บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 มะขาม

มะขาม (tamarind) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Tamarindus indica* L. มะขามเป็นไม้ยืนต้นที่มีขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ ผลัดใบเรือนยอดเป็นพุ่มกลมทึบ เปลือกสีน้ำตาลแตกเป็นร่องลึกตามยาวและขวางลำต้น ใบประกอบแบบขนนกชั้นเดียว ปลายคู่เรียงสลับ มีใบย่อย 8-10 คู่ ดอกมีขนาดเล็กสีเหลืองอมส้ม และมีจุดประสีแดง/ม่วงแดงอยู่กลางดอก (WIK, 2008) ออกเป็นช่อแบบช่อกระจายตามปลายกิ่งหรือลำต้น ฝักมีลักษณะโค้งสีน้ำตาล รูปทรงขอบขนาน ดังรูปที่ 2.1 เมื่อฝักแก่เมล็ดจะมีสีดำเป็นมันวาว ใน 1 ฝักจะมีประมาณ 1-10 เมล็ด ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวของฝักแต่ละสายพันธุ์ (ชูศักดิ์, 2550) มะขามมีถิ่นกำเนิดเดิมคือเป็นพืชพื้นเมืองในแถบทุ่งหญ้าแห้งแล้งของทวีปแอฟริกา ต่อมากระจายไปในแถบละตินอเมริกา หมู่เกาะแถบแคริบเบียน และทวีปเอเชีย (Gibbon and Pain, 1985) ปัจจุบันมีการปลูกมะขามกันอย่างแพร่หลายในกลุ่มประเทศในเขตร้อน สำหรับประเทศอินเดียมะขามนับว่าเป็นพืชเศรษฐกิจพื้นบ้านที่สำคัญ เช่นเดียวกับประเทศในแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้รวมทั้งประเทศไทยด้วย

สำหรับประเทศไทยมีการปลูกทั้งมะขามเปรี้ยวและมะขามหวานตามจังหวัดต่างๆ จังหวัดที่มีการปลูกมากได้แก่ เพชรบูรณ์ เลย ลำปาง เชียงใหม่ นครราชสีมา และอุบลราชธานี (ชูศักดิ์, 2550)

รูปที่ 2.1 ลักษณะดอก (ก) ฝัก (ข) และเมล็ด (ค) ของมะขาม

2.2 เมล็ดมะขาม

เมล็ดมะขาม (tamarind seed) เมื่อแก่จัดจะแข็ง มีสีน้ำตาลเข้ม ผิวเรียบเป็นมัน เมล็ดจะมีลักษณะเป็นแท่งสี่เหลี่ยมหัวป้าน ภายในมีเนื้อประกอบด้วยแป้งประมาณร้อยละ 63 โปรตีนร้อยละ 16 และไขมันร้อยละ 5.5 สามารถใช้ประกอบอาหารได้ (โสภณ, 2550) ภายในเมล็ดมะขามมีกรด อะมิโนจำเป็น คือ cysteine และ methionine ทั้งนี้โปรตีนภายในเนื้อในของเมล็ดมะขามยังอุดมไปด้วย lysine, glutamic acid, aspartic acid, glycine และ leucine (Bhattacharya *et al.*, 1994) นอกจากนี้ในส่วน

ของเนื้อในเมล็ดมะขามยังมีการนำมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมการทำกาว กระดาษ อุตสาหกรรมพลาสติก และสกัดสารประเภทกัมใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร (Phillips *et al.*, 1989) สำหรับเมล็ดมะขามยังมีสารต้านอนุมูลอิสระซึ่งมีประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร ยาและเครื่องสำอาง ในส่วนของของเหลวที่สกัดได้จากเมล็ดมะขาม พบว่ามีโปรตีนที่ออกฤทธิ์เป็น antidiabetic และ antihiperlipidemic ซึ่งช่วยลดระดับน้ำตาลในเลือดและปริมาณของคลอเลสเตอรอลพร้อมทั้งไตรกลีเซอไรด์ในหนูตัวผู้ที่เป็นโรคเบาหวานเนื่องจากได้รับสาร streptozocin (STZ) ได้อีกด้วย

2.2.1 การลอกเปลือกเมล็ดมะขาม

จากรายงานของ Chaiakdanukull and Sriroth (2005) ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีลอกเปลือกหุ้มเมล็ดมะขาม 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 เป็นการลอกเปลือกโดยไม่ใช้ความร้อน (non- heating) โดยทำการบดเมล็ดมะขามและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร แยกเปลือกหุ้มเมล็ดออก จากนั้นนำไปแช่น้ำ 2-3 ชั่วโมง แล้วขัดเอาเปลือกหุ้มเมล็ดออก และนำเมล็ดไปทำแห้งด้วยตู้อบแบบถาด (tray dry) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง วิธีที่ 2 เป็นการลอกเปลือกโดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบด pin mill และวิธีที่ 3 เป็นการลอกเปลือกโดยการคั่วเมล็ดมะขามที่ 200 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที นาที แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบด pin mill จากวิธีการลอกเปลือกทั้ง 3 วิธี พบว่า ให้ผงมะขามที่มีร้อยละผลผลิตไม่แตกต่างกัน คือ ประมาณร้อยละ 50 และมีองค์ประกอบทางเคมีที่ใกล้เคียงกัน และการลอกเปลือกวิธีที่ 1 ผงมะขามที่ได้ยังมีค่าความสว่างและความขาวมากกว่าผงมะขามที่ผ่านการลอกเปลือกด้วยความร้อน โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับผงเมล็ดมะขามที่ผ่านการลอกเปลือกโดยการคั่วที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที และจากการศึกษาด้านคุณสมบัติการไหลพบว่า ผงเมล็ดมะขามที่ผ่านการลอกเปลือกที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีคุณสมบัติการไหลแบบ pseudoplastic และไม่แสดงคุณสมบัติ yield stress ในขณะที่ผงมะขามที่ผ่านการลอกเปลือกโดยไม่ผ่านความร้อนจะมีค่า consistency coefficient (k) สูงกว่าผงมะขามที่ผ่านการให้ความร้อนทั้ง 2 วิธีอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ค่า flow behavior index (n) มีค่าต่ำกว่า

พวงเพ็ชร (2522) ทดลองลอกเปลือกเมล็ดมะขาม โดยนำเมล็ดมะขามไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วนำไปแช่ในสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้น 0.5 โมล่าร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นาน 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการแช่ในสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้น 1 โมล่าร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นาน 1, 2 และ 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปล้างน้ำแล้วนับจำนวนเมล็ดที่ลอกเปลือกได้ พบว่าเมล็ดมะขามที่แช่ในสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้น 1 โมล่าร์ ปริมาตร 200 มิลลิลิตร นาน 3 ชั่วโมง มีร้อยละมะขามที่ลอกเปลือกได้สูงสุด นอกจากนี้ยังทำการแช่เมล็ดมะขามที่อบในตู้อบอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที ในสารละลายกรดกำมะถันความเข้มข้น 1 โมล่าร์ นาน 3 ชั่วโมง เปรียบเทียบกับการแช่เมล็ดมะขามซึ่งไม่ผ่านการอบในสารละลายกรดกำมะถันชนิดเข้มข้น นาน 67 ชั่วโมง และการแช่เมล็ดมะขามในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 ร้อยละ นาน 15 นาที พบว่าเมล็ด

มะขามที่ผ่านการอบร้อนที่105 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วแช่ในสารละลายกรดกำมะถัน 1 โมล่าร์ นาน 3 ชั่วโมง มีร้อยละมะขามที่ลอกเปลือกได้สูงที่สุด

2.2.2 องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของผงเมล็ดมะขาม

องค์ประกอบและโครงสร้างทางเคมีของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม (tamarind kernel powder, TKP) ประกอบด้วยสารโพลิแซคคาร์ไรด์มากกว่าร้อยละ 65 โปรตีนร้อยละโดยประมาณ 15 - 21 ไขมันร้อยละโดยประมาณ 3 - 8 ดังแสดงในตารางที่ 2.1 กัมจากมะขามเป็นองค์ประกอบหลักของผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ซึ่งโครงสร้างทางเคมีประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด คือน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกาแลคโตส ซึ่งเรียกว่า "ไซโลกลูแคน" ตามชนิดของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่พบ (Freitas *et al.*, 2005 ; Ren *et al.*, 2005 ; Patel *et al.*, 2008 and Marcus *et al.*, 2008)

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อในเมล็ดมะขาม

องค์ประกอบ	ค่าร้อยละ
โพลีแซคคาร์ไรด์	65.1 - 72.2
โปรตีน	15.0 - 20.9
ไขมัน	3.9 - 8.0
เส้นใย	2.5 - 8.2
ความชื้น	11.4 - 22.7
เถ้าทั้งหมด	2.4 - 4.2

ที่มา : Kumar and Bhattacharya (2008)

2.2.3 คุณสมบัติของผงเมล็ดมะขาม

ผงมะขามสามารถกระจายตัวและรวมตัวกับน้ำเย็นได้อย่างรวดเร็ว โดยจะมีความหนืดสูงสุด เมื่อต้มกับน้ำร้อนเป็นเวลา 20 - 30 นาที โดยสารละลายผงเมล็ดมะขามมีสมบัติการไหลแบบนอนนิวโตเนียนชนิดซูโดพลาสติก และยังเป็นสารขึ้นรูปที่สำคัญของอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นสารให้ความข้นหนืดที่ดีมากแก่น้ำยางพารา และเป็นแหล่งของสารที่ทำให้เกิดเจลที่เรียกว่า "เจลโลส" นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติในการขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้อีกด้วย ผงเมล็ดมะขามนั้นมีโพลีแซกคาร์ไรด์อย่างน้อยร้อยละ 50 - 60 โดยมีความสามารถในการเกิดเจลในสารละลายน้ำตาลหรือแอลกอฮอล์ และสามารถทนต่อสภาพความเป็นกรดได้ดี มีคุณสมบัติและลักษณะที่คล้ายกับเพกตินในผลไม้ ที่ใช้ผลิตเยลลี่ แยมผิวส้ม และแยมผลไม้ นอกจากนี้อุตสาหกรรมอาหารของประเทศญี่ปุ่นยังได้อนุญาตให้นำผงเมล็ดมะขามที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้วมาใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด สารให้ความคงตัว และสารที่ทำให้เกิดเจล โดยนำมาใช้ร่วมกับกัมอื่นๆ เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้ดีขึ้น เช่น กัวกัม และอัลจิเนต (Marathe *et al.*, 2002)

2.2.4 ประโยชน์ของผงมะขาม

ผงเมล็ดมะขามสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น นำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสกัดไซโลกลูแคนหรือเจลโลส ใช้เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตได้ โดยผงเมล็ดมะขามมีราคาถูกและสามารถนำไปทดแทนในอาหารสัตว์ได้และมีโปรตีนที่มีค่า biological value สูง (บัญชา, 2520) นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ นอกจากอุตสาหกรรมอาหารอีกด้วย เช่น อุตสาหกรรมทอผ้า อุตสาหกรรมยา เป็นต้น

2.3 ไซโลกลูแคน

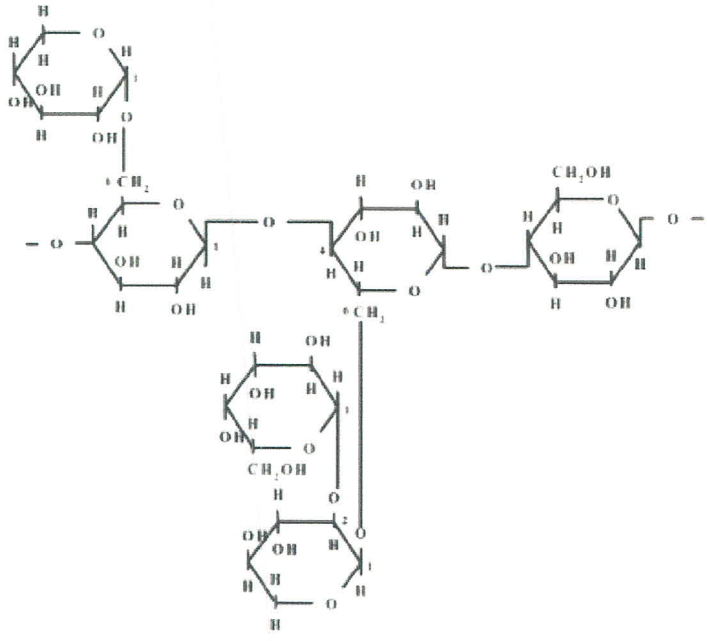
ไซโลกลูแคน (xyloglucan) คือ พอลิแซคคาร์ไรด์ หรือ กัม ที่ได้จากเมล็ดพืชประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกาแลคโตส เก็บสะสมอยู่ที่ผนังเซลล์ของเอนโดสเปิร์ม (endosperm) หรือใบเลี้ยง (cotyledons) ส่วนมากพบในพืชตระกูลฝัก เช่น มะขาม และมะค่าโมง (พิมพ์วดี และ อณัติถยา, 2551)

2.3.1 โครงสร้างทางเคมีของไซโลกลูแคน

ไซโลกลูแคน เป็นพอลีแซคคาร์ไรด์กัมชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซคคาร์ไรด์สามชนิด คือน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกาแลคโตส โดยมีน้ำตาลกลูโคสเป็นสายโซ่หลักแล้วมีสายกิ่งเป็นน้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกาแลคโตส (Yamanaka, 2000) ไซโลกลูแคนที่สกัดได้จากเมล็ดมะขามมีโครงสร้างหลักคือ (1-4)-β-D-glucan และมี (1-6)-α-D-xylose เป็นสายกิ่งซึ่งมี (1-2)-β-D-galactoxylose เข้าแทนที่บางส่วน ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งหากตัดส่วนที่เป็นกาแลคโตสในไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขามออกไปบ้าง (ประมาณร้อยละ 44) โดยเอนไซม์ β-1, 2-galactosidase ผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อผสมกับน้ำแล้วให้ความร้อนเกิดเจลแบบ thermally reversible gel ที่อุณหภูมิระหว่าง 22-27 องศาเซลเซียส ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-2 น.น./น.น. (Miyazaki *et al.*, 1998)

การใช้เอนไซม์ตัดกาแลคโตสที่มีอยู่ออกไปในปริมาณที่มากกว่าร้อยละ 50 จะแสดงความสามารถในการเป็นเจลของไซโลกลูแคนได้ ขณะที่ไซโลกลูแคนที่ไม่ผ่านการดัดแปรใดๆจะสามารถละลายในน้ำเย็นและเกิดเป็นเจลได้เมื่ออยู่ในแอลกอฮอล์หรือสารละลายน้ำตาลที่มีปริมาณมากๆ โดยมากกว่าร้อยละ 40 โดยน้ำหนักเท่านั้น (Shirakawa *et al.*, 1998 ; Yamanaka *et al.*, 2000 and Nishinari *et al.*, 2000)

ไซโลกลูแคนที่สกัดได้จากเมล็ดพืชต่างชนิดกันจะมีอัตราส่วนระหว่างน้ำตาลกลูโคสต่อน้ำตาลไซโลสต่อน้ำตาลกาแลคโตสที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลให้ไซโลกลูแคนต่างชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย (Ren *et al.*, 2005) ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับค่าสัดส่วนน้ำตาลกลูโคสต่อน้ำตาลไซโลสต่อน้ำตาลกาแลคโตส ซึ่งค่าสัดส่วนที่แปรผันนั้นอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยทางสภาวะแวดล้อมที่เพาะปลูก เช่น ธาตุอาหารในดิน ปริมาณน้ำ อุณหภูมิ เป็นต้น (Dea and Morrison, 1975)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขาม

ที่มา : Puja *et al.* (2008)

ตารางที่ 2.2 สัดส่วนระหว่างน้ำตาลกลูโคส น้ำตาลไซโลส และน้ำตาลกาแลคโตส จากเมล็ดพืชชนิดต่างๆ

ชนิดพืช	กลูโคส	ไซโลส	กาแลคโตส
Afzelia africana Se.[1]	2.95	2.22	1.00
Detarium senegalense Gmelin[2]	2.89	2.17	1.00
Hymenaea courbaril[3]	2.69	2.27	1.00
Tamarind indica L.[1]	3.09	2.33	1.00

ที่มา : [1]Ren *et al.*, (2005), [2]Wang *et al.*, (1996), [3]Freitas *et al.*, (2005)

2.3.2 การสกัดไซโลกลูแคน

พวงเพ็ชร (2522) ได้ทดลองสกัดไซโลกลูแคนออกจากผงเมล็ดมะขาม ที่ผ่านการร่อนด้วยตะแกรงร่อนขนาด 40 เมช ด้วยน้ำร้อน โดยควบคุมสารละลายนี้ให้มีอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส นาน 50 นาที จากนั้นจึงลดอุณหภูมิลงเหลือ 55 องศาเซลเซียส เติมเอนไซม์ diastase ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 โดยปริมาตรลงไปในสารละลาย คงอุณหภูมินี้ไว้นาน 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการกรองแล้วตกตะกอนไซโลกลูแคน จากสารละลายดังกล่าวด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 95 ในอัตราส่วนสารละลายต่อไซโลกลูแคน ต่อเอทิลแอลกอฮอล์ประมาณ 2:3 โดยปริมาตร นำไซโลกลูแคนที่สกัดได้ ไปอบแห้งที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วบดเป็นผง

อรรถวิทย์ (2540) ได้ศึกษาการเตรียมโพลิแซคคาร์ไรด์จากเมล็ดมะขามโดยนำผงเมล็ดมะขามมาสกัดไขมัน สีและกลิ่นด้วย ปิโตรเลียม ฮีเทอร์ และเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 ตามลำดับ แล้วศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำสกัด ผลของการตกตะกอนแยกโพลิแซคคาร์ไรด์ วิธีการทำให้แห้งและอุณหภูมิที่ทำการสกัดแอลกอฮอล์ จากการศึกษาคุณสมบัติของโพลิแซคคาร์ไรด์และการไหล (rheology) ของสารสกัด พบว่า การศึกษาผลของความเข้มข้นของน้ำสกัด สัดส่วนของผงเมล็ดมะขามต่อน้ำ 1:40, 1:60 และ 1:80 (น้ำหนัก/ปริมาตร) สามารถใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงแยกตะกอนได้ จากนั้นทำการแยกโพลีแซคคาร์ไรด์ โดยใช้วิธีต่างๆ คือ (1) ตกตะกอนด้วยเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 อัตราส่วน 1: 1.5 (น้ำหนัก/ปริมาตร) กรองเก็บตะกอนด้วยผ้านำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส (2) ตกตะกอนด้วย เกลือ-เอทิลแอลกอฮอล์ กรองเก็บตะกอนด้วยผ้านำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส (3) เทน้ำสกัดลงในถาดแล้วนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส และ (4) นำน้ำสกัดไปทำแห้ง จากการศึกษาพบว่าการสกัดตามวิธีที่ (2) ต้องใช้เอทิลแอลกอฮอล์ปริมาณมาก ในการล้างเอาเกลือที่ใช้ในการตกตะกอนออกและล้างออกยาก การอบแห้งโดยวิธีที่ (3) พบว่าโพลิแซคคาร์ไรด์ที่ได้เกาะแน่นติดกับภาชนะแยกออกได้ยาก การตกตะกอนด้วย เอทิลแอลกอฮอล์ ให้โพลีแซคคาร์ไรด์สีขาว เช่นเดียวกับการ spray dry จากการศึกษาผลของอุณหภูมิของสารสกัดพบว่า การแยกสกัดที่ 3 อุณหภูมิ คือที่ 5 , 25 - 30, 85 - 90 องศาเซลเซียส พบว่าส่วนที่แยกสกัดที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส และ85 - 90 องศาเซลเซียส ได้โพลิแซคคาร์ไรด์ที่มีลักษณะขาวและมีความหนืดดี ในการสกัดระดับ pilot scale ได้ทำการสกัดอย่างต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน คือ (1) สกัดด้วยน้ำ 10 เท่าตัว ที่ 5 องศาเซลเซียส (2) สกัดด้วยน้ำ 40 เท่าตัว ที่ 25 - 30 องศาเซลเซียส (3) สกัดด้วยน้ำ 40 เท่าตัว ที่ 85 - 90 องศาเซลเซียส พบว่าสารสกัดที่ 5 องศาเซลเซียส ให้สารละลายที่มีความหนืดต่ำ แม้ว่าจะเตรียมในความเข้มข้นที่สูง สำหรับโพลิแซคคาร์ไรด์ที่สกัดได้ในขั้นตอนที่ (2) และ (3) ได้ปริมาณโพลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับร้อยละ 8 และ 21 ตามลำดับ และยังให้สารสกัดที่มีความหนืดสูงกว่า โดยสารสกัดที่อุณหภูมิ 25 - 30 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นร้อยละ 2 หรือ สูงกว่า มีคุณสมบัติการไหลที่เป็นซูโดพลาสติก เช่นเดียวกับสารสกัดที่อุณหภูมิ 85 - 90 องศาเซลเซียส ที่ร้อยละ 1.5 หรือสูงกว่า แต่สารสกัดที่อุณหภูมิ 85 - 90 องศาเซลเซียส ยังมีความหนืดน้อยกว่าโพลิแซคคาร์ไรด์ที่จำหน่ายในท้องตลาดที่ความเข้มข้นเท่ากัน

วารี (2543) ศึกษาการผลิตโพลิแซคคาร์ไรด์ จากเมล็ดมะขามโดยใช้สารละลายเอทิลแอลกอฮอล์และกระบวนการกรองเพื่อกำจัดโปรตีนออกจากผงเนื้อในเมล็ดมะขาม ทำการแยกโมเลกุลของโปรตีนออกจากอนุภาคโพลิแซคคาร์ไรด์จากเมล็ดมะขามในสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์ โดยใช้คลื่นเหนือเสียง ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการแยกโปรตีนออกจากอนุภาคของโพลิแซคคาร์ไรด์ จากผงเมล็ดมะขามคือ ความเข้มข้นของผงเมล็ดมะขาม เท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร เวลาในการผ่านคลื่นเหนือเสียงประมาณ 60 วินาที และความเข้มข้นของสารละลายเอทิลแอลกอฮอล์เท่ากับร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก จะให้ร้อยละการกำจัดโปรตีนเท่ากับ 92.203 และร้อยละการสูญเสียโพลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 68.512 เมื่อนำภาวะที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคโปรตีนออกจากอนุภาคโพลิแซคคาร์ไรด์มาใช้กับการกรองโดยกวาดผิวหน้าของตัวกรองด้วยใบกวาด พบว่าร้อยละการกำจัดโปรตีนและร้อยละการสูญเสียโพลิแซคคาร์ไรด์เท่ากับ 81.216 และ

70.995 ตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณโพลิแซคคาร์ไรด์ร้อยละ 93.61 ปริมาณของโปรตีนและปริมาณของไขมันร้อยละ 4.884 และ 1.540 ตามลำดับ

Marathe และคณะ (2002) ได้ศึกษาพฤติกรรมในการเกิดเจลของผงเมล็ดมะขาม โดยได้ทำการแยกโพลิโอสจากผงเมล็ดมะขาม โดยใช้กรดในการย่อยและตกตะกอนผงเมล็ดมะขามด้วยแอลกอฮอล์และทำแห้งได้เป็นผงโพลิโอส แล้วนำผงโพลิโอสที่ได้กับเพกตินมาละลายในสารละลายน้ำตาล 50 องศาบริกซ์ ต้มนาน 20 - 30 นาที ให้ได้สารละลายน้ำตาลเข้มข้น65 องศา บริกซ์ การใช้เพกตินอย่างเดียวจะทำให้เจลมีความแข็งดี ในขณะที่เพกติน/โพลิโอส 80:20 และ 60:40 ที่ความเข้มข้นร้อยละ1.5 และ2.0 พบว่าเจลจะแข็งดี และในอัตราส่วนเพกติน/โพลิโอส 40:60, 20:80 และ 0:100 เจลจะเซตตัวดีที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 หากความเข้มข้นสูงกว่าร้อยละ 2 เยลลี่ที่ได้จะแข็งและยากที่จะเคี้ยว ดังนั้นโพลิโอสร้อยละ 2 สามารถใช้ร่วมกับเพกตินร้อยละ 1 ในการผลิตเยลลี่ได้เหมาะสม

Ikeda และคณะ (2004) ได้ศึกษาการนำไซโลกลูแคนผสมกับเจลแลน ซึ่งพบว่าเจลแลนและไซโลกลูแคนไม่ฟอร์มตัวเป็นเจลที่ความเข้มข้นต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก และร้อยละ 0.75 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ในขณะที่ผสมเจลแลนร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนัก และ ไซโลกลูแคนร้อยละ 0.7 โดยน้ำหนักจะฟอร์มตัวที่ single-phase gel แสดงให้เห็นถึงการเสริมกันของเจลแลนและไซโลกลูแคน โดยพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นของไซโลกลูแคนจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของเจล แลนในการผสม และโครงสร้างตาข่ายของเจลแลนเกิดขึ้นได้แม้ที่ความเข้มข้นต่ำกว่าการใช้เจล แลนเพียงอย่างเดียว

Yuguchi และคณะ (2004) กล่าวว่าไซโลกลูแคนในสารละลายสามารถเกิดเจลได้หลากหลายเมื่อสภาวะเปลี่ยนแปลง เช่น (1) การใช้เอนไซม์ β–galactosidase (2) การเติมแอลกอฮอล์ต่างๆ (3) การเติมโพลีฟีนอลต่างๆ (4) การเติมสารละลายไอโอดีน (เจลสี) โดยศึกษาลักษณะโครงสร้างของไซโลกลูแคนเจลในตัวทำละลายผสมน้ำ/เอทิลแอลกอฮอล์ พบว่าความแข็งแรงของเจลขึ้นกับชนิดของแอลกอฮอล์

Chaiakdanukull และ Sriroth (2005) ได้ทำการสกัดไซโลกลูแคน ที่ดัดแปลงจากวิธีของ York *et al.*, 1990 โดยนำผงนี้อในเมล็ดมะขามจาก (วิธีที่ 1) ที่ผ่านการลอกเปลือกโดยไม่ใช้ความร้อน (วิธีที่ 2) จากการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที และ (วิธีที่ 3) การคั่วเมล็ดมะขามที่ 200 องศาเซลเซียส นาน 2 นาที จำนวน 30 กรัม ไปสกัดเอาไขมันออกด้วยเฮกเซน จากนั้นนำไปอบเพื่อระเหยเฮกเซนออกแล้วจึงนำแป้งไปละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 3 ลิตร จากนั้นนำสารละลายที่ได้ไปต้มที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที โดยทำการคนตลอดเวลาแล้วนำไปเข้าเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อวินาที นาน 30 นาที ตกตะกอนสารละลายโพลิแซคคาร์ไรด์ด้วยเอทิลแอลกอฮอล์เข้มข้นร้อยละ 70 ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส โดยทิ้งไว้ข้ามคืน หลังจากนั้นจึงนำไปหมุนเหวี่ยงอีกครั้งที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อวินาที นาน 30 นาที นำไซโลกลูแคนที่สกัดได้ไปทำแห้ง โดยการ freeze dry แล้วนำไปหาค่าน้ำหนักโมเลกุล (Mw) พบว่าไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขามที่ผลิตจากวิธีที่ 1 มีค่า Mw 3.831 $\times 10^6$

กรัม/โมล ส่วนค่า Mw ของไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขามที่ผลิตจากวิธีที่ 2 และ 3 มีค่า 3.44×10^6 และ 3.304×10^6 กรัม/โมล ตามลำดับ

Temsiripong และคณะ (2005) ได้ศึกษาผลของไซโลกลูแคนต่อสมบัติทางกายภาพโดยเฉพาะด้านรีโอโลจีและความร้อนของแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาด้านรีโอโลจีทั้งแบบไดนามิก และแรงเฉือนที่คงที่ และด้านความร้อนของของผสม (dispersions) ระหว่างแป้งมันสำปะหลังและไซโลกลูแคน ด้วยวิธี DSC เพื่อติดตามผลของไซโลกลูแคนต่อการเกิดเจลาติไนเซชันและรีโทรเกเดชันของสตาร์ช พบว่าความหนืดของแป้งมันสำปะหลังและไซโลกลูแคน (ที่ความเข้มข้นรวมร้อยละ 3.5) หลังการเจลาติไนเซชันและวัดค่าทันทีพบว่ามีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของไซโลกลูแคนเพิ่มขึ้น เจลขอลแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมไซโลกลูแคนมีพฤติกรรมการไหลแบบซูโดพลาสติก ที่อัตราเฉือน (shear rate) ต่ำ และมีพฤติกรรมการไหลแบบไดลาเทนต์ เมื่ออัตราเฉือนสูงกว่า 1 s^{-1} ในขณะที่ของผสมแป้งมันสำปะหลัง/ไซโลกลูแคนแสดงลักษณะไดลาเทนต์ นอกจากนี้ mechanical spectra ของเพสต์ (paste) แป้งมันสำปะหลัง/ไซโลกลูแคนจากการทดสอบไดนามิกส์แสดงสมบัติที่เป็นของเหลวมากกว่าเพสต์ ของแป้งมันสำปะหลัง เพียงอย่างเดียว และไซโลกลูแคนยังให้ความคงตัวต่อแรงเฉือนที่ให้แก่เพสต์ของแป้งมันสำปะหลังและทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าไดนามิกส์โมดูลัส (dynamic moduli) ในเพสต์ของแป้งมันสำปะหลังที่เก็บ 5 องศาเซลเซียสลดลง ในทางตรงกันข้าม เมื่อศึกษาความร้อนด้วย DSC พบว่า ตัวอย่างที่มีไซโลกลูแคนผสมอยู่มีค่าอัตราส่วนรีโทรเกรเดชันเพิ่มขึ้นเร็วกว่าไซโลกลูแคนอยู่ในเฟสต่อเนื่องที่เป็นของเหลวในของผสมซึ่งให้ความคงตัวต่อแรงทางกลดีขึ้นในระหว่างการเก็บ แต่จะเร่งการจัดเรียงตัวของโครงสร้างสตาร์ชเนื่องจากไซโลกลูแคนจะจับน้ำได้ดีทำให้ปริมาณน้ำในระบบที่แป้งมันสำปะหลังจะนำไปใช้ได้น้อยลง

Pongsawatmanit และคณะ (2006) ได้ศึกษาอิทธิพลของไซโลกลูแคนบริสุทธิ์จากผงเมล็ดมะขามต่อคุณสมบัติการไหลและการทนความร้อนของแป้งมัน โดยนำแป้งมันผสมกับไซโลกลูแคนในอัตราส่วนแป้งมันต่อไซโลกลูแคน เท่ากับ 10/0, 9/1, 8/2, 7/3, และ 6/4 กับโพลิแซคคาร์ไรด์ทั้งหมดเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไซโลกลูแคนจะทำให้ค่าความหนืดของแป้งเพิ่มขึ้น

จากรายงานของ Nishinari และคณะ (2009) ได้บอกว่าการเกิดเจลสามารถเกิดได้โดยการเปลี่ยนตัวทำละลาย ซึ่งไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขาม อย่างเดียวไม่สามารถเกิดเจลได้แม้ในสารละลายที่ความเข้มข้นสูงและทำให้สารละลายหนืดโดยเติมโพลิแซคคาร์ไรด์ชนิดต่างๆ เช่น เจลแลน และแซนแทนกัม หรือการเปลี่ยนปริมาณตัวทำละลายโดยการเติมน้ำตาลหรือแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น สารละลายไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขาม ฟอร์มตัวเป็นเจลเมื่อมีน้ำตาลร้อยละ 40 -70 นอกจากนี้สารละลายไซโลกลูแคนจากเมล็ดมะขาม เกิดเจลได้โดยการเติมเอทิลแอลกอฮอล์ เจลนี้จะมีความยืดหยุ่นสูง และปล่อยน้ำออกมาน้อย เจลที่เกิดจากแอลกอฮอล์จะแข็งและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าเจลที่มีน้ำตาล และยังพบว่าไซโลกลูแคนฟอร์มตัวเป็นเจลโดยการเอากาแลคโตสบางส่วนออกโดยใช้เอนไซม์ β-galactosidase

Simi และ Abraham (2010) ได้สกัดไซโลกลูแคนจากผงเมล็ดมะขาม ตามวิธีการของ Rao และ Srivastava (1973) โดยกำจัดโปรตีนออกจากผงเมล็ดมะขามโดยใช้เอนไซม์โปรติเอสจากเชื้อ *B.licheniformis* และกำจัดไขมันออกโดย soxhlet extractor ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย และทำแห้งในตู้อบลมร้อน นำผงเมล็ดมะขามมาต้มกับน้ำผสมกรดซิตริก เก็บสารละลายไว้ข้ามคืนและระเหยของเหลวใสให้ได้ครึ่งหนึ่งของปริมาตร สารละลายถูกทำให้เย็นลงและตกตะกอนเอาเส้นใย โดยการเติมเอทิลแอลกอฮอล์ร้อยละ 95 (ปริมาตร/ปริมาตร) กรอง และทำให้แห้ง พบว่าไซโลกลูแคนผงที่ได้มีปริมาณความชื้นร้อยละ 9.7, ไขมันร้อยละ 0.33, เถ้าร้อยละ 0.285 และมีโปรตีนเล็กน้อย

2.3.3 คุณสมบัติของไซโลกลูแคน

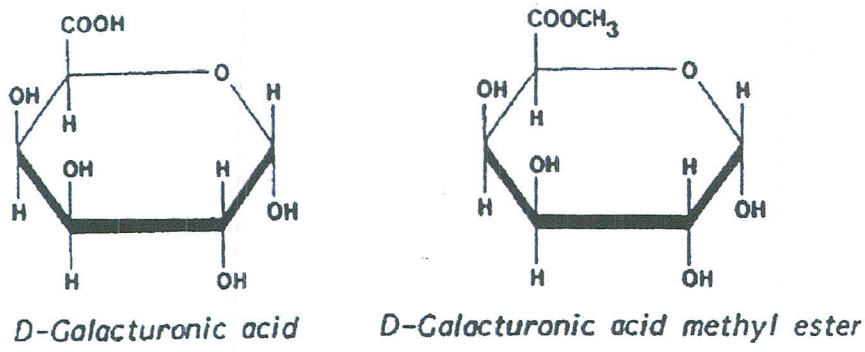
ไซโลกลูแคนสามารถทนต่อความร้อน ทนต่อกรดและการทำให้เสียรูปร่างจากแรงกลในระดับปานกลาง ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์เป็นส่วนประกอบในอาหารได้ (Nishinari *et al.*, 2000) เมื่อละลายน้ำจะให้สารละลายที่เหนียวหนืด เป็นเจลภายใต้ pH ที่เป็นกรดและเป็นกลางได้ดี ซึ่งสามารถใช้แทนแป้งและเพกตินได้ (นิภาวดี, 2545) และยังมีคุณสมบัติและลักษณะที่คล้ายกับเพกตินในผลไม้ ที่ใช้ผลิตเยลลี่ แยมผิวส้ม และแยมผลไม้ (Marathe *et al.*, 2002)

2.3.4 ประโยชน์ของไซโลกลูแคน

เนื่องจากไซโลกลูแคนแสดงความสามารถในการอุ้มน้ำได้สูง ทนต่อความร้อน ทนต่อกรดและแรงเฉือนได้ดี ดังนั้นในอุตสาหกรรมอาหารจึงนำไซโลกลูแคนมาใช้เป็นสารให้ความข้นหนืด สารให้ความคงตัว สารทดแทนไขมัน และในสตาร์ชดัดแปรในผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น ไอศกรีม น้ำสลัด มายองเนส บะหมี่ สตูว์และผลิตภัณฑ์อื่นๆมากมาย ซึ่งเป็นการใช้เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางด้านความร้อนของผลิตภัณฑ์ (rheological and thermal properties) (Nishinari *et al.*, 2000) คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของไซโลกลูแคนจะคล้ายคลึงกันกับโพลิแซคคาร์ไรด์ชนิดอื่นๆ โดยขึ้นอยู่กับมวลโมเลกุลที่จะนำมาใช้ สำหรับประโยชน์ในส่วนของการรักษาทางการแพทย์ และเครื่องสำอางนั้น จะนำโพลิแซคคาร์ไรด์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำมาใช้เพื่อปรับปรุงการแพร่เข้าสู่เนื้อเยื่อ (Strickland *et al.*, 1999)

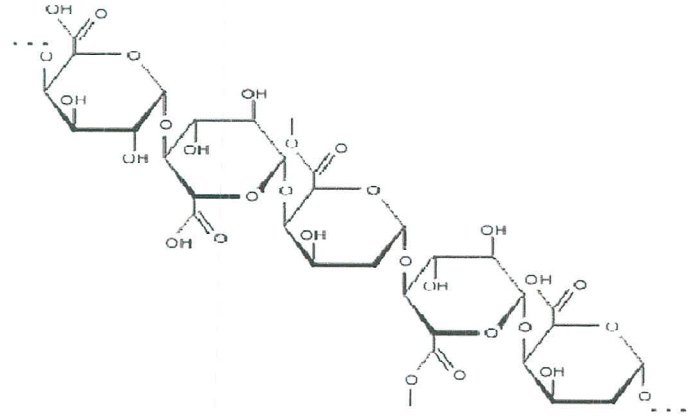
2.4 เพกติน

เพกติน หมายถึง กรดเพกตินที่ละลายน้ำมีขนาดความยาวและน้ำหนักโมเลกุลต่างกันตั้งแต่ 30,000 - 300,000 และในโมเลกุลยังมีปริมาณเอสเทอร์ต่างกัน ซึ่งขึ้นกับแหล่งที่เกิด วิธีการสกัดและการเตรียม เพกตินเป็นคอลลอยด์ที่สามารถเปลี่ยนกลับไปมาได้ คือสามารถตกตะกอนและละลายกลับใหม่ได้โดยไม่สูญเสียความสามารถในการเกิดเจล



รูปที่ 2.3 สูตรโครงสร้างโมโนเมอร์ของเพกติน

ที่มา : วุฒิชัย (2551)



รูปที่ 2.4 สูตรเคมีทั่วไปของเพกติน

ที่มา : Simon (2003)

โปรโตเพกติน (protopectin) เป็นสารเพกตินที่ไม่ละลายในน้ำที่พบอยู่ในพืชเมื่อนำมาไฮโดรไลส์จะได้เพกตินและกรดเพกตินิก ซึ่งกรดเพกตินิก เป็นสารเพกตินที่มีสูตรโครงสร้างส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์ของกรดกาแลกทูโรนิก (galacturonic acid) สามารถเกิดเจลได้เมื่อผสมอยู่กับของผสมที่มีสภาพเป็นกรดและน้ำตาลอยู่ด้วย เพกตินเป็นสารเพกติกที่มีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนที่เป็นกรดเพกตินิคซึ่งละลายน้ำได้และส่วนของกรดเพกตินิกที่มีหมู่คาร์บอกซิลเกิดพันธะเอสเตอร์กับเมทธิล ซึ่งสามารถเกิดเป็นเจลได้เมื่อมีน้ำตาลและของผสมมีสภาพเป็นกรดเพกติกมีโครงสร้างประกอบด้วยส่วนของพอลิเมอร์ที่เป็นกรดกาแลกทูโรนิกเท่านั้น โดยไม่มีส่วนใดของหมู่คาร์บอกซิลของกรดกาแลกทูโรนิกที่เกิดพันธะเอสเตอร์กับหมู่เมทธิล (วุฒิชัย, 2555)

2.4.3 สมบัติของเพกติน

2.4.3.1 การละลายของเพกติน

ปรัญชา และมงคล (2543) กล่าวว่า เพกตินสามารถละลายในน้ำเย็นและทำให้เกิดความข้นหนืดได้เช่นเดียวกับกัมส์ชนิดอื่นๆ แต่ผงเพกตินจับกันเป็นก้อนได้ง่าย ทำให้ละลายได้ช้าและยาก จึงควรเก็บรักษาให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้ความชื้นเข้าไป เพกตินจะสามารถละลายได้ดีในน้ำอุ่นหรือน้ำที่มีอุณหภูมิมากกว่า 60 องศาเซลเซียส แล้วทำการผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วจากต่ำไปหาสูงสุด ต้องระวังไม่ให้เพกตินจับกันเป็นก้อนเพราะจะทำให้ละลายได้ยาก อีกวิธีที่ละลายเพกตินได้ดีนั้นจะต้องผสมเพกตินกับน้ำตาล โดยอัตราส่วนของเพกติน 1 ส่วนกับน้ำตาล 5 ส่วน หรือกับสารละลายอื่นๆ เช่น สารละลายน้ำตาลความเข้มข้นร้อยละ 65 หรือแอลกอฮอล์เพื่อทำให้เพกตินเปียก ถ้าไม่ได้ผสมด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง ให้ต้มประมาณ 1 นาที เพื่อให้มั่นใจว่าเกิดการละลายได้หมด (Rolin and De Vries, 1990) การตรวจดูว่ามีการละลายเกิดขึ้นสมบูรณ์หรือไม่ สามารถทำได้โดยการดูฟิล์มของสารละลายบนไม้พายหรือใบมีดที่สะอาดจะต้องใสไม่มีส่วนคล้ายเม็ดทรายอยู่

2.4.3.2 ความหนืดของเพกติน ความหนืดของเพกตินขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ ดังนี้

2.4.3.2.1 ความเข้มข้นของเพกติน มีความเข้มข้นสูงของเพกตินจะเกิดเจลได้ง่ายกว่า แต่ทั้งนี้ต้องสัมพันธ์กับอุณหภูมิและระยะเวลาด้วย

2.4.3.2.2 ปริมาณแคลเซียม เพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลสูงไม่ต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล แต่เพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลต่ำต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล เนื่องจากเพกตินหมู่เมทอกซิลต่ำมีความไวต่อแคลเซียมสูง

2.4.3.2.3 ปริมาณความเป็นกรด-ด่าง มีอิทธิพลต่อการแข็งตัว แต่ถ้ามีกรดมากเกินไปก็จะไปทำลายความอยู่ตัวของเจลได้ โดยค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเกิดเจล คือ 3.2 เนื่องจากปริมาณกรดในผลไม้แต่ละชนิดแตกต่างกัน ผลไม้ที่มีกรดต่ำอาจจะต้องเติมกรดลงไป กรดที่นิยมใช้เติมผลิตภัณฑ์ คือ กรดซิตริก กรดมาลิก และกรดแลคติก กรณีผลไม้ที่มีปริมาณกรดตามธรรมชาติมากเกินไปจะลดความเป็นกรดลง โดยการเติมเกลือที่มีสมบัติเป็นบัฟเฟอร์ เช่น แคลเซียมคาร์บอร์เนตโซเดียมซิเตรท

2.4.3.2.4 ชนิดของเพกติน Low methoxyl pectin และ High methoxyl pectin การนำเพกตินไปใช้จะต่างกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับหน้าที่ของเพกตินว่าต้องการนำเพกตินไปใช้ประโยชน์ในด้านใด

2.4.3.2.5 ขนาดของมวลโมเลกุล โดยค่าของความหนืดจะขึ้นอยู่กับขนาดหรือความยาวของโมเลกุล

2.4.3.3 สมบัติการไหล (รีโอโลจี)

สารละลายเพกตินเจือจางจะให้การไหลของของเหลวแบบนิวโตเนียน (Newtonian) และความเข้มข้นของสารละลายเพกตินมากกว่าร้อยละ 1 จะมีคุณสมบัติการไหลเป็นแบบ Pseudoplastic solution (Sriamornsal, 2003) และ (Kawakatsu *et al.*, 2001)

2.4.3.4 ความเป็นกรด – ด่าง

ความหนืดของสารละลายเพกตินจะเพิ่มขึ้นถ้าความเป็นกรดด่างลดลงเป็น 2.5-5.5 สารละลายเพกตินจะอยู่ในรูปของ Thixotropic solution สารละลายที่มีประจุ +1 จะลดความหนืดของสารละลายเพกตินเพราะลดแรงดึงดูดระหว่างประจุ

2.4.3.5 มวลโมเลกุลเพกติน

มวลโมเลกุลเพกตินที่มีมวลโมกุลสูงจะทำให้สารละลายมีความหนืดสูงขึ้นด้วย การหาน้ำหนักโมเลกุลของเพกตินสามารถทำนายได้โดยการหาค่า Intrinsic viscosity ในทางตรงกันข้ามเมื่อเจือจางสารละลายและไม่มีแคลเซียม สารละลายจะมีความหนืดลดลง การเตรียมสารละลายเพกตินให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสแตกต่างกันนั้น สามารถทำได้โดยผสมเพกตินชนิดต่างๆหรือผสมเพกตินให้มีความเข้มข้นแตกต่างกัน (Michel *et al.*, 1982), (Christensen, 1954) และ (Berth *et al.*, 1982)

2.4.3.6 ปริมาณของแคลเซียมอิออน (Ca^{2+})

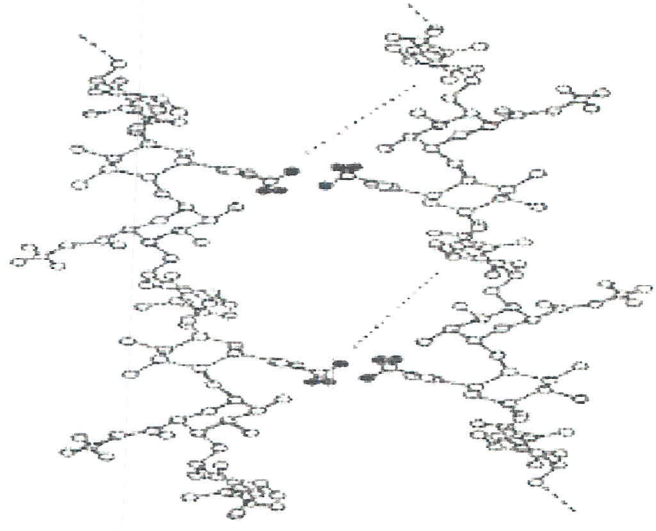
เพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลสูงไม่ต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล แต่เพกตินที่มีหมู่เมททอกซิลต่ำต้องการแคลเซียมในการเกิดเจล ทำให้สามารถแบ่งเพกตินออกตามความไวต่อแคลเซียมอิออนออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่เกิดเจลได้ช้า เนื่องจากความไวต่อแคลเซียมต่ำและกลุ่มที่เกิดเจลได้เร็ว มีความไวต่อแคลเซียมสูง กลุ่มหลังนี้หากเพิ่มปริมาณแคลเซียมความหนืดของสารละลายเพกตินก็จะสูงขึ้นด้วย

2.4.4 การเกิดเจลของเพกติน

สมบัติในการเกิดเจลของเพกตินขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ ความยาวของสายโพลิเมอร์ และระดับการเกิดเมทอกซิล (degree of methoxylation, DM) เกิดเจลได้ดีที่ภาวะที่มีกรดและน้ำตาล โครงสร้างโมเลกุลของเพกตินจะเป็นเกลียว (coil) มากกว่าสายตรง และมีพันธะไฮโดรเจนน้อยกว่าพวกโพลิเมอร์สายยาว เช่น เซลลูโลส สาเหตุเนื่องจากลักษณะและรูปร่างของสาย คือ หมู่ไฮดรอกซิล (-OH) หรือหมู่เมทิล (-CH_3) และประจุที่เกิดจากการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิล (นิธิยา รัตนาปนนท์, 2539)

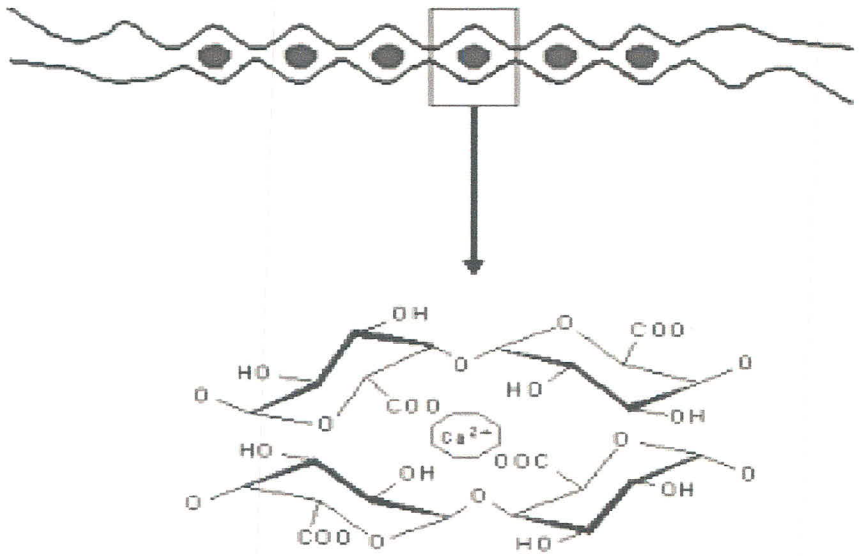
การเกิดเจลของเพกตินจะมีสารช่วยดูดน้ำออกจากโมเลกุล (dehydration agent) เช่น น้ำตาล จะช่วยลดการละลายของเพกตินให้น้อยลง และมีกรดในปริมาณที่เหมาะสม การเกิดเจลของเพกตินชนิด

เมทอกซิลสูงจะเกิดเจลได้ดีที่ภาวะที่มีกรดและน้ำตาล โดยไฮโดรเจนไอออน (H^+) จากกรดจะช่วยลดจำนวนประจุลบของคาร์บอกซิลให้น้อยลง ทำให้ลดการผลักกันระหว่างประจุลบของหมู่คาร์บอกซิล ทำให้สายของเพกตินโมเลกุลเข้ามาใกล้กัน และเกาะกันเป็นตาข่าย (junction zone) ดังรูปที่ 2.5 เพกตินที่สามารถเกิดเจลดีที่สุด คือ เพกตินที่มีหมู่เมทอกซิลในโมเลกุลประมาณร้อยละ 8 หรือมีระดับการเกิดเมทอกซิล ประมาณร้อยละ 50 (นัยทัศน์, 2521)



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ junction zone ระหว่างการเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซิลสูงที่ได้จากการสะท้อนของรังสีเอกซ์ เมื่อเกิด hydrophobic internation ระหว่างคู่ของหมู่เมทิล (จุดทึบ) กับพันธะไฮโดรเจน (เส้นประ)
ที่มา : Thakur *et al.* (1997)

การเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำ จะไม่เกิดเจลกับน้ำตาลและกรด แต่จะเกิดเจลร่วมกับแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) กลไกการเกิดเจลจะเกิดการ cross link ระหว่างหมู่คาร์บอกซิล 2 หมู่กับแคลเซียมไอออน อธิบาย โดยใช้ egg box model ดังรูปที่ 2.6 การเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำเกิดในช่วงความเป็นกรด-ด่างสูง เนื่องมาจากต้องทำลายหมู่คาร์บอกซิล ($-COO^-$) เพื่อมาเชื่อมต่อกับพันธะของเกลือแคลเซียม โดยขนาดของ junction zone จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของแคลเซียมที่ถูกเติมลงไป ดังนั้นการเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำจึงมีประโยชน์ ใช้สำหรับทำแยมหรือเยลลี่ที่ให้พลังงานหรือแคลอรี่ต่ำ และเตรียมได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสที่ควบคุมอัตราการไฮโดรไลซ์หมู่เมทอกซิลออกจากโมเลกุลของเพกตินด้วยกรดด่างหรือเอนไซม์เพกตินเอสเทอร์เลส



รูปที่ 2.6 การจับแคลเซียมในสายโพลีเมอร์ของกาแลกทูโรนิก
ที่มา : Axelos and Thibault (1991)

2.4.5 การนำเพกตินมาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหาร

เพกตินมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมอาหารเนื่องจากความสามารถของสารละลายเพกตินที่ต่างจากสารอื่น คือ สามารถสร้างเจลได้ในภาวะที่เหมาะสม การใช้ประโยชน์ของเพกตินแบ่งออกตามชนิดของเพกติน ดังนี้

2.4.5.1 เพกตินชนิดเมทอกซิลสูง ส่วนใหญ่จะใช้ในอุตสาหกรรมแยม และเยลลี่ ซึ่งจะทำให้เกิดลักษณะสัมผัสที่ดีในแยมหรือเยลลี่โดยเมื่อเคลื่อนย้ายแล้วจะไม่เปลี่ยนรูปร่าง ให้รสชาติดี การหดตัวของวุ้นต่ำ ความเข้มข้นของเพกตินที่ใช้ในการทำแยมและเยลลี่อยู่ในช่วงร้อยละ 1.0 - 4.0 (Cpklco, 2005)

2.4.5.2 เพกตินชนิดเมทอกซิลต่ำ เพกตินชนิดนี้ไม่ต้องการน้ำตาลหรือกรดในการเกิดเจล ดังนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารที่ทำให้เกิดเจลในผลิตภัณฑ์ผลไม้ที่มีส่วนประกอบของน้ำตาลต่ำ หรือผลิตภัณฑ์ที่ไม่มีการเติมน้ำตาลลงไป