

## ไอโซเทอมและการเปรียบเทียบเส้นเฉพาะการอบแห้งของหน่อไม้

### ในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

#### DESORPTION ISOTHERMS AND COMPARISON OF DRYING CHARACTERISTICS OF BAMBOO SHOOT IN SUPERHEATED STEAM AND HOT AIR

ทวีชัย วงศ์ศักดิ์ไพโรจน์<sup>1</sup> สมชาติ โสภณรณฤทธิ์<sup>1</sup> สมบูรณ์ เวชกามา<sup>1</sup>

และ สมเกียรติ ปรัชญาวรรการ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>คณะพลังงานและวัสดุ <sup>2</sup>คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

#### บทคัดย่อ

จากการศึกษาคุณสมบัติของไอโซเทอมของหน่อไม้ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50 ถึง 80°C และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 10-85% พบว่าหน่อไม้เข้าสู่สมดุลแบบคายความชื้น จากการนำสมการไอโซเทอมของ BET, GAB, Chung and Pfsot และ Henderson มาอธิบายความชื้นที่สภาวะสมดุลพบว่าสมการของ GAB อธิบายความชื้นสมดุลที่อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ต่างๆ ได้สอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด สำหรับในการศึกษาการเปรียบเทียบเส้นลักษณะเฉพาะของการอบแห้งของหน่อไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C และอัตราไหลเชิงมวลของตัวกลางอบแห้ง 0.024 kg/s พบว่าอุณหภูมิมีผลต่ออัตราการลดความชื้นของหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 145°C การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งให้อัตราการลดความชื้นเร็วกว่าการใช้อากาศร้อน และที่อุณหภูมิ 145°C นี้ เป็นอุณหภูมิผกผันประสิทธิผล

สีหน่อไม้หลังการอบแห้งที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง ลมร้อนอุณหภูมิสูง และการตากแห้งมีสีน้ำตาลขณะที่ตัวอย่างอบแห้งที่แห้งด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำ (55 และ 70°C) มีสีอยู่ในกลุ่มของสีเทา (162A) สารความขมที่มีอยู่ในหน่อไม้สามารถทำลายได้โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง

คำสำคัญ: การอบแห้ง / แบบจำลองการอบแห้ง / ผัก / ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง

#### Abstract

Desorption isotherms for bamboo shoot have been carried out at the ranges of temperatures between 50 and 80°C and of relative

humidity levels between 10 and 85%. Amongst the isotherm models, BET, GAB, Chung and Pfsot and Henderson, the GAB model suitably describe the moisture equilibrium under a wide range of conditions. The comparison of drying characteristics between superheated steam and hot air at temperatures of 120, 140 and 160°C and a fixed mass flow rate of 0.024 kg/s shows that the temperatures have a more significant effect on the drying rates in the superheated steam than in the hot air. In particular, superheated steam drying at temperatures higher than 145°C provides relatively faster moisture reduction than the hot air. There exists the effective inversion temperature at a temperature of 145°C.

The dried bamboo shoots from the superheated steam, hot air and sun drying has brown colour whereas the samples from the low-temperature air drying (55 and 70°C) has a gray-orange colour (162A). Drying at high temperatures can eliminate the taxiphyllin substance.

Key words: Dehydration / Drying Model / Superheated Steam / Vegetable

#### 1. บทนำ

ต้นไผ่มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Bambusa sp.* เป็นพืชที่ขึ้นอยู่ทั่วไปตามธรรมชาติมีมากมายหลายพันธุ์ พันธุ์ที่รู้จักกันโดยทั่วไป ได้แก่ ไผ่ตง (*Dendrocalamus asper Backer*) และ ไผ่ป่า (ไผ่จันทร์, *Bambusa longispatha Kurz*) ไผ่เป็นพืชที่ใช้ประโยชน์ได้หลายอย่างเช่น ผลิตเชื้อกระดาษ เครื่องอุปโภคต่างๆ และส่วนที่เป็นหน่อจะนำไปใช้ในการขยายพันธุ์ ในช่วงฤดูฝนระหว่างเดือนมิถุนายนถึงตุลาคม เป็นช่วงที่ต้นไผ่มีการขยายพันธุ์โดยจะแทงหน่อออกมา หน่อของต้นไผ่ที่แทงออกมานี้ เราเรียกว่าหน่อไม้ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาบริโภค จากการที่มีการขยายพันธุ์อย่างรวดเร็วทำให้มีปริมาณของหน่อไม้สดขายในท้องตลาดเป็นจำนวนมาก และมีปริมาณเกินความต้องการ ทำให้เกิดปัญหาสินค้าล้นตลาด ส่งผลให้ราคาของหน่อไม้ตกต่ำ การถนอมอาหารเป็นวิธีหนึ่งในการแก้ปัญหาสินค้าล้นตลาด ผลิตภัณฑ์ที่แปรรูปจากหน่อไม้ได้แก่ หน่อไม้

RECEIVED 20 JUNE, 2001

ACCEPTED 20 APRIL, 2002

แห้ง หน่อไม้ต้มบรรจุปี๊บ หน่อไม้ดอง หน่อไม้แห้งที่วางขายในปัจจุบัน มักใช้วิธีการตากแห้งเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งปัญหาที่ตามมาคือ ความสะอาดของหน่อไม้แห้ง กระบวนการผลิตหน่อไม้แห้งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ นำหน่อไม้สดมาทำการต้มเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดพิษ [1-2] สารนี้จะสลายตัวเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 116°C จากนั้นจะเป็นกระบวนการลดความชื้นของหน่อไม้ ความชื้นของหน่อไม้แห้งที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรักษาจะอยู่ในช่วงประมาณ 0.17 มาตรฐานแห้ง ในกระบวนการลดความชื้นของผลิตภัณฑ์นอกจากจะใช้ความร้อนเป็นตัวกลางในการพาความชื้นออกจากวัสดุ เราอาจใช้ไอน้ำร้อนขวดอึ่งแทนก็ได้

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งได้มีการพัฒนามาเป็นเวลานานมาแล้ว งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาการอบแห้งผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่อาหาร เช่น ไม้, กากน้ำตาล และ ถ่านหิน เป็นต้น เมื่อเปรียบเทียบการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งกับลมร้อนในแง่ของอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิต่างๆ อัตราการอบแห้งของผลิตภัณฑ์โดยวิธีไอน้ำร้อนขวดอึ่งจะมีค่าต่ำกว่าการใช้ความร้อน และอัตราการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงจนถึง ๗ ตัวแห้งหนึ่ง อัตราการอบแห้งที่ได้จากการใช้ไอน้ำร้อนขวดอึ่งและอากาศร้อนจะมีค่าเท่ากัน อุณหภูมิ ๗ ตำแหน่งที่เราเรียกว่า อุณหภูมิผกผัน (inversion temperature) Schwartze and Brocker [3] ได้ทำการศึกษาและรวบรวมงานวิจัยเกี่ยวกับอุณหภูมิผกผันพบว่า อุณหภูมิผกผันมีค่าไม่แน่นอน ขึ้นกับรูปแบบของกระบวนการอบแห้งและลักษณะทางกายภาพของวัสดุ และเมื่ออุณหภูมิการอบแห้งมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน อัตราการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดอึ่งมีค่าสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทความร้อนและค่าการนำความร้อนของไอน้ำร้อนขวดอึ่งมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับของอากาศร้อน คำนิยามของอุณหภูมิผกผันที่กล่าวมาเบื้องต้นสามารถใช้ได้ ในกรณีนี้ การอบแห้งเกิดขึ้นเฉพาะที่ผิวของเท่านั้น ในกรณีที่การอบแห้งถูกควบคุมโดยกระบวนการถ่ายเทความร้อนภายในอุณหภูมิ ๗ ตำแหน่งดังกล่าวเราเรียกว่า อุณหภูมิผกผันประสิทธิผล ( effective inversion temperature)

ความแตกต่างระหว่างการอบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดอึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา [4-9] พบว่ามีข้อดีและข้อเสียดังต่อไปนี้

**ข้อดี**

1. ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน หรือเกิดการเผาไหม้เนื่องจากไม่มีแก๊สออกซิเจนในระบบทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ดีขึ้น อาทิเช่นสีของผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง
2. อัตราการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนขวดอึ่งสูงกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อน เมื่อใช้อุณหภูมิการอบแห้งสูงกว่าอุณหภูมิผกผัน
3. ผลิตภัณฑ์ที่มีพิษ หรือมีกลิ่นที่ต้องการนำมาใช้งาน สามารถสกัดนำมาใช้ได้

4. การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งสามารถฆ่าเชื้อโรค หรือกำจัดกลิ่นของอาหารได้

**ข้อเสีย**

1. ระบบมีความซับซ้อน จำเป็นต้องมีการป้องกันการรั่วซึม การนำผลิตภัณฑ์เข้าและออกต้องไม่มีการรั่วซึมของอากาศ ในตอนเริ่มเดินเครื่องและหยุดเดินเครื่องอาจเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเกิดขึ้นได้
2. เมื่อผลิตภัณฑ์เข้ามาในระบบ ไม่สามารถหลีกเลี่ยงการกลั่นตัวของไอน้ำได้ ทำให้เวลาในการอบแห้งเพิ่มขึ้น 10-15% ที่ความดันบรรยากาศ
3. ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการกระบวนการออกซิเดชันเพื่อที่จะให้ได้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ไม่สามารถใช้ในการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งได้ แต่สามารถแก้ไขโดยแบ่งการอบแห้งเป็นสองช่วงเช่น การอบรังไหม ซึ่งอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งก่อน และตามด้วยการอบแห้งแบบใช้ลมร้อน

จุดประสงค์ของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้ 1) เพื่อต้องการทราบเส้น ไอโซเทอมแบบการคายความชื้นของหน่อไม้แห้งที่ความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่าง ๆ 2) มีความเข้าใจถึงกลไกของการอบแห้งที่เกิดขึ้นเมื่ออบแห้งด้วยลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดอึ่ง ความแตกต่างของอัตราการอบแห้งที่ได้จากการใช้ตัวกลางที่แตกต่างกันอธิบายด้วยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผล 3) เปรียบเทียบคุณภาพของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดอึ่งและลมร้อน โดยเปรียบเทียบกับที่ได้จากการตากแห้ง

**2. ทฤษฎี**

**2.1 แบบจำลองของไอโซเทอมแบบมีการคายความชื้น**

คุณประโยชน์ของการที่ทราบคุณสมบัติไอโซเทอมของอาหารมีความสำคัญสำหรับใช้ในการคำนวณหาความชื้นที่สภาวะสมดุลขณะทำการเก็บรักษา ซึ่งทำให้ทราบได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ทำการรักษาภายใต้สภาวะดังกล่าวมีโอกาสที่เชื้อจุลินทรีย์จะมีการเจริญเติบโตโดยยากหรือขายนอกจากนี้ยังนำไปใช้ในการคำนวณหาความชื้นที่เวลาอบแห้งต่าง ๆ

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการอธิบายไอโซเทอมของวัสดุรูปทรงสามารถแบ่งได้กว้าง ๆ เป็น 2 ชนิดคือ สมการในทางทฤษฎีและสมการเอมไพริคัล ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเลือกทั้งสองรูปแบบดังกล่าวมาอธิบายไอโซเทอมของหน่อไม้ที่สภาวะความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิต่าง ๆ รูปแบบสมการมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**2.1.1) สมการทางทฤษฎี**

**2.1.1.1) สมการของ Brunauer-Emmett-Tetter (BET) [10]**

$$M_{eq} = \frac{M_b Y a_w}{(1 - a_w)(1 + (Y - 1)a_w)} \quad (1)$$

โดยที่  $M_w$  คือความชื้นที่สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นมาตรฐานแห้ง (d.b.)

$M_s$  คือความชื้นสูงสุดขณะที่โมเลกุลของน้ำเรียงตัวเพียงชั้นเดียวภายในรูพรุนของวัสดุ

$a_w$  คือความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศขณะที่เกิดสภาวะสมดุล มีหน่วยเป็นเศษส่วน

$Y$  คือค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบมีการคายน้ำ

2.1.1.2) สมการของ Guggenheim-Anderson-de Boer (GAB)[11]

$$M_{eq} = \frac{M_b S Y a_w}{(1 - S a_w)(1 + (Y - 1) S a_w)} \quad (2)$$

โดยที่  $S$  คือค่าคงที่แบบมีการคายน้ำ

ค่าคงที่  $S$  และ  $Y$  เป็นตัวแปรที่อธิบายถึงอิทธิพลของอุณหภูมิว่ามีผลอย่างไรต่อเส้นไอโซเทอม โดยตัวแปรดังกล่าวอธิบายได้ด้วยสมการของอาร์เรเนียส

$$Y = G \exp\left(-\frac{E}{R(T + 273)}\right) \quad (3)$$

$$S = A \exp\left(-\frac{C}{R(T + 273)}\right) \quad (4)$$

โดยที่  $E$  และ  $C$  เป็นค่าคงที่มีหน่วยเป็น kJ/kmol  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (kJ/kmol-K)

2.1.2) สมการอีมไพริคัล

2.1.2.1) สมการของ Henderson [12]

$$M_{eq} = \left[ -\frac{1}{B(T + 273)} \ln(1 - a_w) \right]^{1/F} \quad (5)$$

โดยที่  $B$  และ  $F$  คือ ค่าคงที่ของหน่อไม้

2.1.2.2) สมการของ Chung and Pfof [13]

$$M_{eq} = -\frac{1}{B} \ln\left(-\frac{R(T + 273)}{F} \ln a_w\right) \quad (6)$$

ในการหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสมการไอโซเทอมได้ใช้เทคนิคของการวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear regression) และ SSE (summation of square error) เป็นดัชนีบ่งชี้ที่แสดงถึงความสามารถของแบบจำลองที่นำมาอธิบายผลการทดลอง ค่าของ SSE มีค่าต่ำ แสดงว่าแบบจำลองนั้นอธิบายผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจ นิยามของ SSE เป็นดังนี้

$$SSE = \sum_{i=1}^n (M_{eq}(\text{experiment}) - M_{eq}(\text{prediction}))^2 \quad (7)$$

โดยที่  $n$  คือจำนวนข้อมูลการทดลอง

2.2 แบบจำลองของการอบแห้ง

รูปร่างของหน่อไม้ที่ใช้ในการศึกษาการอบแห้งมีลักษณะเป็นแผ่นแบนกว้าง ในงานวิจัยนี้สมมติว่าหน่อไม้มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (isotropic solid) และการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นในทิศทางเดียว ขณะที่เกิดการถ่ายเทมวลของผลิตภัณฑ์ที่มีคงที่เท่ากับอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง จากข้อสมมติฐานดังกล่าวข้างต้นเราสามารถคำนวณหาความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เวลาใด ๆ ได้จากสมการการแพร่ทางทฤษฎี [14]

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(i+1)^2} \exp\left(-\frac{(i+1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{b^2}\right) \quad (8)$$

โดยที่  $MR$  คือ อัตราส่วนความชื้นไร้หน่อไม้  $\frac{M(t) - M_{eq}}{M_{in} - M_{eq}}$

$D_{eff}$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลมีหน่วยเป็น  $m^2/min$

$t$  คือเวลาในการอบแห้งมีหน่วยเป็นนาที

$b$  คือความหนาครึ่งหนึ่งของวัสดุ มีหน่วยเป็นเมตร

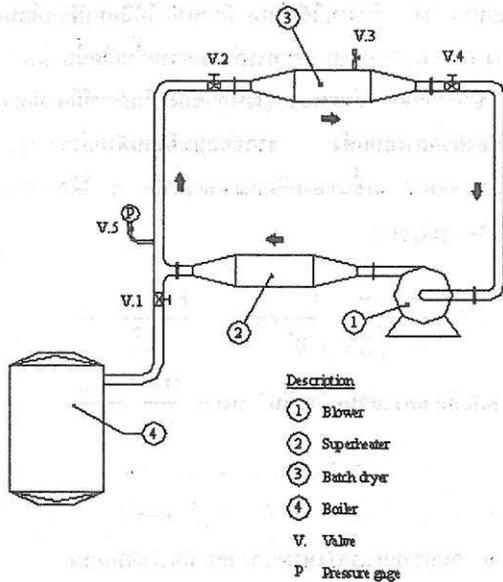
ในการคำนวณหาความชื้นของวัสดุที่เวลาต่าง ๆ เราใช้จำนวนเทอมทั้งหมด 10 เทอมในการคำนวณ กรณีที่ใช้จำนวนเทอมมากนี้พบว่าผลการคำนวณความชื้นที่ได้มีแตกต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับที่ใช้จำนวนเทอมเท่ากับ 10 ดังนั้นจำนวนเทอมดังกล่าวสามารถเป็นตัวแทนที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณความชื้นแทนการใช้จำนวนเทอมเป็นอนันต์

3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 อุปกรณ์

รูปที่ 1 แสดงระบบอบแห้งของไอน้ำร้อนยวดยิ่งซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์หลัก ๆ ดังนี้ ถึงความดันที่ผลิตไอน้ำที่ความดันเหนือบรรยากาศเล็กน้อย ชุดทำไอน้ำร้อนยวดยิ่งโดยใช้ขดลวดความร้อนวาล์วสำหรับควบคุมความดันของไอน้ำ ชุดอบแห้งแบบลาด พัดลมแบบเหวี่ยงที่มีใบพัดโค้งหลัง อัตราไหลของตัวกลางที่ใช้ในการอบแห้งควบคุมโดยใช้ตัวปรับความเร็วรอบ และระบบท่อไอน้ำ การทำงานของระบบเริ่มต้นด้วยอุณหภูมิโดยใช้อากาศร้อน ไปยังอุณหภูมิที่ต้องการอบแห้ง เหตุที่กระทำเช่นนี้เพื่อต้องการป้องกันการกลั่นตัวของไอน้ำภายในระบบอบแห้งขณะทำการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง เมื่อหน่วยต่างๆ ภายในระบบมีอุณหภูมิคงที่ จากนั้นก็จะปล่อยไอน้ำร้อนผ่านหน่วยต่าง ๆ โดยไอน้ำที่ผลิตจากถังความดันหมายเลข 4 จะมีสภาวะเป็นไอน้ำตัวไหลผ่านหน่วย Superheater เพื่อทำการเปลี่ยนสภาวะของไอ

จากไออิมตัวเป็นไอร้อนขวดซึ่ง และในขณะที่เดียวกันให้ความร้อนต่อไป จนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ หลังจากนั้นไอน้ำร้อนขวดซึ่งจะไหลผ่านชุด หน่วยอบแห้ง โดยทิศทางการไหลของไอน้ำจะอยู่ในแนวขนานกับวัสดุ และวัสดุซึ่งวางอยู่บนลวดตะแกรงจะสัมผัสกับไอน้ำทั้งสองด้าน ปริมาณ ไอน้ำทั้งหมดหลังจากผ่านห้องอบแห้งแล้วจะนำกลับมาใช้ใหม่ โดย ลักษณะวิธีการเช่นนี้จะทำให้การใช้พลังงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเทียบการใช้อากาศร้อนซึ่งต้องมีการทิ้งอากาศร้อนไปเป็นบางส่วน



รูปที่ 1 ระบบเครื่องอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่งชนิดกะ

### 3.2 การทดลองหาความชื้นสมดุล

การทดลองหาความชื้นสมดุลของหน่อไม้ใช้วิธีสถิติ โดยนำ หน่อไม้มาหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 0.5×0.5×0.5 cm วางไว้ เหนือสารละลายเกลืออิมตัวของ KNO<sub>3</sub>, NaCl, Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O และ LiCl ซึ่งสารดังกล่าวมีความชื้นสัมพัทธ์เหนือ สารละลายเกลือในช่วงระหว่าง 11.2 ถึง 84.9% จากนั้นจึงนำตัวอย่างต่าง ๆ ไปใส่ในตู้อบที่ควบคุมอุณหภูมิ โดยใช้อุณหภูมิตั้ง 50, 60, 70 และ 80°C ตามลำดับ นำตัวอย่างมาชั่งน้ำหนักทุกวันจนน้ำหนักไม่เปลี่ยนแปลง แล้ว จึงนำไปหาความชื้นที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ที่แต่ละ อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้ทำทดลองซ้ำถึง 3 ครั้ง

### 3.3 การทดลองอบแห้ง

นำหน่อไม้ปริมาณ 0.5 kg ที่ความชื้นเริ่มต้นประมาณ 19–25 d.b. มาหั่นตามแนวเส้นใยขนาด 5×5 cm หนา 0.3 cm โดยอบแห้งที่อุณหภูมิ ของไอน้ำร้อนขวดคือ 120, 140 และ 160°C และอัตราการไหลของอากาศ 0.024 kg/s หน่อไม้ที่นำอบแห้งที่อุณหภูมิสูงดังกล่าวนี้จะไม่ผ่าน กระบวนการต้มเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin ขณะอบแห้งนำตัวอย่างมาชั่ง

น้ำหนักทุก ๆ 20 นาทีเพื่อเก็บข้อมูลหาความชื้น การอบแห้งดำเนินไป จนกระทั่งอบแห้งความชื้นของหน่อไม้ลดลงเหลือประมาณ 0.17 d.b. ที่ ความชื้นดังกล่าวเป็นความชื้นของหน่อไม้ที่เก็บรักษา และจำหน่ายใน ห้องตลาด สำหรับการอบแห้งด้วยลมร้อนทำการทดลองโดยใช้เงื่อนไข อุณหภูมิและอัตราการไหลเชิงมวลเดียวกันกับการใช้ไอน้ำร้อนขวดซึ่ง ทำ การทดลองเหมือนการทดลองอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่ง

### 3.4 การทดสอบคุณภาพ

ตัวอย่างที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงด้วยไอน้ำร้อนขวดซึ่ง และอากาศร้อนได้นำมาเปรียบเทียบกับคุณภาพของหน่อไม้ที่ได้จากการตาก แห้งและจากการทดลองอบแห้งหน่อไม้ด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55 และ 70°C ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่นิยมในการใช้ในการอบแห้งผักและผลไม้ ใน การอบแห้งที่ด้วยลมร้อนอุณหภูมิต่ำหรือจากการตากแห้งดังกล่าว หน่อไม้จะต้องผ่านกระบวนการต้มเสียก่อนเพื่อกำจัดสาร Taxiphyllin และจากนั้นหน่อไม้จะนำมาลดความชื้นจนเหลือประมาณ 0.17 d.b. คุณ ภาพของหน่อไม้ที่ได้รับความสะดวกในงานวิจัยนี้ได้แก่ สีของหน่อไม้ หลังการอบแห้งและรสชาติความขม

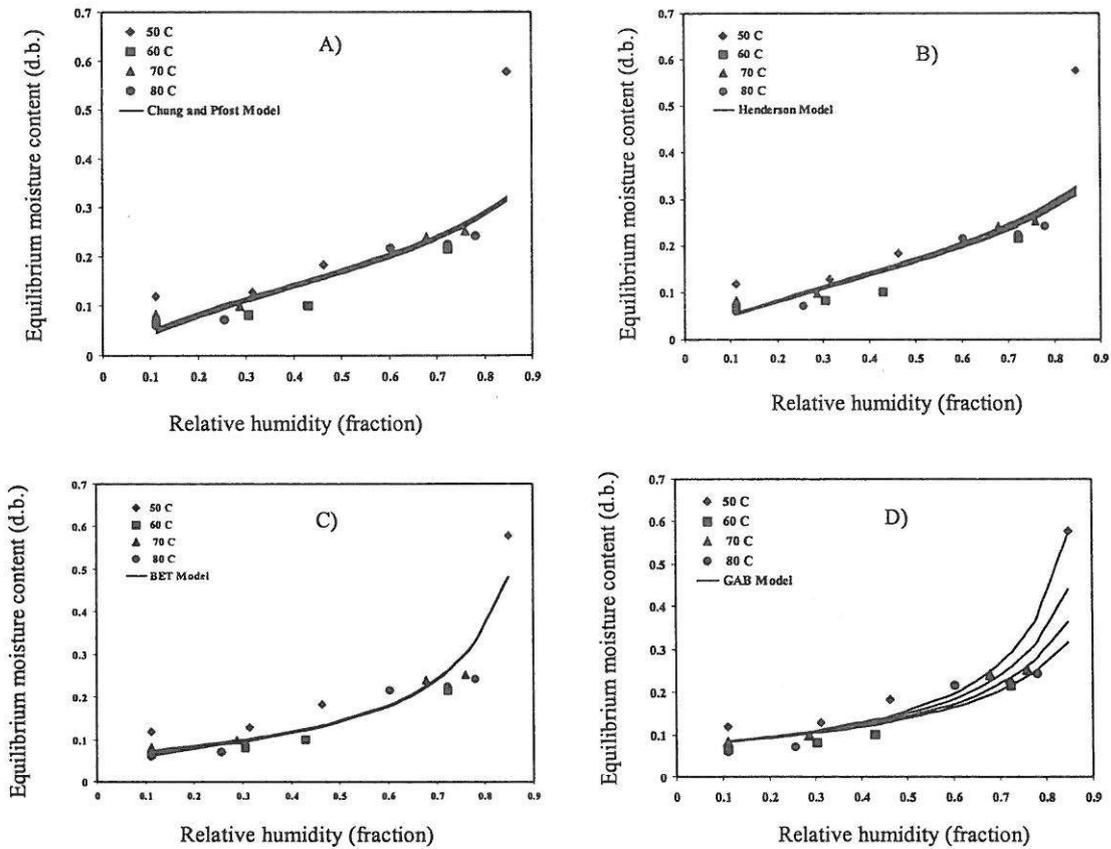
สีของหน่อไม้แห้งวัดจากการเปรียบเทียบกับตารางเทียบสี มาตรฐานของ R.H.S. (The Royal Horticultural Society) สำหรับในการ ทดสอบรสชาติความขมใช้วิธีทดสอบการชิม โดยใช้ผู้อาสาสมัครเป็น จำนวน 10 คน และกลุ่มตัวอย่างได้แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มมีลำดับ การชิมไม่เหมือนกัน เหตุที่ทำเช่นนี้เพื่อต้องการพิสูจน์ผลของลำดับการ ชิมไม่มีผลต่อการรู้สึกรับรส ในการวิเคราะห์ข้อมูลได้ใช้วิธีทางสถิติของ ฟรีดแมน (Friedman's test) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เป็น 0.05

## 4.ผลและวิจารณ์

### 4.1 ความชื้นสมดุล

ผลการทดลองพบว่า หน่อไม้เข้าสู่สมดุลแบบคาย ความชื้น ที่อุณหภูมิ 50, 60, 70 และ 80°C ความชื้นสมดุลที่แต่ละ ความชื้นสัมพัทธ์มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ขณะที่อุณหภูมิ 50°C และ ความชื้นสัมพัทธ์ 0.85 ความชื้นสมดุลของหน่อไม้มีค่าค่อนข้างสูงเป็น พิเศษเมื่อเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ที่อุณหภูมิอื่น ๆ ภายใต้ความชื้น สัมพัทธ์เดียวกันดัง รูปที่ 2 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่านอกจาก ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิก็เป็นปัจจัยที่สำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อความชื้น สมดุล จากผลการทำนายโดยใช้แบบจำลองของ BET, GAB, Chung and Pfof และ Henderson พบว่า ยกเว้นเฉพาะกรณีของแบบจำลองของ GAB แบบจำลองสมดุลต่าง ๆ ที่เสนอไม่สามารถอธิบายผลของอุณหภูมิที่ต่อ ความชื้นสมดุลได้อย่างแม่นยำ พารามิเตอร์ของแบบจำลองต่าง ๆ ที่ได้ จากการศึกษาวิเคราะห์การทดลองแสดงในตารางที่ 1 จากตารางจะเห็นว่า ค่า ความชื้นสูงสุดของหนึ่งชั้น โมเลกุลที่ทำนายได้จากสมการของ GAB

และ BET มีค่าใกล้เคียงกัน และจากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าสมการของ GAB เป็นสมการที่อธิบายผลสอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด



รูปที่ 2 ความชื้นสมดุลของหน่อไม้ที่ได้จากการทดลอง และการทำนายจากแบบจำลองต่างๆ

ตารางที่ 1 ค่าคงที่พารามิเตอร์ของแบบจำลองไอโซเทอมชนิดต่างๆ

Models	$M_b$	$G$	$H$	$D$	$E$	$B$	$F$	$SSE$
BET	0.07300	-	-	0.000135000	35656.40	-	-	0.0304
GAB	0.07600	0.2156	4179.53	555054	1018.87	-	-	0.0117
Chung and Pfof	-	-	-	-	-	9984.41	9.67	0.138
Henderson	-	-	-	-	-	0.0366700	1.57	0.141

#### 4.2 การเปลี่ยนความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้ง

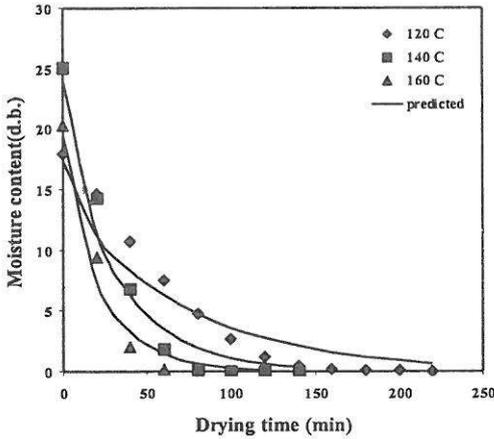
การอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงสามารถลดความชื้นของหน่อไม้ได้เร็วกว่าการใช้อุณหภูมิต่ำ ดังรูปที่ 3 และ 4 โดยลักษณะการลดลงของความชื้นทั้งในกรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนเป็นรูปของการลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล

จากข้อมูลการทดลองจะเห็นว่าเมื่อการอบแห้งดำเนินไปเป็นระยะเวลาหนึ่ง ความชื้นของหน่อไม้มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นแสดง

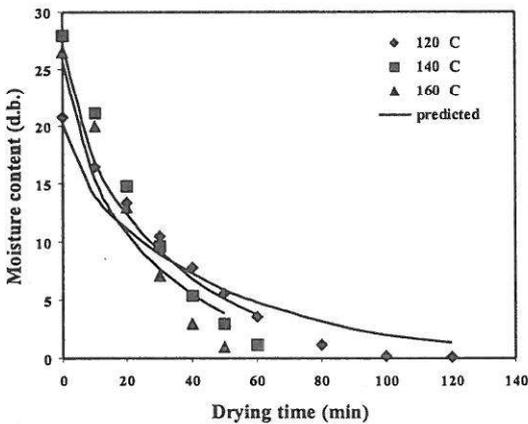
ว่าความเข้มข้นของไอน้ำในตัวกลางขณะอบแห้งมีค่าน้อยมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสมมติให้ความเข้มข้นของความชื้นที่ผิวของหน่อไม้มีค่าเป็นศูนย์หลังจากเริ่มอบแห้ง ข้อสมมติฐานนี้ไม่สามารถนำไปใช้กับการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำๆ

จากการทำนายโดยใช้สมการที่ 8 จะเห็นว่าให้ผลการทำนายในทำนองเดียวกับผลการทดลอง กล่าวคือการลดลงของความชื้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเวลา จากรูปที่ 3 และ 4 แบบจำลองการแพร่ทำนายความชื้นในช่วงต้น ๆ ของการทดลองเร็วกว่าการทดลอง

พอสมควร ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงต้นๆของการอบแห้งเป็นการเพิ่มอุณหภูมิให้กับวัสดุ ดังนั้นอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จึงมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง ซึ่งในการคำนวณความชื้นของหน่อไม้ เราสมมติให้อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์คงที่ โดยมีค่าเท่ากับอุณหภูมิของตัวกลางอบแห้ง



รูปที่ 3 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย

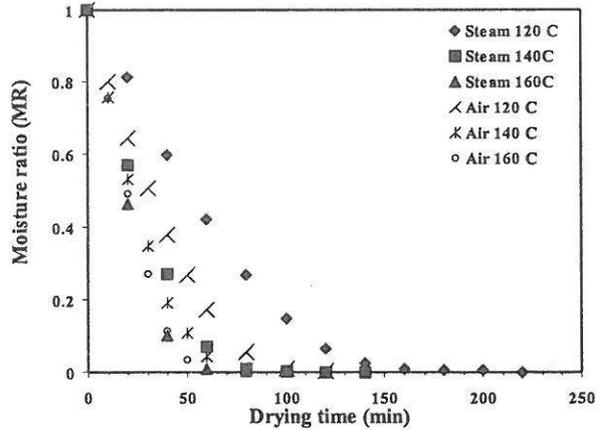


รูปที่ 4 การเปลี่ยนแปลงความชื้นของหน่อไม้ขณะอบแห้งด้วยอากาศร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ และเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทำนาย

### 4.3 การเปรียบเทียบความชื้นระหว่างการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อน

รูปที่ 5 แสดงอัตราส่วนความชื้นไร้หน่วยของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งที่อุณหภูมิลดลงใกล้เคียงกับจุดเดือดปกติของน้ำให้อัตราการลดความชื้นช้ากว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับการอบแห้งโดยใช้อากาศร้อนภายใต้อุณหภูมิเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่นที่อุณหภูมิ 120°C ในการลดอัตราส่วนความชื้นจากหนึ่งให้ลดลงเหลือ 0.2 การอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งใช้เวลา 90

นาที ขณะที่ลมร้อนใช้เวลา 60 นาที เมื่ออุณหภูมิอบแห้งเพิ่มสูงขึ้นเป็น 140°C กลับพบว่าเวลาที่ใช้ในการลดอัตราส่วนความชื้นของหน่อไม้ทั้งในไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนมีค่าเกือบเท่ากัน และเวลาที่ใช้ในการอบแห้งโดยใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเร็วกว่ากรณีของลมร้อนเล็กน้อยเมื่อใช้อุณหภูมิอบแห้งเป็น 160°C



รูปที่ 5 เปรียบเทียบความชื้นของหน่อไม้ที่ได้จากการอบแห้งด้วยอากาศร้อนและไอน้ำร้อนยวดยิ่งภายใต้อุณหภูมิต่างๆ

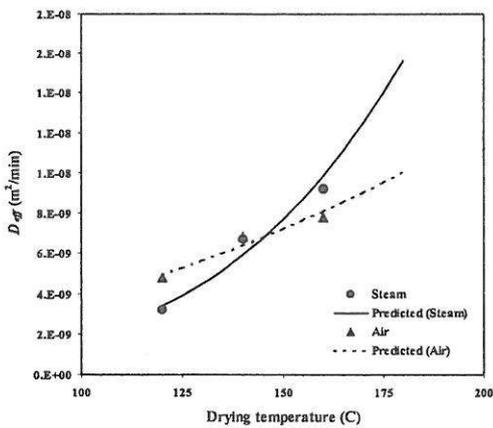
รูปที่ 6 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้ที่อบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิที่ใช้ออบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งสำหรับการใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งเมื่อเทียบกับลมร้อน โดยที่อบแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่า 145°C ให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลต่ำกว่ากรณีของลมร้อนแต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 145°C กลับพบว่าค่าประสิทธิ์การแพร่ของหน่อไม้ในกรณีที่ใช้ไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วและมีค่ามากกว่าประสิทธิ์การแพร่ของลมร้อนอย่างเห็นได้ชัดเจน ณ ตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้ที่อบแห้งด้วยตัวกลางเท่ากันอยู่ที่อุณหภูมิ 145°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิผกผันประสิทธิผลของหน่อไม้สำหรับการอบแห้งในช่วงอัตราอบแห้งลดลง

ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้สำหรับไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อนมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิในรูปของสมการของอาร์เรเนียสดังต่อไปนี้

$$\text{ไอน้ำร้อนยวดยิ่ง } D_{eff} = 3.613 \times 10^{-4} \exp\left(-\frac{37837}{R(273+T)}\right) \quad (9)$$

$$\text{อากาศร้อน } D_{eff} = 1.038 \times 10^{-6} \exp\left(-\frac{17471}{R(273+T)}\right) \quad (10)$$

จากสมการที่ (9) และ (10) จะเห็นว่าในกรณีที่อุณหภูมิสูงเท่ากับ 170°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีค่ามากกว่าของลมร้อน 1.5 เท่า



รูปที่ 6 สัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งและอากาศร้อน และการเปรียบเทียบผลทำนายด้วยสมการที่ 9 และ 10

4.4 คุณภาพของหน่อไม้แห้ง

สำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งพบว่าหน่อไม้แห้งที่ได้จากการอบแห้งที่อุณหภูมิ 120, 140 และ 160°C มีสีตรงกับรหัสสี 164A, 165B และ 165A ตามลำดับ ขณะที่การอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวหน่อไม้แห้งที่ได้มีรหัสสี 164B, 164A และ 164A ตามลำดับ สีที่ได้จากการอบแห้งด้วยตัวกลางทั้งสองมีสีลักษณะน้ำตาลไหม้ แต่สีของหน่อไม้ที่ผ่านการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งมีสีเข้มกว่าภายใต้การอบแห้งที่อุณหภูมิเดียวกัน จากการสังเกตกรณี

การอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่ง พบว่าในช่วงแรกของการอบแห้ง สีของหน่อไม้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยสีของหน่อไม้เปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวลคล้ายสีของหน่อไม้ต้ม มีรหัสสี 160B ซึ่งอยู่ในกลุ่มสี greyed-yellow ขณะที่ การอบแห้งด้วยลมร้อนสีของหน่อไม้ในช่วงแรกของการอบแห้งยังคงเป็นสีขาวมีรหัสสี 157D ตรงกับกลุ่มสี green-white จากการเปรียบเทียบด้วยวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ พบว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 55และ70°C ให้สีอ่อนน่ารับประทานที่สุดโดยมีรหัสสี 162A ซึ่งยังให้ผลดีกว่าการทำหน่อไม้แห้งโดยวิธีตากแดดโดยหน่อไม้แห้งที่ได้มีสีตรงกับรหัสสี 164B

สำหรับการทดสอบคุณภาพของหน่อไม้แห้งในด้านรสชาติกระทำเพื่อยืนยันว่าสารให้ความขมในหน่อไม้ (Taxiphyllin) โดยใช้วิธีการชิม จากผลการทดสอบในแต่ละกลุ่มดังแสดงในตารางที่ 2 จากผลการทดสอบสมมติฐานของความแตกต่างของรสชาติในแต่ละวิธีการอบแห้งตามวิธีของฟริตแมน สรุปได้ว่าวิธีการอบแห้งแบบต่างๆ ให้ผลไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการอบแห้งโดยใช้อุณหภูมิสูงทั้งไอน้ำร้อนยวดยิ่งและลมร้อนสามารถทำลายสารความขมที่มีอยู่ในหน่อไม้

ตารางที่ 2 การทดสอบรสชาติของหน่อไม้ด้วยวิธีการอบแห้งต่างๆ

Group	Subsequent testing	Very bitter	bitter	slight bitter	no bitter
No.1	Sun drying	0	0	0	8
	Low temperature hot air	0	0	2	6
	High temperature hot air	0	2	5	1
	Superheated steam	0	1	5	2
No. 2	Superheated steam	0	1	3	4
	High temperature hot air	1	1	6	0
	Low temperature hot air	0	0	1	7
	Sun drying	0	1	2	5
No. 3	Low temperature hot air	0	0	1	7
	Superheated steam	0	0	7	1
	Sun drying	0	0	3	5
	High temperature hot air	0	5	3	0

5 สรุป

จากการทดลองเพื่อศึกษาไอโซเทอมแบบการคายความชื้นของหน่อไม้ การเปรียบเทียบจุลศาสตร์การอบแห้งหน่อไม้ด้วยไอน้ำร้อนยวดยิ่งกับลมร้อน และศึกษาเปรียบเทียบคุณภาพของหน่อไม้

หลังการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดแข็ง ลมร้อนอุณหภูมิสูง ลมร้อนอุณหภูมิต่ำ และวิธีการตากแห้ง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ความชื้นสมดุลของหน่อไม้ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศและอุณหภูมิ และแบบจำลองไอโซเทอมของ GAB สามารถทำนายความชื้นสมดุลมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลอง

2. อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลกระทบต่ออัตราการลดความชื้นสำหรับการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดแข็ง โดยการอบแห้งที่อุณหภูมิใกล้เคียงจุดเดือดปกติจะทำให้อัตราการลดความชื้นช้ากว่าการอบแห้งด้วยอากาศร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดแข็งมีค่าเกือบเท่ากับหรือมากกว่าการอบแห้งด้วยลมร้อนทั้งนี้ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้

3. จากสัมประสิทธิ์การแพร่ประสิทธิผลของหน่อไม้แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิผกผันประสิทธิผลสำหรับการอบแห้งหน่อไม้อยู่ที่ช่วงประมาณ 145°C

4. คุณภาพของหน่อไม้ในด้านสีที่ได้จากการตากแห้งและการอบแห้งด้วยอุณหภูมิสูงระหว่าง 120 และ 160°C โดยใช้ลมร้อนและไอน้ำร้อนขวดแข็งอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับหน่อไม้อบแห้งที่อุณหภูมิระหว่าง 55 ถึง 70°C

5. สารให้ความขมในหน่อไม้ (*Taxiphyllin*) สามารถสลายตัวระหว่างกระบวนการอบแห้งด้วยไอน้ำร้อนขวดแข็งและลมร้อนได้เมื่อใช้อุณหภูมิมอบแห้งสูงกว่าหรือเท่ากับ 120°C

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอแสดงความขอบคุณต่อสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยที่ให้ทุนสนับสนุนโครงการงานวิจัยนี้

### เอกสารอ้างอิง

1. ณรงค์ นิยมวิทย์ "หน่อไม้และผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้ ตอนที่ 1: หน่อไม้," อาหาร, ฉบับที่ 2 ปีที่ 18 พ.ศ. 2531a หน้า 79-94.
2. ณรงค์ นิยมวิทย์ "หน่อไม้และผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้ ตอนที่ 2 : ผลิตภัณฑ์จากหน่อไม้," อาหาร, ฉบับที่ 3 ปีที่ 18 พ.ศ. 2531b หน้า 183-189.
3. J. Schwartze, and S. Brocker, "A Theoretical Explanation for the Inversion Temperature", Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'2000), No. 93 [CD-ROM], 2000, pp.10, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam
4. A.S. Jensen "Pressurized Drying in Fluid Bed with Steam ", Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Drying Symposium

(IDS'92), 1992, pp. 1593-1601, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam.

5. W.Z. Tarnawski, J. Mitera, P. Borowski and A. Klepaczka "Energy Analysis on Use of Air and Superheated Steam as Drying Media", Drying Technology, Vol. 14, No. 7&8, 1996, pp. 1733-1749.
6. K. Urbaniec and J. Malczewski, "Experimental Investigations of Beet Pulp Drying in Superheated Steam under Pressure ", Drying Technology, Vol. 15, No. 6-8, 1997, pp. 2005-2013.
7. J.E. Gilmour, T.N. Oliver and S. Jay "Energy Use for Drying Processes: The Potential Benefits of Airless Drying", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'98), Vol. A, 1998, pp. 573-580, Halkidiki, Greece.
8. J. Seyed-Yagoobi, Y.B. Li, R.G. Moreira and R. Yamsaengsung, "Superheated Steam Impingement Drying of Tortilla Chips ", Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Drying Symposium (IDS'98), Vol. B, 1998, pp. 1221-1228, Halkidiki, Greece.
9. R. Blasco and P.I. Alvarez, "Flash Drying of Fish Meals with Superheated Steam: Isothermal Process", Drying Technology, Vol. 17, No. 4&5, 1999, pp. 775-790.
10. S. Brunauer, P.H. Emmette and E. Teller, "Adsorption in Multimolecular Layers", Journal of the American Chemical Society, Vol. 60, No. 2, 1938, pp. 309-319.
11. C. Van den Berg and S. Bruin, "Water Activity and Its Estimation in Food Systems: Theroretical Aspects", In Water Activity: Influences on Food Quality, L.B. Rockland and G.F. Stewart (Eds.), 1981, pp.1-61, Acedamic Press, Inc., New York
12. S.M. Henderson, "A Basic Concept of Equilibrium Moisture", Transaction of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 33, No. 1, 1952, pp. 29-31.
13. D.S. Chung and H.B. Pfost, "Adsorption and Desorption of Water Vapour by Cereal Grains and Their Products", Transaction of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), Vol. 10, No. 4, 1967, pp. 52-557.
14. J. Crank, "The Mathematics of Diffusion second edition", 1975, pp. 44-68, Brunel University Uxbridge, J. W. Arrowsmith LTD.