



## ไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้นของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

### Moisture Sorption Isotherms of Osmosed-Air Dried Fruits

ลธิธิโชค เถลิงนวชาติ<sup>1</sup> และ เกียรติศักดิ์ ดวงมาลัย<sup>1,2\*</sup>

#### บทคัดย่อ

ไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น (moisture sorption isotherm, MSI) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) กับปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร โดยลักษณะของ MSI เป็นผลมาจากองค์ประกอบและโครงสร้างของอาหาร ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทที่มีปริมาณน้ำตาลสูง จึงมักมี MSI เป็นแบบ J-shape เนื่องจากเมื่อความชื้นสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งน้ำตาลในผลิตภัณฑ์จะดูดน้ำได้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะน้ำตาลเปลี่ยนรูปไปอยู่ในรูปโครงสร้างอสัณฐาน ในการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้งมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ระดับความชื้นเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่ระดับความสุกมากกว่าจะมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่ระดับความสุกต่ำ ทำให้โอกาสการเสื่อมเสียมีน้อยกว่า การทดแทนน้ำตาลซูโครสบางส่วนด้วยน้ำตาลอินเวิร์ตมีผลให้ผลิตภัณฑ์เสื่อมเสียได้ช้ากว่าเมื่อความชื้นสูงขึ้น นอกจากนี้วิธีการทำแห้งยังส่งผลต่อรูปแบบ MSI แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการทำนาย MSI ของผลไม้แช่อิ่มอบแห้งคือ แบบจำลอง Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) ค่า monolayer moisture content ( $M_0$ ) และค่าคงที่ C ในสมการจะเป็นตัวบ่งบอกปริมาณน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนอย่างแข็งแกร่งกับโมเลกุลของสารในผลิตภัณฑ์อาหารยากแก่การระเหยออก ซึ่งสัมพันธ์กับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ และบ่งบอกรูปแบบของไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้นว่าเป็นรูปแบบซิกมอยด์คอคอล (sigmoid-shape) หรือ J-shape ด้วย

<sup>1</sup>ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

<sup>2</sup>กลุ่มการวิจัยการทำแห้งอาหารและวัสดุชีวภาพ ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

\*Corresponding Author, E-mail: kiattisak.d@chula.ac.th

## ABSTRACT

Moisture sorption isotherm (MSI), a plot between water activity ( $a_w$ ) and equilibrium moisture content of a food at constant temperature, is an important tool to obtain the suitable storage condition for certain food. The shape of MSI is a result of food composition and food structure. Due to high amount of sugar containing in osmosed-air dried fruits, MSI of these products usually present a J-shape. At high relative humidity, the change of crystalline to amorphous form of sucrose leads to a sudden increase in moisture content at high  $a_w$ . MSI of these products is influenced by various factors in the process of osmosed-air dried fruit. At the same storage condition with high moisture, an increased stage of fruit ripeness resulted in products with lower in  $a_w$ . This leads to lowering the chance of product deterioration. Partially replacing sucrose with invert sugar lowers the product deterioration. Moreover, methods of drying also affect the MSI shape. Commonly used equation for fitting MSI of osmosed-air dried fruit is Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB). The monolayer moisture content ( $M_o$ ) and the constant “C” depicts the amount of water that strongly bound to other components in product and the shape of moisture sorption isotherm either in sigmoid-shape or J-shape, respectively.

**คำสำคัญ:** ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น สมการ GAB สารละลายออสโมติก

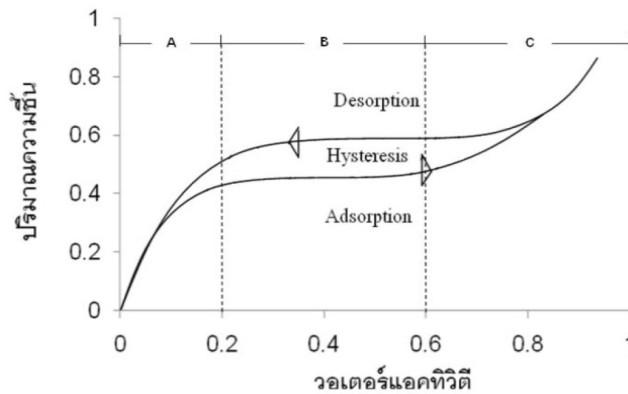
**Keywords:** Osmosed-air dried fruit, Moisture sorption isotherm, GAB equation, Osmotic solution

### 1. บทนำ

ไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น (moisture sorption isotherm, MSI) เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิตี ( $a_w$ ) กับปริมาณความชื้นสมดุลของอาหารที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โดยทั่วไปใช้ MSI ในการหาสถานะที่เหมาะสมของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร

MSI สามารถแบ่งได้ 2 ชนิด คือ ไอโซเทิร์มการดูดซึบ (adsorption isotherm) และไอโซเทิร์มการคายซึบ (desorption isotherm) ซึ่งกราฟทั้ง 2 รูปแบบเกิดจากกลไกในการเคลื่อนย้ายความชื้น (moisture migration) ที่แตกต่างกัน โดยทั่วไปในอาหารแห้งจะสร้าง MSI แบบไอโซเทิร์มการดูดซึบหรือเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ

โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างอาหารแห้งไว้ในภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กัน แล้วปล่อยให้เกิดการเคลื่อนย้ายความชื้นจากอากาศสู่อาหารจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ขณะที่ไอโซเทิร์มการคายซึบสร้างได้จากข้อมูลที่ได้จากการเก็บอาหารที่มีปริมาณความชื้นสูงไว้ในภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กันที่อุณหภูมิต่าง ๆ หนึ่ง ๆ แล้วปล่อยให้เกิดการเคลื่อนย้ายความชื้นจากอาหารสู่อากาศจนเข้าสู่ภาวะสมดุล เมื่อเปรียบเทียบปริมาณความชื้นของอาหารที่ภาวะสมดุลระหว่าง MSI ทั้ง 2 ชนิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ค่า  $a_w$  เดียวกัน พบว่า จะมีช่วงค่า  $a_w$  ที่ปริมาณความชื้นของอาหารที่สภาวะสมดุลของไอโซเทิร์มการคายซึบสูงกว่าไอโซเทิร์มการดูดซึบ ซึ่งช่วงความแตกต่างดังกล่าวที่เกิดขึ้นเรียกว่า ฮีสทีรีซิส (hysteresis) โดยอาหารแต่ละชนิดมีฮีสทีรีซิส



**รูปที่ 1** ไอโซเทิร์มการดูด-คายซับความชื้นและการแบ่งช่วงกราฟตามแรงยึดเหนี่ยวของน้ำในอาหาร (ที่มา: ดัดแปลงจาก Barbosa-Canovas and Juliano (2007))

ที่แตกต่างกัน (Barbosa-Canovas and Juliano, 2007) รูปที่ 1 แสดงฮีสทีรีซิสและความสัมพันธ์ระหว่างค่าวอเตอร์แอกทิวิตีกับปริมาณความชื้นของอาหารที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โดยที่ภาวะสมดุลค่าวอเตอร์แอกทิวิตีในระบบที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ มีค่าสูงกว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ ณ จุดนั้น ๆ เล็กน้อย

การสร้าง MSI ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ นอกจากจะมีประโยชน์ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารแล้ว ยังมีประโยชน์อีกหลายด้าน เช่น การเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมเพื่อลดการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างอาหารกับภาวะแวดล้อม การคัดเลือกส่วนผสมของอาหารเพื่อหลีกเลี่ยงการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างส่วนผสม การทำนายการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีและจุลินทรีย์ของอาหารอันเนื่องมาจากปริมาณความชื้น (Fennema, 1996) สำหรับอาหารแห้งและอาหารกึ่งแห้ง การสร้าง MSI ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ นอกจากจะมีประโยชน์ดังกล่าวข้างต้นแล้วยังช่วยในการเลือกปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้งที่เหมาะสมเพื่อยืดอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ (Mathlouthi, 2001) ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าการสร้าง MSI ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ เป็นเครื่องมือที่สำคัญสำหรับนักวิทยาศาสตร์ทางอาหาร

บทความนี้จะกล่าวถึงรูปแบบของ MSI การสร้าง MSI ด้วยวิธีต่าง ๆ ตลอดจนปัจจัยที่มีผลต่อรูปแบบไอโซเทิร์มของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง รวมทั้งการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำนายลักษณะของไอโซเทิร์ม เพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ไอโซเทิร์มที่ได้กับผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในด้านต่าง ๆ

## 2. ความสัมพันธ์ของน้ำในอาหารกับการสร้างไอโซเทิร์มการดูด-คายซับความชื้น

### 2.1 ชนิดของน้ำในอาหาร

น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญของอาหารที่มีผลต่อคุณภาพและอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากปริมาณน้ำในอาหารมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีลักษณะทางกายภาพ และการเจริญของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามบทความดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำ น้ำในอาหารสามารถจำแนกตามการเกิดอันตรกิริยาของน้ำกับองค์ประกอบอื่นได้ 2 ชนิด คือ น้ำอิสระ (free water) และน้ำที่จับอยู่กับโมเลกุลของอาหาร (bound water)

น้ำอิสระเป็นน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในอาหารสามารถเข้าร่วมปฏิกิริยาเคมี มีผลต่อการเจริญของจุลินทรีย์ และระเหยได้ง่าย จึงมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในอาหาร ในขณะที่น้ำที่

จับอยู่กับโมเลกุลของอาหารเป็นน้ำที่เกิดอันตรกิริยากับ โมเลกุลของอาหาร จึงมีการเคลื่อนที่อย่างจำกัด และ ระบายออกจากอาหารยาก น้ำชนิดนี้จะไม่เข้าร่วม ปฏิกิริยาทางเคมี และจุลินทรีย์ไม่สามารถใช้ในการ เจริญ อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำในอาหารยังไม่ใช้ดัชนีที่ เหมาะสมในการทำนายการเปลี่ยนแปลงของอาหาร โดยดัชนีที่เหมาะสมและนิยมใช้ในการทำนาย เสถียรภาพของอาหาร (food stability) คือ ค่าวอเตอร์ แอคทิวิตี (Labuza and Altunakar, 2007)

## 2.2 ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี ( $a_w$ )

ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีเป็นค่าที่บอกอัตราส่วน ความดันย่อยของน้ำในอาหารต่อความดันไอของน้ำ บริสุทธิ์อิ่มตัวที่อุณหภูมิเดียวกัน ซึ่งแสดงถึง ความสามารถของน้ำในการเข้าร่วมปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน อาหาร  $a_w$  มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำอิสระใน อาหาร โดยอาหารที่มีค่า  $a_w$  สูงมักมีปริมาณน้ำอิสระ มาก อย่างไรก็ตามหากมีการเติมตัวถูกละลาย เช่น น้ำตาลหรือเกลือลงในอาหาร ค่า  $a_w$  ของอาหารจะ ลดลง เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างตัวถูกละลายกับโมเลกุลของน้ำ ทำให้ความสามารถในการเข้าร่วมปฏิกิริยาของน้ำลดลง (Reid, 2007) ค่า  $a_w$  ของ อาหารจะสัมพันธ์กับเสถียรภาพของอาหาร ซึ่งสามารถ อธิบายด้วยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $a_w$  และ อัตราเร็วในการเกิดปฏิกิริยาเคมี การทำงานของ เอนไซม์ และการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งกราฟนี้จะ ใช้อธิบายการเสื่อมเสียของอาหาร เพื่อจะได้พิจารณา ช่วง  $a_w$  ที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาอาหารชนิด นั้น ๆ กราฟความสัมพันธ์นี้เรียกว่า “food stability map” (Labuza and Altunakar, 2007)

เมื่อเกิดการเคลื่อนย้ายความชื้นในอาหาร น้ำ จากบริเวณที่มี  $a_w$  สูงจะเคลื่อนที่ไปสู่บริเวณที่มี  $a_w$  ต่ำกว่า ทำให้สมบัติของอาหารอาจเกิดการเปลี่ยนแปลง (Al-

Muhtaseb et al., 2002) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมี การศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนย้ายความชื้นในอาหาร เพื่อหาภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษา โดยอาศัยการ สร้าง MSI ของอาหารชนิดนั้น ๆ ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ

## 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างชนิดของน้ำในอาหารกับไอโซเทิร์มการดูด-คายซั้บความชื้น

จากรูปที่ 1 MSI แบ่งออกเป็น 3 ช่วงตาม ชนิดของน้ำในอาหาร คือ A, B และ C (Barbosa-Canovas and Juliano, 2007)

ช่วงกราฟ A แสดงถึง monolayer water ซึ่งเป็นน้ำที่เกิดพันธะไฮโดรเจนอย่างแข็งแรงกับ โมเลกุลของสารในผลิตภัณฑ์อาหาร และยากแก่การ ระบายออก โดยปริมาณ monolayer water สามารถ คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งจะกล่าว ในหัวข้อ 2.5

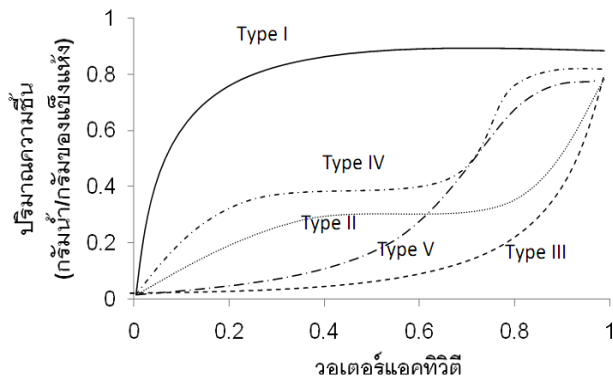
ช่วงกราฟ B แสดงถึง multilayer water ซึ่งมีลักษณะการจัดเรียงตัวเป็นชั้นของโมเลกุลของน้ำที่ยึด กันด้วยพันธะไฮโดรเจน น้ำในชั้นนี้จะอยู่ติดกับ monolayer water

ช่วงกราฟ C แสดงถึงน้ำอิสระในอาหาร ซึ่ง โมเลกุลของน้ำในชั้นนี้ถูกทำให้ระเหยออกจากอาหารได้ ง่าย

## 2.4 รูปแบบไอโซเทิร์มการดูด-คายซั้บความชื้น

ลักษณะของ MSI มีทั้งหมด 5 แบบ (รูปที่ 2) คือ Langmuir isotherm (Type I), Sigmoid isotherm (Type II), Flory-Higgins isotherm (Type III), Type IV และ BET multilayer adsorption isotherm (Type V)

โดยทั่วไปลักษณะของ MSI ที่พบในอาหารมี 3 แบบ คือ Type I, Type II และ Type III ลักษณะ ของ MSI ขึ้นอยู่กับโครงสร้างและองค์ประกอบของ



**รูปที่ 2** รูปแบบของเส้นพฤติกรรมการดูดความชื้น (ที่มา: ดัดแปลงจาก Labuza and Altunakar (2007) และ Mathlouthi and Roge (2003))

อาหาร (Labuza and Altunakar, 2007; Mathlouthi and Roge, 2003)

รูปแบบ Type I พบมากในสารกันการรวมตัวเป็นก้อน (anticaking agent) เช่น อลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งเป็นสารที่สามารถดูดความชื้นได้ดีตั้งแต่ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ดังนั้นปริมาณความชื้นของสารที่ภาวะสมดุลจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อความชื้นในระบบสูงขึ้น

รูปแบบ Type II มีลักษณะกราฟแบบ sigmoidal shape พบในอาหารส่วนใหญ่ ซึ่งมีทั้งสารพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน รวมอยู่กับตัวถูกละลาย เช่น เกลือ น้ำตาล

รูปแบบ Type III มีลักษณะกราฟแบบ J shape พบในน้ำตาล เกลือ และอาหารที่มีน้ำตาลหรือเกลือในปริมาณสูง แต่มีพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ในปริมาณต่ำ พบได้ในผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง ลูกกวาด แยม เป็นต้น เมื่อความชื้นในภาวะแวดล้อมมีค่าต่ำ อาหารกลุ่มนี้จะดูดความชื้นได้ช้า แต่เมื่อความชื้นในภาวะแวดล้อมมีค่าสูงถึงค่าหนึ่ง อาหารกลุ่มนี้จะสามารถดูดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ลักษณะทางกายภาพของอาหารเปลี่ยนแปลง จนก่อให้เกิดการ

ไม่ยอมรับของผู้บริโภค หรือเกิดการเน่าเสียเนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์

**2.5 วิธีการสร้างไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายลักษณะของไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น**

วิธีการสร้าง MSI ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไป เรียกว่า “The static desiccator method” หรือที่เรียกว่า “The standard saturated salt slurry method” ซึ่งสามารถทำได้โดยการเก็บตัวอย่างอาหารที่ทราบน้ำหนักแน่นอนในภาชนะปิดที่ภาวะความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ ในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ 10-90% ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ บันทึกน้ำหนักของตัวอย่างทุกวัน ระหว่างการเก็บตัวอย่างอาหารเกิดการเคลื่อนย้ายความชื้นระหว่างอาหารกับอากาศภายในภาชนะปิดจนเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งจะใช้เวลาาน ในทางปฏิบัติจะรอจนกว่าน้ำหนักของตัวอย่างอาหารคงที่ แล้วนำน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงกับปริมาณความชื้นเริ่มต้นไปคำนวณปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุล เพื่อนำไปใช้ในการสร้าง MSI ที่อุณหภูมินั้น ๆ การแปรระดับความชื้นสัมพัทธ์เพื่อสร้าง MSI สามารถทำได้โดยแปรชนิดของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 1 (Spiess and Wolf, 1987)

**ตารางที่ 1** ความชื้นสัมพัทธ์ของสารละลายเกลืออิ่มตัวที่ 25 องศาเซลเซียส (Spiess and Wolf, 1987)

เกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	เกลือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)
LiCl	11.15	NaBr	57.70
CH <sub>3</sub> COOK	22.60	SrCl <sub>2</sub>	70.83
MgCl <sub>2</sub>	32.73	NaCl	75.32
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43.80	KCl	84.32
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52.86	BaCl <sub>2</sub>	90.26

นอกจากการสร้าง MSI ด้วยวิธีข้างต้นแล้ว อาจใช้วิธีการที่เรียกว่า “The dynamic dewpoint isotherm method” วิธีการนี้จะแตกต่างจากวิธีการแรก เนื่องจากจะวัดค่า  $a_w$  โดยตรงจากการใช้หลักการ Standard chilled mirror dewpoint sensor จากนั้นคำนวณปริมาณความชื้นจากการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของตัวอย่างที่ค่า  $a_w$  นั้น ๆ วิธีการนี้สามารถวัดค่า  $a_w$  ได้โดยที่ไม่จำเป็นต้องรอให้ระบบเข้าสู่สมดุล ทำให้ประหยัดเวลาในการสร้าง MSI ของผลิตภัณฑ์อาหาร ในการปรับความชื้นของสภาพอากาศในระบบสามารถทำได้ใน 2 ลักษณะ คือ การทำให้อากาศอิ่มตัวด้วยไอน้ำก่อนปล่อยเข้าสู่ระบบ หรือการดูดความชื้นออกจากอากาศ โดยใช้ตัวดูดซับความชื้นก่อนที่จะปล่อยอากาศแห้งเข้าสู่ระบบ ด้วยวิธีการนี้จึงช่วยลดระยะเวลาของการสร้าง MSI ของอาหารชนิดหนึ่ง ๆ ลงเหลือ 2-3 วัน (Carter and Fontana, 2008; Schmidt and Lee, 2012)

เมื่อเปรียบเทียบการสร้าง MSI ด้วย “The dynamic dewpoint isotherm method” กับ “The standard saturated salt slurry method” ในตัวอย่างอาหาร พบว่า MSI ที่ได้จากทั้งสองวิธีมีลักษณะคล้ายคลึงกัน แต่การสร้าง MSI ด้วย “The dynamic dewpoint isotherm method” มีข้อได้เปรียบในแง่ต่าง ๆ ดังนี้ (1) ลดเวลาที่ใช้ในการสร้าง MSI จาก 2-3 สัปดาห์ เหลือ 2-3 วัน (2) สามารถสร้างข้อมูลได้มากกว่า 75 จุด สำหรับ MSI ของอาหารชนิด

หนึ่ง ๆ ซึ่งจะช่วยในด้านความถูกต้องของ MSI ที่ได้ (3) ลดข้อกังวลในการเจริญของเชื้อราที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการทดลอง โดยเฉพาะในสภาวะที่มีค่า  $a_w$  สูง (4) เป็นวิธีการที่สามารถติดตามข้อมูลด้านสมบัติของอาหารที่เปลี่ยนแปลงไปตามระยะเวลา ซึ่งอาจเรียกได้ว่าเป็น “real-time investigation” เช่น ข้อมูลความชื้นสัมพัทธ์ระหว่าง MSI กับสมบัติการเปลี่ยนสถานะจากคล้ายแก้ว (glassy) เป็นคล้ายยาง (rubbery) ของอาหาร หรือการเกิดผลึก (recrystallization) ณ เวลานั้น ๆ (Schmidt and Lee, 2012)

แม้ว่าการสร้าง MSI มีประโยชน์ต่อผลิตภัณฑ์อาหารหลายด้าน เช่น การหาสภาวะที่เหมาะสมของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงด้านเคมีและจุลินทรีย์ของอาหาร รวมถึงการเลือกปริมาณความชื้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง (Fennema, 1996; Schmidt and Lee, 2012) อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการสร้าง MSI ในแต่ละครั้งจำเป็นต้องใช้เวลานาน 2-3 สัปดาห์ และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่าย จึงต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการทำนาย MSI โดยสามารถแบ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ 3 ประเภท ได้แก่ แบบจำลองแบบ 2 ตัวแปร เช่น Brunauer-Emmett-Teller (BET) model (Brunauer et al., 1938), Modified Halsey model (Halsey, 1948), Modified Oswin model (Oswin, 1946), Modified Henderson model (Henderson, 1952) เป็นต้น

แบบจำลองแบบ 3 ตัวแปร เช่น Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB) model (Van den Berg, 1984) และแบบจำลองแบบ 4 ตัวแปร เช่น Peleg model (Peleg, 1993)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นิยมใช้ในการทำนาย MSI คือ แบบจำลอง BET และแบบจำลอง GAB ซึ่งแสดงดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ แบบจำลองทั้ง 2 ประเภทมีรูปแบบสมการใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามแบบจำลอง GAB ต่างกับแบบจำลอง BET ตรงที่มีการเพิ่มค่าคงที่  $K$  ในสมการ แบบจำลอง BET สามารถใช้ทำนายพฤติกรรมการดูดความชื้นของอาหารในช่วงค่า  $a_w$  ต่ำกว่า 0.6 ได้ดี ซึ่งครอบคลุมน้ำประเภท monolayer water (ช่วง A) และน้ำประเภท multilayer water (ช่วง B) ในรูปที่ 1 ได้ดี แต่อย่างไรก็ตามช่วงค่า  $a_w$  ที่ใช้สำหรับแบบจำลอง BET มิได้ครอบคลุม MSI ตลอดทั้งเส้นทำให้ไม่สามารถประยุกต์ใช้แบบจำลอง BET กับผลิตภัณฑ์อาหารทุกประเภทได้ จึงมีการพัฒนาแบบจำลอง GAB ขึ้นมา โดยแบบจำลอง GAB ครอบคลุมช่วงค่า  $a_w$  ที่กว้างกว่าแบบจำลอง BET และใช้ได้ดีกับอาหารหลายประเภทมากขึ้น (Timmermann et al., 2001) มีการใช้แบบจำลองทั้ง 2 ประเภทสามารถใช้ในการทำนายค่า monolayer moisture content ( $M_o$ ) ของอาหารได้ ซึ่งค่านี้แสดงปริมาณน้ำที่จะถูกดูดซับได้ที่บริเวณที่เกิดการดูดซับ (adsorption site) ของอาหารชนิดนั้น ๆ หรืออาจประมาณน้ำส่วนนี้ว่าเป็น monolayer water อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณความชื้นของอาหารเข้าใกล้ค่า monolayer concentration ปริมาณน้ำส่วนใหญ่ในอาหารจะอยู่ในรูป monolayer water แต่จะมีน้ำบางส่วนสามารถเคลื่อนที่ได้เล็กน้อย ซึ่งเชื่อว่าเป็นน้ำส่วนที่มีส่วนในการรักษาความดันไอสมดุล ณ ภาวนั้น ๆ (Tait et al., 1972) เราสามารถนำค่า  $M_o$  มาใช้ในการเปรียบเทียบเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์อาหารแต่

ละชนิด นอกจากนี้ค่าคงที่  $C$  จากสมการบอกถึงค่าคงที่ของความร้อนที่พื้นผิว (surface heat constant) โดยค่าคงที่  $C$  จะขึ้นกับพฤติกรรมการดูดความชื้นของบริเวณที่เกิดการดูดซับ และค่าคงที่  $C$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลองทั้งสองประเภทสามารถใช้ซึ่งซึ่งถึงรูปแบบของ MSI ได้ โดย MSI ที่มีค่าคงที่  $C$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง BET หรือแบบจำลอง GAB อยู่ในช่วง 0-2 จะมีรูปแบบ MSI เป็นแบบ J shape (Type III) ขณะที่ MSI ที่มีค่าคงที่  $C$  มากกว่า 2 ขึ้นไป จะมีรูปแบบ MSI เป็นแบบ sigmoidal shape (Type II) ดังรูปที่ 2 (Labuza and Altunakar, 2007)

$$M = \frac{M_o C a_w}{(1 - a_w)(1 + C a_w - a_w)} \quad (1)$$

$$M = \frac{M_o C K a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)} \quad (2)$$

เมื่อ  $M$  = ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุล (กรัมน้ำ/กรัมของแข็งแห้ง)

$M_o$  = monolayer moisture content (กรัมน้ำ/กรัมของแข็งแห้ง)

$C, K$  = ค่าคงที่ของสมการ

### 3. ลักษณะไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้นของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

#### 3.1 ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง

การทำแห้งแบบออสโมซิสหรือการแช่อิ่มเป็นการกำจัดน้ำบางส่วนออกจากเนื้อเยื่ออาหาร โดยแช่ตัวอย่างในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นของสารละลายภายในเนื้อเยื่อ ทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในและภายนอกเนื้อเยื่อจนเกิดแรงขับ และเกิดการถ่ายเทมวลสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า การถ่ายเทมวลสารจะเกิดขึ้นในลักษณะ



สวนทางกัน โดยน้ำภายในเนื้อเยื่อเคลื่อนที่ออกมาภายนอก ในขณะที่ตัวถูกละลายในสารละลายจะเคลื่อนที่เข้าไป นอกจากนี้ตัวถูกละลายบางส่วนในเนื้อเยื่อ เช่น กรดอินทรีย์ เกลือแร่ และวิตามินจะแพร่ออกมา แต่เป็นการแพร่ในปริมาณเล็กน้อย วิธีการนี้จัดเป็นการเตรียมวัตถุดิบวิธีหนึ่งซึ่งช่วยลดปริมาณความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าสู่กระบวนการขั้นตอนอื่น เช่น การอบแห้ง การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง การทำแยม โดยการออสโมซิสช่วยรักษาคุณค่าทางอาหาร การถนอมสี และประหยัดพลังงานในการอบแห้ง เมื่อเทียบกับการถนอมอาหารโดยการอบแห้งแต่เพียงอย่างเดียว (Raoult-Wack, 1994; Torreggiani and Bertolo, 2004)

ในการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง จะมีการแช่ผลไม้ในสารละลายน้ำตาลเข้มข้น โดยทั่วไปนิยมใช้ความเข้มข้นประมาณ 50-60 องศาบริกซ์ เพื่อให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติก และเกิดการเคลื่อนที่ของน้ำตาลเข้าสู่เนื้อเยื่อ พร้อมกับเกิดการกำจัดน้ำออกจากผลไม้ การแช่ผลไม้ในสารละลายน้ำตาลอาจทำเป็นลำดับขั้น โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายน้ำตาลทีละน้อย เช่น 40 องศาบริกซ์ เป็น 50 องศาบริกซ์ และ 60 องศาบริกซ์ ตามลำดับ ในอุตสาหกรรมผลไม้แช่อิ่มอบแห้งในประเทศไทยนิยมการทำแห้งแบบออสโมซิสด้วยวิธีแช่หลายขั้นตอนหรือที่เรียกว่า “multiple step” โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกเป็นลำดับขั้น ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับการออสโมซิสด้วยสารละลายออสโมติกความเข้มข้นเดียว (single step) ดังนั้นวิธีนี้จึงมีประโยชน์ในการช่วยลดเวลาการออสโมซิส (Korsrilabut et al., 2010) การที่น้ำตาลเคลื่อนที่เข้าไปในผลไม้ในปริมาณมากขึ้นจะช่วยลดปริมาณน้ำอิสระภายในผลไม้ลง และ

หลังจากการอบแห้งผลไม้ที่ผ่านการออสโมซิสแล้ว ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะมีค่า  $a_w$  ในช่วง 0.65-0.70

เนื่องจากผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นผลิตภัณฑ์อาหารประเภทที่มีปริมาณน้ำตาลสูง ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งจึงมักมี MSI เป็นแบบ J shape (Type III) ดังปรากฏในรูปที่ 2 การที่ลักษณะ MSI มีรูปแบบคล้ายตัว “J” เนื่องจากเมื่อค่า  $a_w$  สูงกว่า 0.6-0.7 น้ำตาลในผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนจากรูปผลึก (crystalline) ไปอยู่ในรูป อสัณฐาน (amorphous) ซึ่งมีความสามารถดูดความชื้นได้ดีกว่าน้ำตาลในรูปผลึก (Falade et al., 2003) น้ำตาลในผลิตภัณฑ์จึงดูดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นเส้นกราฟจึงมีลักษณะโค้งสูงชันอย่างรวดเร็วเมื่อค่า  $a_w$  สูงกว่าค่าดังกล่าว เนื่องจากมีการใช้น้ำตาลชนิดต่าง ๆ ในขั้นตอนการแช่อิ่มผลไม้ก่อนการอบแห้ง ชนิดของน้ำตาลจึงมีผลต่อรูปร่างของ “J shape” ของ MSI เพราะน้ำตาลต่างชนิดกันมีความสามารถในการจับน้ำได้ต่างกัน ดังนั้นการใช้ MSI ในการประเมินสถานะที่เหมาะสมในการเก็บผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง และการเลือกใช้บรรจุภัณฑ์มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ เนื่องจากเมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงชันจะทำให้ผลิตภัณฑ์ดูดความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อค่า  $a_w$  มากกว่า 0.6-0.7 ทำให้ผิวหน้าผลิตภัณฑ์มีลักษณะฉ่ำเยิ้ม

Lemus-mondaca et al. (2009) ศึกษา MSI ของมะละกออบแห้งโดยอบแห้งมะละกอสดที่อุณหภูมิ 40 60 และ 80 องศาเซลเซียส และ MSI ของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งโดยผ่านการออสโมซิสในสารละลายซูโครสความเข้มข้น 40 50 หรือ 60 องศาบริกซ์ สร้าง MSI ของตัวอย่างทั้งหมดที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยใช้แบบจำลอง GAB ในการทำนาย MSI ผลการทดลองพบว่า รูปแบบ MSI ของตัวอย่างทุกชุดการทดลองเป็นแบบ sigmoidal shape (Type II) แต่มีข้อสังเกตว่ารูปแบบ MSI ของตัวอย่างมะละกอ



อบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสมีรูปแบบใกล้เคียง J shape (Type III) มากกว่า เมื่อพิจารณาจากค่าคงที่ C ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB (สมการ 2) พบว่ามีค่าเข้าใกล้ 2 มากกว่าตัวอย่างมะละกอบแห้ง แต่ค่าคงที่ C ยังมีค่ามากกว่า 2 จึงไม่สามารถสรุปได้ว่าผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งดังกล่าวมีรูปแบบ MSI แบบ J shape แม้ว่ารูปแบบ MSI ของมะละกอแช่อิ่มอบแห้งในงานวิจัยดังกล่าวเป็นแบบ sigmoidal shape อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวกับ MSI ของผลไม้แช่อิ่มอบแห้งอีกหลายชนิดที่มี MSI เป็นรูปแบบ J shape ซึ่งมีค่าคงที่ C ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB อยู่ในช่วง 0-2 เช่น ผลิตภัณฑ์สับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง (Falade et al., 2004) แอปเปิ้ลและมะม่วงแอฟริกันแช่อิ่มอบแห้ง (Falade and Aworh, 2004) และมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง (สิทธิโชค, 2554) การที่รูปแบบ MSI ของตัวอย่างมะละกอทุกชุดการทดลองตามงานวิจัยของ Lemus-mondaca et al. (2009) เป็นแบบ Type II และเมื่อมีน้ำตาลในผลิตภัณฑ์สูงขึ้นรูปแบบ MSI ที่ได้ใกล้เคียง Type III มากกว่า อาจเนื่องมาจากในมะละกอบแห้งที่ทำจากมะละกอสตมมีปริมาณน้ำตาลต่ำทำให้รูปแบบ MSI จึงเป็นแบบ Type II ขณะที่ในตัวอย่งมะละกอบแห้งที่ผ่านการออสโมซิสมีปริมาณน้ำตาลในตัวอย่งสูงขึ้น ทำให้เมื่อคำนวณค่าคงที่ C จากแบบจำลอง GAB ค่าจึงเข้าใกล้ 2.0 ดังนั้นปริมาณน้ำตาลในตัวอย่งซึ่งเพิ่มขึ้นในขั้นตอนออสโมซิสจึงมีบทบาทสำคัญต่อรูปแบบ MSI

### 3.2 ปัจจัยของการผลิตผลไม้แช่อิ่มอบแห้งที่มีผลต่อไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น

#### 3.2.1 ระดับความสุกของผลไม้

องค์ประกอบทางเคมีของผลไม้ โดยเฉพาะปริมาณน้ำตาลจะเปลี่ยนแปลงระหว่างการสุกของผลไม้ เมื่อระดับความสุกเพิ่มขึ้นปริมาณน้ำตาลในผลไม้จะเพิ่มสูงขึ้น Bolin (1980) รายงานว่าระดับความสุกของ

องุ่นมีผลต่อ MSI ของลูกเกดที่ได้ Falade and Aworh (2004) พบว่า เมื่อระดับการสุกของแอปเปิ้ลและมะม่วงแอฟริกันมากขึ้น ทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดของผลไม้ทั้ง 2 ชนิดมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อนำมาทำผลไม้แช่อิ่มอบแห้งและสร้าง MSI ของผลิตภัณฑ์ พบว่า มีรูปแบบ MSI เป็น J shape ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่มีระดับความสุกสูงกว่าจะมีปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่า  $a_w$  เดียวกัน (ในช่วง 0.1-0.9) เมื่อเทียบกับวัตถุดิบที่มีระดับความสุกต่ำกว่า นอกจากนี้ยังพบว่า ค่า  $M_0$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่มีระดับความสุกสูงกว่า มีค่าสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่มีระดับความสุกต่ำกว่า ข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่มีระดับความสุกสูงกว่าจะมีความชุ่มน้ำมากกว่า และ MSI ที่ได้จะมีประโยชน์ชี้ให้เห็นว่า เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ที่ระดับความชื้นเดียวกัน ผลิตภัณฑ์ที่ทำจากวัตถุดิบที่มีระดับความสุกสูงกว่าจะมีค่า  $a_w$  ต่ำกว่า ทำให้มีโอกาสการเสื่อมเสียน้อยกว่า

#### 3.2.2 ชนิดของสารละลายออสโมติก

สารที่ใช้ในการออสโมซิสมีหลายชนิด เช่น ซูโครส กลูโคส ฟรุกโทส น้ำตาลอินเวิร์ต กลีเซอรอล ซอร์บิทอล เป็นต้น โดยปกติจะนิยมใช้ในรูปแบบของสารละลาย และใช้สารออสโมติกหลายชนิดร่วมกันในการออสโมซิส สารออสโมติกแต่ละชนิดมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร และมีความสามารถในการจับโมเลกุลของน้ำที่แตกต่างกัน (Korsrilabut et al., 2010; Sritongtae et al., 2011) ส่งผลให้ MSI ของผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งมีลักษณะต่างกัน

สิทธิโชค (2554) พบว่า แบบจำลอง GAB มีความเหมาะสมในการทำนาย MSI ของผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งมากกว่าแบบจำลอง BET และผลิตภัณฑ์มะละกอแช่อิ่มอบแห้งที่ทดแทนซูโครสบางส่วนด้วยกลีเซอรอล หรือซอร์บิทอลมีค่า  $M_0$  ที่

คำนวณจากแบบจำลอง GAB สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี การทดแทน และผลิตภัณฑ์ที่ทดแทนซูโครสบางส่วน ด้วยน้ำตาลอินเวิร์ต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่า  $M_0$  อาจกล่าวได้ว่า ผลิตภัณฑ์ที่มีการทดแทนซูโครส บางส่วนด้วยกลีเซอรอลหรือซอร์บิทอลมีเสถียรภาพใน การเก็บรักษามากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ไม่มี การทดแทน Farahnaky et al. (2010) พบว่า ผลมะเดื่อที่ผ่านการ ออสโมซิสแบบแห้งด้วยกลีเซอรอลมีค่า  $M_0$  ที่คำนวณ จากแบบจำลอง GAB สูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้กลูโคสไครป์ การที่สารออสโมติกแต่ละชนิดส่งผลให้ค่า  $M_0$  ที่คำนวณ ได้จากแบบจำลองมีค่าต่างกันอาจเนื่องมาจาก ความสามารถในการจับน้ำของสารออสโมติกแต่ละชนิด ขึ้นกับโครงสร้างโมเลกุลของสารออสโมติก โดย โครงสร้างโมเลกุลของกลีเซอรอลและซอร์บิทอลมี อัตราส่วนระหว่าง OH:C เป็น 1:1 น้ำตาลอินเวิร์ตและ กลูโคสมีอัตราส่วนระหว่าง OH:C เท่ากับ 0.83:1 และ มอลโทเดกซ์ทรินกับซูโครสมีอัตราส่วน OH:C เท่ากับ 0.67:1 ทำให้สารออสโมติกเหล่านี้มีส่วนชอบน้ำ (hydrophilic) มากกว่าซูโครส จึงมีความสามารถในการจับน้ำได้ดีกว่า (Sagiv and Marcus, 2003)

### 3.2.3 ความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก

การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย ออสโมติกทำให้แรงดันออสโมติกเปลี่ยนแปลง ส่งผลต่อ อัตราการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิส โดยทั่วไปเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติก ความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายใน เนื้อเยื่อผลไม้และสารละลายออสโมติกจะเพิ่มขึ้น ทำให้ เกิดการถ่ายเทมวลสารได้ดีกว่าการใช้สารละลาย ออสโมติกความเข้มข้นต่ำ (Raoult-Wack, 1994; Duangmal et al., 2011) อย่างไรก็ตามการถ่ายเท มวลสารยังขึ้นกับสมบัติของสารออสโมติกที่ใช้และชนิด ของผักผลไม้

เมื่อพิจารณาผลของความเข้มข้นของ สารละลายออสโมติกต่อค่า  $M_0$  ของผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง พบว่า ผลที่ได้ยังมีข้อขัดแย้งและไม่ชัดเจน บางงานวิจัย พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายซูโครสใน การออสโมซิส ค่า  $M_0$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB ของผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง โดยพบได้ในผลิตภัณฑ์ สับปะรดแช่อิ่มอบแห้ง (Falade et al., 2004) มะม่วง แอปฟริกกันและแอปเปิ้ลแช่อิ่มอบแห้ง (Falade and Aworh, 2004) และมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง (Lemusmondaca et al., 2009) ขณะที่บางงานวิจัย พบว่า ผลของความเข้มข้นของซูโครสกลับมีแนวโน้มตรงกัน ข้าม ซึ่งพบในผลิตภัณฑ์กล้วย plantain แช่อิ่มอบแห้ง (Falade et al., 2003) ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าค่า  $M_0$  นอกจากจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย ออสโมติกแล้วยังขึ้นกับโครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้ แต่ละชนิดอีกด้วย

ในกรณีที่ใช้กลีเซอรอลเป็นสารละลาย ออสโมติก Farahnaky et al. (2009) พบว่า เมื่อเพิ่ม ความเข้มข้นของกลีเซอรอลในการออสโมซิสแบบแห้ง ค่า  $M_0$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB มีแนวโน้ม เพิ่มขึ้น เนื่องจากกลีเซอรอลมีความสามารถในการดูด ความชื้นได้ดีกว่าซูโครส อย่างไรก็ตามผู้เชี่ยวชาญ เสนอว่าในทางปฏิบัติไม่สามารถใช้กลีเซอรอลเพียงชนิด เดียวในขั้นตอนการแช่อิ่ม เนื่องจากจะทำให้ผิวหน้า ผลิตภัณฑ์มีลักษณะฉ่ำเยิ้มและมีผลเสียต่อรสชาติของ ผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กลีเซอรอลร่วมกับซูโครสจะทำให้ ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพทางประสาทสัมผัสดีกว่า และการสร้าง MSI ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จะช่วยทำนาย อายุการเก็บและหาสภาวะการเก็บที่เหมาะสมได้

### 3.2.4 วิธีการอบแห้งและชนิดผลไม้

เนื่องจากวิธีการอบแห้งที่แตกต่างกันทำให้ ลักษณะโครงสร้างและปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ แตกต่างกัน จึงส่งผลให้ MSI ของผลิตภัณฑ์ต่างกันตาม

ไปด้วย Klewicki et al. (2009) พบว่า เซอร์รี่เปรี้ยว และแบล็คเคอร์แรนท์แช่อบที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่า  $M_0$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB ต่ำกว่าผลไม้แช่อบที่อบแห้งด้วยลมร้อน ในขณะที่ Phongsomboon and Intipunya (2009) พบว่า แครอทแช่อบที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่า  $M_0$  ที่คำนวณจากแบบจำลอง GAB สูงกว่าแครอทแช่อบที่อบแห้งด้วยลมร้อน เนื่องจากค่า  $M_0$  บอกลถึงปริมาณน้ำที่ยึดจับกับโมเลกุลของอาหารอย่างเหนียวแน่น ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าค่า  $M_0$  นอกจากจะขึ้นกับปริมาณน้ำตาล และโครงสร้างของเนื้อเยื่อผลไม้แต่ละชนิดแล้วยังขึ้นกับวิธีการอบแห้ง ซึ่งการอบแห้งแบบลมร้อนนั้นการกำจัดน้ำออกจะเกิดจากการระเหยของน้ำ ในขณะที่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นการกำจัดน้ำออกเป็นวิธีการระเหิด ซึ่งการทำแห้งทั้งสองวิธีมีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

นอกจากนี้ Klewicki et al. (2009) รายงานว่า ปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของเซอร์รี่เปรี้ยวแช่อบและแบล็คเคอร์แรนท์แช่อบที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีค่าสูงกว่าปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของตัวอย่างที่อบแห้งด้วยลมร้อน Phongsomboon and Intipunya (2009) พบว่าเมื่อค่า  $a_w$  สูงกว่า 0.77 ผลิตภัณฑ์แครอทแช่อบแห้งที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลสูงกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยลมร้อน ซึ่งอาจเกิดจากการที่ผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะภายในเป็นรูพรุนจึงสามารถดูดความชื้นได้ดี โดยผลของปริมาณความชื้นที่ภาวะสมดุลของแครอทแช่อบแห้งสอดคล้องกับสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งซึ่งมีปริมาณความชื้นต่ำกว่าผลิตภัณฑ์ที่อบแห้งด้วยลมร้อน แต่สามารถดูดความชื้นได้ดีในภาวะบรรยากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง จากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเมื่อความชื้นสูงขึ้นผลิตภัณฑ์ที่

ผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งจะมีโอกาสเสื่อมเสียสูงกว่าเนื่องจากเกิดการเปลี่ยนแปลงความชื้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า MSI ที่ได้สามารถทำนายภาวะการเก็บที่เหมาะสมและโอกาสที่จะเกิดการเสื่อมเสียคุณภาพของผลิตภัณฑ์

#### 4. บทสรุป

ไอโซเทิร์มการดูด-คายซึบความชื้น (MSI) เป็นเครื่องมือที่สำคัญในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาและเลือกบรรจุภัณฑ์สำหรับผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อบแห้ง โดยลักษณะของ MSI ของผลไม้แช่อบแห้งมักเป็นแบบ J shape (Type III) เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้ำตาลสูง เมื่อความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นจนทำให้ค่า  $a_w$  สูงกว่า 0.6-0.7 น้ำตาลในผลิตภัณฑ์เกิดการเปลี่ยนจากรูปผลึกไปอยู่ในรูปอสัณฐาน ซึ่งมีความสามารถดูดความชื้นได้ดีกว่าทำให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะผิวหน้าที่ฉ่ำเยิ้ม ชนิดและปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์มีผลต่อลักษณะของ J shape เนื่องจากน้ำตาลต่างชนิดกันมีความสามารถในการจับน้ำได้ต่างกัน ทั้งนี้รูปแบบ MSI แบบ J shape จะต้องมีค่าคงที่ C ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง GAB อยู่ในช่วง 0-2 ส่วนค่า  $M_0$  ที่บอกลถึงค่า monolayer moisture content ของผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อบแห้งที่สูงกว่าจะบ่งบอกถึงความชุ่มน้ำของผลิตภัณฑ์และเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีกว่า ในขณะที่ผลของชนิดและความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกต่อค่า  $M_0$  ที่ได้ยังไม่มีการสรุปที่ชัดเจน ความแตกต่างอาจเกิดจากโครงสร้างเนื้อเยื่อผลไม้แต่ละชนิด ขณะที่การอบแห้งแต่ละวิธีมีกลไกในการกำจัดน้ำที่ต่างกัน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่ต่างกันออกไป ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีค่า  $M_0$  ต่างกันตามไปด้วย ซึ่งการศึกษา MSI นอกจากจะช่วยให้สามารถเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ผลไม้แช่อบแห้ง

ให้คงคุณภาพที่ดีไว้ได้ยังช่วยในการพิจารณาการเลือกใช้ผลไม้แช่อิ่มอบแห้งเป็นส่วนผสมในอาหารชนิดอื่น ๆ โดยยังให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ยังคงมีลักษณะปรากฏที่ดี เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเข้าผสมผลไม้แช่อิ่มอบแห้ง โดยที่ผลิตภัณฑ์อาหารเข้ายังคงความกรอบอยู่ได้

## 5.เอกสารอ้างอิง

- สิทธิโชค เถลิงนวชาติ. (2554). ผลของพอลิไฮดรริกแอลกอฮอล์ต่อการทำแห้งและคุณภาพของมะละกอแช่อิ่มอบแห้ง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ 130 หน้า
- Al-Muhtaseb, A.H., Mcminn, W.A.M. and Magee, T.R.A. (2002). Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review. *Food Bioprod Process.* 80(2): 118-128.
- Barbosa-Canovas, G.V. and Juliano, P. (2007). Desorption phenomena in food dehydration process. In *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, G.V. Barbosa-Cánovas., A.J. Fontana, Jr., S.J. Schmidt., T.P. Labuza (eds.). IA: Blackwell Publishing Professional. pp. 313-340.
- Bolin, H.R. (1980). Relation of moisture to water activity in prunes and raisins. *J Food Sci.* 45(5): 1190-1192.
- Brunauer, S., Emmett, P.H. and Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J Am Chem Soc.* 60(2): 309-319.
- Carter, B. and Fontana, A. (2008). Dynamic dewpoint isotherm verses other moisture sorption isotherm methods แหล่งข้อมูล: <http://www.aqualab.com/education/dynamic-dewpoint-isotherm-versus-other-moisture-sorption-isotherm-methods-an-13506-0/>. ค้นเมื่อ 15 มกราคม 2555
- Duangmal, K., Kunawantnit, P. and Mahawanich, T. (2011). Drying of osmoted beetroot: Effect of honey and pineapple juice on drying rate and water availability. In 6<sup>th</sup> International CIGR Technical Symposium. 18-20 April, Nantes, France.
- Falade, K.O., Adetunji, A.I. and Aworh, O.C. (2003). Adsorption isotherm and heat of sorption of fresh- and osmo-oven dried plantain slices. *Eur Food Res Tech.* 217(3): 230-234.
- Falade, K.O. and Aworh, O.C. (2004). Adsorption isotherms of osmo-oven dried African star apple (*Chrysophyllum albidum*) and African mango (*Irvingia gabonensis*) slices. *Eur Food Res Tech.* 218(3): 278-283.
- Falade, K.O., Olukini, I. and Adegoke, G.O. (2004). Adsorption isotherm and heat of sorption of osmotically pretreated and air-dried pineapple slices. *Eur Food Res Tech.* 218(6): 540-543.
- Farahnaky, A., Ansari, S. and Majzoobi, M. (2009). Effect of glycerol on the moisture sorption isotherms of figs. *J Food Eng.* 93(4): 468-473.
- Farahnaky, A., Ansari, S. and Majzoobi, M. (2010). The effects of glucose syrup and glycerol on some physical properties of dried figs. *J Texture Stud.* 41(5): 633-650.
- Fennema, O.R. (1996). *Water and Ice. Food Chemistry.* 3<sup>rd</sup> ed. NY: Marcel Decker. pp. 17-94.
- Halsey, G. (1948). Physical adsorption on non-uniform surfaces. *J Chem Phys.* 16: 931-937.
- Henderson, S.M. (1952). A basic concept of equilibrium moisture. *Agric Eng.* 33: 29-32.
- Klewicky, R., Konopacka, D., Uzcziwek, M., Irzyniec, Z., Piasecka, E. and Bonazzi, C. (2009). Sorption isotherms for osmo-convectively-dried and osmo-freeze-dried apple, sour cherry, and blackcurrant. *J Hort Sci Biotech.* 84 (Isafruit Supplement): 75-79.

- Korsrilabut, J., Borompichaichartkul, C. and Duangmal, K. (2010). Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantaloupe. *Int J Food Sci Tech.* 45(7): 1524-1531.
- Labuza, T.P. and Altunakar, B. (2007). Water activity prediction and moisture sorption isotherm. In *Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications*, G.V. Barbosa-Cánovas., A.J. Fontana, Jr., S.J. Schmidt., T.P. Labuza (eds.). IA: Blackwell Publishing Professional. pp. 109-154.
- Lemus-Mondaca, R., Miranda, M., Andres Grau, A., Briones, V., Villalobos, R. and Vega-Galvez, A. (2009). Effect of osmotic pretreatment on hot air drying kinetics and quality of chilean papaya (*Carica pubescens*). *Drying Tech.* 27(10): 1105-1115.
- Mathlouthi, M. (2001). Water content, water activity, water structure and the stability of food stuffs. *Food Contr.* 12(7): 409-417.
- Mathlouthi, M. and Roge, B. (2003). Water vapour sorption isotherm and the caking of food powders. *Food Chem.* 82: 61-71.
- Oswin, C.R. (1946). The kinetics of package life. III. The isotherm. *J Soc Chem Industry* 65(12): 419-421.
- Peleg, M. (1993). Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. *J Food Process Eng.* 16(1): 21-37.
- Phongsomboon, P. and Itipunya, P. (2009). Comparative study on drying of osmotic treated carrot slices. *As J Food Ag-Ind.* 2(4): 448-456.
- Raoult-Wack, A.L. (1994). Recent advances in the osmotic dehydration of food. *Trends Food Sci Tech.* 5(8): 255-260.
- Reid, D.S. (2007). Water activity: Fundamental and Relationships. In *Water Activity in Foods-Fundamentals and Applications*, G.V. Barbosa-Cánovas., A.J. Fontana, Jr., S.J. Schmidt., T.P. Labuza (eds.). IA: Blackwell Publishing Professional. pp. 15-28.
- Sagiv, A.E. and Marcus, Y. (2003). The connection between in vitro water uptake and in vivo skin moisturization. *Skin Res Tech.* 9:306-311.
- Schmidt, S.J. and Lee, J.W. (2012). Comparison between water vapor sorption isotherms obtained using the new dynamic dewpoint isotherm method and those obtained using the standard saturated salt slurry method. *Int J Food Prop.* 15: 236-248.
- Spieß, W.E.L. and Wolf, W. (1987). Critical evaluation of method to determine moisture sorption isotherms. In L.B. Rockland and L.R. Beuchat (eds.), *Water activity: theory and applications to food*, NY: Marcel Dekker. pp. 215-233.
- Sritongtae, B., Mahawanich, T. and Duangmal, K. (2011). Drying of osmosed cantaloupe: Effect of polyols on drying and water mobility. *Drying Tech.* 29(5): 527-535.
- Tait, M.J., Ablett, S. and Wood, F.W. (1972). The binding of water on starch, an NMR investigation. *J. Colloid Interf Sci.* 41(3): 594-603.
- Timmermann, E.O., Chirife, J. and Iglesias, H.A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters ?. *J Food Eng.* 48:19-31.
- Torreggiani, D. and Bertolo, G. (2004). Present and future in process control and optimization of osmotic dehydration. *Adv Food Nutr Res.* 48: 173-238.
- Van den Berg, C. (1984). Desorption of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In B. M. Mckenna (ed.), *Engineering and Foods*, London: Elsevier. pp. 311-321.

