บทที่ 1
บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันการเลี้ยงผึ้งได้กลายเป็นอาชีพที่สำคัญทางการเกษตรอาชีพหนึ่ง ที่สามารถสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกรเป็นจำนวนมาก และมีการเลี้ยงอย่างแพร่หลายจนกลายเป็นอุตสาหกรรม ผลผลิตสำคัญที่ได้จากการเลี้ยงผึ้งก็คือน้ำผึ้ง ปัจจุบันมีการพัฒนาคุณภาพของน้ำผึ้งให้ดีขึ้นเพื่อแข่งขันเข้าสู่ตลาด และตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค น้ำผึ้งเป็นสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตที่ให้รสหวาน ที่มีคุณค่าทางอาหารสูง ซึ่งประกอบด้วยวิตามิน แร่ธาตุ และกรดอะมิโนหลายชนิด ดังนั้นจึงนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย ผึ้งจะดูดเก็บน้ำหวานของดอกไม้ชนิดต่างๆ โดยมักเรียกชื่อน้ำผึ้งตามพันธุ์ไม้ที่เป็นแหล่งของน้ำหวานที่ใช้ผลิตเป็นน้ำผึ้ง น้ำผึ้งแต่ละชนิดจึงมีคุณสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางชีวเคมีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งของน้ำหวาน ตัวอย่างน้ำผึ้งหลักๆของประเทศไทย ได้แก่ น้ำผึ้งดอกลำไย ซึ่งผึ้งเลี้ยงจะได้น้ำหวานจากดอกลำไย น้ำผึ้งดอกทานตะวันซึ่งผึ้งได้น้ำหวานจากดอกทานตะวัน น้ำผึ้งจากดอกลิ้นจี่ซึ่งผึ้งได้น้ำหวานจากดอกลิ้นจี่ และน้ำผึ้งป่าซึ่งได้จากดอกไม้ป่า (กลุ่มงานผึ้งและแมลงอุตสาหกรรม, 2543) น้ำผึ้งที่ได้มาสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมากมายเช่น การใช้บริโภคโดยตรง นำมาเป็นส่วนผสมของอาหาร ยา เครื่องสำอาง เครื่องดื่ม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำน้ำผึ้งมาใช้บริโภคโดยตรงนั้น จะมีอยู่ 2 ลักษณะคือ น้ำผึ้งเหลวที่มีความหนืดสูง และน้ำผึ้งที่มีลักษณะเป็นผลึก เรียกว่าผลึกน้ำผึ้ง เนื่องจากน้ำผึ้งเป็นสารละลายที่อิ่มตัวไปด้วยกลูโคสและฟรุกโทส และผลึกที่เห็นในน้ำผึ้งจะเป็นผลึกของกลูโคสโมโนไฮเดรต ซึ่งมีความสามารถในการละลายต่ำกว่าน้ำตาลชนิดอื่นที่มีอยู่ในน้ำผึ้งจึงสามารถเกิดเป็นผลึกได้ก่อนน้ำตาลชนิดอื่นๆ ดังนั้นเมื่ออัตราส่วนของน้ำตาลกลูโคสต่อน้ำ อัตราส่วนของฟรุกโทสต่อกลูโคส คุณสมบัติการดูดความชื้น ความหนืดของน้ำผึ้งเปลี่ยนไป และทำให้น้ำผึ้งดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณกลูโคสที่มีในน้ำผึ้งอยู่ในระดับของสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่งจึงมีการตกผลึกเกิดขึ้นได้ โดยการตกผลึกของน้ำผึ้งนี้ไม่ได้หมายความว่าน้ำผึ้งเกิดการการเสื่อมคุณภาพ น้ำผึ้งจากดอกไม้ต่างชนิดกัน มีองค์ประกอบ และคุณสมบัติที่แตกต่างกันอาจจะมีผลโดยตรงต่อการตกผลึกของน้ำผึ้ง (Assil *et al.,* 1991)

การศึกษาวิจัยนี้จะศึกษาถึงองค์ประกอบทางชีวเคมีของน้ำผึ้งที่มีผลต่อการตกผลึกและการสร้างผลึกน้ำผึ้ง โดยในเบื้องต้นนี้จะทำการศึกษาการเพิ่มปริมาณของกลูโคสในน้ำผึ้ง ด้วย

การใช้ α-glucosidase เพื่อทำให้ได้น้ำผึ้งอีกรูปแบบหนึ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีมูลค่าทางการตลาด

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางชีวเคมีของน้ำผึ้งที่ตกผลึก และไม่ตกผลึก
2. ศึกษาผลจากการใช้วิธีการทางเอนไซม์ เพื่อดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลในน้ำผึ้ง
3. ศึกษาผลขององค์ประกอบของน้ำตาลในน้ำผึ้ง เพื่อจะเหนี่ยวนำให้เกิดผลึก
4. ศึกษาวิธีการตกผลึกน้ำตาลในน้ำผึ้ง

ตรวจเอกสาร

มนุษย์ทุกภูมิภาคของโลกเรียนรู้ที่จะนำผลิตผลอันเกิดจากตัวผึ้งมาใช้ประโยชน์ในการดำรงชีวิตมาตั้งแต่ครั้งบรรพกาล มีหลักฐานบันทึกไว้มากมายไม่ว่าจะเป็นภาพวาดการตีรังผึ้งป่าเพื่อเอาน้ำหวานในถ้ำแถบสเปนตะวันออกอายุกว่า 15,000 ปี หรือภาพเขียนในถ้ำทางตอนเหนือของอินเดียที่บิมเบตคาในยุค 6,000 ปีก่อนคริสต์ศักราช ก็แสดงถึงการตีรังผึ้งที่ผาสูง นอกจากนี้ในคัมภีร์ไบเบิ้ล คัมภีร์อัลกุรอ่าน หรือแม้แต่ในคัมภีร์พระไตรปิฎกก็ยังมีบทที่กล่าวถึงประโยชน์ของน้ำผึ้งไว้มากมาย

เริ่มแรกนั้นน้ำผึ้งถูกใช้เป็นอาหาร ต่อมาเมื่อมนุษย์ได้ค้นพบคุณสมบัติของน้ำผึ้ง การใช้ผลิตผลจากผึ้งนี้จึงมีนัยเข้าไปเกี่ยวกับความเชื่อเป็นประการต่อมา ในหลายอารยะธรรม เชื่อว่าน้ำผึ้งคืออาหารที่พระผู้เป็นเจ้าประทานให้แก่มนุษย์ ดังนั้นน้ำผึ้งจึงถูกใช้เป็นอาหารสำหรับบูชาเทพเจ้าและเทพธิดาหลายองค์ของชาวอียิปต์โบราณ บาบิโลน กรีซ และโรมัน ในแอฟริกา เยอรมัน และอินเดีย มีประเพณีการเอาน้ำผึ้งไปแตะริมฝีปากของเด็กแรกเกิดโดยเชื่อว่าจะนำปัญญาและความสุขมาสู่เด็กจวบจนปัจจุบัน

น้ำผึ้งยังถูกใช้เป็นของมงคลที่ต้องมีในพิธีวิวาห์ ด้วยความเชื่อที่ว่าพลังบริสุทธิ์ของน้ำผึ้งจะช่วยคุ้มครองคู่สมรสให้แคล้วคลาดปลอดภัย รวมถึงยังเป็นตัว แทนของความรักและปัญญาด้วย ชาวอินเดียถือเป็นธรรมเนียมให้คู่บ่าวสาวดื่มนมและน้ำผึ้ง ในพิธีแต่งงานประเพณีเก่าแก่ของชาวยุโรปก็ให้บ่าวสาวดื่มไวน์น้ำผึ้งตลอดหนึ่งเดือนแรกที่แต่งงานกัน การดื่มน้ำผึ้งพระจันทร์ หรือ honeymoon ที่ใช้กันในปัจจุบันก็เป็นผลมาจากประเพณีนี้ เพียงแต่เดิมนั้นคำว่า moonไม่ได้หมายถึงพระจันทร์แต่หากหมายรวมถึงจำนวนระยะเวลาหนึ่งเดือนที่คู่สมรสจะต้องดื่มไวน์น้ำผึ้งด้วยกันนั่นเอง

น้ำผึ้งยังถูกนำมาใช้ในทางยาเนื่องจากน้ำผึ้งมีความหวานที่ช่วยบำรุงสุขภาพเสริมสร้างพลังให้แก่ร่างกาย และช่วยรักษาโรคทั้งภายนอกและภายในได้มากมาย ชาวกรีซใช้น้ำผึ้งเป็นยาอายุวัฒนะ กรรมวิธีในการทำมัมมี่ของฟาโรห์อันเลื่องชื่อของชาวอียิปต์ก็มีน้ำผึ้งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้ร่างกายไม่เน่าเปื่อย ความรู้ในเรื่องการใช้น้ำผึ้งในการถนอมรักษาผิวพรรณนี้มีมานาน

แล้ว แม้แต่พระนางคลีโอพัตราก็ใช้น้ำผึ้งเป็นเครื่องประทินสิริโฉม ความเข้มข้นของน้ำผึ้งใช้รักษาแผลไม่ให้มีริ้วรอยช่วยให้แผลแห้งเร็วและยังมีคุณสมบัติพิเศษที่ช่วยฆ่าเชื้อโรคอยู่ในตัว น้ำผึ้งยังถูกใช้เป็นยาสำหรับแก้หวัด แก้ไอ ใช้เป็นยานอนหลับ ยาระบาย ยาแก้ท้องเสีย เป็นต้น

แม้ในปัจจุบันมนุษย์จะสามารถผลิตสารที่ให้ความหวานได้จากพืชหลายชนิด ทั้งจากอ้อย ตาลหรือมะพร้าว ทว่าก็ไม่มีสารรสหวานชนิดใดเลยจะมีคุณสมบัติเทียบเคียงได้เท่ากับน้ำผึ้ง อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของน้ำผึ้งจะทรงคุณค่ามากเพียงใดนั้นก็ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของน้ำผึ้งนั้นๆ ด้วย

การเลี้ยงผึ้งยังให้คุณในด้านกสิกรรม ช่วยเพิ่มผลิตผลจากการช่วยผสมเกสรระหว่างดอกหรือระหว่างต้น ในต่างประเทศมีการเลี้ยงผึ้งสำหรับขายหรือให้เช่าในแปลงปลูกพืชทั้งพืชไร่พืชสวนโดยตรงทำรายได้ให้แก่เจ้าของรังผึ้งอย่างมหาศาล

ปัจจุบันผึ้งที่มนุษย์สามารถนำมาเลี้ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีเพียงชนิดเดียวคือผึ้งพันธุ์หรือผึ้งเลี้ยง (*Apis mellifera*) (Verma, 1990) ในประเทศไทยของเรานั้นมักนำเข้ามาจากประเทศออสเตรเลีย หรืออเมริกา ผึ้งพันธุ์เหล่านี้มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการคือ ขยัน แข็งแรง ตัวใหญ่ และสามารถบินออกไปหาอาหารได้ดีกว่าผึ้งไทย ไม่ดุ เลี้ยงง่าย ดูแลง่าย ที่เหลืออีก 3 ชนิด คือ ผึ้งโพรง (*Apis cerana*) สามารถนำไปเลี้ยงได้แต่จะเสี่ยงต่อการอพยพทิ้งรังของผึ้งซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ส่วนผึ้งหลวง (*Apis dorsata*) และผึ้งมิ้ม (*Apis florea*) มีธรรมชาติเป็นผึ้งป่ายากที่จะนำไปเลี้ยงได้ และแม้ว่าผึ้งแต่ละชนิดจะมีลักษณะรูปร่างทางกายภาพรวมไปถึงการเลือกสถานที่สร้างรังแตกต่างกัน หากรูปแบบการดำรงชีวิตในสังคมผึ้งนั้นกลับมีเหมือนกัน โดยในรังผึ้งรังหนึ่งๆ นั้นจะประกอบไปด้วยผึ้ง 3 ชนิด คือ นางพญาผึ้งเป็นผู้มีอำนาจสูงสุดในการปกครองรังซึ่งจะมีเพียงตัวเดียวในรัง อีกสองชนิดคือผึ้งตัวผู้และผึ้งงาน โดยผึ้งแต่ละชนิดนั้นจะมีบทบาทหน้าที่อันสำคัญแตกต่างกันดังต่อไปนี้ (แสนนัด หงษ์ทรงเกียรติ, 2532)

นางพญาผึ้ง นางพญาจะมีรูปร่างใหญ่โดดเด่นที่สุดในรัง ลักษณะปีกเล็กลำตัวยาวรี แต่ไม่มีอวัยวะที่จะสามารถช่วยเหลือตัวเองได้ แม้แต่หาอาหารกินเอง ต้องอาศัยผึ้งงานเป็นผู้ทำให้ทุกอย่าง หน้าที่หลักของนางพญาคือการวางไข่นับแต่วันที่สามารถวางไข่ได้ไปจนกว่าไข่จะหมดท้อง วันหนึ่งๆ จะสามารถวางไข่ได้ถึง 2,000-2,500 ฟอง อายุขัยของนางพญาจะยืนยาวที่สุดในบรรดาผึ้งทั้งผองในรัง นางพญาตามธรรมชาติในป่าดิบนั้นอาจมีอายุนานถึง 5-6 ปี และเมื่อไม่สามารถวางไข่ได้แล้วก็จะบินออกไปตายนอกรังเพียงลำพังเพื่อไม่ให้เป็นภาระของผึ้งงาน (แสนนัด หงษ์ทรงเกียรติ, 2532)

ไข่แต่ละฟองจะถูกกำหนดชะตาจากนางพญาของรังว่าไข่ฟองนั้นจะเจริญเติบโตขึ้นมาเป็นผึ้งชนิดใดใน 3 ชนิด ไข่ส่วนใหญ่จะได้รับการผสมจากน้ำเชื้อของผึ้งตัวผู้ ซึ่งจะเติบโตไปเป็นผึ้งตัวเมียจะแตกต่างตรงที่ไข่ฟองที่ถูกวางในห้องฟักไข่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าไข่อื่นๆ คือไข่ที่จะถูก

เลี้ยงด้วยนมผึ้งเพื่อสืบทอดการเป็นนางพญาตัวต่อไป ไข่เหล่านี้จะมีจำนวนมากพอๆ กับไข่ที่จะเติบโตเป็นผึ้งตัวผู้ ไข่ที่ถูกเลี้ยงเพื่อให้เป็นนางพญาจะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วโดยเฉลี่ยจะใช้เวลาเพียง 2 สัปดาห์ ก็พร้อมที่จะรับตำแหน่ง ในช่วงนี้จึงมักเกิดศึกแย่งชิงรังระหว่างนางพญาเดิมกับนางพญาที่เพิ่งกำเนิดใหม่ ใครที่ไม่แข็งแรงมักจะถูกต่อยให้ตายไป ส่วนตัวใดที่แข็งแรงรอดไปได้ ก็ต้องอพยพไปสร้างรังใหม่พร้อมผึ้งตัวผู้และผึ้งงานจำนวนหนึ่ง หรือไม่นางพญาตัวเดิมก็อาจเป็นฝ่ายอพยพแยกไปสร้างรังใหม่เสียเองพร้อมผึ้งตัวผู้และผึ้งงาน (แสนนัด หงษ์ทรงเกียรติ, 2532)

ผึ้งตัวผู้ คือ ไข่ของนางพญาผึ้งที่ไม่ได้รับการผสมน้ำเชื้อ ไข่ชนิดนี้จะใช้เวลาฟักนานกว่าไข่ชนิดอื่น คือใช้เวลาประมาณ 1 เดือน ลักษณะรูปร่างของผึ้งตัวผู้จะมีลำตัวค่อนข้างป้อม ตาโตมีขนาดใหญ่กว่าผึ้งงานเล็กน้อย ไม่มีเหล็กในและไม่มีอวัยวะสำหรับหาอาหารเองได้เช่นเดียวกับนางพญาผึ้ง หน้าที่สำคัญประการเดียวของผึ้งตัวผู้คือผสมพันธุ์กับนางพญา สัญญาณแห่งการผสมพันธุ์จะเริ่มขึ้นเมื่อนางพญาขยับปีกแล้วบินขึ้นไปบนชั้นที่สูงที่สุดของรังผึ้ง ตัวผู้ตัวใดสามารถบินตามไปได้ก็จะได้รับเลือกให้ผสมพันธุ์ครั้งหนึ่งๆ จะมีผึ้งตัวผู้ที่ได้รับเลือก 15-20 ตัว หรือจนกว่าถุงเก็บสเปอร์มบริเวณช่องท้องของนางพญาจะเต็ม และแม้ผึ้งตัวผู้จะเกิดมาแล้วได้ทำหน้าที่หรือไม่ได้ทำหน้าที่ของตนก็ตาม ผึ้งเหล่านี้ต้องพบจุดจบเช่นเดียวกันคือความตาย ความตายประการแรกเกิดหลังจากได้ทำหน้าที่ของตนอย่างสมบูรณ์เรียกว่าตายอย่างสมเกียรติ คือตายหลังจากทำการผสมพันธุ์กับนางพญา เพราะลำไส้ของผึ้งตัวผู้ที่อยู่ติดกับอวัยวะสืบพันธุ์ จะถูกดึงไปพร้อมกับอวัยวะสืบพันธุ์ขณะทำการผสมพันธุ์กับนางพญา ส่วนความตายประการสุดท้ายเกิดจากการถูกปล่อยให้อดตายหรือถูกขับออกจากรังเพราะไม่ได้ทำหน้าที่ซึ่งก็คือไม่ได้รับเลือกให้ผสมพันธุ์จากนางพญานั่นเอง (แสนนัด หงษ์ทรงเกียรติ, 2532)

ผึ้งงาน คือไข่ของนางพญาที่ได้รับการผสมพันธุ์กับน้ำเชื้อของผึ้งตัวผู้จะเกิดมาเป็นผึ้งเพศเมียเหมือนกับนางพญาแต่จะถูกทำให้เป็นหมันด้วยสารฟีโรโมน (pheromone) ที่ขับออกมาจากตัวนางพญาผึ้ง ไข่ที่จะเติบโตมาเป็นผึ้งงานนี้จะมีจำนวนมากที่สุดในรัง ผึ้งงานจะมีรูปร่างเล็กที่สุดแต่มีอวัยวะสำหรับทำงานหนักที่สุด บทบาทหน้าที่ของผึ้งงานนี้จะเริ่มตั้งแต่การเป็นผึ้งอ่อน หน้าที่แรกที่ต้องทำคือการดูแลรักษาความสะอาดของรัง ช่วยป้อนอาหารให้แก่ตัวอ่อน พออายุได้ 6-10 วัน ก็เริ่มผลิตไขเพื่อใช้ในการสร้างห้องฟักไข่ ช่วยรับน้ำผึ้งไปเก็บไว้ในห้องเก็บน้ำผึ้ง เมื่ออายุเข้า 14 วัน ก็จะมีหน้าที่ในการคุ้มครองรัง ทำความสะอาดรัง กระพือปีกปรับสภาพอากาศให้แก่รัง จนเมื่อโตเต็มที่จึงออกบินไปเก็บรวบรวมน้ำหวานมาผลิตน้ำผึ้ง รวบรวมละอองเรณูดอกไม้เพื่อเลี้ยงดูตัวอ่อนและนางพญา (แสนนัด หงษ์ทรงเกียรติ, 2532)

1. การจัดการการเลี้ยงผึ้ง

เป้าหมายของการเลี้ยงผึ้งคือ ต้องการได้ผลิตภัณฑ์จากผึ้งสูงที่สุด โดยการที่มีการลงทุนต่ำที่สุด การที่จะให้บรรลุถึงเป้าหมายจึงต้องมีการจัดการเลี้ยงผึ้งที่ดี ซึ่งมีองค์ประกอบหลายอย่าง เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในการเลี้ยงผึ้ง วิธีการเลี้ยงผึ้ง เป็นต้น ผู้เลี้ยงผึ้งต้องมีความละเอียด ช่างสังเกต อดทน ใจเย็น หมั่นฝึกฝนหาความชำนาญต่างๆ ศึกษาหาความรู้เพิ่มเติมจากตำราหรือประสบการณ์ของผู้เลี้ยงผึ้ง รวมถึงการปฏิบัติงานต่างๆ (วนิดา จรุงจิตต์, 2547)

2. ผลิตผลจากรังผึ้งที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์

ทุกส่วนของรังผึ้งคือผลิตผลที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอาหารหรือยา นับแต่น้ำผึ้ง นมผึ้ง เกสรผึ้ง ไขผึ้งหรือขี้ผึ้ง ยางผึ้ง พิษผึ้ง หรือแม้แต่รังของผึ้งก็สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เช่นกัน ในจำนวนผลิตผลจากผึ้งที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ ที่รู้จักกันและถูกนำไปใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับคนไทยคือน้ำผึ้งและไขผึ้ง

3. น้ำผึ้ง (Honey)

น้ำผึ้ง คือ น้ำหวานจากดอกไม้ที่ผึ้งงานดูดไปเก็บไว้ในกระเพาะ ซึ่งมักมีส่วนผสมของเกสรดอกไม้ติดอยู่ด้วย เมื่อผึ้งเก็บน้ำหวานในปริมาณที่สามารถนำกลับไปรังได้แล้ว ก็จะนำน้ำหวานนั้นกลับรัง จากนั้นจะมีผึ้งงานอีกกลุ่มหนึ่งมารับช่วงดูดน้ำหวานเข้าไปผสมกับเอนไซม์ที่อยู่ในกระเพาะ เพื่อเปลี่ยนน้ำหวานที่ได้ให้เป็นน้ำตาลชนิดต่างๆ แล้วกระพือปีกเพื่อไล่ความชื้นให้น้ำหวานมีความเข้มข้นจนกลายเป็นน้ำผึ้ง เพื่อนำไปเก็บไว้ในห้องเก็บน้ำผึ้ง ซึ่งจะปิดทับด้วยไขผึ้งและยางผึ้งเป็นลำดับต่อไป

การที่ผึ้งงานจะดูดน้ำหวานจากดอกไม้ดอกไหนนั้น มันจะเลือกอย่างดีที่สุด แม้สีและกลิ่นหอมของดอกไม้จะเป็นตัวดึงดูดเบื้องต้น แต่ถ้าดอกไม้ดอกนั้นไม่มีคุณภาพมากพอ มันก็จะบินไปเก็บดอกไม้ดอกอื่นหรือบินไปยังแหล่งดอกไม้แหล่งอื่นแทน บางครั้งผึ้งงานต้องบินออกไปหาแหล่งน้ำหวานไกลจากรังมาก กว่าจะพบแหล่งดอกไม้ที่มันต้องการ มีการประมาณว่ากว่าผึ้งงานจะสามารถหาน้ำหวานกลับรังได้สัก 1 ลิตร ผึ้งงานจะต้องบินไปกลับระหว่างรังกับแหล่งน้ำหวานจากดอกไม้ถึง 20,000-100,000 เที่ยวเลยทีเดียว ด้วยกรรมวิธีการเก็บน้ำหวานที่คัดแต่คุณภาพเช่นนี้ทำให้คุณสมบัติอันเป็นองค์ประกอบสำคัญในน้ำผึ้งของผึ้งที่หาอาหารตามธรรมชาติมีคุณค่ามากกว่าน้ำผึ้งที่มาจากผึ้งเลี้ยง ซึ่งจะเก็บน้ำหวานจากดอกไม้เพียงไม่กี่ชนิดที่ผู้เลี้ยงปลูกไว้หรือบางครั้งผึ้งอาจถูกให้ดูดน้ำตาลร่วมกับน้ำหวานจากดอกไม้ที่มีไม่พอ (สมนึก บุญเกิด, 2545)

น้ำผึ้งเป็นสารละลายน้ำตาลที่มีความอิ่มตัวยวดยิ่ง ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลหลักๆ 2 ชนิดคือ กลูโคส และฟรุกโทส มากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ (Siok,

1999) น้ำผึ้งเป็นผลิตผลของน้ำหวาน (nectar) จากดอกไม้ และจากแหล่งน้ำหวานอื่นๆ เช่น น้ำหวานจากเพลี้ยที่ผึ้งนำมาเก็บสะสมไว้และผ่านขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และกายภาพบางประการ แล้วสะสมไว้ในรังผึ้ง (honeycomb)

3.1 แหล่งและชนิดของพืชอาหารผึ้ง

จันทร์เพ็ญ ลิมปพยอม (2547) รายงานว่า น้ำหวานและเกสรดอกไม้จากพืชเป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของผึ้ง พันธุ์ไม้หลายประเภทเป็นต้นว่า ไม้ป่า ไม้ผล พืชไร่ พืชผัก พืชอาหารสัตว์ พืชคลุมดิน ตลอดจนวัชพืชต่างๆดอกของไม้เหล่านี้เป็นแหล่งอาหารของผึ้ง

พืชอาหารที่ดีของผึ้ง ได้แก่ พืชที่มีเกสรและน้ำหวานในปริมาณมาก อาจเป็นพืชชนิดเดียว หรือพืชหลายชนิดก็ได้ พืชบางชนิดให้น้ำหวานปริมาณมากขณะที่พืชบางชนิดให้เกสรมาก

3.1.1 พืชที่มีปริมาณน้ำหวานมากแต่เกสรน้อย ได้แก่ ลิ้นจี่ สาบเสือ เงาะ มะกอกน้ำ มันสำปะหลัง

3.1.2 พืชที่มีปริมาณเกสรมากแต่น้ำหวานน้อย ได้แก่ พืชตระกูลหญ้า ข้าวโพด หางนกยูง นนทรี โสนขน

3.1.3 พืชที่ให้ทั้งเกสรและน้ำหวานในปริมาณสมดุลพอสมควร ได้แก่ งิ้ว ลำไย หญ้าตีนตุ๊กแก ทานตะวัน

โดยปกติแล้ว น้ำตาลที่พืชสร้างขึ้นมาจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโต แต่เมื่อพืชเริ่มผลิดอก ต่อมน้ำหวาน (nectar gland) จะมีการเปลี่ยนแปลงแป้งและน้ำตาลเป็นน้ำหวาน ซึ่งกระบวนการนี้จะขึ้นกับสรีระวิทยาของพืชแต่ละชนิด และลักษณะภูมิประเทศ การผลิตน้ำหวานของพืชจะขึ้นกับกระบวนการสังเคราะห์แสง การขนส่งน้ำตาล การหายใจ และการเจริญเติบโตของพืช น้ำตาลที่จะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำหวานจะถูกเก็บไว้ในต่อมน้ำหวานที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนไป เช่น ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มของแสง อุณหภูมิ ความชื้นในดิน และการเกิดผลของต้นไม้ นอกจากนี้การสร้างน้ำหวานยังแตกต่างไปในแต่ละชนิดของดอกไม้ อายุดอกไม้ และช่วงเวลาในแต่ละวันด้วย ดอกไม้บางชนิดจะมีน้ำหวานเฉพาะในเวลาเช้าหรือในเวลาบ่าย แต่บางชนิดอาจจะผลิตน้ำหวานได้ตลอดวัน ผึ้งจะบินไปตอมหาน้ำหวานในช่วงที่ดอกไม้บานและมีน้ำหวานมากที่สุดเท่านั้น (สิริวัฒน์ วงษ์ศิริ, 2532)

น้ำหวานประกอบไปด้วยเกลือแร่ต่างๆ รวมทั้งสารประกอบของไนโตรเจน วิตามิน และรงควัตถุของพืช สำหรับน้ำตาลนั้นจะมีปริมาณตั้งแต่ 50-80% ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นส่วนผสมของกลูโคสและฟรุกโทส เมื่อธรรมชาติของดอกไม้ ซึ่งเป็นแหล่งอาหารของผึ้งแตกต่างออกไป ดังนั้นน้ำผึ้งที่ได้จึงมีกลิ่นรสและสีแตกต่างกันออกไปด้วย เช่น น้ำผึ้งที่ได้จากดอกลำไยจะมีสีเข้มกว่าน้ำผึ้งที่ได้จากดอกลิ้นจี่ ดอกเงาะ ดอกทุเรียน ดอกนุ่น และเป็นธรรมชาติของรังผึ้งที่จะเก็บน้ำหวาน

สะสมไว้ภายในรัง ดังนั้น ถ้าคนเลี้ยงผึ้งมีกรรมวิธีจัดการดูแลที่ดี และมีรังผึ้งอยู่ในบริเวณที่มีพืชชนิดเดียวกัน ออกดอกบานพร้อมๆกัน น้ำหวานที่ผึ้งงานดูดเก็บสะสมเป็นน้ำผึ้งไว้ภายในรังจะมาจากแหล่งพืชชนิดเดียวกันจึงทำให้ง่ายต่อการระบุชนิดของน้ำผึ้ง โดยปกติแล้วน้ำหวานที่ปล่อยออกมาจากต่อมน้ำหวานของพืชแต่ละชนิดจะมี รส กลิ่น สี เฉพาะตัวแตกต่างกันไป และองค์ประกอบโครงสร้างของน้ำตาลก็อาจผิดแผกจากกันไปบ้าง จึงทำให้คนเลี้ยงผึ้งที่มีประสบการณ์ สามารถจำแนกได้ว่า น้ำผึ้งที่เก็บเกี่ยวจากรังผึ้งในแต่ละสถานที่ แต่ละช่วงเวลา เป็นน้ำผึ้งที่มาจากน้ำหวานของดอกพืชชนิดไหนเป็นส่วนประกอบหลัก จึงทำให้สามารถระบุชนิดของน้ำผึ้งตามชนิดของพืชอาหารได้ เช่นมีการระบุว่าเป็นน้ำผึ้งจากดอกลิ้นจี่ น้ำผึ้งจากดอกส้ม น้ำผึ้งจากดอกลำไย น้ำผึ้งจากดอกสาบเสือ ฯลฯ (พงศ์เทพ อัครธนกุล, 2534)

นอกเหนือจากความแตกต่างในเรื่อง รส กลิ่น สี ของน้ำผึ้งแล้ว น้ำผึ้งจากดอกไม้ต่างชนิดกัน มีองค์ประกอบของน้ำตาลแตกต่างกันไปด้วย สัดส่วนของฟรุกโทส กลูโคส มอลโทส และน้ำตาลชนิดอื่นๆ จะผิดแผกกันไป ซึ่งอาจทำให้มีผลถึงความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้ง เช่นน้ำผึ้งจากดอกไม้บางชนิดอาจตกผลึกได้ยาก ได้แก่น้ำผึ้งจากดอกลำไย แต่น้ำผึ้งจากพืชบางชนิดตกผลึกได้ง่าย เมื่อกระทบความเย็น เช่น น้ำผึ้งจากดอกลิ้นจี่ ดอกส้ม (พงศ์เทพ อัครธนกุล, 2534)

3.2 องค์ประกอบทางชีวเคมีของน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งจากแหล่งต่างๆจะมีองค์ประกอบทางชีวเคมีที่คล้ายๆกันคือ ประกอบด้วย น้ำ น้ำตาล กรด โปรตีน เถ้า และองค์ประกอบอื่นๆ เช่น เอนไซม์ วิตามิน เม็ดสี แทนนิน เป็นต้น ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวอาจจะมีผลต่อการตกผลึกในน้ำผึ้งได้ โดยเฉพาะสัดส่วนขององค์ประกอบน้ำตาลในน้ำผึ้ง ดังแสดงในตารางที่ 1

3.2.1 ความชื้น (Moisture)

ปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งตามธรรมชาติขึ้นอยู่กับสภาวะอากาศ ความชื้นเริ่มต้นของน้ำหวานของดอกไม้ และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งอาจจะเปลี่ยนแปลงได้หลังจากที่แยกน้ำผึ้งออกจากรวงผึ้งแล้ว และการเก็บน้ำผึ้งไว้ในสภาวะต่างๆกัน

Gojmerac (1980) พบว่าปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งตามธรรมชาติจะอยู่ระหว่างร้อยละ 15-25 ปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งจะมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้งในเรื่องของการเปลี่ยนแปลงความหนืด ความหนาแน่น ความถ่วงจำเพาะ และความเข้มข้นของน้ำผึ้ง ซึ่งจะมีผลต่อการเกิดผลึกในน้ำผึ้ง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบหลักของน้ำผึ้งทั่วไป

Table 1 Principle composition of honey

องค์ประกอบ	ร้อยละ
น้ำ	17.20
น้ำตาล	
- ฟรุกโทส (fructose)	38.19
- กลูโคส (glucose)	31.29
- มอลโทส (maltose)	7.31
- ซูโครส (sucrose)	1.31
- น้ำตาลอื่นๆ	1.50
กรด (กลูโคนิก ซิตริก มาลิก ฟอร์มิก อะซิติก ฯลฯ)	0.57
ไนโตรเจน	0.04
เถ้าหรือธาตุต่างๆ	0.17
อื่นๆ	2.43

ที่มา : ดัดแปลงจาก สมนึก บุญเกิด (2544); Merin และคณะ (1998)

3.2.2 น้ำตาล (Sugar)

น้ำผึ้งเป็นแหล่งของสารอาหารคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญ เพราะถ้าหักปริมาณน้ำหรือความชื้นออกไปก่อน ร้อยละ 95-99 ที่เหลือจะเป็นน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ชนิดที่สำคัญคือ น้ำตาลฟรุกโทส และกลูโคส น้ำตาลทั้งสองชนิดซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ที่ร่างกายสามารถดูดซึมไปสร้างพลังงานได้ทันที และทำให้น้ำผึ้งมีคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น ดูดความชื้นจากบรรยากาศได้ น้ำผึ้งที่ดีควรมีน้ำตาลทั้งสองชนิดไม่น้อยกว่าร้อยละ 65 นอกจากนี้ฟรุกโทสยังมีความหวานมากกว่าน้ำตาลทราย 1.6 เท่า ขณะที่ร่างกายดูดซึมได้ช้า จึงสามารถใช้น้ำผึ้งเป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลทั่วไปได้ น้ำผึ้งที่ได้จากน้ำหวานดอกไม้จะมีฟรุกโทสมากกว่ากลูโคส นอกจากน้ำตาลทั้งสองชนิดแล้ว น้ำผึ้งยังประกอบด้วยซูโครส มอลโทส และน้ำตาลที่มีโมเลกุลเชิงซ้อนจัดเป็นประเภทโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide) (Kajiwara *et al*., 2002) คุณสมบัติจำเพาะทางกายภาพและเคมีของน้ำผึ้งจึงแปรผันขึ้นอยู่กับชนิดและสัดส่วนโอลิโกแซคคาไรด์ นอกจากนี้โอลิโกแซคคาไรด์ยังจัดเป็นพรีไบโอติก เพราะโอลิโกแซคคาไรด์ หลายชนิดช่วยส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย และมีผลให้จำนวนของแบคทีเรียที่เป็นอันตรายต่อร่างกายลด

น้อยลง โอลิโกแซคคาไรด์ที่พบในน้ำผึ้งได้แก่ ไอโซมอลโทส (isomaltose) หรือ มอลทูโลส (maltulose) ทูราโนส (turanose) หรือ เจนติโอไบโอส (gentiobiose) ไนจิโรส (nigerose) เมเลซิโทส (melezitose) พาโนส (panose) (Weston and Brocklebank, 1999) เมลิบิโอส (melibiose) มอลโทไตรโอส (maltotriose) และ ราฟฟิโนส (raffinose) (Da Costa Leite *et al*., 2000)

3.2.3 อนุภาคคอลลอยด์ (Colloid)

สำหรับอนุภาคคอลลอยด์ที่พบในน้ำผึ้งจะเป็นเกสรดอกไม้ ฝุ่นละออง และผลึกของกลูโคสขนาดเล็ก อนุภาคดังกล่าวนี้ต้องถูกกรองผ่านแผ่นกรอง ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในการแยกอนุภาคแขวนลอยในน้ำผึ้งก่อนนำไปจำหน่าย อนุภาคคอลลอยด์นี้จะเป็นตัวชักนำ ให้เกิดการตกผลึกของน้ำผึ้งได้ (Dadant and Sons, 1975)

3.2.4 เอนไซม์ (Enzyme)

เอนไซม์ที่พบในน้ำผึ้งและมีความสำคัญมากที่สุดคือ เอนไซม์อินเวอร์เทส (invertase enzyme) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโทส ซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วของการเกิดผลึกของน้ำผึ้งดังได้กล่าวแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์หลายชนิดได้แก่ แอลฟากลูโคซิเดส (α-glucosidase) ไดแอสเทส (diastase or amylase) กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) แคทาเลส (catalase) แอซิด ฟอสฟาเทส (acid phosphatase) (Anklam, 1998) เอนไซม์ที่มีอยู่ในน้ำผึ้งสามารถใช้เป็นดรรชนีในการบอกถึงการได้รับความร้อนของน้ำผึ้ง เนื่องจากเอนไซม์เป็นโปรตีนซึ่งจะสูญเสียสภาพเมื่อได้รับความร้อน

3.3 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำผึ้ง

3.3.1 การดูดความชื้น (Hygroscopicity)

ความสามารถในการดูดความชื้นของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับ ปริมาณน้ำตาลในน้ำผึ้ง ซึ่งจะมีผลต่อสัดส่วนความชื้น หรือองค์ประกอบที่เป็นน้ำในน้ำผึ้ง และปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ Gojmerac (1980) รายงานว่าปริมาณความชื้นของน้ำผึ้งจะไม่แปรปรวนมากในระหว่างการเก็บ โดยปกติพบว่าน้ำผึ้งมีความชื้นอยู่ประมาณร้อยละ 17.4 ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ 58% น้ำผึ้งจะดูดซึมความชื้นจากอากาศเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูงกว่า 58% และจะสูญเสียความชื้นเมื่อสัมผัสกับอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำกว่า 58% การเปลี่ยนแปลงของความชื้นในน้ำผึ้งจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งถึงจุดสมดุล น้ำผึ้งก็จะไม่เปลี่ยนแปลงความชื้นอีก

Dadant and Sons (1975) ได้ทดลองหาความสามารถในการดูดความชื้นของน้ำผึ้งเมื่ออยู่ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศต่างๆกันดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้น และความชื้นสัมพัทธ์ระดับต่างๆกันของน้ำผึ้งจากต้นโคลเวอร์ (clover honey)

Table 2 Approximate equilibrium points between the relative humidity and the percentage of water content in liquid clover honey

ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ปริมาณความชื้น (%)
52	16.1
58	17.4
66	21.5
76	28.9
81	33.9

ที่มา : ดัดแปลงจาก Dadant and Sons (1975)

ผิวหน้าของน้ำผึ้งจะดูดความชื้นอย่างรวดเร็วแต่เมื่อน้ำผึ้งสัมผัสกับอากาศแห้ง น้ำผึ้งจะสูญเสียความชื้นอย่างรวดเร็วในตอนแรก แต่หลังจากนั้นจะสูญเสียความชื้นอย่างช้าๆ เนื่องจากเกิดการรวมตัวกันของน้ำตาลในน้ำผึ้งเป็นแผ่นผลึกบางๆปิดกั้นไม่ให้ความชื้นออกไปได้ แต่เมื่อแผ่นผลึกบางๆนั้นสัมผัสกับอากาศอีกครั้งจะทำให้เกิดการหมักขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเซลล์ของยีสต์ที่ปนเปื้อนจากอากาศ Crane (1980) พบว่าการลดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลงโดยการให้ความร้อนกับอากาศ จะทำให้น้ำผึ้งดูดความชื้นได้น้อย

ปริมาณความชื้นในน้ำผึ้งเป็นตัวแปรสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้เกิดผลึกของน้ำผึ้งหรือทำให้เกิดการหมักของน้ำผึ้ง

3.3.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดของสารคือ แรงต้านการไหลของสารนั้นๆ น้ำผึ้งประกอบด้วยปริมาณเนื้อสารที่เป็นของแข็งซึ่งละลายได้ หรือที่เรียกว่าบอดี้ (body) ความหนืดของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่มีบอดี้มาก (heavy body) จะมีความหนืดสูง และจะไหลอย่างช้าๆ ก่อให้เกิดปัญหามากในขั้นตอนการแยกน้ำผึ้งออกจากรวงผึ้ง ทำให้แยกน้ำผึ้งออกมาได้ไม่หมด นอกจากนี้ความหนืดของน้ำผึ้งยังมีผลต่อปริมาณของฟองอากาศที่เกิดขึ้นในระหว่างการบรรจุลงขวด การควบคุมให้เกิดฟองอากาศน้อยที่สุดมักจะกระทำโดยการปรับอุณหภูมิของน้ำผึ้งให้เหมาะสม (Dadant and Sons, 1975) การให้ความร้อนแก่น้ำผึ้งที่อุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส จะทำให้

ความหนืดของน้ำผึ้งลดลง จึงทำให้มีความเหมาะสมต่อการแยกน้ำผึ้งออกจากรวงผึ้ง การบรรจุน้ำผึ้งลงขวด และการขนส่ง (Gojmerac, 1980)

Yanniotis และคณะ (2006) รายงานว่า น้ำผึ้งแต่ละชนิดมีความหนืดที่แตกต่างกัน และมีคุณสมบัติเป็นแบบ Newtonian ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และความชื้นของน้ำผึ้ง โดยเฉพาะความชื้นของน้ำผึ้งจะขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม และการจัดการการเลี้ยงผึ้งที่กระทำ ณ เวลาเก็บเกี่ยวผลผลิต ทำให้มีผลต่อคุณภาพของน้ำผึ้งแบบปีต่อปี ซึ่งได้ทำการทดลองกับน้ำผึ้งหลายชนิดได้แก่ Pine honey, Fir honey, Cotton honey, Helianthus honey, Orange honey และ Thymus honey พบว่าความหนืดลดลง เมื่อความชื้นเพิ่มสูงขึ้นเป็น 17, 18, 19 และ 21 เปอร์เซ็นต์ และให้อุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 25, 30, 35, 40 และ 45 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

3.3.3 ความหนาแน่น (Density)

น้ำผึ้งมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำประมาณร้อยละ 50 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (relative density) ของน้ำผึ้งจะอยู่ระหว่าง 1.40-1.44 ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความหนาแน่นของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นในน้ำผึ้ง (Crane, 1980)

3.3.4 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity)

ความถ่วงจำเพาะ คือ อัตราส่วนของความหนาแน่นของสารละลายนั้นๆ เทียบกับความหนาแน่นของน้ำ น้ำผึ้งที่คุณภาพดีที่สุด (top-grade) จะมีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.4129 (Dadant and Sons, 1975) ความถ่วงจำเพาะจะมีความสัมพันธ์กับความชื้นในน้ำผึ้งดังตารางที่ 3 โดยที่น้ำผึ้งที่มีความชื้นหรือองค์ประกอบที่เป็นน้ำในสัดส่วนที่มากก็จะมีความถ่วงจำเพาะลดลง

ตารางที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความถ่วงจำเพาะกับความชื้นในน้ำผึ้งที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
Table 3 True specific gravity of honey at different water content at 20 $^{\circ}$C

ความชื้น (%)	ความถ่วงจำเพาะ
13.2	1.4510
15.4	1.4325
17.0	1.4239
18.0	1.4171
19.0	1.4101
21.1	1.3966

ที่มา : ดัดแปลงจาก Dadant and Sons (1975); Crane (1975)

4. การเกิดผลึกในน้ำผึ้ง

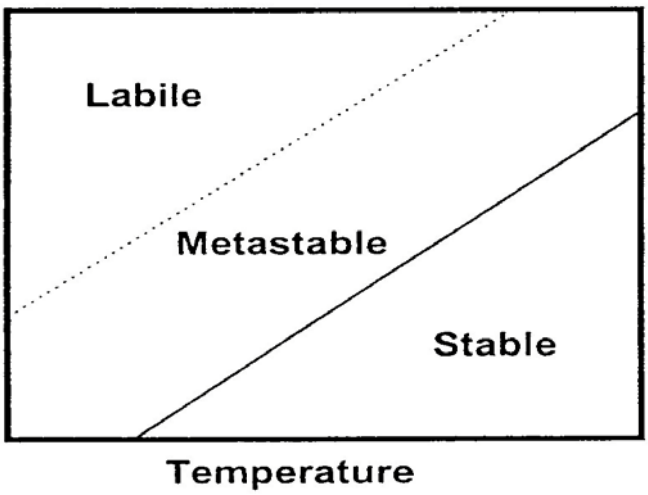
การเกิดผลึกในน้ำผึ้ง (crystallization) หมายถึงการรวมตัวของผลึกน้ำตาลในน้ำผึ้ง เนื่องจากน้ำผึ้งเป็นสารละลายน้ำตาลที่มีความอิ่มตัว ประกอบด้วยกลูโคสและฟรุกโทสเป็นส่วนใหญ่ และเป็นสารละลายที่ไม่เสถียรในสภาวะปกติ ดังนั้นตัวถูกละลาย (solute) ซึ่งเป็นน้ำตาลจึงมักแยกตัวออกมาในรูปผลึก เพื่อให้มีความเสถียร

Root (1950) พบว่ากลูโคสซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้น้อยที่สุด ในบรรดาน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบของน้ำผึ้งทั้งหมด จะตกผลึกแยกตัวออกมาจากน้ำผึ้งก่อน ส่วนฟรุกโทสซึ่งมีความสามารถในการละลายน้ำได้ดีกว่ากลูโคส จะตกผลึกแยกตัวออกมาภายหลังหรือบางครั้งอาจไม่แยกตัวออกจากน้ำผึ้งในรูปของผลึกเลย เนื่องจากกลูโคสตกผลึกออกมาจนทำให้เกิดความสมดุลของสารละลายอิ่มตัวจึงไม่เกิดผลึกขึ้นอีก ดังนั้นผลึกส่วนใหญ่ของน้ำผึ้งจะเป็นผลึกของกลูโคสแม้ว่าองค์ประกอบของน้ำผึ้งปกติจะมีฟรุกโทสอยู่มากกว่ากลูโคสก็ตาม

4.1 ความหมายของการตกผลึก และทฤษฎีการตกผลึก

สสารสามารถแบ่งได้เป็น 3 สถานะ คือของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในสถานะของแข็งอาจแบ่งเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะการจัดเรียงตัว คือ (1) กลุ่มที่มีการจัดเรียงตัวภายในของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล ซึ่งเป็นโครงสร้างภายในของของแข็ง เป็นไปอย่างเดาสุ่มหรือไม่มีระเบียบเรียกว่า อสัณฐาน (amorphous) หรือตะกอนซึ่งตรงข้ามกับอีกกลุ่มหนึ่งคือ (2) กลุ่มที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล อย่างเป็นระเบียบซ้ำๆ กัน เรียกว่าผลึก (crystal) (จินตนา สิริพิทยานานนท์, 2537) หรือกล่าวได้ว่า ผลึก คือของแข็งที่มีผิวหน้าเรียบและผิวแต่ละด้านทำมุมกันแน่นอน ผลึกของสารชนิดเดียวกัน ผิวหน้าแต่ละด้านจะทำมุมเท่ากัน ที่เป็นแบบนี้เพราะว่าอะตอมของสารชนิดเดียวกันมีการเรียงตัวในรูปแบบที่เหมือนกัน ในบางครั้งเราสามารถจำแนกแร่ธาตุต่างๆ ได้จากลักษณะรูปทรงของผลึก (Mullin, 1992)

การตกผลึกเป็นกระบวนการการแยกของแข็งจากของเหลว ที่มีการถ่ายเทมวลสารของตัวถูกละลายจากสารละลายไปยังวัฏภาคของผลึกของแข็งบริสุทธิ์ การตกผลึกเป็นกระบวนการที่อนุภาคของแข็ง ก่อตัวจากวัฏภาคเอกพันธ์ (homogeneous phase) กระบวนการนี้เช่น การทำน้ำเย็นเพื่อก่อตัวเป็นน้ำแข็ง การก่อตัวของอนุภาคของแข็งจากของเหลวหลอมละลาย หรือการก่อตัวของผลึกของแข็งจากสารละลาย ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญเชิงพาณิชย์ ในกระบวนการตกผลึกสารละลายมักจะถูกทำให้เข้มข้นและเย็นลง จนกระทั่งความเข้มข้นของตัวละลายมีค่าสูงกว่าสภาพการละลาย หรือสภาวะสมดุลที่อุณหภูมินั้น จากนั้นตัวถูกละลายจะแยกออกจากสารละลาย โดยก่อตัวเป็นผลึกที่เกือบบริสุทธิ์ (ชาคริต ทองอุไร และคณะ, 2540)



ภาพที่ 1 แผนภาพสภาพอิ่มตัวยวดยิ่ง

Figure 1 Diagram of supersaturation

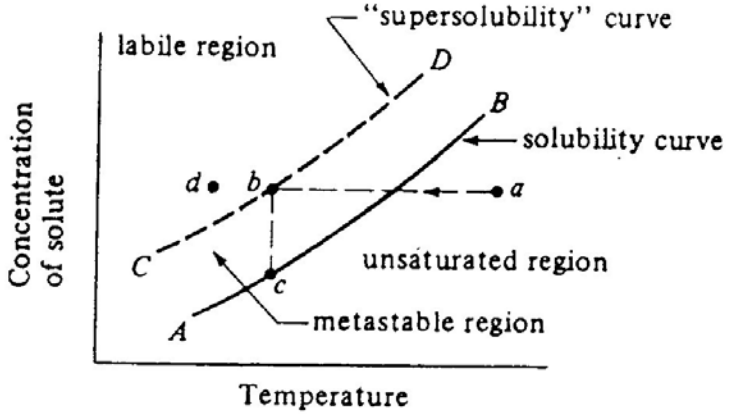
ที่มา : Berger (1977)

เมื่อพิจารณาจากภาพที่ 1 ซึ่งแสดงสถานะของสารละลายแบ่งเป็น 3 ช่วง อธิบายได้ว่า ในกรณีที่ตัวถูกละลายมีค่าต่ำกว่าสภาพในการละลายได้ (solubility) ของสารชนิดนั้นๆ สารละลายจะมีสภาพใสเป็นเนื้อเดียวกัน เนื่องจากตัวถูกละลายจะถูกละลายได้หมด ซึ่งจัดอยู่ในช่วงที่เรียกว่า stable เมื่อค่อยๆ เติมตัวถูกละลายลงไปในสารละลายจะทำให้ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงขึ้นจนเข้าสู่ช่วงของ metastable ในช่วงนี้สารละลายจะอยู่ในสภาพกึ่งเสถียร ถ้ามีการเติมผลึกขนาดเล็ก (seed) ลงในสารละลาย ผลึกจะมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ถ้าสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นอีก จะสามารถมองเห็นผลึกขนาดเล็ก (nuclei) เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในสารละลาย แต่ถ้าสารละลายนั้นมีความเข้มข้นสูงกว่าความสามารถในการละลายมากๆ จนอยู่ในช่วง labile ซึ่งเป็นสภาพที่ตัวถูกละลายจะจับรวมตัวกันเป็นตะกอนเกิดขึ้นมากกว่าที่จะมีการจับตัวเป็นผลึก ซึ่งความแตกต่างระหว่างตะกอนกับผลึกคือ ตะกอนเป็นสารที่มีรูปร่างไม่แน่นอนและไม่มีความจำเพาะในการจัดเรียงตัวในระดับโมเลกุลจึงมักให้สารในสภาพของแข็งที่ไม่บริสุทธิ์

การตกผลึกของน้ำผึ้งเกิดขึ้นได้เมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายมีความเข้มข้นมากกว่าในสภาวะสมดุล เรียกสภาวะดังกล่าวว่าสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง สารละลายที่มีความอิ่มตัวยวดยิ่งอาจเกิดได้หลายๆ วิธี เช่น เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลาย การระเหยออกของตัวทำละลายจากสารละลาย หรือการเพิ่มองค์ประกอบที่สามที่สามารถละลายได้ในสารละลายนั้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของปริมาณตัวถูกละลายและตัวทำละลาย โดยทั่วไปขั้นตอนของการตกผลึกจะประกอบด้วย 2 กระบวนการได้แก่

1. การเกิดนิวเคลียส (Nucleation) กระบวนการตกผลึกของน้ำผึ้งที่อยู่ในสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่ง เริ่มจากการรวมตัวของโมเลกุลในบริเวณเดียวกัน จนกลายเป็นเอ็มบริโอซึ่งมีขนาดเล็กมาก ถ้าเอ็มบริโอมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต (critical size) มักจะละลายเป็นของเหลวเช่นเดิม แต่ถ้าเอ็มบริโอมีขนาดถึงขนาดวิกฤตก็จะกลายเป็น nuclei พร้อมที่จะเพิ่มขนาดเติบโตต่อไป (Oh and Berger, 1981) การเกิดอนุภาคที่มีขนาดเล็กจำนวนมาก หรือที่เรียกว่า nuclei ซึ่งมี 2 ประเภท แบ่งตามกลไกการเกิดอนุภาคคือ

- การเกิดนิวเคลียสแบบปฐมภูมิ (primary nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสในสารละลายที่ไม่มีผลึกของตัวถูกละลายซึ่งแบ่งออกเป็นแบบ homogeneous และ heterogeneous ซึ่งแบบ homogeneous จะเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานของโมเลกุลในบริเวณนั้นในวัฏภาคเอกพันธ์ อะตอมหรือโมเลกุลจะจับตัวกันและก่อตัวเป็นกลุ่ม อนุภาคของตัวถูกละลายในสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง โดยการเชื่อมต่อกันของอะตอม หรือโมเลกุล ทำให้เกิดเป็นผลึกขนาดเล็กๆ แขวนลอยในสารละลาย หากมีโมเลกุลเข้ามาเกาะเพิ่มขึ้น กลุ่มนี้จะเพิ่มขนาดให้ใหญ่ขึ้น ส่วน heterogeneous เป็นการเกิดอนุภาคของแข็งหรือผลึกขนาดเล็กบนพื้นผิวของวัตถุเช่น การเกิดผลึกขนาดเล็กเกาะติดบนพื้นผิวของอนุภาคอื่นที่แขวนลอยในสารละลาย หรือ พื้นผิวของภาชนะ (Cherdrungsi, 1999)



ภาพที่ 2 การอธิบายการตกผลึกเชิงคุณภาพ

Figure 2 Qualitative explanation of crystallization

ที่มา : Geankoplis (1983)

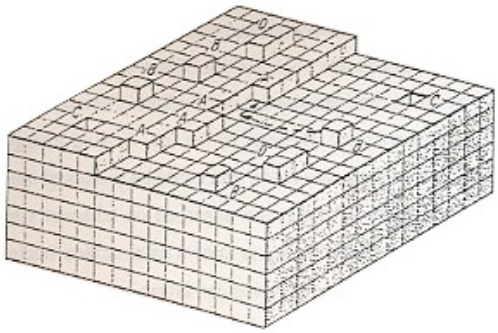
จากภาพที่ 2 ข้างต้นอธิบายการเกิดผลึกในสารละลายที่ไม่มีการล่อผลึก (seeding) เส้น AB เป็นเส้นโค้งของสภาพการละลายได้ ถ้าตัวอย่างสารละลายเริ่มที่จุด a ถูกหล่อเย็นจนอุณหภูมิลด

ลงข้ามเส้นโค้งของการละลายได้ สารละลายตัวอย่างจะยังไม่ตกผลึกจนกระทั่งเข้าสู่สภาพเย็นยวดยิ่งหรือสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่งที่จุด b จึงจะเริ่มตกผลึก และความเข้มข้นก็จะตกลงมาที่จุด c ถ้าไม่มีการหล่อเย็นไปมากกว่านี้ เส้นโค้ง CD เรียกว่าเส้นโค้งของสภาพการละลายยวดยิ่ง ซึ่งแสดงถึงขีดจำกัดในการเริ่มต้นเกิดนิวเคลียส (nucleation threshold) ดังนั้นจึงเป็นจุดที่เริ่มต้นการตกผลึก ผลึกใดๆที่อยู่ในช่วงกึ่งเสถียร (metastable region) จะโตขึ้น จึงมีแนวโน้มที่ต้องพิจารณาเส้นโค้งของสภาพการละลายยวดยิ่งเป็นบริเวณที่อัตราการเกิด nucleation เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามการอธิบายชี้ให้เห็นว่าหากการเกิดสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่งสูงแล้ว โอกาสที่จะเกิด nuclei ก็สูงด้วย (Geankoplis,1983)

- การเกิดนิวเคลียสแบบทุติยภูมิ (secondary nucleation) เป็นการเกิดนิวเคลียสในสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง ที่ถูกชักนำด้วยการเติมผลึกเล็กๆ ลงไปในสารละลาย (seeding)

การชักนำด้วยการเติมผลึกเล็กๆ ลงไป หรือการล่อผลึก (seeding) เป็นกระบวนการที่ช่วยให้สารเกิดการตกผลึกจากสารละลาย โดยการเติมผลึกขนาดเล็กที่เป็นสารชนิดเดียวกันกับสารที่ต้องการให้ตกผลึก ปริมาณเล็กน้อยลงในสารละลาย เพื่อให้เกิดผลึกที่มีขนาดใหญ่ขึ้นในสารละลายนั้น (Oh and Berger, 1981)

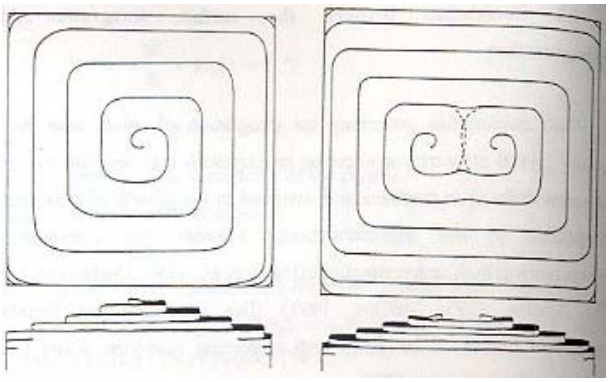
2. การโตของผลึก (Crystal growth) เป็นขั้นตอนการขยายขนาดของผลึกเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นต่อเนื่องจากกระบวนการ nucleation ในสารละลายอิ่มตัวยวดยิ่ง ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ควบคุมรูปร่างและขนาดของผลึก การเพิ่มขนาดของผลึกถูกควบคุมโดย 2 กลไกคือการแพร่ของตัวถูกละลาย และปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึก ซึ่งสามารถอธิบายได้ตามทฤษฎีของการแพร่ คือสารต่างๆจะมีการถ่ายโอนโมเลกุลเกิดขึ้นจากที่มีความเข้มข้นสูงไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังนั้นตัวถูกละลายในของเหลว ซึ่งมีความเข้มข้นสูงกว่าจะมีการถ่ายโอนมวลมายังบริเวณผิวหน้าของผลึกเนื่องจากมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำกว่า โดยเมื่อตัวถูกละลายมาถึงยังผิวหน้าของผลึกจะเชื่อมต่อเข้ากับผลึกด้วยปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของผลึก (Mullin, 1992) อัตราการแพร่ และสมดุลที่ผิวหน้าของผลึกจะมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขนาดของผลึก การเพิ่มขนาดของผลึกสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ แบบ two dimentional nucleation เป็นการเพิ่มขนาดของผลึกโดยที่อนุภาคขนาดเล็กของตัวถูกละลายมาเกาะที่ผิวหน้าของผลึก และก่อตัวเป็นชั้นเกิดขึ้นเพิ่มขึ้นทีละชั้นตามแนวระนาบของพื้นผิวผลึก ทำให้ขนาดของผลึกเพิ่มขึ้น อีกแบบคือ screw dislocations เป็นการเพิ่มขนาดของผลึกโดยอนุภาคขนาดเล็กมาเกาะที่บริเวณผิวของผลึกแบบหมุนวนในลักษณะคล้ายบันไดเวียน เนื่องจากการเข้ามาเกาะของอนุภาคตรงบริเวณที่เป็นมุมจะใช้พลังงานน้อยกว่า



ภาพที่ 3 แสดงการโตของผลึกแบบ two dimentional nucleation

Figure 3 The growth of crystal by two dimentional nucleation

ที่มา : Burton และคณะ (1951 อ้างโดย Cherdrungsi,1999)



ภาพที่ 4 แสดงการโตของผลึกแบบ screw dislocations

Figure 4 The growth of crystal by screw dislocations

ที่มา : Burton และคณะ (1951 อ้างโดย Cherdrungsi,1999)

4.2 จลนพลศาสตร์ของการตกผลึก (Rufford, 2000)

อัตราการเพิ่มขนาดของผลึก (crystal growth rate) สามารถคำนวณด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น linear growth rate (L*) ซึ่งเป็นเทคนิคอย่างหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย โดยใช้การเปรียบเทียบเป็นการเปลี่ยนมิติด้านขนาดของผลึก (L) กับเวลา (t) ดังสมการ (1)

$$L^* = dL/dt \qquad (1)$$

หรืออาจวัดอัตราการเพิ่มขนาดของผลึกด้วยมวลสารที่เพิ่มขึ้น (m_c) ต่อหน่วยของเวลา (t) ดังสมการที่ (2)

$$m_c = d\, m_c /dt \qquad (2)$$

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตของมวล ของผลึกเดี่ยว (m_c^*) กับ linear growth rate (L*) สามารถแสดงดังสมการ (3)

$$m_c^* = \pi/2\, \rho_c L^2 L^* \qquad (3)$$

เมื่อ ρ_c เป็นความหนาแน่นของผลึก ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,540 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับกลูโคสโมโนไฮเดรต

driving force สำหรับ crystal growth rate ในสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่ง ซึ่งกลูโคสในสารละลายน้ำผึ้งเป็นตัวถูกละลายคือ

$$s = (C-C^*) \qquad (4)$$

โดยที่ C เป็นค่าความเข้มข้นของกลูโคสโมโนไฮเดรตที่มีในสารละลายหรือน้ำผึ้ง และ C* เป็นค่าการละลายได้ของกลูโคสโมโนไฮเดรตที่สภาวะสมดุล

โดยที่อัตราส่วนของกลูโคสต่อน้ำ (G/W) ถูกตั้งเป็นคุณสมบัติเพื่อการวิเคราะห์ crystal growth เพื่อให้ driving force อยู่ในรูปของอัตราส่วนของกลูโคสต่อน้ำ ดังนั้นสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่งของกลูโคสโมโนไฮเดรตในน้ำผึ้งอาจหาได้จากสมการ

$$s = (G/W - G^*/W) \qquad (5)$$

และสามารถเขียนในรูปของสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่งด้วย dimentionless ratio ได้ดังนี้

$$\sigma = [(G/W) / (G/W)^*] -1 = s / (G/W)^* \qquad (6)$$

linear growth rate (L*) จึงอาจเขียนในรูปของสภาวะอิ่มตัวยวดยิ่ง ดังสมการ

$$L^* = k_G s^a = k'_G \sigma^a \qquad (7)$$

นอกจากนี้การตกผลึกของน้ำผึ้งยังเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของน้ำผึ้ง สภาพการเก็บรักษาและกระบวนการผลิตน้ำผึ้ง น้ำผึ้งบางชนิดไม่เคยตกผลึก ในขณะที่น้ำผึ้งอีกหลายชนิดตกผลึกภายในระยะเวลาเพียงไม่กี่วันหลังจากที่แยกออกมาจากรวงผึ้ง หรืออาจตกผลึกตั้งแต่อยู่ในรวงผึ้งก็

ได้ (Dadant and Sons, 1975) น้ำผึ้งบางชนิดจะเกิดการรวมตัวของผลึกกลูโคสเป็นผลึกที่มีขนาดเล็ก แต่บางชนิดก็เป็นผลึกขนาดใหญ่

4.3 สาเหตุของการตกผลึกในน้ำผึ้ง

เนื่องจากน้ำผึ้งเป็นสารละลายอิ่มตัวของกลูโคส และฟรุกโทสเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้น น้ำผึ้งทุกชนิดจึงมีโอกาสที่จะตกผลึกได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

4.3.1 แหล่งของน้ำหวาน

Assil และคณะ (1991) ได้รายงานว่าพื้นที่ที่มีสภาพภูมิศาสตร์ต่างกันจะมีพันธุ์ไม้ที่สามารถเจริญเติบโตได้แตกต่างกัน พันธุ์ไม้แต่ละชนิดจะเป็นแหล่งของน้ำหวานที่ผึ้งใช้ในการสร้างน้ำผึ้งซึ่งมีปริมาณของน้ำตาลแตกต่างกันไป รวมไปถึงปริมาณของกลูโคสด้วย ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้น้ำผึ้งมีโอกาสตกผลึกต่างกัน ตัวอย่างเช่น น้ำผึ้งจากมลรัฐอัลเบอร์ตา (Alberta) ประเทศแคนาดา ซึ่งเก็บมาจากพื้นที่หลักๆ 3 แหล่งคือ บริเวณลุ่มแม่น้ำพีซ (peace) ทางภาคเหนือ ภาคกลาง และภาคใต้ของมลรัฐอัลเบอร์ตา หลังจากที่ได้วิเคราะห์หาปริมาณน้ำตาลชนิดต่างๆด้วยวิธี HPLC (High Performance Liquid Chromatography) แล้วพบว่าน้ำผึ้งที่เก็บมาจากทั้ง 3 แหล่งดังกล่าวมีปริมาณของกลูโคส และฟรุกโทสต่างกัน และน้ำผึ้งจากแหล่งที่มีกลูโคสมากกว่าจะตกผลึกได้เร็วกว่า น้ำผึ้งแต่ละชนิดจะมีองค์ประกอบของกลูโคสและฟรุกโทสแตกต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อความเร็วในการตกผลึกของน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่ได้จากน้ำหวานของดอกคาโนลา (canola) จะตกผลึกโดยธรรมชาติ โดยยังไม่ผ่านกระบวนการผลิต ในขณะที่น้ำผึ้งจากดอกโคลเวอร์ ไม่ตกผลึกเมื่อเก็บในสภาวะเดียวกันซึ่งเป็นไปได้ว่าน้ำผึ้งจากดอกโคลเวอร์มีปริมาณกลูโคสอยู่น้อยกว่าน้ำผึ้งจากดอกคาโนลา นอกจากนี้ Hooper (1976) พบว่าน้ำผึ้งซึ่งมีปริมาณกลูโคสสูง เช่น น้ำผึ้งจากดอกของต้นเรพ (rape honey) จะตกผลึกอย่างรวดเร็ว ในทางตรงกันข้ามน้ำผึ้งที่มีปริมาณของฟรุกโทสสูง เช่น น้ำผึ้งจากดอกของต้นโรบิเนีย (robinia) เกือบจะไม่มีการตกผลึกเลย

องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่ต่างกันมีผลต่อปริมาณกลูโคสอิ่มตัวในน้ำผึ้ง น้ำหวานของดอกไม้ที่มีกลูโคสสูงจะตกผลึกได้ง่ายเช่น ไอวี่ เนคตาร์ (ivy nectar) มีกลูโคสสูงถึงร้อยละ 70 และมีฟรุกโทสเพียงร้อยละ 22 จะตกผลึกตั้งแต่อยู่ในตัวผึ้ง น้ำผึ้งที่มีกลูโคสน้อยกว่าร้อยละ 30 เช่น ทูพีโล (tupelo) จะไม่มีการตกผลึกเลยในขณะที่น้ำผึ้งที่มีกลูโคสอยู่ร้อยละ 37 เช่น น้ำผึ้งจากดอกฝ้าย (cotton) จะตกผลึกได้ตามธรรมชาติ (Crane, 1975)

4.3.2 อัตราส่วนขององค์ประกอบต่างๆในน้ำผึ้ง

อัตราส่วนขององค์ประกอบในน้ำผึ้งที่ใช้เป็นดรรชนีบอกถึงความสามารถในการตกผลึกของน้ำผึ้งมีอยู่หลายตัวด้วยกัน แต่ดรรชนีที่สามารถบอกถึงการตกผลึกของน้ำผึ้งได้เป็นอย่างดีและเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมี 2 ชนิดคือ

4.3.2.1 อัตราส่วนของปริมาณกลูโคสต่อปริมาณน้ำ (glucose/water)

น้ำผึ้งที่มีอัตราส่วนของกลูโคสต่อน้ำน้อยกว่า 1.7 จะไม่เกิดการตกผลึกในขณะที่น้ำผึ้งซึ่งมีอัตราส่วนของกลูโคสต่อน้ำมากกว่า 2.1 จะตกผลึกภายในระยะเวลา 1 สัปดาห์เท่านั้น (Assil *et al.,* 1991)

4.3.2.2 อัตราส่วนของฟรุกโทสต่อกลูโคส (fructose/glucose)

น้ำผึ้งที่มีอัตราส่วนของน้ำหนักแห้งของฟรุกโทสต่อกลูโคสมากกว่า 2 จะไม่เกิดผลึก ทั้งนี้ไม่คิดปริมาณน้ำที่น้ำตาลสองชนิดนี้ละลายอยู่ นอกจากนี้ยังพบอีกว่า น้ำผึ้งที่มีปริมาณกลูโคสน้อยกว่าร้อยละ 30 (น้ำหนักแห้ง)จะไม่เกิดผลึกเช่นกัน (Assil *et al.,* 1991)

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้พอที่จะสรุปได้ว่า การตกผลึกของน้ำผึ้งขึ้นอยู่กับปริมาณกลูโคส อัตราส่วนของกลูโคสต่อน้ำ และอัตราส่วนของฟรุกโทสต่อกลูโคส Crane (1975) กล่าวว่าน้ำผึ้งที่มีปริมาณฟรุกโทสสูงจะยังคงเป็นของเหลวอยู่ได้นาน ดังนั้นอัตราส่วนของฟรุกโทสต่อกลูโคส และอัตราส่วนของกลูโคสลบด้วยค่าปริมาณของน้ำต่อฟรุกโทส จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดผลึกในน้ำผึ้งได้ อย่างไรก็ตามการใช้อัตราส่วนขององค์ประกอบในน้ำผึ้งเป็นดรรชนีในการบอกถึงการตกผลึก จะใช้ได้เฉพาะน้ำผึ้งที่มีความแตกต่างขององค์ประกอบของน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น

4.3.3 ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งที่มาจากแหล่งต่างๆกัน มีปริมาณความชื้นต่างกัน ปริมาณความชื้นในน้ำผึ้งจะมีผลต่อระดับความเข้มข้นของน้ำตาลในน้ำผึ้ง น้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นสูงจะมีความเข้มข้นของน้ำตาลน้อยจึงไม่เกิดผลึก ส่วนน้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นต่ำจะมีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงจึงเกิดผลึกได้ง่าย (Assil *et al*., 1991) น้ำผึ้งที่มีปริมาณความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 17 จะเกิดผลึกได้ง่าย ส่วนน้ำผึ้งที่มีความชื้นสูงกว่าร้อยละ 19 จะเสี่ยงต่อการเกิดการหมัก (Crane, 1980)

4.3.4 อนุภาคที่แขวนลอยในน้ำผึ้งเป็นตัวกลางชักนำให้เกิดผลึก

น้ำผึ้งซึ่งเป็นสารละลายอิ่มตัวของน้ำตาล เมื่ออยู่ในสภาวะปกติโมเลกุลของน้ำตาลที่ละลายอยู่มีแนวโน้มที่จะแพร่ไปสู่บริเวณผิวหน้า แล้วมีแรงกระทำในช่วงสั้นๆ (short-range force) ทำให้เกิดการรวมตัวกันของโมเลกุลน้ำตาลเหล่านั้นกลายเป็นผลึกขึ้นที่บริเวณผิวหน้าโดยที่ผลึกจะเกิดที่บริเวณขอบหรือมุมที่สัมผัสกับน้ำผึ้งก่อน จากนั้นจะแพร่กระจายไปทั่วผิวหน้าของน้ำผึ้ง อนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำผึ้ง ได้แก่ ผลึกขนาดเล็กของน้ำตาลซึ่งมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า ฝุ่นละอองทั้งที่มาจากอากาศ เกสรดอกไม้ (pollen grains) และเศษของรวงผึ้ง (Crane, 1975) นอกจากนี้ยังมีฟองอากาศในน้ำผึ้ง ซึ่งอนุภาคที่แขวนลอยเหล่านี้จะเป็นตัวกลางที่ชักนำให้เกิดการตกผลึกขึ้นในน้ำผึ้งได้ (Hooper, 1976)

Crane (1980) พบว่าการรวมตัวของผลึกในน้ำผึ้งเป็นการรวมตัวกันของผลึกกลูโคสที่มีอยู่ก่อนแล้วแต่มีขนาดเล็กมากมองด้วยตาเปล่าไม่เห็น ต้องใช้กล้องจุลทรรศน์ที่มีกำลังขยายสูงๆจึงจะมองเห็นได้ ผลึกขนาดเล็กเป็นตัวชักนำให้เกิดการรวมตัวของผลึกกลูโคสเกิดเป็นผลึกได้ นอกจากนี้ยังได้ค้นพบว่าการตกผลึกของน้ำผึ้งนอกจากจะเกิดจากผลึกเล็กๆ ของกลูโคสชักนำให้เกิดขึ้นแล้ว ยังอาจเกิดจากผลึกขนาดเล็กของสารอื่นๆ ที่มีโครงสร้างของผลึกแบบเดียวกับกลูโคสที่ปะปนมากับน้ำผึ้งแล้วชักนำให้เกิดผลึกขึ้นก็เป็นได้

Root (1950) พบว่าฟองอากาศเล็กๆที่ปรากฏอยู่ในน้ำผึ้งจะเป็นตัวเร่งให้เกิดผลึกเร็วขึ้น เพราะว่าฟองอากาศจะพยายามดันตัวลอยขึ้นสู่บริเวณผิวหน้าแล้วรวมตัวกันมากขึ้นที่บริเวณผิวหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของผิวหน้าของน้ำผึ้ง ทำให้สัมผัสกับอากาศมากขึ้นและน้ำระเหยออกไปได้เร็วขึ้น จึงเป็นเหตุให้เกิดการตกผลึกเร็วขึ้น

4.3.5 การกวนหรือแรงกระทำจากภายนอก

การกวนหรือแรงกระทำจากภายนอกทำให้น้ำผึ้งได้รับการกระทบกระเทือน จะมีผลต่อการตกผลึกของน้ำผึ้ง พบว่าน้ำผึ้งที่มีความอิ่มตัวสูงอาจจะไม่เกิดผลึกถ้าไม่มีแรงกระทำจากภายนอก แต่ถ้ามีการกวนจะทำให้เกิดผลึกขึ้นได้ Root (1950) ได้ศึกษาผลของแรงกระทำจากภายนอกต่อการเกิดผลึกของน้ำผึ้งโดยแบ่งตัวอย่างผึ้งออกเป็นสองชุด น้ำผึ้งชุดแรกจะถูกขนส่งไปยังสถานที่อื่น พบว่ามีผลึกเกิดขึ้นเนื่องจากมีการกระทบกระเทือนระหว่างการขนส่ง เมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างน้ำผึ้งอีกชุดหนึ่งซึ่งเก็บไว้ที่แหล่งผลิตไม่มีการเคลื่อนย้าย พบว่าไม่เกิดผลึกทำให้สรุปได้ว่าการกวนหรือแรงกระทำจากภายนอกจะเร่งให้น้ำผึ้งตกผลึกเร็วขึ้น

4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตกผลึกของน้ำผึ้ง

4.4.1 ปริมาณกลูโคสในน้ำผึ้ง

ปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในน้ำผึ้งแต่ละชนิดจะไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นกับแหล่งน้ำหวานของดอกไม้ซึ่งความอิ่มตัวของกลูโคสในน้ำผึ้งจะทำให้น้ำผึ้งเกิดผลึกได้อย่างรวดเร็ว เช่น น้ำผึ้งจากดอกอัลฟาลฟา (alfalfa) ที่อิ่มตัวไปด้วยน้ำตาลกลูโคสจะเกิดผลึกอย่างรวดเร็ว ในขณะที่น้ำผึ้งจากทูพีโล (tupelo) ซึ่งมีปริมาณฟรุกโทสมากกว่ากลูโคสอยู่มากจะไม่เกิดผลึก (Root, 1950)

4.4.2 พื้นที่ผิวของผลึกกลูโคสเริ่มต้นในน้ำผึ้ง

ผลึกของสารชนิดเดียวกัน ผลึกที่มีขนาดเล็กจะละลายได้เร็วกว่าผลึกที่มีขนาดใหญ่ เนื่องจากผลึกขนาดเล็กมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับตัวทำละลายได้มากกว่า สามารถนำมาใช้เป็นทฤษฎีในการอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวของผลึกกลูโคสที่มีอยู่เดิมในน้ำผึ้ง กับความเร็วในการตกผลึกของน้ำผึ้งได้ เพราะว่าการละลายกับการรวมตัวเกิดเป็นผลึกนั้นจะเกิดในทิศทางตรงข้ามกัน กล่าวคือ ผลึกของกลูโคสที่เป็นตัวชักนำให้เกิดผลึกโดยควบคุมน้ำหนักของกลูโคสให้มีค่าคงที่ยิ่งมี

ขนาดเล็กมากเท่าใด ก็จะทำให้มีพื้นผิวจำนวนมากเกิดขึ้น ทำให้เกิดผลึกได้เร็วมากขึ้นเท่านั้น (Root, 1950)

4.4.3 การกวน

การกวนเป็นวิธีการเพิ่มความเร็วในการรวมตัวของผลึกกลูโคสในน้ำผึ้งได้ ถ้าไม่มีการกวนอาจมีโมเลกุลของน้ำที่อยู่ในน้ำผึ้งมาคั่นอยู่ระหว่างโมเลกุลของกลูโคสกับผลึกกลูโคสที่มีอยู่ในน้ำผึ้ง ทำให้การรวมตัวของผลึกกลูโคสเกิดช้าลง ดังนั้นการกวนจึงเป็นการเร่งให้มีการตกผลึกในน้ำผึ้งเร็วขึ้น (Root, 1950)

4.5 ผลของการตกผลึกในน้ำผึ้ง

น้ำผึ้งที่มีจำหน่ายในปัจจุบันมีรูปแบบผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันไป การเกิดผลึกอาจไม่เป็นที่ต้องการของน้ำผึ้งเหลวที่มีจำหน่ายทั่วไป แต่กลับเป็นที่ต้องการของผลิตภัณฑ์น้ำผึ้งอีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่า candied honey นิยมใช้ทาหน้าขนมปัง หรือบิสกิต (bread-spread) หากทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดผลึกในน้ำผึ้งเราสามารถควบคุมปัจจัยเหล่านั้นให้เหมาะสมกับผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดได้ เราก็จะได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ๆเกิดขึ้นมา ดังเช่นผลของการตกผลึกของน้ำผึ้งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความข้นหนืดเพิ่มขึ้นเหมาะสำหรับใช้ทาหน้าขนมปังมากกว่าน้ำผึ้งเหลว ถือได้ว่าเป็นข้อได้เปรียบอย่างหนึ่งที่ทำให้ในต่างประเทศนิยมบริโภคผลึกน้ำผึ้งอย่างแพร่หลายมากกว่าในประเทศไทย

5. การสร้างผลึกน้ำตาลในน้ำผึ้ง

ผลึกในน้ำผึ้งคือ ผลึกของกลูโคส จากความรู้เรื่องการตกลึกพบว่า การตกผลึกของกลูโคสจะเกิดขึ้นได้ หากปริมาณกลูโคสที่มีอยู่ในน้ำผึ้งสูงกว่าความสามารถในการละลายหรือสมดุลของการละลาย ดังนั้นในการสร้างผลึกอาจทำได้โดยการดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลในน้ำผึ้งให้มีปริมาณกลูโคสให้เพิ่มสูงขึ้น ส่วนปัจจัยอื่นๆ เช่นการกวน หรือการเติมผลึกเล็กๆของกลูโคสลงในสารละลายจะเป็นปัจจัยเสริมที่ช่วยเร่งให้การเกิดตกผลึกเร็วขึ้นเท่านั้น

6. การดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลเพื่อเพิ่มปริมาณกลูโคสในน้ำผึ้ง

การใช้เอนไซม์ในการดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลเพื่อให้ผลผลิตที่ต้องการได้มีการใช้มาเป็นเวลานานแล้วในอุตสาหกรรมอาหาร ในการดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลโดยการใช้เอนไซม์ทำให้ได้ผลผลิตออกมาจากปฏิกริยาทั้งเป็นผลผลิตหลัก และผลผลิตรองที่เป็นผลพลอยได้จากปฏิกิริยา ตัวอย่างเช่น Hang และ Woodams (1996) พบว่า เอนไซม์ fructosyltransferase ผลิต fructo-oligosaccharides (kestose และnystose) จากซูโครสที่มีความเข้มข้น 450 กรัมต่อลิตร ที่

อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส pH 5.6 ได้กลูโคส 23.4 เปอร์เซ็นต์ และ fructo-oligosaccharides สูงถึง 56.5 เปอร์เซ็นต์

Mala และคณะ (1999) ใช้เอนไซม์ α-glucosidase จาก *Bacilllus stearothermophilus* และ Brewer's yeast ในการสังเคราะห์โอลิโกแซคคาไรด์ โดยใช้สารละลายมอลโทสเข้มข้น 15 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉพาะเอนไซม์จาก *Bacilllus stearothermophilus* เปลี่ยนแปลงมอลโทสซึ่งเป็น substrate ให้ได้กลูโคส และ trisaccharides และ tetrasaccharides ที่ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส pH 7.5

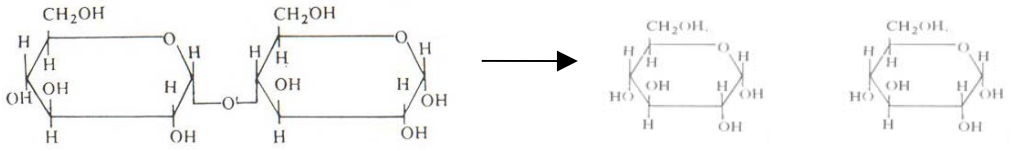
Duan และคณะ (1995) สังเคราะห์ isomaltooligosaccharides โดยใช้เอนไซม์ α-glucosidase ใช้เอนไซม์ 0.5 ยูนิต จาก *Aspergillus carbonarious* ในสารละลายมอลโทสเข้มข้น 150 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส pH 5.0 สามารถผลิตกลูโคสได้ 23.6 กรัมต่อลิตร

Anindyawati และคณะ (1998) ใช้เอนไซม์ α-glucosidase จาก *Aspergillus awamori* KT-11 ในการผลิต oligosaccharide (panose) ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส pH 6.7 โดยใช้เอนไซม์ 1.4 ยูนิต (unit) ในความเข้มข้นมอลโทส 60 เปอร์เซ็นต์ (w/v) สามารถผลิตกลูโคสได้ 23.0 เปอร์เซ็นต์ และพาโนสได้ถึง 34.3 เปอร์เซ็นต์

ข้อดีของการใช้เอนไซม์ในการดัดแปรคุณสมบัติ หรือองค์ประกอบทางชีวเคมีในน้ำผึ้ง อาจสร้างผลึกในน้ำผึ้งที่ไม่สามารถตกผลึก หรือตกผลึกได้ยากตามธรรมชาติ การใช้เอนไซม์ดัดแปรสัดส่วนของกลูโคสที่มีในน้ำผึ้ง เป็นวิธีการที่มีความน่าจะเป็นสูง เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจากเอนไซม์มีความจำเพาะ และสามารถควบคุมได้ง่าย ในปฏิกิริยาต้องการเอนไซม์ปริมาณน้อย เมื่อเปรียบกับการใช้วิธีอื่น จึงไม่กระทบต่อองค์ประกอบอื่นที่มีในน้ำผึ้ง เอนไซม์เป็นสารประกอบประเภทโปรตีนเมื่อยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์แล้วจะมีคุณค่าทางอาหารเทียบเท่ากับโปรตีนชนิดหนึ่ง นอกจากนี้ผลพลอยได้จากปฏิกิริยาของเอนไซม์อาจเกิดน้ำตาลที่มีโมเลกุลเล็กลงที่ร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย หรือทำให้เกิดสารพรีไบโอติกเพิ่มขึ้นในน้ำผึ้งนอกจากที่มีอยู่แล้วตามธรรมชาติ แม้ว่าเอนไซม์บริสุทธิ์จะมีราคาสูงในปัจจุบัน แต่ขณะนี้เอนไซม์สามารถผลิตได้จากจุลินทรีย์หลายชนิด ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะมีราคาถูกลงในอนาคต

จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณกลูโคส ในน้ำผึ้งสามารถทำให้เกิดขึ้นได้โดยการดัดแปรองค์ประกอบของน้ำตาลที่มีอยู่ในน้ำผึ้งเช่น ซูโครส และมอลโทส เป็นต้น ซึ่งในน้ำผึ้งจะมีน้ำตาลสองชนิดนี้อยู่ ในปริมาณค่อนข้างสูงจึงเป็นที่น่าสนใจและมีความเป็นไปได้ที่จะเพิ่มปริมาณของกลูโคสในน้ำผึ้งได้ ซึ่งจะเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการชักนำให้เกิดผลึกในน้ำผึ้งได้ เอนไซม์ที่น่าสนใจคือ เอนไซม์แอลฟากลูโคซิเดส (α- glucosidase) ที่สามารถย่อยสลายมอลโทส 1 โมเลกุลแล้วให้กลูโคสออกมา 2 โมเลกุล ซึ่งเอนไซม์ α- glucosidase หรือ

เอนไซม์มอลเทส (maltase) จัดอยู่ในกลุ่มของเอนไซม์ไกลโคไซด์ไฮโดรเลส ซึ่งไกลโคไซด์ไฮโดร-เลส หมายถึง กลุ่มไฮโดรเลสที่ย่อยสลายสับสเทรตที่มีพันธะไกลโคซิลได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และเพคติน เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วถ้าพิจารณาจากสับสเทรตทั่วไปที่มีพันธะไกลโคซิล 1 พันธะคือ น้ำตาลไดแซคคาไรด์ ซึ่งประกอบด้วยอนุมูลโมโนแซคคาไรด์ 2 ตัวเช่น แลกโทส และมอลโทส จะเห็นว่ามีอนุมูลโมโนแซคคาไรด์ 2 ตัว อนุมูลโมโนแซคคาไรด์ตัวที่ให้หมู่รีดิวซ์เพื่อทำให้เกิดพันธะไกลโคซิลกับอนุมูลโมโนแซคคาไรด์ตัวที่ 2 เรียกว่า ไกลโคน ดังนั้นถ้าพิจารณาสับสเทรตตามลักษณะของไกลโคนแล้ว มอลโทสมีไกลโคนเป็นกลูโคสเรียกเอนไซม์ที่สลายพันธะไกลโคซิลนี้ว่า กลูโคซิเดส โดยเอนไซม์ในกลุ่มนี้จะตัดพันธะไกลโคซิลของโมเลกุลน้ำตาล (ปราณี อ่านเปรื่อง, 2543) ดังนั้นเอนไซม์ α- glucosidase นี้สามารถย่อยสลายมอลโทส (maltose) 1 โมเลกุล และปล่อยกลูโคสออกมา 2โมเลกุล โดยมอลโทสมีลักษณะพันธะไกลโคซิลแบบ α-1,4 ดังนั้นเอนไซม์ที่เจาะจงต่อไกลโคนคือ α- glucosidase โดยเอนไซม์จะตัดตรงพันธะα-1,4 ของมอลโทส จึงได้กลูโคสออกมา ซึ่งเอนไซม์ α- glucosidase จะมีความจำเพาะกับอะตอมของกลูโคส (Uhlig, 1998) ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงการใช้วิธีการทางเอนไซม์โดยใช้เอนไซม์ α-glucosidase ในการย่อยมอลโทส 1โมเลกุลเป็นกลูโคส 2โมเลกุล

Figure 5 Enzyme reaction produces 2 molecules of glucose from 1 molecule of maltose

ที่มา : ดัดแปลงจาก เกสร พะลัง (2539)