหาดังกล่าว ดังนั้น moisture sorption isotherms เป็นเครื่องมือที่ใช้ประโยชน์สำหรับการทำความเข้าใจในเรื่องของความสัมพันธ์ของผงและปัญหาเกี่ยวกับความคงตัวต่างๆ ซึ่ง moisture sorption isotherms สำหรับผงนั้นอธิบายถึงความสัมพันธ์ที่สมดุลระหว่างปริมาณความชื้นของผงและความชื้นสัมพัทธ์ของสิ่งแวดล้อมโดยรอบ (Foster *et al.*, 2005)

Sorption isotherms จะประกอบด้วยกระบวนการลดความชื้น (desorption) และการเพิ่มความชื้น (adsorption) ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและจะมีผลต่อค่า a_w (ภาพที่ 2.3) กระบวนการทั้งสองจะไม่เกิดขึ้นพร้อมกันหรือเปลี่ยนกลับไปมา แต่มีความแตกต่างกันระหว่าง isotherms ณ ที่ความชื้นหนึ่งๆของอาหาร ค่า a_w ของ desorption จะต่ำกว่า adsorption หรือ ณ ที่ค่า a_w หนึ่งๆ ปริมาณความชื้นของ desorption จะมากกว่า adsorption เสมอ

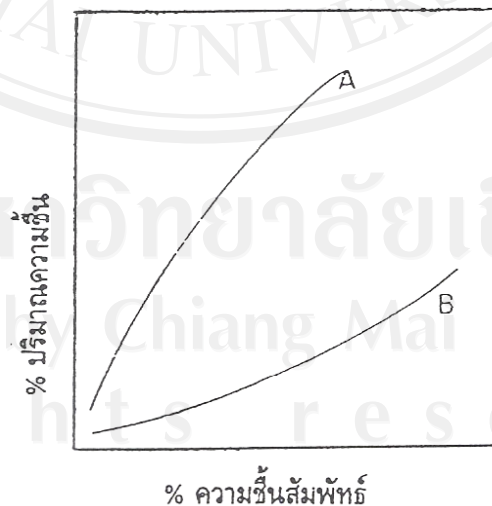
กราฟ desorption isotherm แสดงถึงระดับความแห้งของอาหารที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นหรือความชื้นของอาหารที่ค่อยๆลดต่ำลงจนถึงจุดสมดุลกับสภาวะแวดล้อม หรือความชื้นของอากาศขณะนั้น ดังนั้นจึงใช้ desorption isotherm สำหรับกระบวนการทำแห้ง ส่วนกราฟ adsorption หรือ

resorption isotherm เป็นการวิเคราะห์ความชื้นของอาหารที่ค่อยๆเพิ่มขึ้น เนื่องจากอาหารนั้นมีความสามารถในการดูดความชื้นจากอากาศได้ หากความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและอาหารมีความสามารถในการดูดความชื้นได้มาก เส้นกราฟ adsorption isotherm จะมีความชันมาก อาหารประเภทนี้เรียกว่า hygroscopic product เช่น อาหารที่มีปริมาณน้ำตาลและเกลือสูง และถ้าอาหารไม่มีความไวต่อความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่เพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะมีความชันน้อยอาหารประเภทนี้เรียกว่า nonhygroscopic product (ภาพที่ 2.4)



ภาพที่ 2.3 ลักษณะ desorption และ adsorption isotherms ของอาหาร

ที่มา : Hui *et al.* (2008)



ภาพที่ 2.4 Adsorption isotherms ของสารประเภท hygroscopic product (A) และ nonhygroscopic product (B)

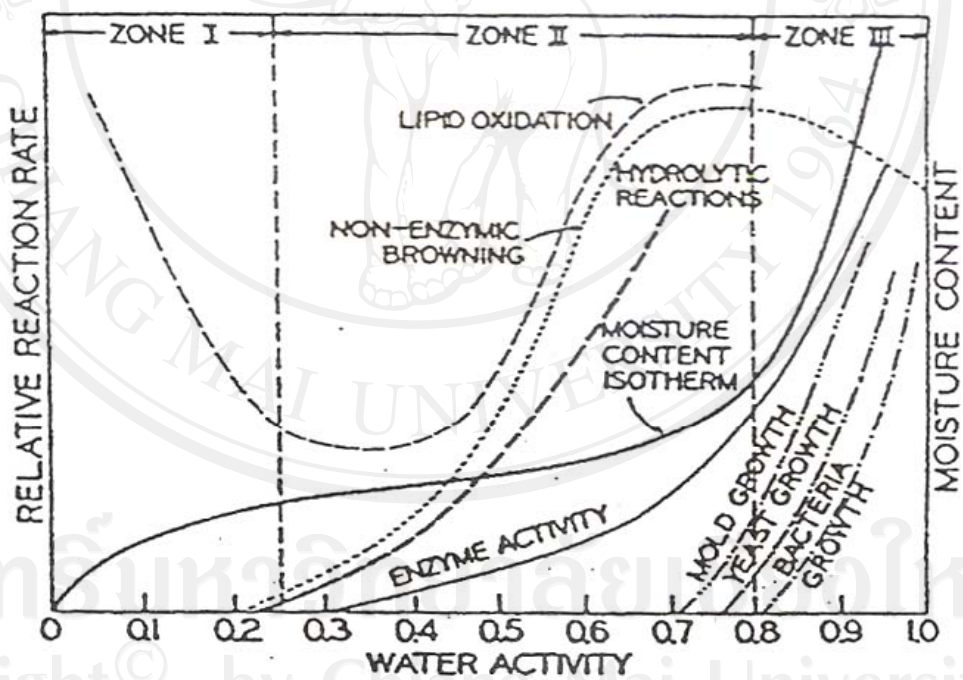
ที่มา : นิธิยา (2545)

รูปกราฟ sorption isotherm โดยทั่วไปจะเป็นรูป sigmoid แบ่งออกเป็น 3 ส่วน (ภาพที่ 2.3) ซึ่งจะแตกต่างกันตามปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในอาหารหรือค่า a_w

Zone I ของ isotherm เส้นกราฟค่อนข้างชันจะสอดคล้องกับ monolayer ของน้ำ ซึ่งเป็นน้ำที่เกาะอยู่กับสารประกอบในอาหารอย่างเหนียวแน่นและมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0-0.25 หรือ 0.3

Zone II เส้นกราฟค่อนข้างราบสอดคล้องกับ capillary water ที่มีอยู่ในอาหาร ซึ่งเป็นน้ำที่กำจัดออกได้ค่อนข้างยาก ถ้าปริมาณน้ำส่วนนี้ลดลงทำให้ค่า a_w ลดลงด้วยและยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาทางเคมีส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในอาหารได้ด้วย ปริมาณความชื้นจะลดลงเหลือประมาณ 3-7% ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและอุณหภูมิ ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.3-0.8

Zone III เป็นน้ำอิสระที่มีอยู่ในเนื้อเยื่ออาหารทั้งพืชและสัตว์ สามารถกำจัดออกได้โดยง่าย น้ำเหล่านี้จะทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย และถูกใช้สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี อาหารจะมีน้ำประมาณ 12-25% และมีค่า a_w มากกว่า 0.8-1.0 (ภาพที่ 2.5)



ภาพที่ 2.5 อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอาหารและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผันแปรตามค่า a_w ที่อุณหภูมิ 20°C
ที่มา : นิธิยา (2545)

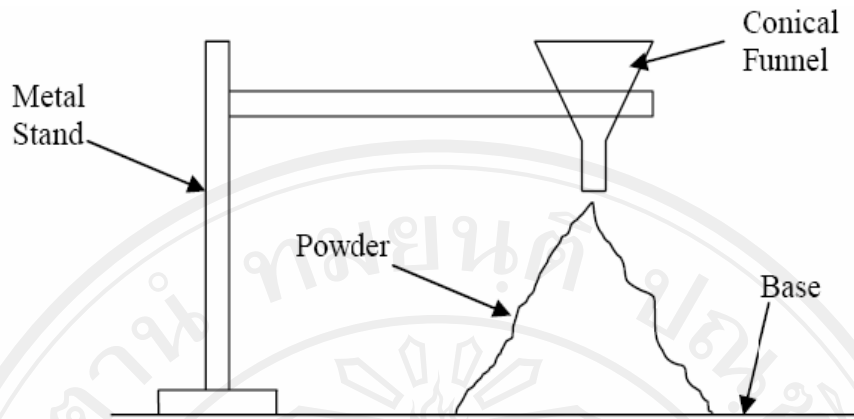
2.4.3 ความสามารถในการไหล (Flow ability)

การไหลของผงเป็นการอธิบายความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ของอนุภาคระหว่างอนุภาคที่ล้อมรอบและในระหว่างพื้นผิวผนังของบรรจุภัณฑ์ (Peleg, 1977) ลักษณะการไหลของผงมีความสำคัญอย่างมากต่อการจัดการและในสภาวะการเก็บรักษา สมบัติการไหลที่ลดลงของผงเกิดจากการอัดตัวแน่นของผง รวมถึงความชื้นที่มีผลทำให้ความสามารถในการไหลลดลง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหาร เวลาในการรวมตัวกันของผงจะมีผลทำให้สมบัติของอาหารผงลดลง ดังนั้นในการทดสอบสมบัติแต่ละชนิดมักทำภายใต้สภาวะการควบคุม ทำการปิดผนึกตัวอย่างอาหารหรือทดสอบภายในห้องปิด สมบัติพื้นฐานที่แสดงถึงการเสื่อมสภาพของผงได้แก่ the angle of wall friction, the effective angle of internal friction, the failure function, the cohesion และ the ultimate tensile strength

การวัดสมบัติในการไหลของอาหารผงมักวัดเป็นค่ามุมกอง เนื่องจากเป็นวิธีการวัดที่ง่าย มุมกอง (Angle of repose) หมายถึง มุมกองระหว่างพื้นราบ และพื้นเอียงของกองวัสดุที่ถูกทำให้ไหลลงมาจากอุปกรณ์ที่จัดให้อยู่สูงเหนือพื้นราบ โดยใช้อุปกรณ์อย่างง่ายในการทำให้เกิดการไหลของวัสดุจากจุดที่อยู่เหนือพื้นราบจนกระทั่งมุมที่เกิดขึ้นคงที่ มุมกองเป็นดัชนีชี้วัดความสามารถในการไหลของผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นผง ค่ามุมกองของวัสดุแห่งหนึ่งที่มีค่าต่ำกว่าจะมีความสามารถในการไหลได้มากกว่าวัสดุแห่งหนึ่งที่มีค่ามุมกองที่สูงกว่า (Bodhimage, 2006)

Carr (1976) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการไหลของผง โดยค่ามุมกองที่ต่ำกว่า 35 องศา แสดงว่าสามารถไหลได้อย่างอิสระ ค่ามุมกองอยู่ในช่วง 35-45 องศา แสดงว่าอนุภาคเกิดการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคเล็กน้อย สำหรับค่ามุมกองที่อยู่ในช่วง 45-55 องศา แสดงว่าเกิดการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมาก (สูญเสียความสามารถในการไหล) และค่ามุมกอง >55 องศา แสดงว่าอนุภาคมีการเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคสูงมากและมีความสามารถในการไหลจำกัดหรือไหลยาก การวัดค่ามุมกองเป็นวิธีที่ง่าย เชื่อถือได้ รวดเร็ว และง่ายสำหรับการวัดความสามารถในการไหลของผงที่แตกต่างกัน โดยมุมกองที่มีขนาดเล็กกว่าจะมีความสามารถในการไหลของผงได้อิสระกว่า ขณะที่มุมกองที่มีขนาดใหญ่กว่าแสดงว่าวัสดุมีความสามารถในการไหลได้ไม่ดีหรือมีความเกาะตัวกันระหว่างอนุภาคมากกว่า (cohesiveness) (Bodhimage, 2006)

มุมกองสามารถวัดได้ 2 แบบ คือ static angle of repose เป็นมุมที่เกิดขึ้นระหว่างระนาบพื้นราบและเส้นความชันที่ยาวไปตามพื้นผิวของกองที่เกิดขึ้น โดยวัสดุที่เทลงบนพื้นผิวราบ การวัด static angle of repose แสดงดังรูป 2.6 สำหรับ dynamic angle of repose จะถูกวัดในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating cylinder) แสดงดังรูป 2.7 (Bodhimage, 2006)



ภาพที่ 2.6 การวัด Static angle of repose

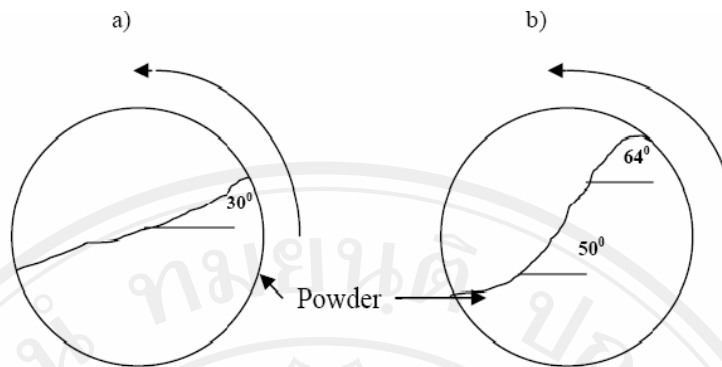
ที่มา : Bodhmag (2006)

การวัด static angle of repose

การวัด static angle of repose ประกอบด้วยกรวยแก้วทรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทางออกด้านปลายกรวยแก้วทรงขนาด 0.9 cm ถูกตรึงไว้บนขาตั้งโลหะดังรูปที่ 2.6 ทางออกด้านปลายกรวยแก้วทรงจะอยู่สูงจากฐาน 6 cm ตาม ตัวอย่างผง 200 g จะถูกเทผ่านกรวยทรงลงไป ปลายทางออกของกรวยทรงจะถูกปิดไว้ เมื่อปลายทางออกถูกเปิดออกวัสดุจะไหลออกไปสร้างเป็นรูปทรงกรวยบนฐาน วางกล้องดิจิทัลไว้ในตำแหน่งด้านหน้าของกรวยทรงเพื่อถ่ายรูปอัด โนมัติ หลังจากนั้นจะถูกนำไปวิเคราะห์ static angle of repose (Bodhmag, 2006)

การวัด dynamic angle of repose

Dury and Ristow (1998) ทำการวัด dynamic angle of repose ด้วย Electrical Capacitance Tomography (ECT) โดยเทผงตัวอย่างลงในกระบอกตวงที่มีการหมุน (rotating drum) แล้วสังเกตก้อนที่กลิ้งไปตามพื้นผิวของกองผง เมื่อเพิ่มอัตราการหมุนพบว่า ก้อนที่กลิ้งจะหยุดเป็นพักๆ หรือน้อยลงและขาดออกจากพื้นผิวอย่างต่อเนื่อง โดย dynamic angle of repose คือ มุมที่เกิดขึ้นโดยพื้นผิวที่ลาดเอียงของกองผงกับแนวราบเมื่อทำการหมุนในกระบอกตวงดังรูปที่ 2.7 และเมื่อเพิ่มอัตราเร็วการหมุนต่อไปมากขึ้น จะทำให้เกิดการเสีรูปของพื้นผิวแบนราบไปเป็นรูปร่างตัว S (S shape profile) การเสีรูปเริ่มต้นจากการลดเข้ามาข้างในของขอบเขต และสามารถถูกประมาณค่าโดยเส้นตรง 2 เส้นที่มีความชันแตกต่างกัน โดยเส้นตรงที่มีความชันมากกว่าจะไว้สำหรับการวัด dynamic angle of repose (Bodhmag, 2006)



ภาพที่ 2.7 การวัด Dynamic angle of repose
ที่มา : Bodhimage (2006)

2.4.4 ความสามารถในการละลาย

สมบัติการละลายของผง (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 1996) ได้แก่

1. Wettability คือ ความสามารถของอนุภาคของผงในการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และปัจจัยที่มีผลต่อ wettability ได้แก่ กระบวนการเกาะกันเป็นก้อนของอนุภาค จำนวนของอนุภาคที่ดูดซับน้ำได้ พื้นผิวของอนุภาค หรือการไม่มีอนุภาคที่ไม่เกาะกันเป็นก้อน
2. Sinkability คือ ความสามารถของผงในการจมลงไปในน้ำ หลังจากผงเกิดการดูดซับน้ำบนพื้นผิวของอนุภาค และมีผลมาจากความหนาแน่นของอนุภาค
3. Dispersibility หมายถึง ความสามารถของผงในการกระจายตัวตลอดทั่วทั้งภายในน้ำ โดยไม่เกิดเป็นก้อน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อ dispersibility คือ อนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 250 μm หรืออนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อน
4. Solubility คือ อัตราการละลายหรือความสามารถในการละลายทั้งหมด โดยการบวมตัวอย่างอย่างรวดเร็วของอนุภาคเป็นปัจจัยที่กระทบต่อความสามารถในการละลาย

Solubility index (SI) คือ ร้อยละของมวลแห้งของสารที่ละลายได้ใน supernatant (W_s) กับมวลแห้งของตัวอย่างทั้งหมด (W_o) (Mandala and Bayas, 2004)

โดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 5 g ใส่ใน centrifuge tube เติมน้ำ 50 ml ที่อุณหภูมิ 30°C ปั่นที่ความเร็ว 3000 rpm นาน 10 นาที เท supernatant ใส่ใน aluminium can อบที่อุณหภูมิ 105°C เวลานาน 24 ชั่วโมง คำนวณหาค่าความสามารถในการละลาย (%) (Shittu and Lawal, 2007)

$$SI = \frac{W_s}{W_o} \times 100 \quad (2.4)$$

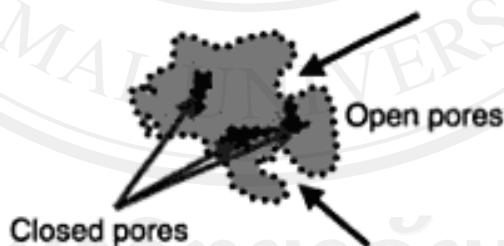
ปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถในการละลาย คือ ธรรมชาติของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย อุณหภูมิ ความดัน ขนาดของอนุภาค และการกวนผสม (Rahman, 1995)

2.4.5 ความหนาแน่น (Density) (Barbosa-Cánovas *et al*, 2005)

2.4.5.1 ความหนาแน่นของอนุภาค (Particle density)

ความหนาแน่นของอนุภาคสามารถอธิบายได้ในรูปของมวลต่อปริมาตรทั้งหมด ความหนาแน่นจะมีความสัมพันธ์กับการอธิบายสมบัติอื่นๆของอนุภาค เช่น โครงสร้างของผง (bulk powder structure) และขนาดของอนุภาค (particle size) โดยขึ้นอยู่กับวิธีการวิเคราะห์ปริมาตร total volume ความหนาแน่นของอนุภาคจะมีค่าจำกัดความที่แตกต่างกัน โดยแบ่งออกเป็น true particle density, apparent particle density หรือ effective (aerodynamic) particle density เนื่องจากอนุภาคนั้นมักเกิดการแตก การร้าว การเกิดโพรง หรือการติดกันของอนุภาค ดังนั้นการนิยามจึงแตกต่างกัน

True particle density แสดงถึง มวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วย open และ close pores ดังภาพที่ 2.8 และความหนาแน่นอนุภาคของวัตถุที่เป็นของแข็ง สำหรับสารเคมีบริสุทธิ์ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ความหนาแน่นของสารสามารถอ้างอิงได้จากหนังสือข้อมูลทางเคมี ฟิสิกส์ โดยวัตถุนินทรีย์ประกอบด้วยอนุภาคที่แข็ง ส่วนสารประกอบอินทรีย์จะมีลักษณะที่อ่อนนุ่มและอนุภาคที่เป็นรูพรุน true density ของอาหารผงหลายชนิดมักมีค่าต่ำกว่าผงแร่หรือโลหะ วัตถุประเภทที่ไม่ใช่โลหะ (non metallic) จะมีความหนาแน่นมากกว่า $2,000 \text{ kg/m}^3$ ในขณะที่อนุภาคของอาหารส่วนใหญ่จะมีความหนาแน่นต่ำกว่า $1,000\text{-}1,500 \text{ kg/m}^3$



กราฟที่ 2.8 แสดงผงที่ประกอบด้วย open และ close pores

ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

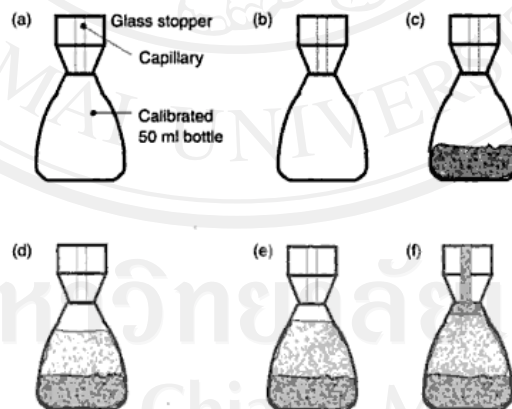
Apparent particle density คือมวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วย open pore ซึ่งสามารถวิเคราะห์โดยวิธีการแทนที่ด้วยก๊าซหรือของเหลว เช่น liquid or air pycnometry

Effective particle density แสดงถึง มวลของอนุภาคหารด้วยปริมาตรที่ประกอบด้วยที่ประกอบด้วย open และ close pores ในกรณีนี้ปริมาตรคือปริมาตรภายใน aerodynamic envelope ซึ่งจะแสดงการไหลของก๊าซผ่านตัวอย่างอนุภาค ความหนาแน่นชนิดนี้มีความสำคัญมากต่อการนำไปประยุกต์ใช้ซึ่งจะมีผลต่อ bulk flow ในอากาศรอบๆที่อยู่ล้อมรอบอนุภาคคล้ายกับการไหลของของเหลว (fluidization)

ความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกันสามารถอธิบายได้จาก dimensionless form ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นหรือความถ่วงจำเพาะ ซึ่งเป็นสัดส่วนของความหนาแน่นของอนุภาคต่อความหนาแน่นของน้ำ การวิเคราะห์ห้มวลของอนุภาคที่แม่นยำนั้นสามารถทำได้ง่ายแต่การประเมินปริมาตรนั้นสามารถทำได้ยากเนื่องจากมีรูปร่างที่ไม่สม่ำเสมอและการมีช่องว่างระหว่างอนุภาค

การวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคด้วยวิธี Liquid pycnometry

สามารถใช้ liquid pycnometry ในการหาความหนาแน่นของอนุภาคทั้งวัตถุที่ละเอียดและหยาบ โดยจะขึ้นอยู่กับปริมาตรของขวด pycnometer ที่ใช้โดยทั่วไปแล้วจะใช้ขวด pycnometer ขนาด 50 ml ส่วนสารที่ใช้ในการวิเคราะห์ควรเป็นสารที่ไม่ทำละลายหรือไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในตัวอย่างอาหารผง ขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาค โดยวิธี liquid pycnometry แสดงดังภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 แสดงขั้นตอนการวิเคราะห์ความหนาแน่นของอนุภาคด้วยวิธี liquid pycnometry

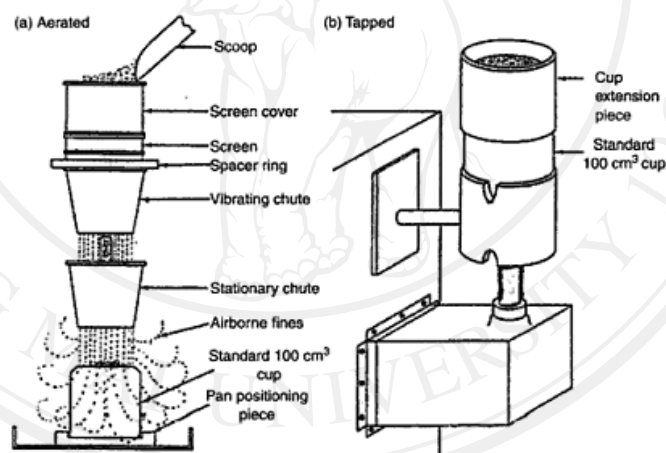
ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

2.4.5.2 ความหนาแน่นผง (Bulk density) (Barbosa-Cánovas and Joliano, 2005)

ความหนาแน่นของผงสามารถประเมินได้จากความหนาแน่นของอนุภาค โดยเป็นการวิเคราะห์ความหนาแน่นของของแข็งและอนุภาคที่มีรูพรุนภายใน หรือสามารถวิเคราะห์ได้จาก

ลักษณะการจัดตัวของอนุภาคภายในบรรจุภัณฑ์ ความหนาแน่นของผงประกอบด้วยปริมาตรของวัตถุที่เป็นของแข็งและของเหลว

ความหนาแน่นของผงสามารถวิเคราะห์ได้โดยวิธี Aerate powder จากการเทผงลงในตะแกรงร้อนซึ่งจะเขย่าผงผ่านลงไปยังถ้วยแสดงดังภาพ 2.10 Hokusawa powder tester จะรวบรวมผงเข้าด้วยกันโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการผลิตโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมคุณภาพในการผลิต เครื่องนี้สามารถใช้ในการวิเคราะห์ความหนาแน่นของผงด้วยวิธี Tap bulk density โดยบรรจุผงผ่านการเคาะ (tapping) เขย่า หรือใส่ในภาชนะที่ใช้เพื่อการวิเคราะห์ความถี่ขึ้นสะเทือน หลังการเคาะผงส่วนเกินที่เหลืออยู่คือเศษที่ติดขอบของถ้วยและความหนาแน่นของผงจะสามารถหาได้จากน้ำหนักของถ้วย การวิเคราะห์ด้วยวิธี tap density สามารถวิเคราะห์ด้วย tap density tester หรือ Copley volumeter ซึ่งประกอบด้วย cylinder และตัวเคาะ ข้อดีของ Hokusawa powder tester และ Copley over คือสามารถกำหนดมวลของผงที่ใช้และไม่ต้องขนย้ายหากต้องการชั่งน้ำหนัก รวมถึงมีจำนวนการเคาะที่เพิ่มขึ้น



ภาพที่ 2.10 แสดงการวิเคราะห์ความหนาแน่นของผงด้วย Hokusawa powder tester ทั้งวิธี Aerate density และ Tapped density

ที่มา : Barbosa-Cánovas and Joliano (2005)

2.5 สารลดความเหนียว

มีสารหลายชนิดที่ถูกนำมาใช้เพื่อลดความเหนียวของอาหารผงระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย ตัวอย่างเช่น กัมอราบิก ไฮโดรไลซ์สตาร์ช สตาร์ชคัดแปร์ โปรตีนบางชนิด เช่น เวย์โปรตีน โซเดียมคาร์ซิเนต และเจลาติน สมบัติที่ดีของสารลดความเหนียว คือ ต้องมีความสามารถในการละลายสูง ความหนืดต่ำแม้มีความเข้มข้นสูง และราคาถูก (Loksuwan, 2007)

2.5.1 มอลโทเดกซ์ทริน (Maltodextrin)

Food and Drug Administration (FDA) ให้คำจำกัดความมอลโทเดกซ์ทริน ($C_6H_{12}O_5$) H_2O ว่าเป็นสารที่ไม่มีรสหวาน ประกอบด้วยหน่วยของ D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอัลฟา 1, 4 มอลโทเดกซ์ทรินมีทั้งที่เป็นผงสีขาวหรือสารละลายเข้มข้นที่เตรียมได้จากสตาร์ชข้าวโพด (corn starch) มาผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) บางส่วนด้วยกรดและ/หรือเอนไซม์ที่เหมาะสมและปลอดภัย (Kenyon, 1995)

มอลโทเดกซ์ทรินจะมีขนาดโมเลกุลที่แตกต่างกันโดยสามารถแบ่งได้จากค่า dextrose equivalent (DE) ค่า DE คือ ค่า reducing power ของพอลิแซคคาไรด์ หรือโอลิโกแซคคาไรด์ที่ได้จากสตาร์ชเปรียบเทียบกับ D-glucose โดยน้ำหนักฐานแห้ง โดยทั่วไปมอลโทเดกซ์ทรินจะมีค่า DE น้อยกว่า 20 หาก DE มากกว่า 20 เป็นกลูโคสไซรัป มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่างกันจะมีสมบัติทางเคมี ภายภาพต่างกัน เช่น ความสามารถในการละลาย อุณหภูมิเยือกแข็ง และความหนืด เป็นต้น (Klinkesorn *et al.*, 2004) มอลโทเดกซ์ทรินมีสมบัติดังนี้ สามารถละลายน้ำได้ ป้องกันการเกิดออกซิเดชัน (oxidation) ได้ดี ความสามารถในการเก็บรักษาสารที่ถูกห่อหุ้มขึ้นอยู่กับค่า DE มอลโทเดกซ์ทรินเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับค่า DE ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักโมเลกุลกับค่า T_g ของมอลโทเดกซ์ทรินสามารถอธิบายได้จากสมการ

$$T_g = T_{g\infty} - \frac{K_g}{M} \quad (2.6)$$

โดย T_g คือ อุณหภูมิ glass transition ของอนุพันธ์สตาร์ช K_g คือ ค่าคงที่ (-25000 K)
 $T_{g\infty}$ คือ T_g ของสตาร์ชที่น้ำหนักโมเลกุลใดๆ M คือ น้ำหนักโมเลกุล

ค่า T_g และ K_g ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุคิบ (material) เนื่องจากอุณหภูมิ glass transition ของสารผสม มีผลมาจาก T_g ของส่วนประกอบแต่ละตัว (Bhandari and Howes, 1999)

มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำจะมี T_g สูง ประสิทธิภาพของมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำ คือ มีความสามารถในการก่อฟิล์มได้เร็วหรือมีสมบัติในการห่อหุ้มสารได้ดี และฟิล์มที่ได้ค่อนข้างมีความชื้นต่ำมีความสามารถในการกระจายตัวที่ดี (Adhikari *et al.*, 2003) การเติมมอลโทเดกซ์ทรินซึ่งมี T_g สูงเข้าไปจะทำให้ T_g ทั้งหมดของผลิตภัณฑ์สูงขึ้น

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า T_g ของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ

| วัตถุดิบ | น้ำหนักโมเลกุล | T_g ($^{\circ}\text{C}$) |
|----------------|----------------|------------------------------|
| ฟรักโทส | 180 | 5 |
| กลูโคส | 180 | 31 |
| กาแล็กโทส | 180 | 32 |
| ซูโครส | 342 | 62 |
| มอลโทส | 342 | 87 |
| แล็กโทส | 342 | 101 |
| มอลโทเดกซ์ทริน | | |
| DE 36 | 500 | 100 |
| DE 25 | 720 | 121 |
| DE 20 | 900 | 141 |
| DE 10 | 1800 | 160 |
| DE 5 | 3600 | 188 |
| สตาร์ช | | 243 |

คัดแปลงจาก: Bhandari and Howes (1999)

Kurozawa *et al.* (2009) ได้ศึกษาผลของมอลโทเดกซ์ทรินและกัมอราบิกต่อค่า water sorption และค่า T_g ของโปรตีนไฮโดรไลเซทจากเนื้อไก่โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งโปรตีนไฮโดรไลเซทจากเนื้อไก่จะมี T_g และอุณหภูมิวิกฤติที่ต่ำ อาจเป็นผลมาจากความชื้นและค่า a_w ในระหว่างกระบวนการผลิตการจัดการ และการเก็บรักษา เมื่อเติมมอลโทเดกซ์ทรินและกัมอราบิกจะสามารถเพิ่ม T_g ของวัตถุดิบ ซึ่งมีผลทำให้ผงที่ได้มีความเสถียรต่อความชื้นมากขึ้น Bhandari *et al.* (1997a) กล่าวว่า การอบแห้งที่จะประสบความสำเร็จนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลัก 3 ประการ ได้แก่ ส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์ อุณหภูมิในการอบแห้ง และสมบัติของสารที่ช่วยในการอบแห้ง เช่น น้ำผลไม้และ น้ำผึ้งประกอบไปด้วยน้ำตาลหลายชนิดรวมทั้งกรดอินทรีย์ โดยอัตราส่วนของน้ำตาลและปริมาณ กรดอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามชนิดของผลไม้ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการสุกแก่ของผลไม้ชนิด และพันธุ์ ซึ่ง T_g ของสารประกอบแต่ละชนิดจะมีผลอย่างมากต่อกระบวนการผลิต Bhandari *et al.* (1993) ศึกษาการผลิตน้ำผลไม้ผงจากแบล็คเคอร์แรนท์ ราสเบอร์รี่ และแอพริคอต ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยผสมน้ำผลไม้และมอลโทเดกซ์ทริน (DE 6) ที่อุณหภูมิ 60°C และกำหนดอัตราส่วนของแข็งในน้ำผลไม้ต่อมอลโทเดกซ์ทรินเท่ากับ 65:35, 55:45 และ 60:40 ตามลำดับ

สโรบล และคณะ (2550) ศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าและความเข้มข้นของมอลโท-เดกซ์ทริน (DE 10) ขณะอบแห้งด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยของสับประรดผง พบว่า อิทธิพลร่วมระหว่างตัวแปรนี้มีผลต่อความชื้นที่ลดลง ความหนาแน่นบรรจุ การละลายที่ 30°C และการเปลี่ยนแปลงสีโดยรวมที่เพิ่มขึ้น ส่วนอิทธิพลหลักของตัวแปรกระบวนการมีผลต่อปริมาณของผงที่ได้ ความหนาแน่นโดยรวม การละลายที่ 4°C ค่าการดูดน้ำกลับ (hygroscopicity) ค่าการกระจายตัว และปริมาณฟีนอลที่คงอยู่ สับประรดผงที่ได้จะมีความชื้นต่ำอยู่ในช่วง 2.04-3.64% ฐานแห้ง เมื่อพิจารณาภาวะการอบแห้งที่เหมาะสมจาก %recovery และปริมาณสารฟีนอลที่คงอยู่ พบว่า อุณหภูมิอากาศขาเข้าควรอยู่ในช่วง 130-150°C ที่ความเข้มข้นมอลโทเดกซ์ทรินต่ำสุดที่ 37% พืชพันธ์ และคณะ (2551) ทำการศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการทำน้ำลำไยผงด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเลือกปริมาณสัดส่วนมอลโทเดกซ์ทริน 0.4, 0.5 และ 0.6 กรัม ต่อกรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อัตราการไหลของลมร้อน 1.45, 1.68 และ 1.8 ตารางเมตรต่อนาที อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้ง 165, 175 และ 185°C จากการศึกษาพบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแล้วให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ลำไยผงสูงสุดที่ปริมาณสัดส่วนมอลโทเดกซ์ทริน 0.6 กรัม ต่อกรัมของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้อบแห้ง 185°C และช่วงปริมาณอัตราการไหลของลมร้อนระหว่าง 1.5-1.7 ตารางเมตรต่อนาที ซึ่งได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากกว่า 40%

2.5.2 โปรตีนนม (Milk protein)

ในนมจะประกอบด้วยโปรตีนสองชนิด โดยสามารถแยกได้จากความสามารถในการละลายที่ pH 4.6 อุณหภูมิ 20°C ภายใต้สภาวะนี้โปรตีนชนิดหนึ่งจะเกิดการตกตะกอน ได้แก่ เคซีน ส่วนโปรตีนที่สามารถละลายได้ที่ pH 4.6 คือ เวย์โปรตีน การนำโปรตีนจากนมมาใช้โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นส่วนผสมของอาหารในเชิงอุตสาหกรรมนั้น มักมีการลดปริมาณโปรตีนในนมลง Shrestha *et al.* (2007) ศึกษาความเข้มข้นของโปรตีนในนมผงพร้อมมันเนยต่อค่า T_g ด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยทำการเจือจางโปรตีนด้วยแล็กโทสให้มีปริมาณโปรตีน 34, 25.5, 17.0 และ 8.5% ตามลำดับ จากการทดลองที่ปริมาณ a_w ที่แตกต่างกัน พบว่า T_g ของนมผงพร้อมมันเนยต่อแล็กโทสที่ได้จะต่ำกว่านมผงพร้อมมันเนยบริสุทธิ์เล็กน้อย แต่เมื่อเปรียบเทียบกับ T_g ของนมผงพร้อมมันเนยและนมผงพร้อมมันเนยต่อแล็กโทสทั้งหมดที่ความชื้นเดียวกัน พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน โดย T_g ของนมผงพร้อมมันเนยและนมผงพร้อมมันเนยต่อแล็กโทสจะขึ้นอยู่กับปริมาณการดูดซับน้ำของ amorphous แล็กโทส โดยแต่ละอนุภาคของแล็กโทสอาจมีปริมาณน้ำที่เท่ากันเมื่อเฉลี่ยในค่า a_w จึงทำให้ T_g เท่ากัน แต่อย่างไรก็ตามหากในนมผงพร้อมมันเนยมีปริมาณโปรตีนที่ต่ำกว่ามาตรฐาน เช่นที่ 8.5% เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูง แล็กโทสจะดูดซับน้ำเป็นสาเหตุให้ T_g ลดลง

Shrestha *et al.* (2008) ศึกษาการเจือจางโปรตีนในนมพร่องมันเนยด้วยนมที่ผ่านการกรองไขมันนมและโปรตีนนมออก (milk permeate: MP) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ MP มีผลทำให้เกิดการเหนียวของผลิตภัณฑ์ผงเพิ่มมากขึ้นซึ่งสังเกตจากปริมาณ recovery ของผงที่ติดอยู่กับผนังเครื่องอบแห้งจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่า T_g ต่ำกว่านมพร่องมันเนยที่ไม่เติม MP และการเกิดผลึกของแล็กโทสลดลงเมื่อมี a_w ต่ำ นมพร่องมันเนยที่มีการเติม MP จะมีค่า a_w และปริมาณความชื้นวิกฤติต่ำกว่า ดังนั้นการเติม MP ในนมพร่องมันเนยจึงเป็นการเพิ่มความเหนียวให้กับผลิตภัณฑ์ผงที่ได้มากกว่านมพร่องมันเนยที่ไม่เติม MP เมื่อเก็บรักษาที่ค่า a_w และปริมาณความชื้นเดียวกัน

การสะสมของอนุภาคที่ผนังของเครื่องอบแห้งคือปัญหาสำคัญของการอบแห้งแบบพ่นฝอยในการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ T_g ของวัสดุที่มีโครงสร้างเป็น amorphous จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะเป็นแนวทางในการเลือกสภาวะการผลิตที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดการสะสมที่ผนังของเครื่องน้อยที่สุด Langrish *et al.* (2007) ศึกษาเปรียบเทียบปริมาณการเกาะติดที่ผนังเครื่องอบแห้งระหว่างนมผงพร่องมันเนยและมอลโทเดกซ์ทรินในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยแบบจำลอง ความสูง 1.5 เมตร หัวฉีดแบบ two-fluid atomizer ทั้งมอลโทเดกซ์ทรินและนมผงพร่องมันเนยมีปริมาณของแข็ง 9% โดยมวล จากการทดลอง พบว่าการเกาะติดกันระหว่างอนุภาค (cohesion) และการเกาะติดที่ผนัง (adhesion) ของนมผงพร่องมันเนยมีปริมาณที่เท่ากัน ส่วนมอลโทเดกซ์ทริน (DE 18) มีอัตราการตกค้าง (deposition) น้อยกว่าและสภาวะการเกาะติดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับอัตราการเกาะตัวของผง เนื่องจาก T_g ของมอลโทเดกซ์ทรินสูงกว่าของนมผงพร่องมันเนย ส่วนประกอบหลักที่อยู่ในนมผงได้แก่ แล็กโทส ซึ่งมีค่า T_g สูงประมาณ 97–116°C เมื่อปราศจากความชื้น (Haque and Roos, 2004) การมีส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ความชื้น โปรตีน ไขมัน แร่ธาตุ และกรดแลคติก เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อลักษณะทางเคมีกายภาพ เช่น การดูดซับน้ำ ค่า T_g และการก่อผลึกของนมผง (Shrestha *et al.*, 2007) T_g ของแล็กโทสบริสุทธิ์เท่ากับ 101°C และจะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น (Boonyai *et al.*, 2006) โดยหากมีปริมาณความชื้น 1.65 กรัมต่อ 100 กรัมของผง T_g ของนมพร่องมันเนยจะเท่ากับ 87.7°C และหากปริมาณความชื้นเท่ากับ 4.52 กรัมต่อ 100 กรัมของผง T_g จะลดลงเหลือ 46.7°C (Ozmen and Langrish, 2002) Fitzpatrick *et al.* (2007) ศึกษา T_g และการแตกตัวของผงที่มีแล็กโทสเป็นส่วนประกอบ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงจะเป็นวัสดุ amorphous เช่น น้ำตาลแล็กโทสในนมผง เมื่อได้รับอุณหภูมิหรือความชื้นที่มากพอจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของความหนืดสูง มีผลทำให้อนุภาคเหนียวเป็นเหตุให้เกิดการเกาะตัวของอนุภาคของผงเพิ่มขึ้น และเกิดการแตกตัวของอนุภาคซึ่งเป็นการเพิ่มการสะสมที่ผิว การเปลี่ยนสถานะจากออสถฐานสามารถทำได้จาก

การเพิ่มอุณหภูมิของผงให้มากกว่า T_g โดยหากนมผงมีอุณหภูมิสูงกว่า T_g ของแล็กโทส 10-20°C จะส่งผลให้การเกาะตัวของอนุภาคและการเกาะติดที่ผนังเครื่องอบแห้งเพิ่มมากขึ้น

2.5.3 สตาร์ชและสตาร์ชดัดแปร (Starch and modified starch)

สตาร์ชดัดแปร (modified starch) ความหมายตามมาตรฐานอุตสาหกรรม มอก. 1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชข้าวสาลี มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางกายภาพจากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือ เอนไซม์ และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ

วิธีการดัดแปรสตาร์ชทำได้ 3 วิธี คือ

1. วิธีทางเคมี
2. วิธีทางกายภาพ
3. วิธีการใช้เอนไซม์

ตัวอย่างการดัดแปรสตาร์ช เช่น

1. ทำให้เกิด cross-linking ของสายโพลีเมอร์โดยให้ cross-linking reagent ทำปฏิกิริยากับ หมู่ไฮดรอกซิลบนโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบ จะทำให้เม็ดสตาร์ชดัดแปรพองตัวได้ช้าลง และความหนืดของสารละลายจะลดลงด้วย

2. ออกซิไดซ์หมู่ไฮดรอกซิลบางส่วน

3. ใช้สารทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลเกิดเป็นอีเทอร์ เอสเทอร์และแอซิดลหรืออนุพันธ์อื่นๆ

4. ทำให้เม็ดสตาร์ชสุกเสียก่อนโดยใช้ความร้อน (pregelatinization) สตาร์ชดัดแปรที่ได้จะพองตัวได้ดีในน้ำเย็น

5. ใช้เอนไซม์สลายพันธะไกลโคไซด์บางส่วน (depolymerization) ทำให้สตาร์ชดัดแปรมีขนาดโมเลกุลเล็กลง และสตาร์ชดัดแปรที่ได้จะทำให้สมบัติของอะไมโลสที่เป็นพอลิเมอร์สายยาวเปลี่ยนไป มีขนาดสั้นลง ละลายน้ำได้ดี มีความหนืดเพิ่มขึ้นหรือลดลง มีความคงตัวเพิ่มขึ้น เช่น ยับยั้งการเกิดเจลทำให้เกิดเป็นฟิล์มง่ายขึ้น เพิ่มความคงตัวต่อความร้อน กรด แรงเฉือน จึงไม่สามารถเกาะตัวกันได้ง่าย และไม่เกิดรีโทรเกรดชัน (นิธิยา, 2549)

สมบัติที่สำคัญของสตาร์ชขึ้นอยู่กับส่วนประกอบที่อยู่ภายในสตาร์ช เช่น อัตราส่วนของ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน ฟอสฟอรัส ไขมัน โปรตีน และเอนไซม์ โครงสร้างโมเลกุลของ อะไมโลเพคติน โครงสร้างของเม็ดสตาร์ช รูปร่าง และขนาดของเม็ดสตาร์ชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ในการศึกษาสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชสามารถศึกษาได้จากการเกิดเจลดีโนเซนชัน

Singh *et al.* (2007) รายงานถึงปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางเคมี ภายภาพ รูปร่าง สมบัติด้านความร้อน และรีโอโลยีของสตาร์ชตัดแปร โดยวิธีการทางเคมี ในการศึกษาพฤติกรรมด้านความร้อนของสตาร์ชพบว่า สตาร์ชตัดแปรทุกชนิดจะมีอุณหภูมิ transition (T_o : เริ่มต้น, T_p : พีค) อุณหภูมิสุดท้าย (T_c) และพลังงานเอนทาลปีทั้งหมด (ΔH_{gel}) ที่สัมพันธ์กับการเกิดเจลในเซชัน ในการตัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีไฮดรอกซีโพรพิลเลชัน (hydroxypropylation) จะทำให้เกิดการแตกตัวของพันธะไฮโดรเจนทั้งภายในและระหว่างโมเลกุลที่สายโซ่ของสตาร์ช ทำให้น้ำสามารถเข้าไปจับกับพันธะที่อิสระเป็นผลให้อุณหภูมิการเกิดเจลในเซชันลดลง Perera *et al.* (1997) ศึกษาผลของไฮดรอกซีโพรพิลเลชันต่อสมบัติด้านความร้อนของสตาร์ชมันฝรั่งชนิดต่างๆ พบว่า หากมีโมเลกุลที่ถูกแทนที่เพิ่มขึ้น (molar substitution) ΔH_{gel} , T_o , T_p และ T_c จะลดลง และอุณหภูมิเฉลี่ยในการเกิดเจลในเซชันจะเพิ่มขึ้น ($T_c - T_o$) ในการศึกษา T_g ของสตาร์ชข้าวเจ้าที่ผ่านการตัดแปรด้วยวิธี cross-linking โดยใช้ sodium trimetaphosphate-sodium tripolyphosphate จะไม่เปลี่ยนแปลงไป เมื่อเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องหรือที่ความชื้น 67% การวิเคราะห์ค่า T_g ของสตาร์ชภายใต้สภาวะที่มีความชื้นจำกัด (15%) มักจะทำการวัดภายหลังจากที่สตาร์ชเปลี่ยนรูปสู่ amorphous state เนื่องจาก T_g ของเม็ดสตาร์ชประกอบไปด้วยผลึกซึ่งยากที่จะทำการวัดเมื่อมีความจุความร้อนในการเปลี่ยน T_g ค่า T_g ของสตาร์ชที่ทำ cross-linking ภายใต้สภาวะที่มีน้ำจำกัดจะลดลงตามอัตราส่วนของสารที่ใช้ cross-linking ซึ่งแนวโน้มที่เกิดขึ้นเนื่องจาก internal plasticization โดยการแทนที่ของโมโนฟอสเฟตซึ่งจะทำให้ปริมาณสายแขนงของสตาร์ชอิสระเพิ่มขึ้น มีผลทำให้ T_g ลดลง (Singh *et al.*, 2007)