บทที่ 5

วิจารณ์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมะนาวสด

จากการวิเคราะห์สมบัติของน้ำมะนาวสดจากมะนาวพันธุ์แป้น พบว่า ผลการวิเคราะห์ค่า total soluble solids, และ pH ของน้ำมะนาวสด มีค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ของอรัญญา รัสตถิพันธุ์(2534) ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณกรดและวิตะมินซี ผลที่ได้แตกต่างไปบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมะนาวที่นำมาวิเคราะห์มีความแตกต่างกันของสถานที่ปลูก ช่วงฤดูกาล ฯลฯ ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณ d-limonene พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ของ Askar และคณะ (1981) ที่ได้วิเคราะห์ปริมาณ d-limonene ในน้ำมะนาวที่สกัดจากผลมะนาวที่ปลูกในประเทศอียิปต์โดยใช้ Bertuzzi juice processing รายละเอียดดังตารางที่ 2.3 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากมะนาวที่นำมาวิเคราะห์มีพันธุ์และสถานที่ปลูกต่างกัน นอกจากนี้วิธีการที่ใช้ในการสกัดน้ำมะนาวมีความแตกต่างกัน จึงทำให้ปริมาณสารให้กลิ่นรสในน้ำมะนาวมีความแตกต่างกัน ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณ citral ในน้ำมะนาวนั้น ยังไม่มีข้อมูลรายงานมาก่อน

5.2 การศึกษาผลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินและวิธีการแช่แข็งต่อคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์

งานวิจัยนี้เลือกใช้มอลโตเดกซ์ทรินเป็น drying aid เนื่องจากสามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาไม่แพงนักคือ กิโลกรัมละ 35 บาท มีลักษณะเป็นผงแห้ง สีขาว สามารถละลายน้ำได้ดีและให้สารละลายใสไม่มีสี นอกจากนี้มอลโตเดกซ์ทรินยังมีส่วนช่วยเพิ่มความคงตัวของสารให้กลิ่นรสระหว่างกระบวนการทำแห้ง (Rulkens and Thijseen, 1972; Kopelman, Meydav and Wilmersdorf, 1977) และช่วยลดการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้(Juan

et al., 1987) Bangs และ Reineccius (1981) ศึกษาความคงตัวของสารให้กลิ่นรสต่างๆ (octane, 2-octanone, methyl-2-octenoate, oct-1-en-3-ol, octanol, thiophene,2-ethylthiophene,thiazole,2,5-dimethylpyrazine, benzaldehyde และ 5-methylfurfural) ในสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ตั้งแต่ 10 ถึง 36.5 เมื่อผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นกระจายพบว่า ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสทั้งหมด(overall retention) ในสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE 15 มีค่าสูงที่สุด และความคงตัวของสารให้กลิ่นรสในสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE ตั้งแต่ 20 ถึง 36.5 มีค่าลดลงตามลำดับ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้มอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE ประมาณ 17 ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสในสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE 17 แม้ว่าจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อใช้มอลโตเดกซ์ทรินที่มี DE 15 แต่ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสยังคงอยู่ในระดับสูง จากการทดลองในขั้นต้น พบว่าไม่สามารถทำแห้งน้ำมะนาวแบบเยือกแข็งภายใต้ภาวะที่ใช้ในการทดลองได้อย่างสมบูรณ์ เมื่อปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่เติมในน้ำมะนาวน้อยกว่า 15% (w/w)คือผลิตภัณฑ์ที่ได้มีลักษณะแห้งไม่สม่ำเสมอและดูดความชื้นอย่างรวดเร็วหลังจากนำออกจากเครื่อง freeze dryer และการนำออกจากถาด (detray) ทำได้ยาก นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ยังมีสีเหลืองเข้มและบดให้เป็นผงละเอียดได้ยากอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงแปรปริมาณปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่เติมในน้ำมะนาวในช่วง 15-35% (w/w) ส่วนภาวะต่างๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการทำแห้งนั้นทำที่ภาวะเดียว ดังรายละเอียดที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 3 ทั้งนี้เนื่องจากเครื่อง freeze dryer ที่ใช้ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดในการตั้งอุณหภูมิที่ใช้โดยอุณหภูมิสุดท้ายของ plate (plate temperature) ไม่ควรเกิน 40°C เมื่อพิจารณาระบบการถ่ายเทความร้อนให้กับ plate ดังรูปที่ 1.1 จะเห็นว่าเป็นระบบที่ไม่ได้ให้ความร้อนโดยตรงกับ plate แต่ใช้การถ่ายเทความร้อนจาก heater ผ่าน heat transfer medium มายัง plate อีกทีหนึ่ง ส่วนการหล่อเย็นของ medium นี้ จะมีระบบ cooling โดยให้ medium ถ่ายเทความร้อนให้กับฟรีออน ฟรีออนจะทำหน้าที่เป็นทั้งสารที่ใช้หล่อเย็น heat transfer medium และเป็น refrigerant ในระบบ condenser ของเครื่อง freeze dryer ด้วย ระบบการหล่อเย็นฟรีออนจะใช้ compressor การเพิ่มอุณหภูมิของ plate ให้มากกว่า 40°C นั้น compressor จะต้องทำงานหนัก ซึ่งอาจมีผลให้อายุการใช้งานของ compressor สั้นลง ประกอบกับจากผลงานวิจัยของ Jabarit(1970) ที่รายงานว่าในการทำแห้งน้ำส้มแบบเยือกแข็งควรรักษาอุณหภูมิสุดท้ายให้อยู่ในช่วง 25-35°C จึงจะทำให้ได้

ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้อุณหภูมิสุดท้ายของ plate เท่ากับ 35°C เพื่อไม่ให้ compressor ต้องทำงานหนักและระยะเวลาที่ใช้ในการทำแห้งไม่นานเกินไป

ส่วนการศึกษาผลของวิธีการแช่แข็งต่อคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์นั้น ใช้วิธีการแช่แข็ง 2 วิธีคือ การแช่แข็งใน freezing room ที่อุณหภูมิ -18°C เป็นเวลา 20 ชั่วโมง และการแช่แข็งใน air-blast freezer ที่อุณหภูมิ -32°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากการทดลองวัดอัตราการลดลงของอุณหภูมิของน้ำมะนาวที่เติมปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณ 15 -35% (w/w) ที่แช่แข็งด้วยวิธีดังกล่าว พบว่า อัตราการลดลงของอุณหภูมิโดยเฉลี่ยมีค่าประมาณ 0.2°C/min สำหรับวิธีการแช่แข็งใน freezing room (slow freezing) และ 2°C/min สำหรับวิธีการแช่แข็งใน air-blast freezer (fast freezing) ในกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งนั้น วัตถุดิบจะถูกนำมาทำให้อยู่ในสภาพแช่แข็งก่อน อุณหภูมิในการแช่แข็งจะต้องต่ำกว่า eutectic point ของตัวอย่าง สำหรับตัวอย่างที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์มากกว่า 1 ชนิด เมื่อนำมาแช่แข็งจะมี eutectic point หลายจุด ดังนั้นจึงควรหา eutectic point ที่ต่ำที่สุด เพื่อเป็นตัวแทนของ freezing point ของตัวอย่างทั้งหมด (VirTis, 1977) freezing point ของน้ำมะนาวมีค่าโดยเฉลี่ยประมาณ -1.67°C (Mohsenin, 1980) การเติมมอลโตเดกซ์ทรินในสารละลายต่างๆ จะมีผลให้ freezing point มีค่าต่ำลง (Whistler *et al.*, 1984) แม้ว่า freezing point ของน้ำมะนาวจะมีค่าต่ำลง แต่อุณหภูมิแช่แข็งที่ใช้ในการทดลองมีค่าต่ำกว่า freezing point ของน้ำมะนาวมาก จึงน่าจะเพียงพอที่จะทำให้น้ำมะนาวแข็งตัวได้ จากการทดลองพบว่า หลังจากที่แช่แข็งน้ำมะนาวใน freezing room(-18°C) นาน 20 ชม. อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของน้ำมะนาวลดลงถึงประมาณ -16°C และน้ำมะนาวอยู่ในสภาพแข็งตัว ส่วนน้ำมะนาวที่แช่แข็งใน air-blast freezer (-32°C) นาน 1 ชม. อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของน้ำมะนาวลดลงถึงประมาณ -28°C และน้ำมะนาวอยู่ในสภาพแข็งตัวเช่นกัน

การศึกษาผลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินและวิธีการแช่แข็ง ต่อคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์นั้น จะศึกษาคุณภาพในแง่ของ % yield ของการทำแห้ง ปริมาณกรด ปริมาณความชื้น การดูดความชื้น และคุณภาพด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์

5.2.1 ผลต่อ % yield ของการทำแห้งและปริมาณกรดของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์

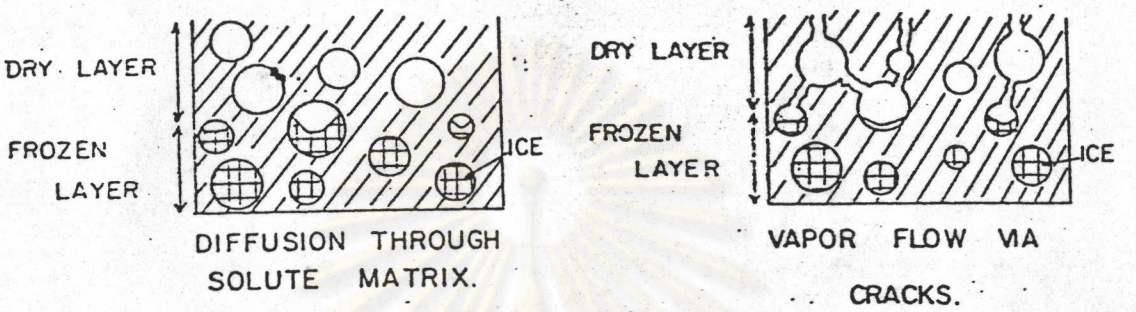
จากผลการทดลองดังตาราง4.2.3 จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน

ที่เติมในน้ำมะนาวจาก 15% จนถึง 35%(w/w) จะทำให้ %yield ของการทำแห้งเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะในการคำนวณ %yield ของการทำแห้งนั้น จะคิดจากร้อยละของน้ำหนักผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์ที่ได้ต่อน้ำหนักรวมของน้ำมะนาวและมอลโตเดกซ์ทรินก่อนการทำแห้ง ดังนั้นจึงมีผลให้ %yield ของการทำแห้งมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน แต่ในทางกลับกันจะทำให้ปริมาณกรดของผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์ลดลง ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจาก dilution effect

5.2.2 ผลต่อปริมาณความชื้นและการดูดความชื้นของผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์

จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติดังตารางที่4.2.4 พบว่าอิทธิพลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน อิทธิพลของวิธีการแช่แข็งและอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย มีผลต่อปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์

เมื่อพิจารณาผลของวิธีการแช่แข็งก่อนการทำแห้ง(pre-freezing)ดังตารางที่ 4.2.5 จะเห็นว่าผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์ที่มีการเติมปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณเท่ากันและใช้วิธีการแช่แข็งต่างกัน การใช้วิธีการแช่แข็งแบบอัตราเร็วสูง(fast freezing)จะมีผลให้ปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวพรีซดรายด์ที่ได้ต่ำกว่า เมื่อใช้วิธีการแช่แข็งแบบอัตราเร็วต่ำ (slow freezing) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การแช่แข็งด้วยอัตราเร็วสูงทำให้การระเหิดของผลึกน้ำแข็งเกิดขึ้นได้ดีกว่า โดยปกติแล้วการแช่แข็งด้วยอัตราเร็วต่ำ ทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งที่มีขนาดใหญ่กว่าการแช่แข็งด้วยอัตราเร็วสูง ผลก็คือช่องว่างที่เกิดจากการระเหิดของผลึกน้ำแข็งมีขนาดใหญ่ด้วย การถ่ายเทของมวลระหว่างการทำแห้งหรือการระเหิดจึงน่าจะเกิดได้ดีกว่า อย่างไรก็ตาม การแช่แข็งด้วยอัตราเร็วต่ำนั้น จะมีการเคลื่อนที่หรือการแพร่ของตัวถูกละลายเกิดขึ้นระหว่างการแช่แข็ง ซึ่งจะทำให้เกิดฟิล์มที่บริเวณ surface ฟิล์มที่เกิดขึ้นนี้จะขัดขวางการทำแห้ง โดยทำให้การระเหิดเกิดขึ้นได้น้อยลง แต่การแช่แข็งด้วยอัตราเร็วสูงสามารถป้องกันการเกิดฟิล์มเช่นนี้ได้ นอกจากนี้ถ้าการแช่แข็งทำให้เกิดผลึกน้ำแข็งในลักษณะที่แยกเป็นผลึกเดี่ยวๆ ซึ่งล้อมรอบด้วย solid matrix ดังนั้นไอจากการระเหิดของน้ำแข็งจะต้องแพร่ผ่าน solid matrix ดังรูปที่ 5.2.1 การแช่แข็งด้วยอัตราเร็วสูงจะทำให้เกิดการแตก (crack) ของ solid matrix การระเหิดจึงเกิดได้ดีขึ้น (Karel and Flink, 1973)



รูปที่ 5.2.1 Types of vapor flow in freeze drying
ที่มา : Karel and Flink (1973)

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ ที่ใช้วิธีการแช่แข็งวิธีเดียวกัน แต่แปรปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน (ดังตารางที่ 4.2.5) จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน มีผลให้ความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่ามอลโตเดกซ์ทรินช่วยให้การทำแห้งเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น

จากการศึกษาผลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินและวิธีการแช่แข็ง ต่อการดูดความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ ในระบบที่ควบคุมอุณหภูมิประมาณ 25°C และความชื้นสัมพัทธ์ 75% จะเห็นว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีการดูดความชื้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในช่วง 20 ชั่วโมงแรก (ดังรูปที่ 4.2.1-4.2.2) ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำแห้งแบบเยือกแข็งจะมีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ซึ่งเป็นช่องว่างจากการระเหิดของน้ำแข็ง จึงทำให้การดูดความชื้นเป็นไปอย่างรวดเร็ว จากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (ดังตารางที่ 4.2.7) พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์คือ ปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่เติมในน้ำมะนาว การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินจะมีผลให้การดูดความชื้นน้อยลง โดยการเติม

มอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณ 35% (w/w) ทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ได้มีค่า eq. water absorption ต่ำที่สุด ซึ่งไม่แตกต่างจากเมื่อเติมมอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณ 25% และ 30% (w/w) อย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$) แต่แตกต่างจากเมื่อเติมในปริมาณ 15% และ 20% (w/w) อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)(ดังตารางที่ 4.2.8) การที่ค่า eq. water absorption มีค่าน้อย แสดงว่ามอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณที่ใช้จะช่วยรักษาสภาพในการเป็นผงแห้งของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ได้ดี จึงน่าจะมีการเสื่อมเสียช้ากว่า สามารถเก็บไว้ได้นานขึ้น จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า มอลโตเดกซ์ทรินมีคุณสมบัติของการเป็น drying aid ที่ดีคือช่วยลดการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ การดูดความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์นี้นอกจากจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการจับตัวเป็นก้อน ซึ่งจะทำให้ลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคแล้ว ยังเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดการยุบตัว (collapse) ของโครงสร้าง dried powder matrix ซึ่งจะทำให้มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสออกจากโครงสร้างนี้ด้วย(Tsourouflis *et al.*,1976) สมบัติด้านการดูดความชื้นของมอลโตเดกซ์ทรินขึ้นอยู่กับค่า DE โดยมอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำกว่าจะดูดความชื้นน้อยกว่า แต่การใช้มอลโตเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ต่ำมากๆ จะมีปัญหาในการละลายและทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นมาก (Whislter *et al.*, 1984) การใช้มอลโตเดกซ์ทรินเป็น drying aid ในการทำแห้ง นอกจากจะช่วยลดปริมาณการดูดความชื้นของผลิตภัณฑ์ จากผลการทดลองของ Juan และคณะ(1987) พบว่า การใช้มอลโตเดกซ์ทริน(DE14) ปริมาณ 10% เป็น drying aid ในชาผงสำเร็จรูปละลายทันที ช่วยให้ค่าความชื้นวิกฤตและ critical water activity ซึ่งเป็นความชื้นและ water activity ที่ผลิตภัณฑ์เริ่มจับตัวเป็นก้อนตามลำดับ เพิ่มขึ้นจาก 7.5% เป็น 9.0% และ 0.42 เป็น 0.52 ตามลำดับ ทำให้สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานขึ้น

5.2.3 ผลต่อคุณภาพด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินและวิธีการแช่แข็ง ต่อคุณภาพด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ โดยวิธีวิเคราะห์ทางเคมีและวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัสควบคู่กัน โดยในหัวข้อ 5.2.3 นี้ จะกล่าวถึงเฉพาะผลการวิเคราะห์ทางเคมี สารให้กลิ่นรสที่เลือกติดตามวัดปริมาณคือ citral และ d-limonene ทั้งนี้เนื่องจากมีรายงานว่า citral เป็นสารที่ให้กลิ่นรสที่เฉพาะตัวของมะนาวฝรั่ง (lemon) และมะนาว (lime) (Askar *et al.*, 1981) และเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของ lime essence(Moshonas and

Shaw, 1972) ส่วน d-limonene เป็นดัชนีสำคัญที่ชี้ให้เห็นถึงการเสื่อมคุณภาพด้านกลิ่นรส เพราะ d-limonene ถูกออกซิไดส์ได้ง่ายและทำให้เกิดกลิ่นรสที่ผิดปกติ(off-flavor)(Hall, 1973) ปฏิกิริยา autooxidation ของ limonene ไปเป็น carvone และ carveol เป็นสาเหตุสำคัญของการเสื่อมเสียของ citrus oil (Guenther, 1948)

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.9 และ 4.2.12 จะเห็นว่า อิทธิพลของวิธีการแช่แข็ง อิทธิพลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทริน และอิทธิพลร่วมของตัวแปรทั้งสอง มีผลต่อ %citral และ %d-limonene retention อย่างมีนัยสำคัญ โดยเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของตัวแปรทั้งสองจะเห็นว่า การใช้วิธีการแช่แข็งแบบ slow freezing และเติมมอลโตเดกซ์ทรินในน้ำมะนาว 30% หรือ 35% (w/w) มีผลให้ %citral และ %d-limonene retention มีค่าสูงที่สุด ซึ่งแตกต่างจากกรณีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)ดังตารางที่ 4.2.10 และ 4.2.14 โดยการใช้วิธีการแช่แข็งแบบ slow freezing ร่วมกับการเติมมอลโตเดกซ์ทริน 30% ทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ได้มีค่า %citral และ %d-limonene retention ประมาณ 74.31 และ 47.56 ตามลำดับ และเมื่อใช้วิธีการแช่แข็งแบบเดียวกันแต่เพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินเป็น 35% ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ได้มีค่า %citral และ %d-limonene retention ประมาณ 76.50 และ 48.04 ตามลำดับ จะเห็นว่าการทำแห้งแบบเยือกแข็งจะช่วยรักษาสารให้กลิ่นรสไว้ได้ดี ทำให้มีสารให้กลิ่นรสเหลืออยู่หลังกระบวนการทำแห้งในปริมาณค่อนข้างสูงทั้งนี้เนื่องจากเป็นการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำ ปราณี ประกิตเตชะกุล(2525)ได้ทดลองทำแห้งน้ำมะนาวโดยวิธีพ่นกระจาย (spray drying) พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสไปมากในกระบวนการทำแห้ง สำหรับกลไกในการรักษาสารให้กลิ่นรสในกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งนั้น มีผู้อธิบายไว้หลายกลไก แต่ที่เป็นที่ยอมรับและมีผลงานวิจัยสนับสนุนเป็นจำนวนมาก คือ entrapment mechanism (Flink and Karel,1970) ซึ่งอธิบายว่า สารให้กลิ่นรส (volatile compounds) จะถูกตรึง (immobilized) ไว้ภายใน microregion ซึ่งเป็นบริเวณที่ประกอบด้วยสารละลายคาร์โบไฮเดรตและสารให้กลิ่นรสที่เข้มข้น และเมื่อความชื้นภายใน microregion ลดลง เนื่องจากกระบวนการแช่แข็งและการทำแห้งจะเกิดการเชื่อมต่อกัน (association) ของโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนที่จะควบคุมการแพร่ผ่านของสารให้กลิ่นรส ตัวอย่างของงานวิจัยที่สนับสนุนกลไกนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Flink และ Gejl-Hansen (1972) ซึ่งได้ทดลองทำแห้งสารละลาย

มอลโตเดกซ์ทรินเข้มข้น 20% (w/v) ที่มี hexanal 1%(v/v) ผสมอยู่ โดยใช้วิธีทำแห้งแบบเยือกแข็ง เมื่อนำผลิตภัณฑ์แห้งที่ได้มาวิเคราะห์ด้วย scanning electron microscopic technique และ optical microscopic technique สามารถตรวจพบ liquid hexanal ในรูป droplet ภายในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของมอลโตเดกซ์ทริน นอกจากนี้ในกาแฟที่ผ่านการทำแห้งแบบเยือกแข็งก็สามารถตรวจพบ droplet ขนาดเล็กเป็นจำนวนมากอยู่ภายในโครงสร้างที่เป็นรูพรุนเช่นกัน แม้ว่าจะยังไม่มีผู้ศึกษาให้แน่ชัดว่า droplet นั้นเป็นสารให้กลิ่นรสที่เหลืออยู่หลังการทำแห้ง แต่ก็พอคาดเดาได้ว่า droplet เหล่านี้คือ coffee oil และ coffee aroma substances

เมื่อพิจารณาผลของวิธีการแช่แข็ง ต่อความคงตัวของสารให้กลิ่นรสทั้งสองระหว่างกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งดังตารางที่ 4.2.10 และ 4.2.14 จะพบว่า วิธีการแช่แข็งแบบ slow freezing ทำให้ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสสูงกว่าเมื่อใช้วิธีการแช่แข็งแบบ fast freezing ที่ระดับปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินเท่าๆ กัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Flink และ Karel (1970) รวมทั้ง Gerschensen และคณะ(1979)

Etzel และ King(1980) อธิบายกลไกการสูญเสียสารให้กลิ่นรสในสารละลายคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งว่า เมื่ออุณหภูมิของสารละลายคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่า freezing point สารละลายจะเกิดการแยกเป็น 2 phase คือ pure ice phase และ concentrated amorphous solution (CAS) ในกรณีที่สารให้กลิ่นรส(volatile compounds) ละลายเป็นเนื้อเดียวกันในสารละลาย สารให้กลิ่นรสนั้นจะถูกตรึงไว้ภายใน CAS ทั้งหมด การสูญเสียสารให้กลิ่นรสสามารถอธิบายได้ด้วย selective diffusion mechanism โดยการแพร่ของ volatile compounds จากภายใน CAS ไปยังบริเวณ CAS-ice interface ซึ่งเป็นบริเวณที่สัมผัสกับความดันต่ำ จึงทำให้มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสไประหว่างกระบวนการทำแห้งพร้อมกับการระเหิดของน้ำแข็ง สำหรับในกรณีที่ volatile compounds ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันในสารละลาย เช่น citrus juice ซึ่งมี volatile compounds รวมตัวกันเป็น immiscible organic phase เมื่อนำไปแช่แข็ง volatile compounds เหล่านี้จะอยู่ในลักษณะของ droplets ซึ่งส่วนหนึ่งอยู่ภายใน CAS และอีกส่วนหนึ่งอยู่ที่บริเวณ CAS-ice interface volatile droplets ส่วนที่อยู่ภายใน CAS จะมีการสูญเสียไประหว่างกระบวนการทำแห้งได้ เมื่อ volatile

droplets นั้นเกิดการแพร่มายังบริเวณ interface หรือเมื่อขนาดของ volatile droplets มีขนาดใหญ่จึงทำให้มีโอกาสสัมผัสกับ interface ได้ ส่วน volatile droplets ที่อยู่บริเวณ interface จะสูญเสียไปทั้งหมดระหว่างการทำแห้งแบบเยือกแข็ง แต่สำหรับ droplets ที่มีขนาดเล็กๆ จะสามารถเคลื่อนที่เข้าไปภายใน CAS ได้โดย Brownian diffusion จึงไม่สูญเสียไปในกระบวนการทำแห้ง จากงานวิจัยของ Massaldi และ King (1974) ที่ได้ศึกษาความคงตัวของ d-limonene ในการทำแห้งน้ำส้มแบบเยือกแข็ง สามารถสรุปได้ว่า ปริมาณ d-limonene ที่เหลืออยู่ทั้งหมดหลังจากผ่านกระบวนการทำแห้งขึ้นอยู่กับความคงตัวของ d-limonene ที่อยู่ในรูปของ oil droplets และ homogeneously dissolved d-limonene สำหรับ d-limonene ที่อยู่ในรูป oil droplets นั้นการสูญเสียไประหว่างการทำแห้งจะเกิดขึ้นในกรณีที่ oil droplets นั้นมีโอกาสสัมผัสกับ ice crystal interface หรือเมื่อ oil droplets นั้นเกิดการแพร่ (diffusion) มายังบริเวณ ice crystal interface ก็จะมีโอกาสสูญเสียไปได้เช่นกัน ส่วน d-limonene ที่อยู่ในรูป homogeneously dissolved การสูญเสียไประหว่างการทำแห้งสามารถเกิดขึ้นได้โดย diffusion mechanism

Flink และ Karel (1970) อธิบายผลการทดลองที่พบว่า วิธีการแช่แข็งแบบ slow freezing ช่วยรักษาสารให้กลิ่นรสไว้ได้มากกว่าวิธีแช่แข็งแบบ fast freezing ว่าเป็นเพราะ ในการแช่แข็งแบบ slow freezing ความเข้มข้นของตัวถูกละลายใน microregion จะสูงกว่าเมื่อแช่แข็งแบบ fast freezing เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ของตัวถูกละลายเกิดขึ้นในกระบวนการแช่แข็ง ความเข้มข้นของตัวถูกละลายใน microregion ที่สูงขึ้นนี้จะส่งผลให้การแพร่ของสารให้กลิ่นรสผ่าน microregion น้อยลง จึงมีความคงตัวสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินที่เติมในน้ำมะนาว ต่อความคงตัวของสารให้กลิ่นรสในกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็ง พบว่า การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินมีผลให้ความคงตัวของสารให้กลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ได้มีค่าสูงขึ้น(ดังตารางที่4.2.10 และ 4.2.14) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Rulkens และ Thijseen (1972) ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ในลักษณะเดียวกันกับผลของวิธีการแช่แข็งโดยการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของตัวถูกละลายภายใน microregion หรือ CAS ซึ่งจะช่วยขัดขวางการแพร่ของสารให้กลิ่นรสจากภายใน CAS มายังบริเวณ ice crystal อย่างไรก็ตามจาก

การศึกษาของ Rulkens และ Thijseen (1972) พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินในช่วง 5-20%(w/w) จะมีผลให้ความคงตัวของ methanol, n-propanol และ n-pentanol ในกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายมอลโตเดกซ์ทรินจนมากกว่า 20% (w/w) จะไม่มีผลต่อความคงตัวของ volatile compounds เหล่านี้ จากผลการทดลองของงานวิจัยนี้ก็เช่นกัน โดยจะเห็นว่า การเติมมอลโตเดกซ์ทรินในน้ำมะนาวในปริมาณ 30% และ 35% (w/w) และใช้วิธีการแช่แข็งแบบเดียวกัน %citral และ %d-limonene retention ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ($p>0.05$) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก ทั้ง citral และ d-limonene นั้นเป็น volatile compounds ที่อยู่ใน immiscible organic phase ซึ่งไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันใน CAS เมื่อนำไปแช่แข็ง citral และ d-limonene จะอยู่ในรูป droplets ซึ่งส่วนหนึ่งอยู่ภายในCAS และส่วนที่เหลืออยู่ที่บริเวณ interface การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินจะเพิ่มความคงตัวของสารให้กลิ่นรสทั้งสองที่อยู่ภายใน CAS ได้ แต่ส่วนที่อยู่บริเวณ interface นั้น จะสูญเสียไปทั้งหมดระหว่างกระบวนการทำแห้ง ทำให้ %retention ของสารให้กลิ่นรสมีขีดจำกัดอยู่ที่ระดับหนึ่งเท่านั้น นอกจากนี้จากผลการทดลองจะเห็นว่า การเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินมีผลให้ %citral retention มีค่าเพิ่มขึ้นมาก แต่สำหรับ %d-limonene retention นั้นเพิ่มขึ้นไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายภายใน CAS ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินจะช่วยขัดขวางการแพร่ของ citral ($C_{10}H_{16}O$) ได้ดีกว่า d-limonene ($C_{10}H_{16}$) เพราะ citral มีมวลโมเลกุลสูงกว่า d-limonene และความสามารถในการแพร่ของสารขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลของสารนั้น โดยการแพร่ของสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าจะเกิดขึ้นได้ดีกว่า

แม้ว่าการเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินจะช่วยเพิ่มความคงตัวของสารให้กลิ่นรสในการทำแห้งน้ำมะนาวแบบเยือกแข็งก็ตาม แต่ในกรณีที่เมื่อเพิ่มปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินแล้ว %retention ของสารให้กลิ่นรสไม่เพิ่มขึ้นมากนัก จะพบว่า ความเข้มข้น (ppm) ของสารให้กลิ่นรสในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณมากกว่า จะน้อยกว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณน้อย ดังเช่นในกรณีของ d-limonene ซึ่งเป็นสิ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาประกอบด้วย เพราะการที่ความเข้มข้นของ d-limonene ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีค่าต่ำ จะทำให้ต้องใช้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ใน

ปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ได้กลิ่นเท่าที่ต้องการ

5.2.4 ผลต่อคะแนนการยอมรับทางประสาทสัมผัส

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.2.20 พบว่า น้ำมะนาวพร้อมดื่มที่เตรียมจากผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินก่อนการทำแห้งในปริมาณ 15% (w/w) มีคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสต่ำกว่าน้ำมะนาวพร้อมดื่ม ที่เตรียมจากผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินก่อนการทำแห้งในปริมาณ 20%, 25%, 30% และ 35% อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยระดับคะแนนจะอยู่ในช่วงที่มีกลิ่นรสอ่อนกว่าน้ำมะนาวพร้อมดื่มที่เตรียมจากน้ำมะนาวสดเล็กน้อยถึงปานกลาง นอกจากนี้พบว่าน้ำมะนาวพร้อมดื่มที่เตรียมจากผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ผ่านการแช่แข็งแบบ slow freezing มีคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสสูงกว่า เมื่อใช้วิธีการแช่แข็งแบบ fast freezing อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ดังตารางที่ 4.2.21) เมื่อพิจารณาผลการประเมินคุณภาพด้านกลิ่นรสโดยวิธีวิเคราะห์ทางเคมีและการทดสอบทางประสาทสัมผัส จะเห็นว่า มีความสอดคล้องกันโดยผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ผ่านการแช่แข็งแบบ slow freezing ที่มีทั้งปริมาณ citral และ d-limonene สูงกว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ผ่านการแช่แข็งแบบ fast freezing เมื่อนำมาทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส จึงมีคะแนนสูงกว่า นอกจากนี้จะเห็นว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินก่อนการทำแห้ง 15% ซึ่งมีปริมาณ citral ต่ำกว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทรินก่อนการทำแห้ง 20%,30% หรือ 35% และใช้วิธีการแช่แข็งแบบเดียวกัน จึงมีคะแนนเฉลี่ยทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์ปริมาณ citral ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทริน 20%,30% และ 35% พบว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติ แต่คะแนนทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสไม่มีความแตกต่างกัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวิธีวิเคราะห์ทางเคมีโดยใช้ Gas chromatography เป็นวิธีที่มี sensitivity สูงจึงสามารถบอกความแตกต่างได้ดีกว่าการทดสอบทางประสาทสัมผัส อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างผลของการประเมินคุณภาพด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ โดยวิธีการทดสอบทางประสาทสัมผัส(subjective method) และการวัดปริมาณสารให้กลิ่นรสด้วย GC (objective method) พบว่าคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรส มีความสัมพันธ์กับค่า %d-limonene retention และปริมาณ citral ของผงน้ำมะนาว

ฟรีซดรายด์ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient;r)เท่ากับ 0.86 และ 0.81 ตามลำดับ (ค่า r ที่คำนวณได้นี้มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%) แสดงว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มี %d-limonene retention และปริมาณ citral สูงจะมีคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสสูงตามไปด้วย ความสัมพันธ์ที่ได้นี้ถือว่ามีความสัมพันธ์กันในระดับสูง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.7-0.9 (ชูศรี วงศ์รัตนะ,2525) ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าทั้ง citral และ d-limonene เป็นสารให้กลิ่นรสที่สำคัญของน้ำมะนาว ทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีปริมาณสารให้กลิ่นรสทั้งสองนี้น้อย ซึ่งอาจเกิดจากมีการสูญเสียไประหว่างกระบวนการทำแห้งหรือเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนไปเป็นสารอื่น มีคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านกลิ่นรสต่ำ

จากผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติพบว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติมมอลโตเดกซ์ทริน 35% จะมีความหวานมากกว่า และความเปรี้ยวน้อยกว่า เมื่อใช้มอลโตเดกซ์ทรินในปริมาณ 20%, 25% และ 30% อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ดังตารางที่ 4.2.20) ดังนั้นการเติมมอลโตเดกซ์ทรินในน้ำมะนาว 35% จึงไม่เหมาะสม เนื่องจากปริมาณที่เติมมีผลต่อรสเปรี้ยวซึ่งเป็นลักษณะเด่นและเฉพาะตัวของมะนาว แม้ว่าปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินดังกล่าว จะมีผลให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ได้มีคุณภาพด้านกลิ่นรสที่ดี และมีการดูดความชื้นต่ำก็ตาม

5.3 <u>การศึกษาผลของ Tricalcium phosphate (TCP) และ In-package desiccant (IPD) ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ</u>

ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีคุณสมบัติในการดูดความชื้นสูง เนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบเยือกแข็งทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะโครงสร้างที่เป็นรูพรุน(porous) ปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นระหว่างการเก็บมีผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ เกิดขึ้นตามมา ได้แก่ การจับตัวเป็นก้อน(caking) การเกิดสีน้ำตาล(browning) การสลายตัวของวิตะมินซีและการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านกลิ่นรส การเปลี่ยนแปลงต่างๆ เหล่านี้จะทำให้คุณภาพของผลิตภัณฑ์ลดลงและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ในการทดลองนี้จึงเป็นการศึกษาผลของ TCP และ IPD ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ ทั้งนี้เพื่อหาสภาวะในการ

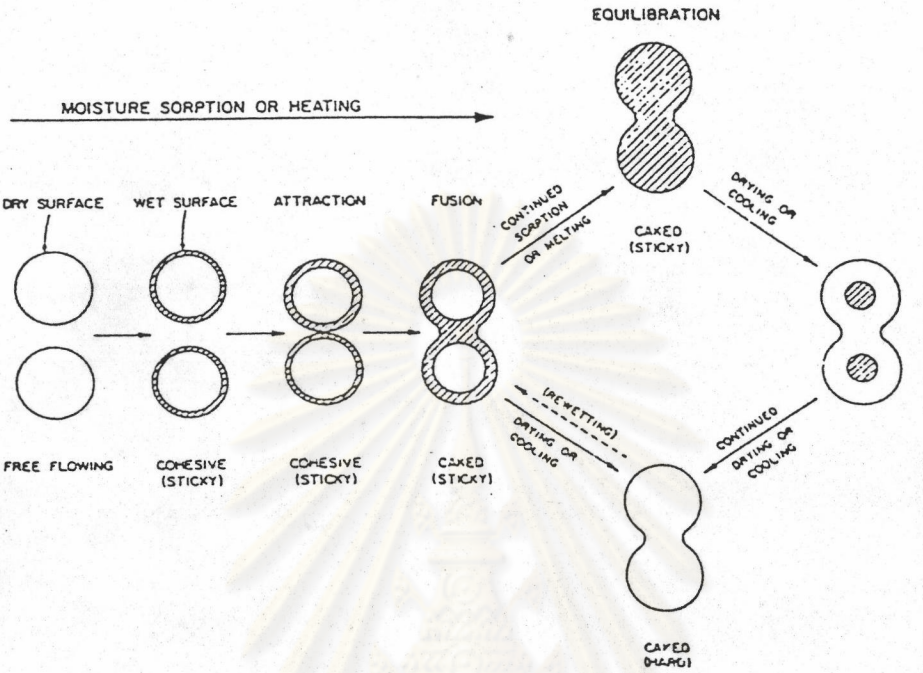
เก็บที่เหมาะสม ทำให้สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้เป็นระยะเวลานาน โดยที่ยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค TCP เป็น anticaking agent ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติด้านการไหล (flow ability) และ ป้องกันการจับตัวเป็นก้อน (Peleg and Hollenbach, 1984) เหตุผลที่เลือกใช้ TCP ในการทดลองนี้เนื่องจากมีราคาถูก คือ 50 บาทต่อกิโลกรัม ส่วน anticaking agent ชนิดอื่นๆ มีราคาแพงกว่า ได้แก่ silicon dioxide ราคา 285 บาทต่อกิโลกรัม ส่วนประสิทธิภาพในการทำงานของ TCP นั้นขึ้นอยู่กับว่า TCP จะสามารถเกาะติด(adhere) และเข้ากัน (compatatible) กับอนุภาคของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ได้ดีเพียงใด โดยอาจจะศึกษาได้โดยการใช้ scanning electron microscopic technique เพื่อดูการปกคลุมของ TCP รอบๆ อนุภาคของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ แต่ในการทดลองนี้จะศึกษาจากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพด้านต่างๆ ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ สำหรับปริมาณ TCP ที่ใช้จะแปร 3 ระดับคือ 0%, 0.5% และ 1.0% เนื่องจากเป็นความเข้มข้นที่ TCP จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีและไม่มีผลต่อลักษณะปรากฏของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์เมื่อละลายน้ำแล้ว ทั้งนี้เพราะ TCP ไม่ละลายน้ำ การใช้ในปริมาณมากเกินไปจะไปมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์ได้ นอกจากนี้ประสิทธิภาพในการทำงานของ anticaking agent ยังขึ้นอยู่กับความชื้นสัมพัทธ์ภายในระบบด้วย จากการทดลองของ Peleg และ Hollenbach(1984) พบว่า aluminium silicate หรือ calcium stearate ในปริมาณ 1% ไม่สามารถป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของ onion powder ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์สูงได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีการดูดซับน้ำได้อย่างอิสระจนเข้าสู่ภาวะสมดุล anticaking agent จะมีประสิทธิภาพดีเมื่อ host powder สัมผัสกับความชื้นที่จำกัดค่าหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาผลของการใช้ IPD (silica gel ปริมาณ 10% โดยน้ำหนัก) ควบคู่ไปกับ TCP ต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บที่อุณหภูมิห้อง ภาชนะบรรจุที่ใช้ในการทดลองนี้คือ ถุงลามิเนต (PET-PE-Al-PE) ขนาด 4x4 นิ้ว เหตุผลที่เลือกใช้ภาชนะบรรจุชนิดนี้เนื่องจาก polyethylene (PE) มีคุณสมบัติช่วยป้องกันการซึมผ่านของน้ำ วน aluminium foil (Al) นั้นจะช่วยป้องกันแสง ความชื้นและออกซิเจน รวมทั้งการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ และสำหรับ polyethylene terepthalate (PET) จะเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงต่อภาชนะบรรจุ สามารถป้องกันการซึมผ่านและการระเหยของกลิ่นอาหารได้ดี รวมทั้งช่วยป้องกันชั้นต่างๆ ที่เชื่อมติดกัน (laminate) ร่อนออกจากกันด้วย(Sacharow and

Griffin, 1980) นอกจากนี้จากการทดลองของปราณี ประกิตเตชะกุล (2525) พบว่า การบรรจุน้ำมะนาวที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบ spray drying ในถุงชนิด laminated aluminium foil(PE-Al-PE) ทั้งภายใต้บรรยากาศและภาวะสุญญากาศ จะสามารถรักษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ไว้ได้ดีกว่า ถุง polyethylene (PE)

5.3.1 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณความชื้นและ %uncaking

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและ %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เพิ่มขึ้นมีความสัมพันธ์กับ %uncaking ที่ลดลง หรืออาจกล่าวได้ว่า เมื่อผลิตภัณฑ์มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจะมีผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการจับตัวเป็นก้อน ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การดูดความชื้นของอนุภาคที่มีสารที่ละลายน้ำได้ ซึ่งในที่นี้ก็คือ ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ จะทำให้เกิด liquid layer แล้วอาจขยายไปยังอนุภาคใกล้เคียงจนเกิดเป็น interparticle liquid bridge เมื่อ bridge เกิดการแข็งตัวหรือตกผลึกจะทำให้เกิด solid bridge เป็นผลให้ผลิตภัณฑ์เกิดการจับตัวเป็นก้อนและไม่มี free flowing property กระบวนการนี้เรียกว่า humidity caking ซึ่งเป็น caking mechanism ที่พบโดยทั่วไปใน food powder (Peleg and Hollenbach, 1984) ดังรายละเอียดของกระบวนการดังรูปที่ 5.3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



<u>รูปที่ 5.3.1</u> Caking mechanism ที่พบโดยทั่วไปใน food powder

ที่มา : Peleg and Bagley (1983)

จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.3.2 จะเห็นว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าเมื่อไม่ใช้ IPD อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจาก desiccant ซึ่งในที่นี้คือ silica gel มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่อหน่วยน้ำหนักสูง จึงสามารถดูดความชื้นที่เหลืออยู่ในผลิตภัณฑ์และภายในภาชนะบรรจุ ดังจะเห็นได้จากการที่ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD มีปริมาณความชื้นลดลง หลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 2 สัปดาห์ ทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าเมื่อไม่ใช้ IPD ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Strashun และ Talburt (1954) และ Woodroof และ Luh (1975) ส่วนผลของ TCP นั้น พบว่า TCP มีผลช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Cal-Vidal และ Falcone

(1985) ซึ่งพบว่า การใช้ silicon dioxide (ชื่อทางการค้าว่า Syloid 244 FB) ซึ่งเป็น anticaking agent ชนิดหนึ่ง ในผงน้ำเสาวรสฟรีซดรายด์ในปริมาณ 0.5-1.0% โดยน้ำหนัก และเก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิ 25°C ความชื้นสัมพัทธ์ 58% จะมีผลให้อัตราการดูดความชื้น และค่า equilibrium moisture content ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการเก็บ ต่ำกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้เติม Syloid 244 FB ที่เป็นเช่นนี้ อาจเป็นเพราะการที่ anticaking agent ช่วยขัดขวางความต่อเนื่องของ liquid layer จากอนุภาคหนึ่งของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ไปยังอนุภาคใกล้เคียง จึงทำให้อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่มีการเติม anticaking agent (ในที่นี้คือ TCP) ต่ำกว่าเมื่อไม่ได้เติม

เมื่อพิจารณา %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ ดังรูปที่ 4.3.1 จะเห็นว่า %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP หรือที่เติม TCP 0.5% มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความชื้นของผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 1.0% แม้ว่าปริมาณความชื้นจะเพิ่มขึ้นแต่ %uncaking มีค่าค่อนข้างคงที่ (99-100%) เมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ในช่วง 4 สัปดาห์แรก และไม่แตกต่างจากที่ระยะเวลาเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่หลังจากนั้น %uncaking มีค่าลดลงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า TCP ซึ่งเป็น anticaking agent ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติสามารถขัดขวางกระบวนการ humidity caking โดยการขัดขวางความต่อเนื่องของ liquid layer และแม้เมื่อเกิด solid bridge แล้ว anticaking agent จะช่วยให้ mechanical strength ของ solid bridge ลดลง ดังนั้นจึงสามารถทำลายได้โดยง่าย มีผลให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 1.0% มี %uncaking ค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ 6 สัปดาห์แรก แต่หลังจากนั้นประสิทธิภาพของ TCP อาจจะลดลง เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มมากขึ้นทำให้ %uncaking เริ่มลดลง

เมื่อพิจารณาผลของ IPD ต่อ %uncaking จะเห็นว่า %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาการเก็บในขณะที่ %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ใช้ IPD มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บ (ดังรูปที่ 4.3.1) ทั้งนี้อาจเนื่องจาก การใช้ IPD มีผลช่วยให้การเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์น้อยกว่าเมื่อไม่ใช้ IPD นอกจากนี้จะเห็นว่า IPD มีส่วนช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพการทำงานของ TCP ดังจะเห็นได้จากการที่ ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ TCP 1.0% ร่วมกับ

IPD มีลักษณะเป็นผงละเอียดที่มี free flowing property ตลอดระยะเวลาการเก็บ 2 เดือน ส่วนผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD เพียงอย่างเดียวหรือเมื่อใช้ IPD ร่วมกับ TCP 0.5% มีการจับตัวเป็นก้อนเล็กน้อย หลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 1 เดือน อย่างไรก็ตาม สามารถทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่จับตัวเป็นก้อน แตกออกเป็นผงละเอียดได้โดยง่าย

5.3.2 การเปลี่ยนแปลงของค่า water activity (a_w)

ผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.4 แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของ TCP, IPD ระยะเวลาการเก็บ และอิทธิพลร่วมของ TCP กับ IPD และ IPD กับระยะเวลาการเก็บมีผลต่อ a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์อย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)โดย a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ TCP 0.5% หรือ 1.0% ร่วมกับ IPD มีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$) นอกจากนี้จะเห็นว่าค่า a_w มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บ โดย a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ใช้ IPD มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่วนผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ IPD มี a_w เพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่า จะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของค่า a_w มีความสอดคล้องกับปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น a_w เป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณ free water ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีวิต ปริมาณความชื้นของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่า a_w มีค่าเพิ่มขึ้นด้วย และจากเหตุผลที่ TCP และ IPD มีผลช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้น ดังนั้นจึงเป็นผลให้การใช้ TCP และ IPD สามารถช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของ a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ได้เช่นกัน

a_w เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดการเปลี่ยนแปลงต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ โดยทั่วไป อาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้ง (dehydrated food) จะมี a_w ต่ำกว่า 0.60 จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.3 จะเห็นว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มี a_w ในช่วง 0.50 ถึง 0.60 ซึ่งเป็นช่วงที่เชื้อยีสต์และราไม่สามารถเจริญเติบโตได้ เนื่องจากเชื้อราและยีสต์ไม่สามารถเจริญเติบโตได้เมื่อ a_w ต่ำกว่า 0.80 (Rockland and Beuchat,1987)อย่างไรก็ตามจะเห็นว่า a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ใช้ IPD มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามระยะเวลาการเก็บ และเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์นานกว่า 2 เดือน อาจเพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เชื้อราเจริญเติบโตได้ ทำให้ไม่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค

5.3.3 การเปลี่ยนแปลงของ titratable acidity (as %citric acid)

จากผลการทดลอง(ดังตารางที่ 4.3.8) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณ TCP มีผลให้ titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)

โดยผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP และที่เติม TCP ในปริมาณ 0.5% และ 1.0% มี titratable acidity (as %citric acid) เท่ากับ 18.61%, 18.23% และ 18.01% ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้สันนิษฐานว่าเป็นผลมาจาก dilution effect เพราะ TCP เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อคำนวณ titratable acidity (as %citric acid) ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP ในปริมาณต่างๆ กัน คือ 0%,0.5% และ 1.0% โดยที่คิดจากร้อยละของกรดซิตริกในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ ที่หักน้ำหนักของ TCP ออกแล้ว พบว่า มีค่าเท่ากับ 18.61%, 18.32% และ 18.19% ตามลำดับ และจากรูปที่ 4.3.4 จะเห็นว่า titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ทั้งที่มีและไม่มี IPD ที่ระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์ มีค่าสูงกว่าที่ระยะเวลาอื่นๆ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะมะนาวเป็นผลผลิตทางธรรมชาติ (biological material) จึงเป็นไปได้ว่าจะมีความผันแปรของ ปริมาณ titratable acidity อยู่บ้างไม่มากก็น้อย หรืออาจเกิดจากความแตกต่างกันของ sensitivity ในการไตเตรตหาปริมาณกรดที่แต่ละระยะเวลาการเก็บ ส่วนที่ระยะเวลาอื่นๆ นั้น จะเห็นว่า titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ทั้งที่มีและไม่มี IPD มีค่าค่อนข้างคงที่ นั่นคือ อาจเป็นไปได้ว่า IPD และระยะเวลาการเก็บจะไม่มีผลต่อ titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ และปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อ titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มากที่สุดคือ ปริมาณ TCP ที่เติมในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์

5.3.4 การเปลี่ยนแปลงของปริมาณวิตะมินซีและ browning index

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.9 จะเห็นว่า อิทธิพลร่วมของ TCP, IPD และระยะเวลาการเก็บ มีผลต่อปริมาณวิตะมินซีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดย TCP เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุด จากการคำนวณพบว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP และที่เติม TCP ในปริมาณ 0.5% และ 1.0% มีปริมาณวิตะมินซี 71.83, 65.73 และ 61.04 mg/100g ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นผลเนื่องมาจาก dilution effect เช่นเดียวกันกับกรณีของ titratable acidity เมื่อคำนวณปริมาณวิตะมินซีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP ในปริมาณต่างๆ กันคือ 0%, 0.5% และ 1.0% โดยที่คิดจากร้อยละของวิตะมินซีในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่หักน้ำหนักของ TCP ออกแล้ว พบว่ามีค่าเท่ากับ 71.83, 66.06 และ 61.66 mg/100g ตามลำดับ นอกจากนี้พบว่า อิทธิพลของ IPD และระยะเวลาการเก็บไม่มีผลต่อปริมาณวิตะมินซีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์อย่างมีนัยสำคัญ

($p>0.05$)

เมื่อพิจารณาผลของ TCP, IPD และระยะเวลาการเก็บ ต่อ browning index ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์พบว่า browning index มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการเก็บซึ่งแสดงว่าผลิตภัณฑ์เกิดสีน้ำตาลเพิ่มขึ้น โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ไว้ 2 สัปดาห์ ซึ่งจะเห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ browning index มีความสอดคล้องกับปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เพิ่มขึ้น ดังจะเห็นได้ว่าในช่วงระยะเวลาการเก็บ 2 สัปดาห์แรก ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่แปรปริมาณ TCP และ IPD มีค่าใกล้เคียงกับที่ระยะเวลาเริ่มต้น ดังนั้น browning index จึงมีค่าใกล้เคียงกับที่เวลาเริ่มต้น หลังจากนั้นผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์จะมีปริมาณความชื้นและค่า a_w เพิ่มขึ้น จึงเป็นผลให้ browning index เพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้จะเห็นว่า การใช้ TCP หรือ IPD เพียงอย่างเดียวจะไม่มีผลต่อ browning index แต่การใช้ IPD ร่วมกับ TCP ในปริมาณ 0.5% หรือ 1.0% จะช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของ browning index ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ โดยทั่วไปปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นในอาหารที่ผ่านกระบวนการทำแห้งส่วนใหญ่ จะเป็นปฏิกิริยาแบบที่ไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic browning reaction) โดยจะเกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิก มากกว่าเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลอินเวิร์ตกับสารประกอบอะมิโน (Ammu *et al.*, 1977; Kopelman, Meydav and Weinberg, 1977) ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบที่ไม่ใช้เอนไซม์ มีความสัมพันธ์กับค่า a_w โดยเมื่อ a_w มีค่าเพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลจะเกิดได้ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากน้ำทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายของระบบ เมื่อปริมาณ free water มากขึ้น ทำให้ mobility ของสารตั้งต้นของปฏิกิริยาดีขึ้น โอกาสที่จะเข้าทำปฏิกิริยาจึงเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม เมื่อค่า a_w เพิ่มขึ้นจนมากกว่า 0.60 ปฏิกิริยาจะเกิดได้น้อยลงทั้งนี้เพราะ "product inhibition" เนื่องจากน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยา เมื่อผลิตภัณฑ์เกิดมากขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับ นอกจากนี้ปริมาณ free water ที่มากขึ้นยังทำให้เกิด dilution effect ทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นน้อยลง (Rockland and Beuchat, 1987) จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.3 จะเห็นว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีค่า a_w เพิ่มขึ้นในช่วงที่น้อยกว่า 0.60 ดังนั้นจึงมีผลให้ browning index ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้น และจากการที่ TCP และ IPD มีผลช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ ดังนั้นจึงมีผลช่วย

ชลอปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลด้วย จึงทำให้ browning index ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ใช้ TCP ในปริมาณ 0.5% หรือ 1.0% ร่วมกับ IPD เพิ่มขึ้นช้ากว่าและมีค่าน้อยกว่ากรณีอื่นๆ (ดังรูปที่ 4.3.6) จากผลการทดลองจึงไม่สามารถสรุปได้อย่างแน่ชัดว่า การเกิดสีน้ำตาลในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์เกิดจากผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของกรดแอสคอร์บิกหรือไม่ เนื่องจากปริมาณวิตะมินซีหรือกรดแอสคอร์บิกของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ มีค่าคอนข้างคงที่ ในขณะที่ค่า browning index มีค่าเพิ่มขึ้น

5.3.5 การเปลี่ยนแปลงของค่าการละลาย

ค่าการละลายในงานวิจัยนี้ เป็นค่าที่กำหนดขึ้นเพื่อแสดงถึงช่วงเวลาที่ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ละลายหมด โดยค่าการละลายที่มากแสดงถึงเวลาที่ใช้ในการละลายที่เพิ่มขึ้น จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.3.7-4.3.9 แสดงให้เห็นว่า ทั้ง TCP, IPD และระยะเวลาการเก็บเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าการละลายของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ นอกจากนี้จะเห็นว่าค่าการละลายมีความสัมพันธ์กับปริมาณความชื้นและ %uncaking ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ โดยเมื่อผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์จับตัวเป็นก้อนมากขึ้น (%uncaking ลดลง) ซึ่งจะมีผลให้ค่าการละลายของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์เพิ่มขึ้น การใช้ TCP ในปริมาณ 0.5% หรือ 1.0% ร่วมกับ IPD ในผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์จะช่วยชลอการเพิ่มขึ้นของปริมาณความชื้น ดังนั้นจึงมีผลช่วยให้การละลายของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ดีขึ้น ค่าการละลายจึงน้อยกว่ากรณีอื่นๆ

5.3.5 การทดสอบทางประสาทสัมผัส

จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.14 พบว่า อิทธิพลของ TCP(A),IPD(B),ระยะเวลาการเก็บ(C)และอิทธิพลร่วมของ BC มีผลต่อคะแนนด้านสีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) การให้คะแนนด้านสีเป็นการให้คะแนนตามความพอใจของผู้ทดสอบต่อผลิตภัณฑ์ คะแนนที่สูงแสดงถึงผู้ทดสอบมีความพอใจต่อสีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ เมื่อพิจารณาผลของ TCP ต่อคะแนนด้านสีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บ(ดังตารางที่ 4.3.16) พบว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP ในปริมาณ 0.5% หรือ 1.0% โดยน้ำหนัก มีคะแนนเฉลี่ยด้านสีตลอดระยะเวลาการเก็บ 2 เดือน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) แต่ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 1.0% มีคะแนนสูงกว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม

TCP หรือที่เติม TCP 0.5% จะเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลมากกว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 1.0% ดังจะเห็นจากค่า browning index ทำให้ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP หรือที่เติม TCP 0.5% มีสีเข้มกว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 1.0% ดังนั้นคะแนนด้านสีจึงต่ำกว่า และเมื่อพิจารณาผลของอิทธิพลร่วมของ IPD และระยะเวลาการเก็บต่อคะแนนด้านสีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ (ดังรูปที่ 4.3.10) พบว่าเมื่อเก็บผลิตภัณฑ์ไว้เป็นเวลา 2 เดือน คะแนนด้านสีจะลดลงอย่างมาก โดยเฉพาะผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่มี IPD ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ด้วยเหตุผลเดียวกันกับที่ได้กล่าวแล้วข้างต้น อย่างไรก็ตาม จะเห็นว่าคะแนนด้านสีของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่แปรปริมาณ TCP และ IPD หลังจากเก็บไว้นาน 2 เดือน ยังมีค่าค่อนข้างสูงและอยู่ในระดับที่ผู้ทดสอบพอใจ โดยมีคะแนนในช่วง 4-4.5 จากคะแนนเต็ม 5

ส่วนคะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะผลิตภัณฑ์นั้น ผู้ทดสอบจะให้คะแนนแก่ผลิตภัณฑ์โดยคะแนนเต็ม 5 หมายถึงผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีลักษณะเป็นผงแห้ง ละเอียดและไม่จับตัวเป็นก้อนเลย คะแนนที่ลดลงแสดงถึง ผลิตภัณฑ์จับตัวเป็นก้อนและไม่มี free flowing property จากผลการทดลองดังตารางที่ 4.3.16-4.3.18 แสดงให้เห็นว่า การใช้ TCP ปริมาณ 0.5% หรือ 1.0% และ IPD มีผลให้คะแนนเฉลี่ยด้านลักษณะผลิตภัณฑ์ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์สูงกว่าเมื่อไม่ใช้ TCP และ IPD นอกจากนี้คะแนนเฉลี่ยจะมีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บ นั่นคือผลิตภัณฑ์จะมีการจับตัวเป็นก้อนมากขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับ %uncaking อย่างไรก็ตามแม้ว่าคะแนนด้านลักษณะผลิตภัณฑ์ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์จะมีค่าลดลง ตามระยะเวลาการเก็บแต่คะแนนยังอยู่ในเกณฑ์ดี

สำหรับคะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ ดังตารางที่ 4.3.15-4.3.16 และ 4.3.18 จะเห็นว่า อิทธิพลของ TCP และระยะเวลาการเก็บมีผลต่อคะแนนเฉลี่ยด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ แม้ว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่ไม่ได้เติม TCP หรือที่เติม TCP 1.0% จะมีคะแนนเฉลี่ยของกลิ่นรสตลอดระยะเวลาการเก็บ 2 เดือน สูงกว่าผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ที่เติม TCP 0.5% อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แต่คะแนนเฉลี่ยจะอยู่ในช่วงเดียวกันคือ 9-12 ซึ่งหมายถึงกลิ่นรสของมะนาวลดลงเล็กน้อย นอกจากนี้จะเห็นว่าคะแนนด้านกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์มีค่าลดลงตามระยะเวลาการเก็บ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการ ได้แก่ มีการสูญเสียสารให้กลิ่นรสจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการยุบตัว (collapse)

ของโครงสร้าง สารให้กลิ่นรสที่ถูกกักเก็บไว้ภายใน solute matrix structure จึงถูกปลดปล่อยออกมา (Tsourouflis *et al.*,1976) ทำให้ปริมาณสารให้กลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ลดลง นอกจากนี้อาจเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของ d-limonene ซึ่งเป็นสารให้กลิ่นรสที่สำคัญในน้ำมะนาว เมื่อสัมผัสกับอากาศ เปลี่ยนไปเป็น carvone และ carveol ซึ่งจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีกลิ่นรสที่ผิดปกติ (Guenther, 1948) ทำให้คะแนนด้านกลิ่นรสลดลงอีกด้วย

แม้ว่าอิทธิพลของ TCP, IPD และระยะเวลาการเก็บ จะมีผลต่อคะแนนเฉลี่ยด้านสี ลักษณะผลิตภัณฑ์และกลิ่นรสของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ แต่อิทธิพลเหล่านี้ไม่มีผลต่อคะแนนความชอบโดยรวมของผลิตภัณฑ์ โดยมีระดับคะแนนในช่วง 3.68-4.29 จากคะแนนเต็ม 5 (ดังตารางที่ 4.3.13)แสดงให้เห็นว่า ผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ทั้งที่มี TCP, IPD หรือไม่มีก็ตาม หลังจากเก็บผลิตภัณฑ์ไว้นาน 2 เดือน ผู้ทดสอบยังคงให้การยอมรับต่อผลิตภัณฑ์ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง

จากการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างคะแนนทางประสาทสัมผัสด้านสี ลักษณะผลิตภัณฑ์ กลิ่นรสและความชอบโดยรวม กับค่า %uncaking ปริมาณความชื้น ค่า a_w browning index และ titratable acidity ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์ระหว่างการเก็บในถุงลามิเนตที่อุณหภูมิห้องภายในระยะเวลา 2 เดือน พบว่า ตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กันสูงกว่าตัวแปรอื่นๆ คือ คู่ความสัมพันธ์ของคะแนนด้านลักษณะผลิตภัณฑ์กับค่า %uncaking คะแนนด้านลักษณะผลิตภัณฑ์กับปริมาณความชื้น และ คะแนนด้านลักษณะผลิตภัณฑ์กับค่า a_w โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์(r) เท่ากับ 0.63, -0.59 และ -0.68 ตามลำดับ (ค่า r ที่คำนวณได้นี้ มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95%)แสดงว่าคะแนนด้านลักษณะผลิตภัณฑ์ของผงน้ำมะนาวฟรีซดรายด์จะมีค่าสูง เมื่อค่า %uncaking สูง(การจับตัวเป็นก้อนน้อย) และมีปริมาณความชื้นและค่า a_w ต่ำ อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้ถือว่ามีความสัมพันธ์อยู่ในระดับปานกลาง เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ในช่วง 0.3-0.7 (ชูศรี วงศ์รัตนะ, 2525)