doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# การกักเก็บกลิ่นและรสชาติที่ไม่ละลายน้ำโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย

**อภินันท์ สุทธิธารธวัช**

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, ประเทศไทย 10330

[2] ศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนุภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ, ประเทศไทย 10330

E-mail : Apinan.S@chula.ac.th

## บทคัดย่อ

กลิ่นและรสชาติเป็นสิ่งสำคัญที่บอกคุณภาพของอาหารและความถูกใจของแต่ละบุคคลได้ กระบวนการกักเก็บของกลิ่นหรือรสชาติเป็นเทคโนโลยีในการกักเก็บกลิ่นรสให้อยู่ภายใต้สารที่จัดตัวกันเป็นร่างแหซึ่งส่วนใหญ่จะแปรรูปไปอยู่ในรูปของผงอนุภาค โดยเทคโนโลยีในการกักเก็บกลิ่นรสนี้จะช่วยปกป้องผลิตภัณฑ์จากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันจากออกซิเจน แสง ความร้อน รวมทั้งไม่เกิดการเสื่อมเสียของกลิ่นรส ระหว่างการเก็บรักษาด้วย ทำให้กลิ่นรสถูกเก็บรักษาได้นานขึ้น วิธีการกักเก็บกลิ่นรสมีอยู่หลายวิธี โดยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยเป็นวิธีที่ใช้กันมากในระดับอุตสาหกรรมในการกักเก็บกลิ่นรสเพื่อให้ได้ผงแห้งบรรจุกลิ่นรส โดยในบทความนี้จะกล่าวถึงกระบวนการกักเก็บกลิ่นรสโดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้สำหรับกลิ่นรสซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารที่ไม่สามารถละลายในน้ำได้ รวมถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการกักเก็บ รวมถึงกลไกในการกักเก็บที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ

## คำสืบค้น

กระบวนการกักเก็บกลิ่นรส, กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย, ผงอนุภาคบรรจุกลิ่น

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# Encapsulation of Hydrophobic Flavor by Spray Drying

**Apinan Soottitantawat**

[1] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330
[2] Center of Excellence in Particle Technology, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330
E-mail : Apinan.S@chula.ac.th

## ABSTRACT

Flavor is one of the most important factors of food quality and acceptability. Microencapsulation of flavors is a technology of enclosing flavor compounds in a carrier matrix to provide dry and free-flowing powders. It is also important to provide protection against the degradative reaction and to prevent the loss of flavors during food processing and storage. Various encapsulated methods of flavors have been proposed. Among them, spray drying is the most common technique to produce flavor powders from food flavor emulsion. In this article, the encapsulations of flavors with spray drying are discussed from the engineering point of view, especially, for the hydrophobic flavors. The process, mechanisms and the factors that affect to the encapsulation efficiency were discussed.

## KEYWORDS

encapsulation, spray drying, flavoring powder

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# I. บทนำ

เทคโนโลยีการกักเก็บเป็นเทคโนโลยีที่มีการพัฒนากันอย่างต่อเนื่องมาแต่อดีต แต่อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีในการกักเก็บในระดับไมโครเมตรเป็นเทคโนโลยีที่มีการค้นคว้าและพัฒนาภายใน 3 ทศวรรษที่ผ่านมา ซึ่งจะพบว่าในปัจจุบันเทคโนโลยีนี้มีการนำไปใช้อย่างมากมายในผลิตภัณฑ์ที่ใช้ชีวิตประจำวัน โดยทุกคนมองเห็นเป็นสิ่งธรรมดาทั่วไป ทำให้ไม่ตระหนักถึงเทคโนโลยีนี้มากนัก แต่อย่างไรก็ตามในหลายอุตสาหกรรมมีการนำเทคโนโลยีในการกักเก็บไปใช้เพื่อให้ได้คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ยกตัวอย่างเช่นเทคโนโลยีในการกักเก็บในระดับไมโครเมตรซึ่งจะมีการกักสารสำคัญไว้ภายในวัสดุห่อหุ้มหรือเปลือก เพื่อควบคุมการปลดปล่อย ซึ่งในอุตสาหกรรมอาหารได้นำข้อดีด้านนี้ไปพัฒนาผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิด นอกจากนี้การกักเก็บยังช่วยป้องกันการสูญเสียกลิ่นรสจากการถูกทำปฏิกริยาไม่ว่าจะเป็นอากาศและแสง รวมไปถึงการระเหยไปของตัวกลิ่นรสนั้นเอง สารสำคัญหรือกลิ่นรสที่มักจะถูกกักเก็บด้วยกระบวนการกักเก็บนี้อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท ได้แก่ กลิ่นรส วิตามินและแร่ธาตุ น้ำมันและไขมัน สมุนไพรสารสกัดทางชีวภาพ และส่วนผสมอื่นๆในอาหาร [1] , [2]

กลิ่นและรสชาติเป็นปัจจัยสำคัญที่วัดคุณภาพของอาหาร โดยเทคโนโลยีการกักเก็บกลิ่นรสจะเป็นการกักเก็บกลิ่นรสไว้ภายใต้สารห่อหุ้มที่จะจัดรวมตัวกันเป็นร่างแหซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของผงแห้ง ซึ่งอาศัยหลักการการเปลี่ยนรูปคล้ายแก้วของสารละลายของสารห่อหุ้มหลังจากการสูญเสียน้ำเกิดขึ้นในกระบวนการ โดยกระบวนการในการกักเก็บมีหลายวิธีที่ได้รับการพัฒนา แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยถือว่าเป็นกระบวนการที่ง่ายและใช้มากที่สุดในการนำมากักเก็บสารสำคัญชนิดต่าง ๆ

ในบทความนี้อธิบายถึงกระบวนการในการกักเก็บในระดับไมโครเมตรโดยอาศัยเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยของกลิ่นรสชนิดต่าง ๆ ที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์มีการรายงานเช่น ตัวแปรของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ชนิดของสารห่อหุ้ม คุณสมบัติของสารผสมตั้งต้นสำหรับเป็นสารป้อนเข้ากระบวนการอบแห้ง เป็นต้น

# II. เทคโนโลยีในการกักเก็บกลิ่นรสของอาหาร

เป้าหมายของการกักเก็บกลิ่นรสคือการปรับปรุงความคงทนระหว่างการเก็บรักษากลิ่นรสและลักษณะการปลดปล่อยของกลิ่นรสนั้นที่ถูกกักเก็บระหว่างกระบวนการผลิตรวมไปถึงระหว่างการบริโภค การกักเก็บกลิ่นรสในรูปของผงแห้ง จะช่วยลดผลกระทบของน้ำที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ส่งผลให้สิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก เช่น แบคทีเรีย ยีสต์ รา ไม่สามารถเจริญเติบโตได้ซึ่งสามารถช่วยยืดระยะเวลาในการกักเก็บ นอกจากนี้การกักเก็บในรูปของผงแห้งยังช่วยลดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของกลิ่นรสและอากาศซึ่งหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เป็นผลต่อกลิ่นรสนั้นเช่น การระเหยออกสู่บรรยากาศภายนอกและการแพร่ผ่านของออกซิเจนไปยังกลิ่นรสซึ่งจะทำให้กลิ่นรสเปลี่ยนรูปไปเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากผงอนุภาคที่ความชื้นต่ำจะมีอุณหภูมิการเปลี่ยนจากสถานะคล้ายแก้วของผงอนุภาคมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับ Ubbink และ Schoonman [3] ที่รายงานว่าความสามารถในการเคลื่อนที่และในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกลิ่นรสภายในอนุภาคแปรผันตามปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ

การเปลี่ยนสารละลายกลิ่นรสให้อยู่ในรูปผงอนุภาคมีเทคโนโลยีที่ถูกใช้อย่างมากมายหลายวิธี [4] - [6] แต่อย่างไรก็ตามวิธีที่ใช้ทั่วไปและสามารถใช้จริงในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี เช่น การอบแห้งแบบพ่นฝอย, การอบแห้งเยือกแข็ง, การอบแห้งแบบฟลูอิดไดเซชัน, กระบวนการอัดรีด, การกักเก็บระดับโมเลกุล และ

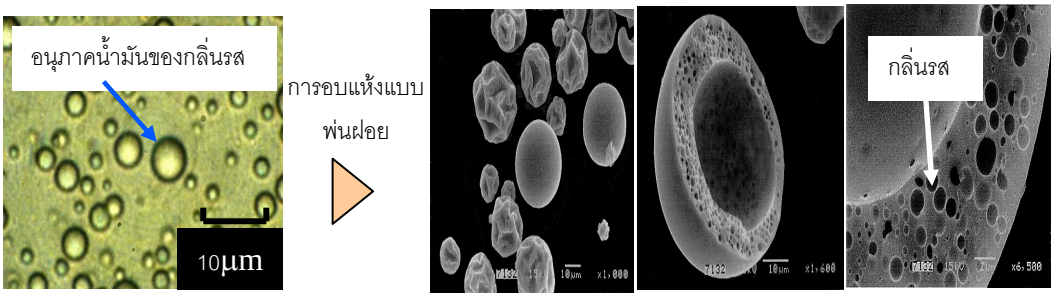
doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

กระบวนการโควเซอร์เวชัน โดยใน 4 วิธีแรกอาจเรียกว่าเป็น “การกักเก็บคล้ายแก้ว” (Glass Encapsulation) ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการกักเก็บส่วนใหญ่จะใช้สารประเภทคาร์โบไฮเดรทที่สามารถละลายน้ำได้เป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยสารประเภทคาร์โบไฮเดรทนี้จะกลายเป็นวัสดุอสัณฐานที่อยู่ในสภาวะคล้ายแก้วหลังจากการที่สูญเสียน้ำไปในกระบวนการทำให้เกิดเป็นโครงร่างของวัสดุห่อหุ้มขึ้น [3] สำหรับกระบวนการที่กักเก็บระดับโมเลกุลนั้นจะใช้ไซโคลเด็กตรินเป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยไซโคลเด็กตรินมีความสามารถในการจับกับโมเลกุลของกลิ่นรสที่เหมาะสมเข้าไปในระหว่างช่องโมเลกุลหรือโพรงของโมเลกุลเกิดเป็นสารประกอบของไซโคลเด็กตรินกลิ่นรสขึ้น ในปัจจุบันได้มีการพัฒนากระบวนการในการกักเก็บขึ้นอีกหลายวิธีเช่น กระบวนการกักเก็บโดยอาศัยคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะเหนือจุดวิกฤตเป็นตัวทำละลายของสารห่อหุ้ม กระบวนการกักเก็บที่อาศัยการตกผลึก รวมไปถึงกระบวนการกักเก็บโดยอาศัยการดูดซับภายใต้วัสดุห่อหุ้มที่เป็นรูพรุน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยยังเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายไม่ว่าในด้านการวิจัยและในเชิงพาณิชย์ดังนั้นในบทความนี้จะรายงานถึงเทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้เป็นหลัก

## III. กระบวนการกักเก็บกลิ่นรสที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอย

กลิ่นรสซึ่งจะอยู่ในรูปน้ำมันหอมระเหยนั้นแบ่งได้ เป็น 2 ประเภทตามความสามารถในการละลายน้ำคือ กลิ่นรสที่ไม่ละลายน้ำ และกลิ่นรสที่ละลายน้ำ โดยกระบวนการที่ใช้ในการกักเก็บก็จะมีลักษณะที่ต่างกัน กระบวนการในการกักเก็บกลิ่นรสที่ไม่ละลายน้ำด้วยวิธีการอบแห้งแบบพ่นฝอยสามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนย่อยได้ 3 ขั้นตอน คือ การเลือกสารเปลือกที่ใช้เป็นตัวห่อหุ้ม การเตรียมสารป้อนสำหรับเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยซึ่งเป็นขั้นตอนของการเตรียมอิมัลชันของกลิ่นรสในสารละลายของตัวห่อหุ้มนั้น ทั้งนี้เนื่องจากกลิ่นรสที่พิจารณานั้นเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำได้ และขั้นตอนของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ดังแสดงในรูปที่ 1

โดยทั้งนี้ปัจจัยที่ใช้ในการประเมินผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่กักเก็บกลิ่นว่ามีคุณภาพดีหรือไม่ดีนั้นพิจารณาจาก ขนาดและรูปร่างของผงแห้ง ความหนาแน่นสมบูรณ์ของผงแห้ง รวมไปถึงความหนาแน่นภายนอก ความสามารถในการไหลของผงแห้ง ความสามารถในการละลายน้ำกลับ ปริมาณความชื้น รูปร่างลักษณะภายนอก ปริมาณของกลิ่นรสที่ถูกกักเก็บ ความเสถียรหรือความคงตัว อายุในการเก็บรักษา ความสามารถในการปลดปล่อยกลิ่นรวมถึงความเสถียรของอิมัลชันหลังจากที่ละลายน้ำกลับคืนอยู่ในสภาพของเหลว เป็นต้น




**รูปที่ 1** แสดงแนวคิดของกระบวนการกักเก็บกลิ่นรสด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยในการแปลงอิมัลชันกลิ่นรสไปเป็นผงแห้งที่บรรจุกลิ่นรส

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

## 3.1 ขั้นตอนในการเลือกชนิดของสารห่อหุ้ม

ขั้นตอนแรกของกระบวนการกักเก็บกลิ่นรส คือ การเลือกชนิดของสารที่ห่อหุ้มให้เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติส่วนใหญ่ของผลิตภัณฑ์ผงแห้งที่ดีหรือไม่ดีนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสารห่อหุ้มเป็นหลัก นอกจากนี้ชนิดของสารห่อหุ้มยังมีผลต่อความเสถียรของอิมัลชันสายป้อนซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บของกลิ่นรสระหว่างกระบวนการอบแห้ง และยังส่งผลต่อความสามารถในการไหล รวมไปถึงอายุในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย ชนิดของสารห่อหุ้ม อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภทหลัก คือ [4]

1. สารประเภทคาร์โบไฮเดรท เช่น แป้ง แป้งดัดแปร มัลโตเด็กตริน ไซโคลเด็กตริน
2. สารประเภทเอสเทอร์หรืออีเทอร์ของเซลลูโลส เช่น คาร์บอกซีเซลลูโลส เมทิลเซลลูโลส เอทิลเซลลูโลส
3. สารประเภทยางหรือกัม เช่น กัมอกาเซีย โซเดียมแอลจีเนท
4. สารประเภทไขมัน เช่น แวกซ์ พาราฟิน น้ำมัน ไขมัน
5. สารประเภทโปรตีน เช่น เจลลาติน โปรตีนจากถั่ว

โดยคุณสมบัติสำคัญของสารห่อหุ้ม คือ มีความสามารถในการละลายน้ำสูง มีความสามารถในการเป็นอิมัลซิไฟเออร์ที่ดี มีความสามารถในการสร้างฟิล์ม ถูกทำให้แห้งได้ และมีความหนืดต่ำถึงแม้ว่าจะละลายในน้ำที่ความเข้มข้นสูง

## 3.2 ขั้นตอนในการเตรียมอิมัลชันของกลิ่นรส

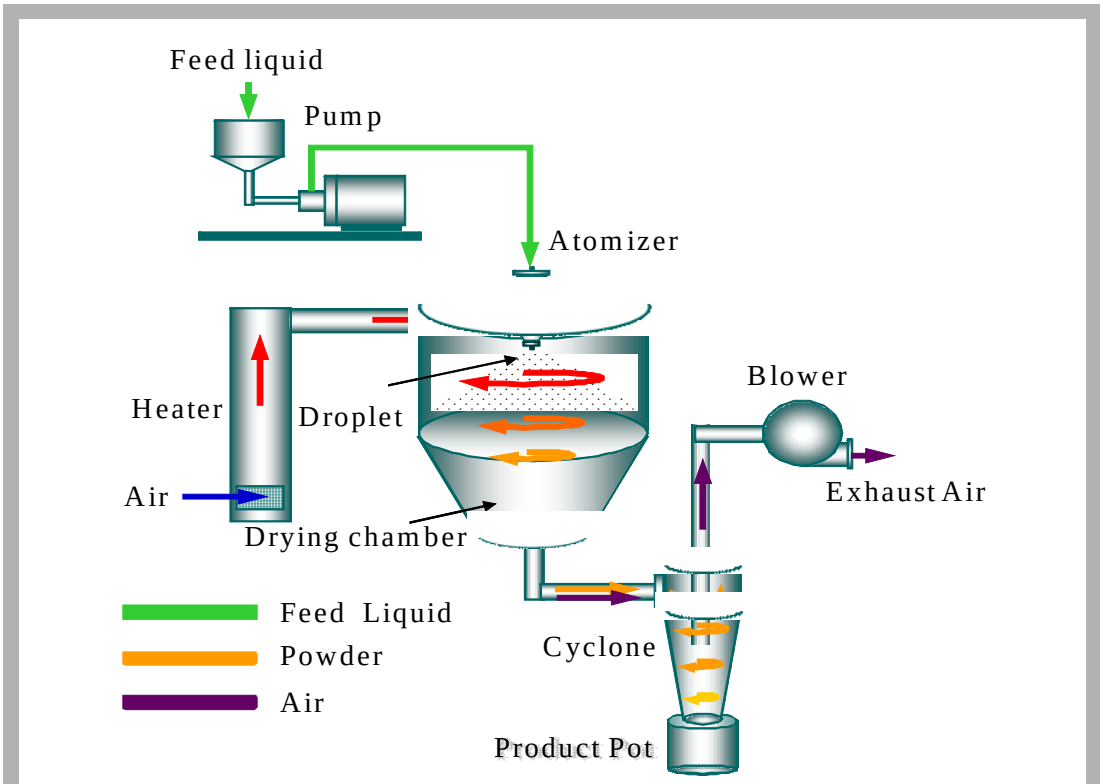
ขั้นตอนต่อมาเป็นการกระจายอนุภาคของกลิ่นรสให้อยู่ในรูปของอนุภาคขนาดเล็กในสารละลายของสารห่อหุ้มที่ถูกเลือกซึ่งเรียกว่าเป็นสารอิมัลชันของกลิ่นรส ซึ่งเป็นอิมัลชันชนิดน้ำมันในน้ำ (O/W อิมัลชัน) เพื่อเป็นสารป้อนสำหรับขั้นตอนของการอบแห้งต่อไป โดยในการทำอิมัลชัน กลิ่นและรสจะถูกเติมลงไปในสารละลายของสารห่อหุ้ม และถูกทำให้เป็นอนุภาคขนาดเล็กโดยผ่านการปั่นกวนอย่างรุนแรงโดยเครื่องโฮโมจิไนเซอร์ ซึ่งขนาดของอนุภาคของกลิ่นรสสามารถควบคุมด้วยสภาวะของเครื่องโฮโมจีไนเซอร์รวมไปถึงเวลาที่ใช้ในการโฮโมจีไนซ์ โดยคุณสมบัติของอิมัลชันเช่นขนาดของอนุภาคและความเสถียรของอิมัลชัน จะส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผงแห้งกักเก็บกลิ่นรสเป็นอย่างมากดังจะได้กล่าวในหัวข้อต่อไป

## 3.3 ขั้นตอนการเตรียมผงแห้งกักเก็บกลิ่นโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

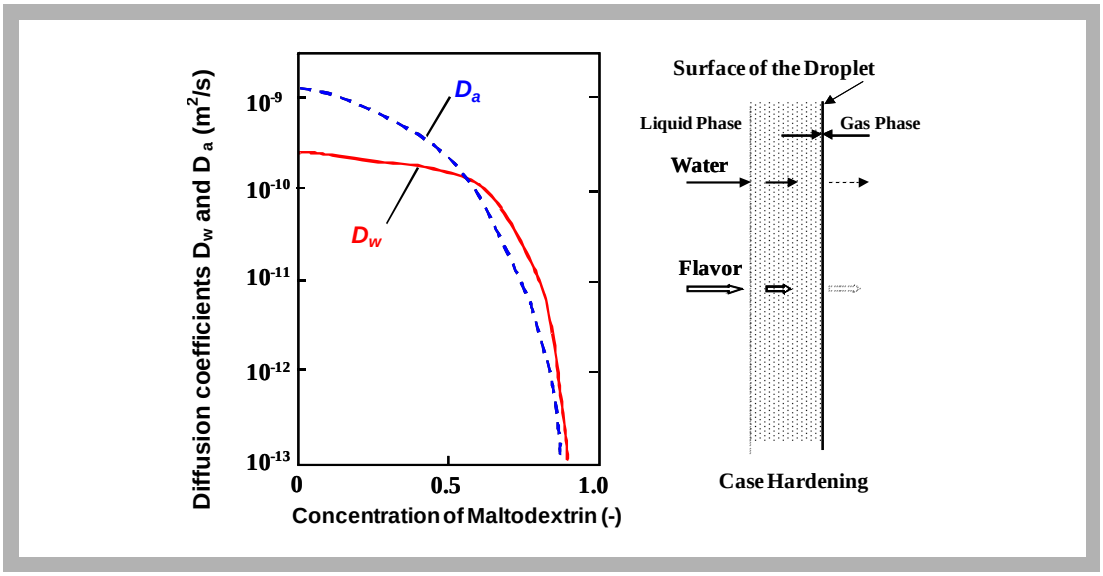
ขั้นตอนต่อมาคือป้อนอิมัลชันของกลิ่นรสผ่านเครื่องกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือการเปลี่ยนแปลงของเหลวซึ่งอาจจะอยู่ในรูปของสารละลายหรืออิมัลชันหรือของผสมระหว่างของเหลวกับของแข็งกลายเป็นผงอนุภาคแห้ง ของเหลวที่ป้อนเข้าจะถูกทำให้เป็นละอองกลายเป็นหยดเล็กๆซึ่งมีขนาดตั้งแต่ระดับสิบไมโครเมตรถึงระดับหลายร้อยไมโครเมตรโดยถูกทำให้แห้งเป็นผงโดยสัมผัสกับอากาศร้อน [7] ข้อดีของการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ดีกว่าการทำแห้งแบบอื่น คือการทำให้แห้งอย่างรวดเร็ว หยดละอองของเหลวสามารถทำให้แห้งได้ในเวลาอันสั้นประมาณ 5 ถึง 30 วินาที โดยสามารถทำให้เกิดผงอนุภาคทรงกลมได้โดยตรงจากสารละลายหรือสารผสมของเหลวที่เตรียมไว้ ดังนั้นการอบแห้งแบบพ่นฝอยจะถูกประยุกต์กับอุตสาหกรรมที่ต้องการผลิตผลิตภัณฑ์ที่เป็นผง และใช้ร่วมกับกระบวนการขนส่งอาศัยอากาศจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง เครื่องพ่นฝอยแบบแห้งโดยทั่วไปประกอบด้วย อุปกรณ์ที่ใช้ป้อนสาร, อุปกรณ์ที่ทำให้ของเหลวกลายเป็นละอองหรือหัวฉีด, เครื่องให้ความร้อนกับอากาศ, เครื่องป้อนอากาศ, หออบแห้ง, ระบบฟอกอากาศให้สะอาด และ อุปกรณ์

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

เก็บผงอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งหัวฉีดของเหลวที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมมี 2 ชนิดคือแบบพ่น และ แบบจานหมุน จะทำให้ของเหลวเป็นละออง จึงทำให้เกิดหยดละอองที่มีขนาดพอเหมาะ และขนาดอนุภาคของละอองเป็นสิ่งสำคัญของการพ่นฝอยแบบแห้งในการกำหนดการกระจายตัวของขนาดผงอนุภาค ส่วนสารละลายที่ป้อนเข้าถูกทำให้เป็นอนุภาคมากที่สุดเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของผงอนุภาค ตัวอย่างเช่น สารละลาย 1 ลูกบาศก์เมตร และได้ละอองขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 ไมโครเมตร หรือ 1 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น 100 หรือ 10,000 เท่าตามลำดับ โดยปกติเครื่องพ่นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหยดละอองประมาณ 10 ถึง 200 ไมโครเมตร และเวลาในการทำแห้งประมาณ 5 ถึง 30 วินาที [8] โดยหัวฉีดแบบจานหมุน นิยมใช้กับของเหลวที่มีลักษณะข้น หรือความหนืดสูง




**รูปที่ 2**
ระบบการทำงานของเครื่องพ่นฝอยแบบแห้ง ประกอบไปด้วยปั๊มที่ใช้ป้อนสาร, หัวฉีด, เครื่องให้ความร้อนกับอากาศ, เครื่องป้อนอากาศ, ถังอบแห้ง, ระบบฟอกอากาศให้สะอาด และ อุปกรณ์เก็บผงอนุภาค




**รูปที่ 3**
แสดงทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่านสำหรับการอบแห้งกลิ่นรสภายใต้สารห่อหุ้ม $D_a$ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของกลิ่นรสซึ่งใช้เอทานอลเป็นกลิ่นต้นแบบ $D_w$ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของน้ำ [12]

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# IV. ทฤษฎีและกลไกการกักเก็บกลิ่นรสโดยการอบแห้งแบบพ่นฝอย

สำหรับการอบแห้งแบบพ่นฝอยของเหลวที่เป็นอิมัลชันกลิ่นรส ปริมาณของกลิ่นรสที่กักเก็บอยู่ในผงอนุภาคเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตผงอนุภาคควบคู่กับปริมาณน้ำที่ลดลงอย่างมาก ระหว่างการอบแห้ง อุณหภูมิของอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งถูกคาดว่าน่าจะทำให้ปริมาณกลิ่นรส ซึ่งส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของน้ำมันหอมระเหยหายไปเป็นจำนวนมากเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำที่หายไป ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าของการกลายเป็นไอสูงกว่าน้ำมาก แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้สามารถกักเก็บปริมาณกลิ่นรส (น้ำมันหอมระเหย) ได้เป็นสัดส่วนปริมาณมากเมื่อเทียบกับน้ำซึ่งจะเหลืออยู่ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักของผงแห้งกักเก็บกลิ่นทั้งหมดเท่านั้น การที่กลิ่นรสถูกกักเก็บในอนุภาคในสัดส่วนที่มากกว่าน้ำเป็นจำนวนมากนั้น สามารถอธิบายได้โดย "ทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่าน" [9], [11] ปริมาณของน้ำมันหอมระเหยที่เหลืออยู่ในผงแห้งเป็นปริมาณที่มากกว่าการคาดคะเนจากการสมดุลไอนั้นทั้งนี้เป็นเพราะการแพร่ของสารที่เป็นของเหลวในละอองอนุภาคสู่พื้นผิวของละอองอนุภาคจะเป็นตัวกำหนดอัตราการอบแห้งของละอองอนุภาคนั้น Thjiissen and Rulkens [9] พบว่าปริมาณของน้ำที่ลดลงบริเวณพื้นผิวของละอองอนุภาคระหว่างการอบแห้งนั้นจะทำให้สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านของน้ำมันหอมระเหยลดลงหลายเท่าตัวเมื่อเทียบกับตอนที่เริ่มต้นก่อนการอบแห้ง และมีอัตราการลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเทียบกับน้ำในสภาวะเดียวกัน ซึ่งจะทำให้ระหว่างการอบแห้งนั้น ปริมาณน้ำจะแพร่ผ่านและระเหยไปด้วยอัตราและปริมาณที่มากกว่าน้ำมันหอมระเหย ซึ่งแพร่ผ่านและระเหยได้ในปริมาณน้อยโดยเฉพาะในสภาวะที่น้ำหายไปเป็นจำนวนมากและอย่างรวดเร็ว ดังนั้นพื้นผิวที่แห้งของละอองอนุภาคหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวแยกการแพร่ผ่านที่ยอมให้โมเลกุลของน้ำแพร่ผ่านแต่ไม่ยอมให้น้ำมันหอมระเหยแพร่ผ่านออกไป ดังแสดงในรูปที่ 3 กล่าวคือสารห่อหุ้มที่อยู่ในเฟสน้ำในอิมัลชันของสายป้อนเมื่อปริมาณน้ำลดลงจะทำให้อุณหภูมิของสภาวะที่คล้ายแก้วเพิ่มขึ้น และทำให้ได้โครงสร้างอสัณฐานซึ่งยอมให้สารอินทรีย์ (กลิ่นรส) ไม่สามารถซึมผ่านไปได้ แต่ยอมให้น้ำซึมผ่านไปได้

Thjiissen และ Rulkens [9] ยังรายงานเพิ่มเติมว่าปริมาณน้ำที่ผิวของละอองอนุภาคลดลงระหว่างอบแห้งแบบพ่นฝอย และปริมาณของกลิ่นรสก็มีแนวโน้มลดลงตามด้วย พบว่าน้ำแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้อย่างต่อเนื่อง แต่กลิ่นรสสามารถแพร่ผ่านในอัตราที่น้อยมาก ดังนั้นบริเวณผิวของอนุภาคที่ถูกทำให้แห้งจะมีลักษณะเป็นเยื่อหุ้มบางๆ ที่ยอมให้น้ำผ่านแต่กักเก็บโมเลกุลของสารอินทรีย์กลิ่นรสไว้ และพบอีกว่าการกักเก็บกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งในสารที่ป้อนเข้า อุณหภูมิอากาศร้อนขาเข้า อัตราการไหลของอากาศร้อน และลดปริมาณความชื้นของอากาศ ซึ่งเงื่อนไขทั้งหมดจะทำให้ผิวแห้งที่เกิดขึ้นบนผิวของละอองอนุภาคมีประสิทธิภาพดีขึ้น [12]

นอกจากนี้ Flink และ Karel [13] ได้เสนอทฤษฎีการทำให้ถูกยึดติดอยู่ในขอบเขตระดับไมโครเมตร ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่าน แต่จะเสนอในแง่ของแนวทางเคมีกายภาพ กล่าวคือ การอบแห้งจะทำให้เกิดขอบเขตของการกักเก็บระดับไมโครเมตรขึ้น ในขอบเขตนี้จะทำให้มีปริมาณความเข้มข้นของกลิ่นรสในปริมาณสูงภายใต้สารละลายความเข้มข้นสูงของสารห่อหุ้ม โดยในขอบเขตนี้ Flink และ Karel [13] เสนอว่าโมเลกุลของน้ำซึ่งมีปริมาณลดลงอย่างมากนั้นจะช่วยให้เกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างสารห่อหุ้มกับกลิ่นรส ทำให้การสูญเสียของกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งนั้นมีค่าลดลง อีกทฤษฎีที่มีลักษณะคล้ายกันคือทฤษฎีสภาวะคล้ายแก้ว ซึ่งนำเสนอโดย Franks และคณะ [14] กลิ่นรสจะมีความคงทนเมื่อกลิ่นรสติดอยู่ในบริเวณโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่มีสภาวะเริ่มคล้ายแก้วและมีความหนืดสูง

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# V. การสูญเสียกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย

ถึงแม้ว่ากลไกในการกักเก็บกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยได้รับการอธิบายดังทฤษฎีข้างต้นแล้วนั้น แต่ปริมาณบางส่วนของกลิ่นรสมีการสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างการอบแห้งอบแห้ง ซึ่งถ้าสามารถอธิบายถึงกระบวนการสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ จะทำให้สามารถป้องกันการสูญเสียของกลิ่นรสในระหว่างกระบวนการได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย King และคณะ [11] ได้เสนอกลไกและขั้นตอนในกระบวนการที่จะให้เกิดการสูญเสียขึ้น คือ

## 5.1 ช่วงระหว่างการพ่นฝอย

การสูญเสียช่วงแรกเกิดขึ้นในระหว่างการพ่นฝอย ทั้งนี้เนื่องจากจะมีแรงเฉือนจากภายนอกมากระทำกับอิมัลชันของกลิ่นรส ซึ่งจะทำให้อนุภาคของอิมัลชันนั้นถูกทำลายลงไป นอกจากนี้ภายในตัวละอองเกิดภาวะปั่นป่วนอย่างรุนแรงเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้กลิ่นรสสูญเสียไปกับน้ำในระหว่างการอบแห้งเป็นปริมาณมาก ทั้งนี้เนื่องจากยังเป็นช่วงที่ผิวภายนอกของละอองอิมัลชันยังไม่กลายเป็นเยื่อหุ้มที่สามารถยับยั้งการแพร่ผ่านของกลิ่นรสตามทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่านได้

## 5.2 ช่วงของการเป็นรูปร่างของผงอนุภาค ก่อนที่อุณหภูมิของละอองจะถึงจุดเดือดของน้ำ

ช่วงการสูญเสียช่วงที่สองเกิดขึ้นระหว่างการเกิดผิวแห้งรอบนอกของละอองกลายเยื่อหุ้มที่ทำหน้าที่ยับยั้งการแพร่ผ่านของกลิ่นรสดังทฤษฎีการแพร่แบบเลือกผ่านข้างต้น แต่อย่างไรก็ตามในระหว่างการเกิดเยื่อเลือกผ่านนั้นกลิ่นรสก็มีการสูญเสียเกิดขึ้นตามเวลาการอบแห้งจนกระทั่งเยื่อเลือกผ่านมีรูปร่างที่สมบูรณ์ ซึ่งอัตราของการสูญเสียก็จะมีปริมาณลดลงตามลำดับ

## 5.3 ช่วงของการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาคที่เริ่มแห้ง

ช่วงสุดท้ายของการสูญเสียกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้น เกิดขึ้นระหว่างการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของละอองอนุภาคที่แห้ง อุณหภูมิภายในของละอองอนุภาคมีอุณหภูมิสูงขึ้นและมีค่าสูงขึ้นมากกว่าอุณหภูมิของจุดเดือดของน้ำ ทำให้น้ำที่อยู่ภายในเกิดการกลายเป็นไอแต่ไม่สามารถผ่านหนีออกจากละอองอนุภาคได้เนื่องจากผิวของอนุภาคที่เริ่มแห้งทำให้ค่าการถ่ายเทมวลของน้ำลดลง ไอของไอน้ำนี้จะรวมตัวกันกลายเป็นฟองอากาศภายในอนุภาคและมีแรงดันทำให้อนุภาคมีการขยายตัว ทำให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ซึ่งแรงดันนี้จะทำให้อนุภาคมีการพองตัวและแตกในที่สุด อาจทำให้อนุภาคมีการบิดเบี้ยวขึ้นทั้งนี้เนื่องจากในระหว่างการอบแห้งนั้นผิวของอนุภาคเกิดการแห้งขึ้นไม่พร้อมกันทั่วทั้งอนุภาค ทำให้บริเวณที่มีการแห้งเกิดขึ้นช้า ถูกแรงดันของไอน้ำดันทำให้รูปร่างของอนุภาคมีลักษณะพองตัวและเกิดการแตกของอนุภาคออก [15] ซึ่งจะทำให้ปริมาณของกลิ่นรสที่อยู่ข้างในสูญเสียตามไปด้วย โดยลักษณะของการขยายตัวและแตกออกของอนุภาคนี้ไม่ได้เกิดขึ้นเพียงรอบเดียวแต่สามารถขึ้นซ้ำไปซ้ำมาจนกระทั่งผิวของอนุภาคแห้งและไม่สามารถขยายตัวออกไปได้

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# VI. ปัจจัยที่มีผลต่อการกักเก็บกลิ่นรสของผงอนุภาคที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

## 6.1 คุณสมบัติของสารประกอบกลิ่นรส

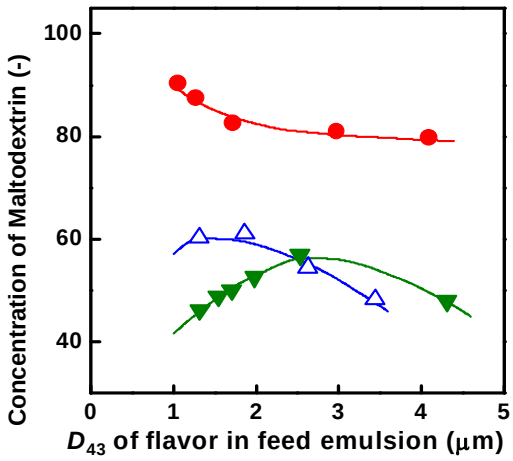
### 6.1.1 หนักโมเลกุล

เนื่องจากขนาดของโมเลกุลส่งผลต่ออัตราในการแพร่ของสาร ดังนั้นสารประกอบกลิ่นรสที่มีขนาดโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลใหญ่ขึ้น จะทำให้ปริมาณในการกักเก็บของกลิ่นรสมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [16] - [20] ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลขนาดใหญ่มีการแพร่ผ่านได้ช้า ทำให้เกิดการสูญเสียกลิ่นรสได้ในปริมาณที่ต่ำ โดยเฉพาะการสูญเสียในช่วงที่ 2 ดังได้กล่าวข้างต้น

### 6.1.2 ความดันไอ

ความดันไอหรือความสามารถในการระเหยของสารกลิ่นรสจะเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นรส ขึ้นระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยเฉพาะในช่วงที่ 1 และช่วงที่ 3 ที่เกิดการสูญเสีย ทั้งนี้เนื่องจากการสูญเสียใน 2 ช่วงนี้ส่วนใหญ่มาจากความสามารถในการระเหยของกลิ่นรสซึ่งพิจารณาได้จากค่าความดันไอของกลิ่นรส [21]

**รูปที่ 4** แสดงผลของขนาดอนุภาคอิมัลชันเริ่มต้นต่อร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสต้นแบบ 3 ชนิดหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยเมื่อ Agacia Gum เป็นสารห่อหุ้ม (● Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม), △ Ethyl butyrate (กลิ่นสับปะรด), ▼ Ethyl propionate (กลิ่นผลไม้)) [22]




**ตารางที่ 1** แสดงคุณสมบัติของกลิ่นรสต้นแบบ [22]

| Model Flavor | Molecular weight | Solubility (v/v) | Boiling temperature (°C) |
|---|---|---|---|
| d- Limonene | 136 | Insoluble | 174 |
| Ethyl butyrate | 116 | 6.7x10-3 | 120 |
| Ethyl propionate | 102 | 1.7x10-2 | 90 |

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

### 6.1.3 ความสามารถในการละลายในน้ำ

ปัจจัยอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการกักเก็บกลิ่น และรสโดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความสามารถในการละลายน้ำของกลิ่นรสนั้น โดย Soottitantawat และคณะ [22] แสดงผลของปริมาณในการกักเก็บของกลิ่นรสต้นแบบ ซึ่งเป็นกลิ่นของ Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม), Ethylpropionate (กลิ่นผลไม้) กับ Ethyl butyrate (กลิ่นสับปะรด) ที่สภาวะของการอบแห้งและวัสดุห่อหุ้มเหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยคุณสมบัติของกลิ่นรสต้นแบบแสดงในตารางที่ 1 ร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรสของ Limoneneมีค่าสูงกว่าของ Ethyl butyrate และEthyl propionateตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันไอ (จุดเดือด)มีผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้อยกว่าความสามารถในการละลาย และขนาดของโมเลกุลนั่นคือการสูญเสียกลิ่นรส เนื่องมาจากคุณสมบัติของสารประกอบกลิ่นรสน่าจะเกิดจากการสูญเสียในช่วงที่ 2 มากกว่าในการสูญเสียที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 1 และ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้เช่นเดียวกับขนาดของโมเลกุลที่การสูญเสียลดลงเนื่องจากความสามารถในการแพร่ผ่านที่ลดลง ในทำนองเดียวกันความสามารถในการละลายน้ำนั่นแสดงถึงกลิ่นรสที่สามารถละลายอยู่ในน้ำ และสามารถแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปได้ ทำให้กลิ่นรสที่ละลายน้ำได้มากมีการแพร่ผ่านเยื่อ และสูญเสียออกไปได้มาก โดยเฉพาะการสูญเสียในช่วงที่ 2

## 6.2 คุณสมบัติของอิมัลชันของสายป้อน

### 6.2.1 ปริมาณของสารห่อหุ้มที่ละลายอยู่ในอิมัลชันสายป้อน

ปัจจัยที่สำคัญในการกักเก็บกลิ่นรสที่เป็นสารที่ระเหยง่าย ระหว่างกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยคือปริมาณของแข็งหรือสารห่อหุ้มที่ละลายอยู่ในอิมัลชันสายป้อน [10], [16], [17], 23] – [29] ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณของแข็งมากขึ้นจะทำให้เกิดอัตราการอบแห้งที่เร็วขึ้น ส่งผลให้เกิดเยื่อเลือกผ่านขึ้นบริเวณของละอองอนุภาคได้เร็วขึ้นตามไปด้วย ทำให้การสูญเสียของกลิ่นรสในช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นช่วงของการสูญเสียที่มากที่สุดมีปริมาณลดลง ดังแสดงในรูปที่ 5 เมื่อความเข้มข้นของสารห่อหุ้มที่ละลายในอิมัลชันสายป้อนมากขึ้น จะทำให้ร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรสมากขึ้น ความเข้มข้นของสารห่อหุ้มในอิมัลชันสายป้อนนั้นสามารถเพิ่มขึ้นได้ตามชนิดของสารห่อหุ้มนั้นๆ ซึ่งจะมีความสามารถละลายอยู่ที่ระดับหนึ่ง ซึ่งด้วยข้อจำกัดนี้จึงมีการเพิ่มปริมาณสารห่อหุ้มที่มีความสามารถละลายน้ำได้ดีเติมแต่งเข้าไปกับสารห่อหุ้มที่มี คุณสมบัติเป็นอิมัลซิฟายเออร์ เพื่อให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นรสน้อยที่สุดระหว่างกระบวนการ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อความเข้มข้นของของแข็งมีค่ามากขึ้นจะทำให้ความหนืดของอิมัลชันมีค่าสูงขึ้น ถ้าค่าความหนืดสูงมากขึ้นอาจส่งผลต่อความสามารถในการพ่นฝอยที่ลดลง ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นรสในช่วงที่ 1 มากขึ้นตามไปด้วย โดยอาจส่งผลให้ร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรสมีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นของของแข็งสูงขึ้น [30], [31]

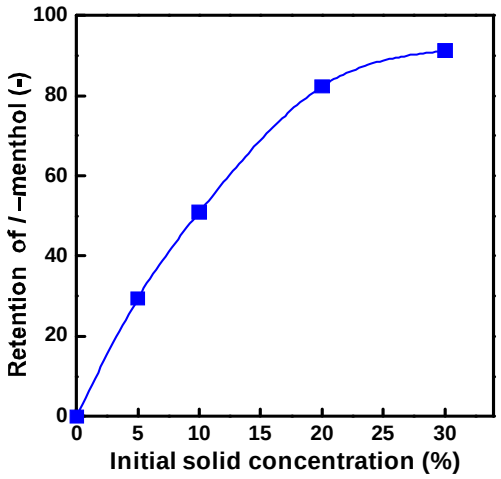
### 6.2.2 ความหนืดของในอิมัลชันสายป้อน

ความหนืดของอิมัลชันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อการคงอยู่ของกลิ่นรสระหว่างกระบวน การทั้งนี้เนื่องจากความหนืดจะส่งผลต่อความสามารถในการเคลื่อนที่ของของไหลที่อยู่ภายในละอองอิมัลชันที่ออกมาจากหัวฉีด [10], [11] ที่ค่าความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการผสมที่ดีขึ้นภายในละอองอิมัลชันระหว่างการอบแห้ง ส่งผลให้การเกิดของเยื่อเลือกผ่านนั้นช้าตามไปด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นรสมากขึ้น โดยเฉพาะในช่วงที่ 2 ของการสูญเสีย นั่นคือถ้าความหนืดของอิมัลชันสูงขึ้นจะทำให้ร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสระหว่างกระบวนการนั้นสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถ้าความหนืดของอิมัลชันมีค่าสูง

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

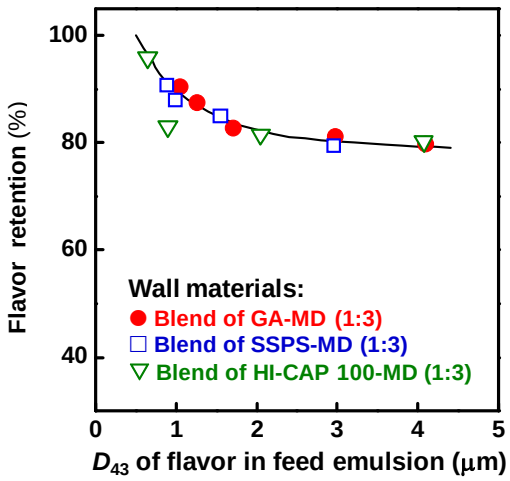
มากเกินไปจนส่งผลต่อการเกิดของละอองอิมัลชันจากหัวฉีด ก็จะทำให้การสูญเสียของกลิ่นรสในช่วงที่ 1 นั้นมาก นอกจากนี้ยังส่งผลให้ร้อยละผลได้ของอนุภาคนั้นลดลงตามไปด้วยเนื่องจากความไม่สามารถในการฉีดออกเป็นละอองได้ทำให้เกิดการติดตามผนังของหออบแห้งขึ้นดังแสดงในรูปที่ 6 ดังนั้นค่าความหนืดที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดการคงอยู่ของกลิ่นรสจะมีค่าสูงที่ระดับหนึ่งเท่านั้น ดังตัวอย่างในงานของ Rosenberg และคณะ [26] ซึ่งศึกษาถึงความสามารถในการคงอยู่ของ ethyl caproate เป็นกลิ่นรสต้นแบบระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อกัมอกาเซียใช้เป็นวัสดุห่อหุ้ม โดยเพิ่มความหนืดของอิมัลชันด้วยการเติมสารแต่งเติมกลุ่มอัลจิเนทพบว่าค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรสมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วงของความหนืด 125-250 cP และพบว่าเมื่อความหนืดสูงขึ้นจะทำให้ไม่ได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงตามที่ต้องการแต่จะมีลักษณะคล้ายสำลีเกิดขึ้น

**รูปที่** 5
แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของแข็งในอิมัลชันสายป้อนต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (เมื่อแป้งดัดแปรและเมนทอลถูกใช้เป็นตัวห่อหุ้มและกลิ่นรสต้นแบบตามลำดับ) [29]

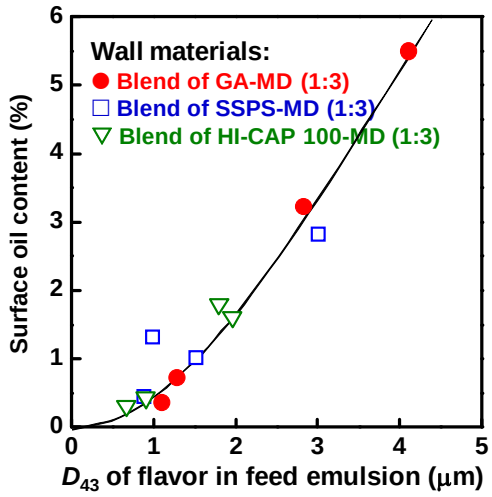



**รูปที่** 6
แสดงหออบแห้งเมื่ออิมัลชันสายป้อนมีความหนืดสูง (เมื่อ Agacia Gum และ น้ำมันมะกรูดใช้เป็นตัวห่อหุ้มและกลิ่นรสต้นแบบตามลำดับ)

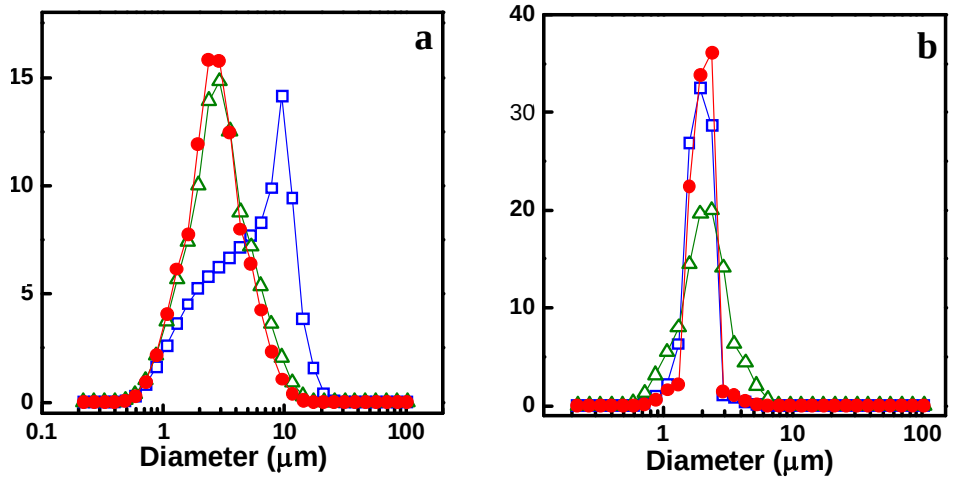
doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43




**รูปที่ 7**
ผลกระทบของขนาดอิมัลชันต่อร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสหลังผ่านกระบวนการเมื่อ Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) เป็นต้นแบบของกลิ่นรส และเมื่อ Agacia gum (GA), มัลโตเด็กตริน (MD), โปรตีนถั่ว (SSPS) และแป้งดัดแปร (HI-CAP 100) เป็นตัวห่อหุ้ม [22]



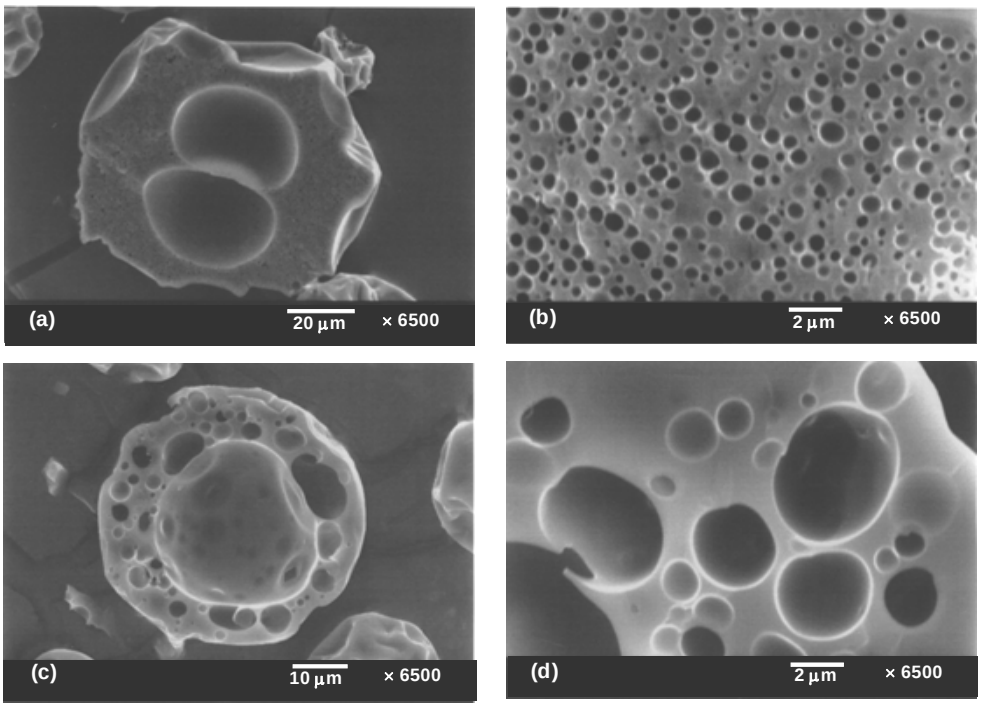

**รูปที่ 8**
ผลกระทบของขนาดอิมัลชันต่อปริมาณของกลิ่นรสที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคหลังหลังผ่านกระบวนการเมื่อ limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) เป็นต้นแบบของกลิ่นรส และเมื่อ Agacia gum (GA), มัลโตเด็กตริน (MD), โปรตีนถั่ว (SSPS) และแป้งดัดแปร (HI-CAP 100) เป็นตัวห่อหุ้ม [22]




**รูปที่ 9**
การเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคน้ำมันกลิ่นรส : (a) สำหรับอิมัลชันสายป้อนมีขนาดอนุภาคที่ใหญ่ (b) สำหรับอิมัลชันสายป้อนมีขนาดอนุภาคที่เล็ก เมื่อ Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) เป็นต้นแบบของกลิ่นรส และเมื่อ Agacia gum (GA) และ มัลโตเด็กตริน (MD) เป็นตัวห่อหุ้ม [22]

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

**รูปที่** 10
รูปหน้าตัดของอนุภาคกักเก็บกลิ่นรส แสดงลักษณะของอนุภาคกลิ่นรสอยู่ภายในตัว ห่อหุ้มสำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็ก (a, b) และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ (c, d) เมื่อ Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) เป็นต้นแบบของกลิ่นรส และเมื่อ Agaciagum (GA) และมัลโตเด็กตริน (MD) เป็นตัวห่อหุ้ม [34]




**ตารางที่** 2
แสดงค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรส (เมนทอล) หลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ค่าความเข้มข้นของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อนต่าง ๆ กัน [29]

| *l*-Menthol concentration | Retention of *l*-menthol (%) | | |
|---|---|---|---|
| (% w/w of total solid) | GA | CAPSUL | HI-CAP 100 |
| 10 | 72 | 85 | 87 |
| 20 | 72 | 85 | 85 |
| 30 | 68 | 79 | 85 |

**ตารางที่** 3
แสดงค่าการคงอยู่ที่ผิวของกลิ่นรส (เมนทอล) หลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ค่าความเข้มข้นของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อนต่าง ๆ กัน [29]

| *l*-Menthol concentration | Surface *l*-menthol content (% of total menthol) | | |
|---|---|---|---|
| (% w/w of total solid) | GA | CAPSUL | HI-CAP 100 |
| 10 | 2.75 | 3.37 | 2.74 |
| 20 | 5.16 | 9.57 | 13.04 |
| 30 | 15.65 | 41.56 | 42.79 |

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

### 6.2.3 ขนาดอนุภาคของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อน

ขนาดของอนุภาคของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อน (ในที่นี้จะเรียกว่าอนุภาคอิมัลชัน) มีผลต่อค่า การคงอยู่ของกลิ่นรสในระหว่างกระบวนการอย่างมาก [22], [32], [33] โดยพบว่าอนุภาคของอิมัลชันของกลิ่นรสที่มีความสามารถในการละลายต่ำมาก หรือไม่สามารถละลายในน้ำได้เลย เมื่อมีขนาดเล็กลงจะทำให้ร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นรสมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยดังแสดงในรูปที่ 7 นอกจากนี้รูปที่ 8 ยังแสดงถึงปริมาณของกลิ่นรสที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยกับขนาดของอิมัลชัน โดยเมื่อขนาดของอิมัลชันมีขนาดใหญ่ขึ้นพบว่ากลิ่นรสที่เกาะตามผิวของอนุภาคผงแห้งก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี่เนื่องมาจากเมื่ออนุภาคของอิมัลชันมีขนาดใหญ่จะถูกแรงเฉือนจากหัวฉีดกระทำต่ออิมัลชันนั้นทำให้อนุภาคกลิ่นรสนั้นแตกเป็นอนุภาคที่เล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 9-a ซึ่งอนุภาคของกลิ่นและรสที่แตกลงนี้จะส่งผลให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นและรสในช่วงที่ 1 มากขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามสำหรับอนุภาคกลิ่นและรสที่ขนาดเล็กจะมีขนาดในไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 9-b แสดงถึงการสูญเสียในช่วงที่ 1 น้อยกว่าอนุภาคกลิ่นรสที่มีขนาดใหญ่ รูปที่ 10 แสดงรูปการคงอยู่ของอนุภาคกลิ่นรสในอนุภาคผงแห้งหลังจากผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับอนุภาคอิมัลชันที่มีขนาดใหญ่ (3.5 ไมโครเมตร) และขนาดเล็ก (0.8 ไมโครเมตร) แต่อย่างไรก็ตามสำหรับกลิ่นรสที่มีความสามารถในการละลายน้ำสูงขึ้น พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคกลิ่นรสลดลงจะทำให้การคงอยู่ของกลิ่นรสหลังกระบวนการมีค่าลดลงตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4 ทั้งนี้เกิดจากปริมาณของกลิ่นและรสที่ละลายอยู่ในเฟสของน้ำมีค่าสูงขึ้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็ก ซึ่งกลิ่นรสที่ละลายอยู่ในน้ำนี้เกิดการสูญเสียไปกับน้ำผ่านเยื่อเลือกผ่านที่เกิดขึ้นในช่วงที่ 2 ของการสูญเสีย

### 6.2.4 ปริมาณของกลิ่นรสในอิมัลชันสายป้อน

เมื่อปริมาณของกลิ่นรสที่อยู่ในอิมัลชันสายป้อนมีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสมีค่าลดลง นอกจากนี้ยังทำให้กลิ่นรสที่เกาะอยู่บริเวณผงแห้งมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย [23] - [25], [27], [29], [35], [36] ดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 สำหรับร้อยละการคงอยู่และปริมาณของเมนทอล (กลิ่นรสต้นแบบ) ตามลำดับ เมื่อปริมาณของเมนทอลที่อยู่ในอิมัลชันมีค่ามากขึ้นทำให้ร้อยละของการอยู่ของเมนทอลมีค่าลดลงแต่ทำให้ปริมาณของเมนทอลที่ผิวของผงแห้งมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นเพื่อให้มีปริมาณของกลิ่นรสในผงแห้งสูงพร้อมทั้งมีร้อยละของการคงอยู่สูงสุด อัตราส่วนของมวลวัสดุหุ้มต่อมวลของกลิ่นรสจะถูกใช้ที่ค่า 4 ต่อ 1 [6], [30], [37], [38] ซึ่งอัตราส่วนนี้จะใช้งานได้ดีกับกัมอกาเซียและสารจำพวกคาร์โบไฮเดรต [21]

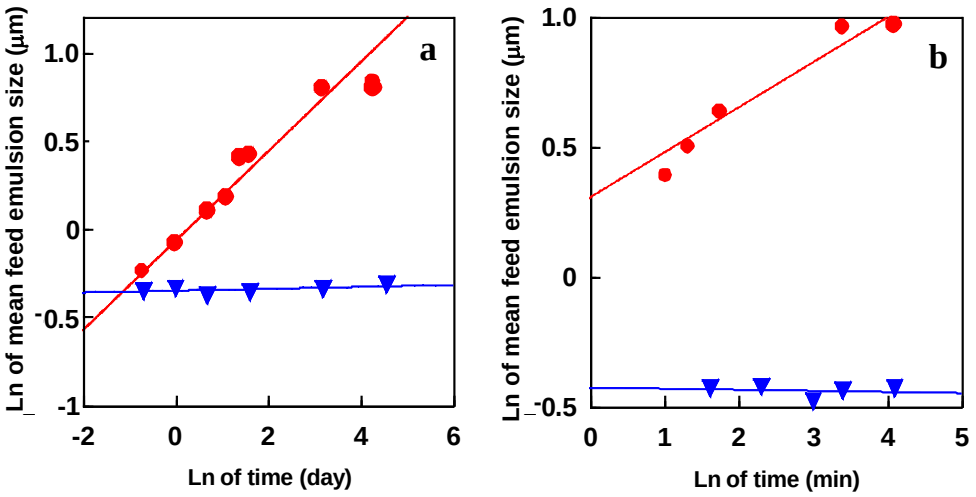
### 6.2.5 ความคงตัวของอิมัลชัน

ความคงตัวของอิมัลชันเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการคงอยู่ของกลิ่นรส หลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เนื่องจากอิมัลชันที่มีความไม่คงตัว เมื่อถูกแรงเฉือนจากหัวฉีดจะทำให้อิมัลชันเกิดการแตกออกเป็นอนุภาคที่เล็กลง และกลับมารวมตัวกันเป็นอนุภาคของเฟสน้ำมันที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งในระหว่างช่วงที่ 1 ของการสูญเสีย จะสังเกตได้ว่าอิมัลชันที่มีความคงตัวต่ำจะเกิดการสูญเสียของกลิ่นรสได้สูงกว่า นอกจากนี้ในช่วงที่ 2 ของการสูญเสียเนื่องจากอนุภาคของเฟสน้ำมันมีการจับตัวกันใหญ่ขึ้น ซึ่งจะทำให้สารห่อหุ้มไม่สามารถห่อหุ้มเฟสน้ำมันได้ทั้งหมด ทำให้เกิดการสูญเสียที่มากขึ้นตามไปด้วย โดยทั่วไปความคงตัวของอิมัลชันจะพิจารณาจากขนาดอิมัลชันที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังแสดงในรูปที่ 11 แสดงถึงขนาดของอิมัลชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ซึ่งจะพบว่า อิมัลชันของน้ำมัน Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) จะมีความคงตัวมากกว่าน้ำมัน Ethyl butyrate (กลิ่นสับปะรด)อย่างชัดเจน

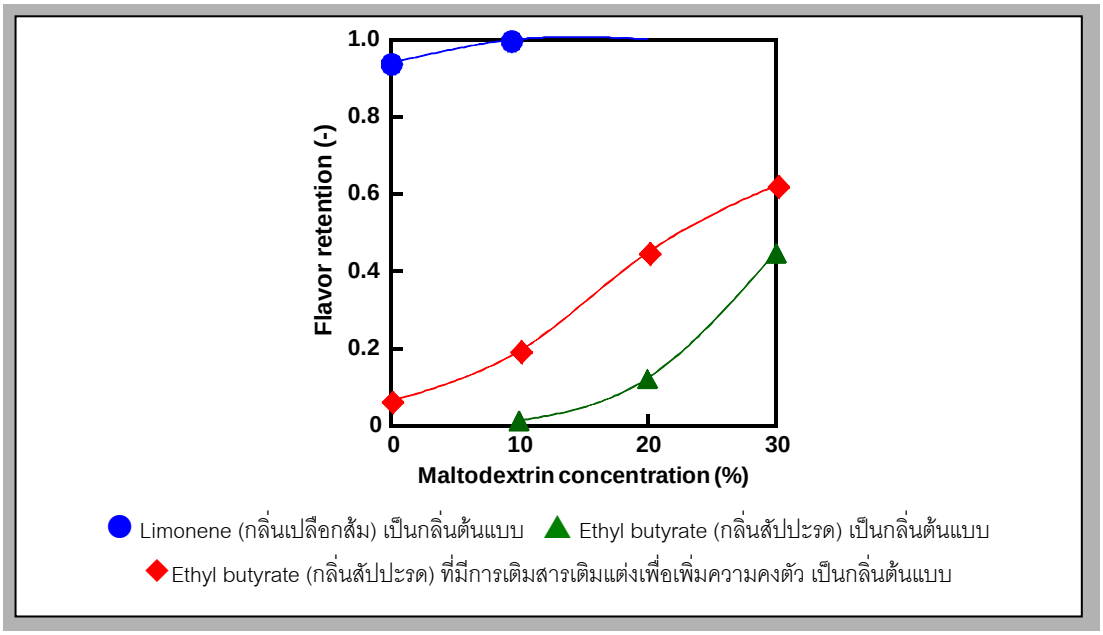
doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

โดยสังเกตจากหน่วยในแกนเวลาของ Limonene เป็นหน่วยวัน แต่ของน้ำมัน Ethyl butyrate หน่วยเป็นชั่วโมง นอกจากนี้ Soottitantawat และคณะ [22] ได้ทำการใส่สารเติมแต่งลงในส่วนของน้ำมันกลิ่นรสเพื่อเพิ่มความคงตัวของอิมัลชันที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งจะพบว่าขนาดของอิมัลชันมีค่าคงที่เมื่อเวลาผ่านไป แสดงถึงความคงตัวสูงของอิมัลชัน นอกจากนี้หลังจากที่นำอิมัลชันของกลิ่นรสดังกล่าวผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย พบว่าร้อยละการคงอยู่ของน้ำมันที่มีการเติมแต่งเพื่อให้อิมัลชันมีความคงตัวมีค่าสูงกว่าอิมัลชันของน้ำมันที่ไม่มีการเติมแต่ง ซึ่งมีความคงตัวต่ำ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าอิมัลชันของ Ethyl butyrateที่มีการใส่สารเติมแต่ง มีค่าความตัวสูงกว่าอิมัลชันของ Limonene ที่ไม่ได้เติมแต่ง ค่าร้อยละของการคงอยู่ของ Ethyl butyrate ก็ยังมีค่าต่ำกว่าดังแสดงในรูปที่ 12 ทั้งนี้นอกจากค่าการคงตัวของอิมัลชันแล้วคุณสมบัติของน้ำมันกลิ่นรส (เช่น ขนาดโมเลกุล ค่าการละลาย และค่าการระเหย) ควรนำมาพิจารณาด้วย ดังอธิบายไว้หัวข้อข้างต้น

**รูปที่ 11** แสดงถึงขนาดของอิมัลชันที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา สำหรับกลิ่นรสต้นแบบ (a) Limonene (กลิ่นเปลือกส้ม) และ (b) Ethyl butyrate กลิ่นสัปปะรด เมื่อ Agacia gum (GA) เป็นสารห่อหุ้ม: ● กลิ่นรสดั้งเดิม ▼ กลิ่นรสที่มีการเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มความคงตัว




**รูปที่ 12** ผลของปริมาณมัลโตเด็กตรินที่เพิ่มเข้าไปในอิมัลชันสายป้อนต่อค่าร้อยละของการคงอยู่ของกลิ่นและรสหลังผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เมื่อ Agacia gum (GA) เป็นสารห่อหุ้มเริ่มต้น [39]




## 6.2.6 อุณหภูมิของอิมัลชันสายป้อน

อุณหภูมิของสายป้อนมีผลต่อการคงอยู่ของน้ำมันกลิ่นรสหลังกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [16], [19], [25], [40], [41] ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิของสายป้อนมีผลต่อค่าความหนืดของอิมัลชันซึ่งจะมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลงซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียของกลิ่นรสในช่วงที่ 1 ของการสูญเสีย ดังอธิบายไว

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

## 6.3 สภาวะของกระบวนการอบแห้ง

### 6.3.1 ชนิดของหัวฉีด

จากลักษณะของการสูญเสียกลิ่นรสระหว่างการอบแห้งแบบพ่นฝอยดังอธิบายข้างต้น โดยการสูญเสียหลักจะเป็นการสูญเสียระหว่างกระบวนการพ่นฝอยในช่วงที่ 1 ดังนั้นลักษณะของหัวฉีดจึงมีผลกระทบต่อความคงอยู่ของกลิ่นรสระหว่างกระบวนการ สำหรับหัวฉีดที่ใช้แรงดันอัด King และคณะ [11] ได้รายงานว่าหัวฉีดที่ฉีดด้วยแรงดันสูงจะทำให้ร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสสูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากที่แรงดันสูงจะทำให้เวลาในการเกิดเป็นละอองฝอยสั้นลงรวมทั้งยังช่วยทำให้ลมร้อนสามารถสัมผัสกับละอองฝอยได้มากขึ้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้การเกิดเยื่อเลือกผ่านที่เร็วขึ้นทำให้เกิดการสูญเสียในช่วงที่ 1 ลดลง ในทำนองเดียวกันสำหรับหัวฉีดที่อาศัยแรงเหวี่ยง ที่แรงเหวี่ยงหรือที่ความเร็วรอบที่สูงจะทำให้การเกิดเป็นละอองฝอยที่เร็วขึ้นและสามารถสัมผัสกับลมร้อนได้มากขึ้นส่งผลให้การสูญเสียของกลิ่นรสลดลง [42]

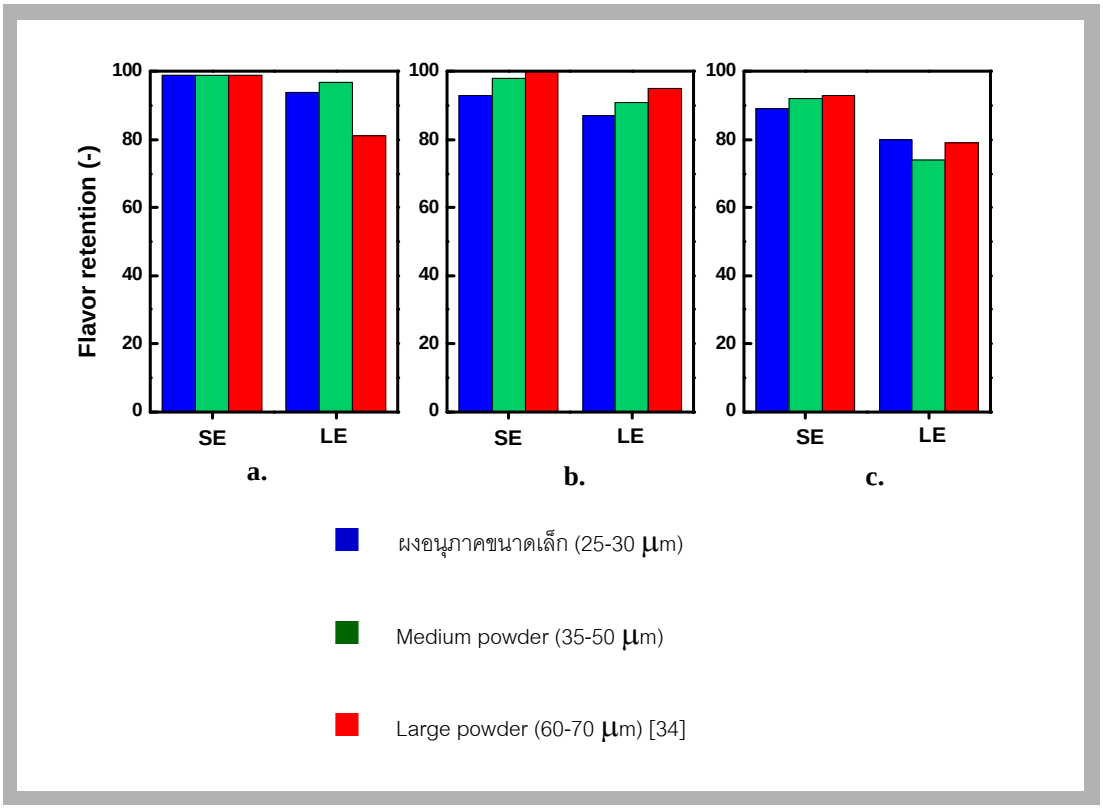
### 6.3.2 ขนาดของละอองฝอย

เนื่องด้วยขนาดของละอองฝอยขึ้นอยู่กับสภาวะของหัวฉีดดังกล่าวข้างต้น โดยที่หัวฉีดอาศัยแรงดันที่แรงดันสูง หรือแบบเหวี่ยงที่ความเร็วรอบสูง ทำให้การเกิดเป็นละอองฝอยได้เร็วขึ้นและได้ขนาดของละอองฝอยที่ได้จะมีขนาดเล็กลงตามไปด้วย ซึ่งทำให้การเกิดเยื่อเลือกผ่านที่เร็วขึ้นจากเวลาที่ใช้ในการเกิดเป็นละอองที่สั้นกว่ารวมถึงพื้นที่ผิวสัมผัสกับลมร้อนที่มากขึ้น ส่งผลให้ค่าการสูญเสียของกลิ่นรสในช่วงที่ 1 มีปริมาณลดลง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากละอองฝอยได้รับความร้อนที่อัตราที่สูงกว่าก็จะทำให้ การสูญเสียในช่วงที่ 2 และ 3 อาจมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย ทำให้เป็นการยากที่สรุปผลของขนาดของละอองฝอยต่อการสูญเสียกลิ่นรสนี้โดยเฉพาะในระบบที่ลักษณะที่แตกต่างกัน ดังในรูปที่ 13 ดังนั้นจึงมีผลงานวิจัยที่แสดงถึงผลของขนาดของละอองฝอยต่อร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสมีผลที่ไม่สอดคล้องกัน เช่นมีรายงานถึงร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสที่มากขึ้นกับขนาดของฝอยละอองที่มากขึ้นตามไปด้วย [16], [40], [43] แต่ Reineccius และคณะ [21] และ Sootitantawat และคณะ [34] รายงานการไม่มีผลกระทบของขนาดฝอยละอองต่อการสูญเสียกลิ่นรสระหว่างกระบวนการ

### 6.3.3 อุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้ง

เมื่ออุณหภูมิของอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสูงขึ้นจะทำให้การเกิดเยื่อเลือกผ่านที่เร็วขึ้นซึ่งจะทำให้การสูญเสียในช่วงที่ 2 ลดลง แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิของอากาศขาเข้าไม่ควรมีค่าสูงเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดการฟองอากาศขึ้นภายในอนุภาคและอาจทำให้เกิดการขยายตัวและแตกออกในที่สุด ซึ่งจะทำให้มีการสูญเสียกลิ่นรสในช่วงที่ 3 โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมของอากาศขาเข้าอยู่ในช่วง 160-210 องศาเซลเซียส ซึ่งจะให้ผลของร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสไม่ต่างกันมากนัก [19], [23], [35]

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43




**รูปที่** 13 ผลของขนาดของผงอนุภาคกักเก็บที่มีผลต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสที่อนุภาคอิมัลชันสายป้อนของกลิ่นรสที่มีขนาดเล็ก (0.5-0.8 μm: SE) และที่มีขนาดใหญ่ (2.5-3.0 μm: LE) เมื่อ Agacia gum (GA) เป็นสารห่อหุ้มเริ่มต้น (a) Agacia gum + มัลโตเด็กตรน (b) และ แป้งดัดแปร (c) และLimonene (กลิ่นเปลือกส้ม) เป็นกลิ่นต้นแบบ

## 6.3.4 อุณหภูมิของอากาศขาออกเครื่องอบแห้ง

ผลของอุณหภูมิของอากาศขาออกเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยสูงต่อค่าร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสระหว่างกระบวนการอบแห้งนั้น ยังไม่มีรายงานที่ชัดเจนทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิขาออกของเครื่องอบแห้งเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศขาเข้าและอัตราการไหลของอากาศและสารป้อนเป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามผลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าต่อการสูญเสียกลิ่นรสนั้นน่าจะมีความคล้ายคลึงกับกรณีของผลกระทบของอุณหภูมิของอากาศขาเข้ากล่าวคือ ที่อุณหภูมิของอากาศขาออกสูงแสดงถึงอัตราการเกิดเยื่อเลือกผ่านที่เร็วขึ้น ซึ่งจะทำให้การสูญเสียในช่วงที่ 2 ลดลง แต่ถ้ามีค่าสูงเกินไปก็จะให้การสูญเสียในช่วงที่ 3 เนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่างของอนุภาค ดังในรายงานของ Reineccius และ Coulter [23] และ Bhandari และคณะ [30] ที่แสดงถึงการเพิ่มขึ้นของร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสเมื่ออุณหภูมิของอากาศขาออกสูงขึ้น

นอกจากนี้ เนื่องด้วยกลิ่นรสบางชนิดไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่สูงได้ ซึ่งอุณหภูมิขาออกเป็นตัวแปรหนึ่งที่บอกถึงอุณหภูมิสูงสุดของอนุภาคผลิตภัณฑ์ ดังนั้นถ้ากลิ่นรสมีค่าคงตัวต่อความร้อนที่ต่ำ ค่าอุณหภูมิของอากาศขาออกจะถูกกำหนดไว้ที่อุณหภูมิที่ไม่สูงมากเกินไป ถึงแม้ว่าจะได้ค่าการคงอยู่ของกลิ่นรสที่สูงก็ตาม

## 6.3.5 อัตราการไหลของอากาศขาเข้าเครื่องอบแห้ง

อัตราการไหลของอากาศขาเข้าที่สูงจะทำให้อัตราการอบแห้งที่สูงขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการถ่ายเทมวลและความร้อนที่สูงขึ้น จากปั่นป่วนที่มากขึ้นในถังอบแห้ง ดังนั้นที่อัตราการไหลของอากาศขาเข้าที่สูงก็จะทำให้ได้อัตราร้อยละการคงอยู่ของกลิ่นรสที่สูงขึ้นตามไปด้วย จากการที่อัตราการเกิดของเยื่อเลือกผ่านที่เร็วขึ้นทำให้การสูญเสียในช่วงที่ 2 มีค่าลดลง

### 6.3.6 ความชื้นของอากาศขาเข้า

เมื่อความชื้นของอากาศขาเข้ามีค่าสูง ทำให้อัตราการอบแห้งลดลงส่งผลต่อการเกิดเยื่อเลือกผ่านเกิดขึ้นได้ช้าทำให้เกิดการสูญเสียในช่วงที่ 2 มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามผลของความชื้นต่อค่าร้อยละการอยู่ของกลิ่นรสมีค่าไม่มากนัก ซึ่งส่วนใหญ่ความชื้นของอากาศขาเข้าจะถูกนำมาพิจารณาต่อ คุณสมบัติและความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับมากกว่า

# กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (สกอ.) ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ (NANOTEC) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และ ศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนุภาค คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้เงินทุนสนับสนุนวิจัยแก่ผู้เขียนในงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีการกักเก็บ

doi:10.4186/ejth.2009.1.3.43

# บรรณานุกรม


[1] G. V. Barbosa-Cánovas, E. Ortega-Rivas, P. Juliano, and H. Yan, *Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality*. New York: Springer-Verlag, 2005, pp. 199–220.

[2] G. Reineccius, *Flavor Chemistry and Technology*. 2nd ed. New York: CRC Press, 2005, pp. 351-384.

[3] J. Ubbink and A. Schoonman, "Flavor Delivery Systems, " in *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, New York: Willey, 2003.

[4] F. Shahidi and X. Q. Han, "Encapsulation of food ingredients," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 33, no. 6, pp. 501-547, 1993.

[5] A. H. King, "Encapsulation of Food Ingredients: A Review of Available Technology, Focusing on Hydrocolloids," in *Potential Failure Mode and Effect Analysis:Encapsulation and controlled releale of foo ingredients*, S. J. Risch and G. A. Reineccius, Ed. Washington, DC: American Chemical Society, 1995, pp. 26–39.

[6] B. F. Gibbs, S. Kermasha, I. Alli, and C. N. Mulligan, "Encapsulation in the food industry: A review," *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, vol. 50, no. 3, pp. 213–224, 1999.

[7] K. Masters, Spray Drying Handbook. 5th ed. New York: Longman Scientific & Technical, 1991.

[8] T. Furuta, H. Hayashi, and T. Ohashi, "Some criteria of sprat dryer design for food liquid," *Drying Technology*, vol. 12, no. 1-2, pp. 151–177, 1994.

[9] H. A. C. Thijssen and W. H. Rulkens, Retention of aromas in drying food liquids. DeIngenieur, JRG 80, NR 47, pp. 45–56, 1968.

[10] W. J. Coumans, P. Kerkhof, and S. Bruin, "Theoretical and practical aspects of aroma retention in spray drying and freeze drying," *Drying Technology*, vol. 12, no. 1-2, pp. 99–149, 1994.

[11] C. J. King, "Spray drying: retention of volatile compounds revisited," *Drying Technology*, vol.13, no. 5-7, pp. 1221–1240, 1995.

[12] T. Furuta, S. Tsujimoto, M. Okazaki, and R. Toei, "Effect of drying on retention of ethanol in maltodextrin solution during drying of a single droplet," *Drying Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 311–327, 1983.

[13] J. M. Flink and M. Karel, "Effects of process variables on retention of volatiles in freeze-drying," *Journal of Food Science*, vol. 35, no. 4, pp. 444–447, 1970.

[14] F. Franks, R. H. M. Hately, and S. F. Mathias, "Material science and the production of shelf-stablebiologicals," *BioPharm*, vol. 4, no. 2, pp. 38–42, 1991.

[15] J. P. Hecht and C. J. King, "Spray drying: Influence of developing drop morphology on drying rates and retention of volatile substances. 1. Single-Drop Experiments," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 39, no. 6, pp. 1756–1765, 2000.

[16] M. Sivetz and H. E. Foote, *Coffee Processing Technology*. Westport : AVI Publishing, 1963.

[17] L. C. Menting and B. Hoogstad, "Volatiles retention during the drying of aqueous carbohydratesolutions," *Journal of Food Science*, Vol. 32, no. 1, pp. 87–90, 1967.

[18] S. K. Chandrasekaran and C. J. King, "Volatiles retention during drying of food liquids," *American Institute of Chemical Engineers Journal,* vol. 18, no. 3, pp. 520-526, 1972.

[19] J. L. Bomben, S. Bruin, H. A. C. Thijssen, and R. L. Merson, "Aroma recovery and retention in concentration and drying of foods," *Advances in Food Research*, vol. 20, pp. 1-111, 1973.

[20] M. M. Leahy, S. Anandaraman, W. E. Bangs, and G. A. Reineccius, "Spray drying of food flavors,II. A comparison of encapsulating agents for the drying of artificial flavors," *Perfume & Flavor*, vol. 8, no. 5, pp. 49–52, 1983.

[21] G. A. Reineccius, "Spray-drying of food flavors. "in *Flavor Encapsulation*, S. J. Risch and G. A. Reineccius, Ed. Washington DC: American Chemical Society, 1988, pp. 55-66.

[22] A. Soottitantawat, H. Yoshii, T. Furuta, M. Ohgawara, and P. Linko, "Microencapsulation by spray drying: Influence of emulsion size on the retention of volatile compounds," *Journal of food science*, vol. 68, no. 7, pp. 2256–2262, 2003.

[23] G. A. Reineccius and S. T. Coulter, "Flavor retention during drying," *Journal of Dairy Science*, vol. 52, no. 8, pp. 1219-1223, 1969.

[24] L. C. Menting, B. Hoogstad, and H. A. C. Thijssen, "Diffusion coefficients of water and organic olatiles in carbohydrate-water systems," *International Journal of Food Science & Technology,* vol. 5, no. 2, pp. 111-126, 1970.

[25] W. H. Rulkens and H. A. C. Thijssen, "The retention of organic volatiles in spray-drying aqueous carbohydrate solutions," *International Journal of Food Science & Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 95–105, 1972.

[26] M. Rosenberg, I. J. Kopelman, and Y. Talmon, "Factors affecting retention in spray-drying microencapsulation of volatile materials, " *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 38, no. 5, pp. 1288–1294, 1990.

[27] R. A. Buffo and G. A. Reineccius, "Optimization of gum acacia/modified starch/maltodextrin blends for the spray drying of flavors," *Perfumer and Flavorist*, vol. 25, no. 4, pp. 45-54, 2000.

[28] X. D. Liu, et al., "Microencapsulation of emulsified drophobic flavors by spray drying," *Drying Technology*, vol. 19, no. 7, pp. 1361–1374, 2001.

[29] S. Apinan, et al., "Microencapsulation of *l*-menthol by spray drying and its release characteristics," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 6, no. 2, pp. 163-170, 2005.

[30] B. R. Bhandari, E. D. Dumoulin, H. M. J. Richard, I. Noleau, and A. M. Lebert, "Flavor encapsulation by spray drying: Application to citral and linalyl acetate, " *Journal of Food Science*, vol. 57, no. 1, pp. 217–221, 1992.

[31] G. A. Reineccius and W. E. Bangs, "Spray drying of food flavors. III. Optimum infeed concentrations for the retention of artificial flavors, " *Perfume and Flavorist*, vol. 10, no. 1, pp. 27–29, 1985.

[32] S. J. Risch and G. A. Reineccius, "Spray-dried orange oil: Effect of emulsion size on flavor retention and shelf stability," in *the series analytic: In Flavor Encapsulation*, ACS Symposium Series No. 370, S. J. Risch and G. A. Reineccius, Ed. Washington, DC: American Chemical Society, 1988, pp. 67-77.

[33] T. Y. Sheu and M. Rosenberg, "Microencapsulation by spray drying ethyl caprylate in whey protein and carbohydrate wall systems, " *Journal of Food Science,* vol. 60, no. 1, pp. 98-103, 1995.

[34] A. Soottitantawat, F. Bigeard, H. Yoshii, T. Furuta, M. Ohgawara, and P. Linko, "Influence of emulsion and powder size on the stability of encapsulated D-limonene by spray drying, " *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 107–114, 2005.

[35] N. Blakebrough and P. A. L. Morgan, "Flavour loss in the spray drying of emulsions," *Birmingham University Chemical Engineering,* vol. 24, no. 3, pp. 57-64, 1973.

[36] R. Brooks, "Spray drying of flavoring materials, " *Birmingham University Chemical Engineering,* vol. 16, no. 1, p. 11, 1965.

[37] S. J. Risch, "Encapsulation: overview of uses and techniques, " in *Encapsulation and Controlled Release of Food Ingredients*, S. J. Risch and G. A. Reineccius, Ed. Washington DC: American Chemical Society, 1995, pp. 2–7.

[38] B. F. McNamee, E. D. O'Riordan, and M. O'Sullivan, "Emulsification and microencapsulation properties of gum arabic, " *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 46, no. 11, pp. 4551–4555, 1998.

[39] H. Yoshii, et al., "Flavor release from spray-dried maltodextrin/gum arabic or soy matrices as a function of storage relative humidity," *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, vol. 2, no. 1, pp. 55–61, 2001.

[40] H. A. C. Thijssen, "Effect of process conditions in drying coffee extract and other liquid foods on aroma retention," *Colloquim International Chemistry Caffeinated,* vol. 8, pp. 222-233, 1973.

[41] T. G. Kieckbusch and C. J. King, "Volatiles loss during atomization in spray drying," *American Institute of Chemical Engineers Journal, vol.* 26, no. 5, pp. 718-725, 1980.

[42] J. Finney, R. Buffo, and G. A. Reineccius, "Effect of type of atomization and processing temperatures on the physical properties and stability of spray-dried flavors, " *Journal of Food Science*, vol. 67, no. 3, pp. 1108–1114, 2002.

[43] Y. I. Chang, J. Scire, and B. Jacobs, "Effect of particle size and microstructure properties on encapsulated orange oil, "in *the series analytic: Flavor Encapsulation,* S.J. Risch and G.A. Reineccius, Ed. Washington DC: American Chemical Society, 1988, pp. 87–102.