

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 การเตรียมผงเมล็ดมะขาม

จากการคั่วเมล็ดมะขามด้วยความร้อนนาน 15 นาที และทำการลอกเปลือกเมล็ดมะขามออกโดยใช้เครื่องกะเทาะเปลือกออกและแยกเปลือกออกจากเมล็ด และแช่น้ำให้เมล็ดเกิดการพองตัวเนื่องจากการดูดน้ำเข้าไปเพื่อให้สามารถบดลดขนาดได้ง่ายขึ้น และนำเข้าสู่ตู้อบอีกครั้งเพื่อไล่ความชื้นออก และนำมาผ่านเครื่องบดแบบละเอียดจะทำให้ได้ผงเมล็ดมะขามที่มีลักษณะเป็นผงแบบละเอียด สีครีม ในรูปที่ 4.1

จากการทดลองปริมาณผงเมล็ดมะขามที่เตรียมได้เท่ากับร้อยละ 60.91 ± 3.39 เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการลอกเปลือกของ ดวงสมร (2556) โดยใช้วิธีการต้มเมล็ดมะขามในน้ำเดือดและทำแห้งเมล็ดมะขาม 2 วิธี คือการใช้ไมโครเวฟและใช้ตู้อบลมร้อนแบบถาด ซึ่งได้ปริมาณผงเมล็ดมะขามเท่ากับร้อยละ 48.93 และ 51.43 ตามลำดับ



รูปที่ 4.1 ผงมะขามจากการคั่วที่ 15 นาที

เมื่อนำผงเมล็ดมะขามมาศึกษาองค์ประกอบทางเคมี พบว่าผงเมล็ดมะขามมีความชื้น ร้อยละ 8.17 ± 0.06 มีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน (ร้อยละ 64.36 ± 0.18 , 16.07 ± 0.22 และร้อยละ 8.69 ± 0.04) ตามลำดับ โดยมีปริมาณใกล้เคียงกับรายงานของ Pujja *et al.* (2008) ที่พบผงเมล็ดมะขามประกอบด้วยโปรตีนร้อยละ 17.1 - 20.1 และคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 65.1 - 72.2 และผงเมล็ดมะขามจากบริษัท Altrafine gums ประเทศอินเดีย ที่ตั้งลักษณะมาตรฐานผลิตภัณฑ์ของผงเมล็ดมะขาม ดังแสดงในตารางที่ 4.1

จากรายงานของ Nishinari *et al.* (2000) พบว่าผงเมล็ดมะขามมีปริมาณเส้นใยอาหารอยู่ในช่วงร้อยละ 65.5 - 72.2 และจากการทดลองนี้ผงเมล็ดมะขามมีเส้นใยอาหารร้อยละ 70.10 ± 1.81 ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของผงเมล็ดมะขามจากการทดลองและผงเมล็ดมะขามทางการค้า

องค์ประกอบ	ผงเมล็ดมะขามจากการทดลอง* (ร้อยละ)	ผงเมล็ดมะขามทางการค้า ¹ (ร้อยละ)
ความชื้น	8.17 ± 0.06	6 - 12
โปรตีน (% N \times 6.25)	16.07 ± 0.22	10 - 20
ไขมัน	8.69 ± 0.04	6 - 10
เส้นใย	1.18 ± 0.04	1 - 2
เถ้า	1.53 ± 0.02	1 - 3
คาร์โบไฮเดรต (คำนวณความแตกต่าง)	64.36 ± 0.18	55 - 65
เส้นใยอาหารทั้งหมด	70.10 ± 1.81	65.5 - 72.2 ²

หมายเหตุ : ¹ <http://www.altrafine.com/tamarind-kernel-powder/>

² Nishinari *et al.*, 2000

* ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.2 คุณสมบัติความหนืดของผงเมล็ดมะขาม

การนำผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออกเปรียบเทียบกับผงเมล็ดมะขามที่กำจัดไขมันออกมาวิเคราะห์คุณสมบัติการเกิดเพสต์และสมบัติความหนืด (pasting properties) ผ่านการให้ความร้อนในขณะที่มีการกวนด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ วิสโคอะไมโลกราฟ ของผงเมล็ดมะขามที่มีความเข้มข้นร้อยละ 4 โดยการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของผสมในระหว่างการให้ความร้อนและการทำให้เย็น ติดตามผลระหว่างความหนืดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในหน่วยความหนืดเป็น Brabender Unit (BU) แสดงความหนืดที่จุดต่างๆ (ตารางที่ 4.2) พบว่าอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดของผงเมล็ดมะขามที่กำจัดไขมันออกและผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออกที่ศึกษาอยู่ในช่วง 51.10 ± 0.56 ถึง 53.00 ± 1.55 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความหนืดสูงสุด (peak viscosity) ของผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออกและผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันออกเท่ากับ 724.00 ± 46.66 และ 959.50 ± 3.53 BU ตามลำดับ และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของหนึ่งฤทัย (2552) ที่ใช้ผงเมล็ดมะขามที่ผ่านการทำแห้งโดยไมโครเวฟ ความเข้มข้นร้อยละ 6 พบอุณหภูมิที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงความหนืดเท่ากับ 30.6 ± 1.4 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิในการเกิดเจลที่ต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับการเตรียมผงเมล็ดมะขามในการทดลองนี้ และมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ $2,272.3 \pm 232.4$ BU เนื่องมาจาก

การใช้ไมโครเวฟในการทำแห้งเมล็ดมะขามอุณหภูมิต่ำในการทำแห้งสูงถึง 102.9 องศาเซลเซียส ซึ่งความร้อนสูงอาจทำให้เม็ดแป้งภายในเมล็ดมะขามบางส่วนเกิดการพรีเจลาติไนซ์ขึ้นโดยไปทำลายโครงสร้างภายในบางส่วน

ค่าความหนืดการแตกสลายของเม็ดแป้ง (breakdown) พบผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันมีค่าสูงกว่าผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมัน (184.50 ± 21.92 BU) แสดงว่าผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันออกมีความคงตัวของเม็ดแป้งในระหว่างการให้ความร้อนน้อยกว่าผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออก เนื่องจากค่าความหนืดการแตกสลายของเม็ดแป้ง ถ้ามีค่าน้อยแสดงว่าเม็ดแป้งมีความคงตัวต่อความร้อนสูง (Agunbiade and Long, 1999)

ความคงตัวของน้ำแป้งหลังจากทำให้เย็น (consistency) ของผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออกและผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันออกเท่ากับ 724.00 ± 15.55 และ 891.50 ± 9.19 BU ตามลำดับ และค่าการคืนตัวของแป้งหลังทำให้เย็นตัวลง (setback) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากความแตกต่างของความหนืดสุดท้ายที่ได้และค่าความหนืดสูงสุด พบว่าผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันออกมีค่าความหนืดสูงกว่าผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออก (786.50 ± 16.26 และ 663.50 ± 7.77 BU) ตามลำดับ เนื่องมาจากการกำจัดไขมันออกจากเม็ดแป้งเมื่อให้ความร้อนทำให้โมเลกุลอิสระของแป้งกระจัดกระจายออกมาและเมื่อลดอุณหภูมิลงโมเลกุลอะไมโลส ที่มีขนาดเหมาะสมจะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลและกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดของแป้งสูงขึ้น (กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2550) โดยจากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมันออกมีค่าความหนืดสูงสุดสูงกว่าผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันออก

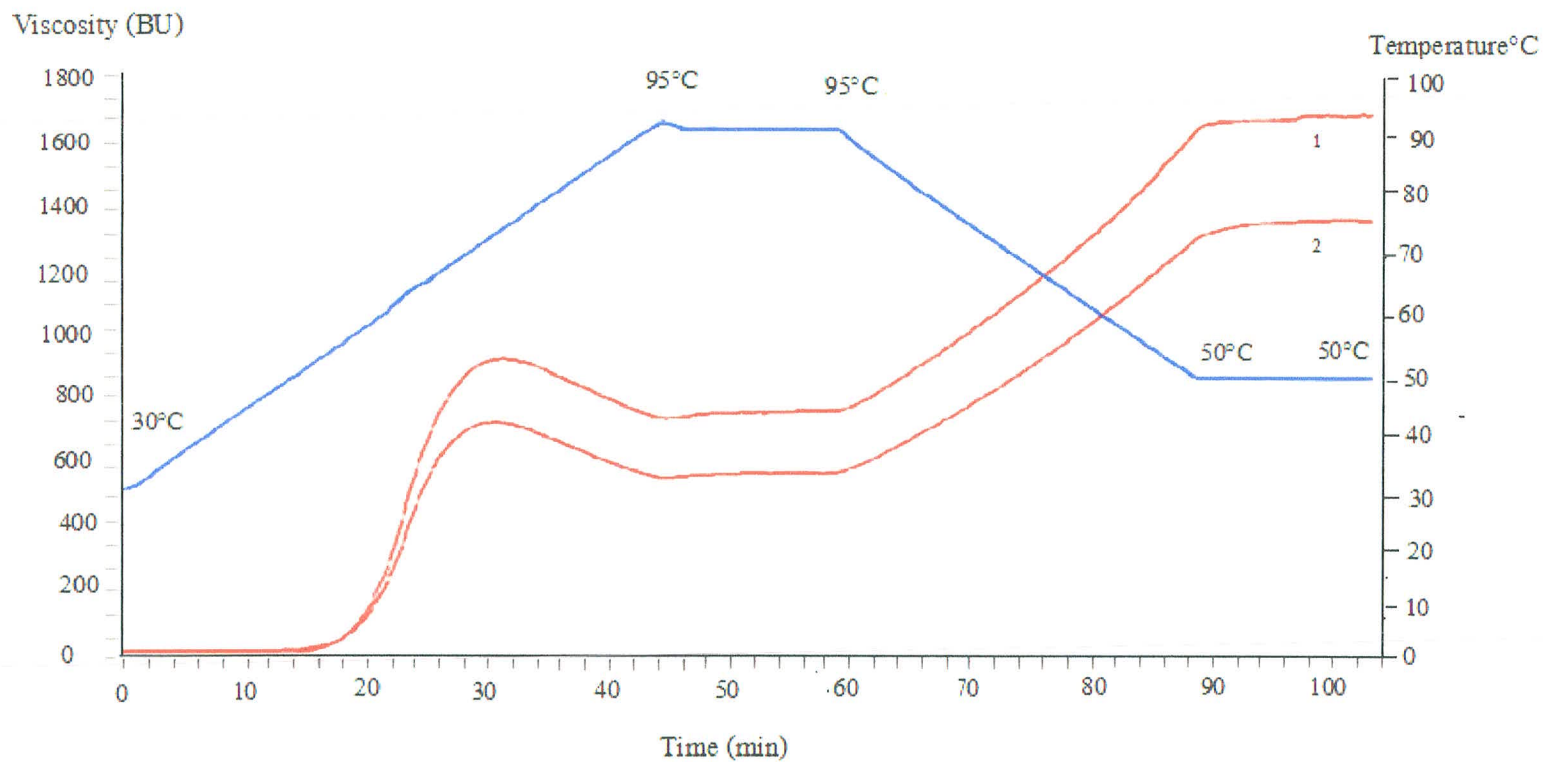
ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิการเกิดเพสต์และสมบัติความหนืดของผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมันและผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมัน

วิธีการ	Pasting temperature (°C) ^{ns}	Viscosity (BU) ¹			
		Peak viscosity	Breakdown ^{ns}	Consistency	Setback
ผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมัน	53.00 ± 1.55	724.00 ± 46.66 ^b	151.50 ± 19.09	742.00 ± 15.55 ^b	663.50 ± 7.77 ^b
ผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมัน	51.10 ± 0.56	959.50 ± 3.53 ^a	184.50 ± 21.92	891.50 ± 9.19 ^a	786.50 ± 16.26 ^a

หมายเหตุ : ¹ ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

^{a, b} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าความหนืดที่จุดต่างๆ ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{ns} ค่าที่แสดงในคอลัมน์นี้ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ ($P > 0.05$)



รูปที่ 4.2 กราฟการตรวจสอบความหนืดของผงมะขามที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 (น้ำหนัก/ปริมาตร, น้ำหนักแห้ง) โดยใช้เครื่อง Brabender Viscograph E

หมายเหตุ : 1 = ผงเมล็ดมะขามกำจัดไขมัน และ 2 = ผงเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กำจัดไขมัน

4.3 ศึกษาสภาวะการสกัดเจลลอส

จากการสกัดเจลลอสโดยใช้ 2 สภาวะในการสกัด คือที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส และ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ระดับ pH = 3, 4 และ 5 เมื่อนำเจลลอสที่ตกตะกอนได้ไปทำแห้งและบดละเอียดจะได้ผงเจลลอส นำสารละลายเจลลอสมาศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีด้วยเครื่องวัดความหนืดแบบแกนหมุน (Brookfield viscometer DV III) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยนำค่าความเค้นเฉือน (Shear stress (N/m^2)) และอัตราเฉือน (Shear rate ($1/\text{sec}$)) ที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์สมการถดถอยเชิงยกกำลังซึ่งอยู่ในรูปของ Power Law Model เพื่ออธิบายถึงพฤติกรรมการไหลของสารละลายเจลลอส ที่ได้จากการสกัดที่อุณหภูมิและสภาวะต่างๆจากการทดลอง

จากรูปที่ 4.3 ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (shear rate) และความเค้นเฉือน (shear stress) ของเจลลอสสกัดที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส และเจลลอสสกัดที่อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ pH = 3, 4 และ 5 พบว่า สารละลายเจลลอสสกัดที่อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส จะมีค่าความหนืดที่สูงกว่าสารละลายเจลลอสสกัดที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากค่าความหนืดคือค่าความชันของเส้นกราฟ โดยเส้นกราฟของสารละลายเจลลอสสกัดที่ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ pH = 4 มีค่าความชันสูงสุดเมื่อเทียบกับที่อุณหภูมิและสภาวะการสกัดอื่น

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าดัชนีบ่งบอกพฤติกรรมการไหลของของไหล (n = flow behaviour index) และดัชนีความคงตัว (k = consistency index) ซึ่งเป็นสมบัติของสารละลายที่สามารถไหลได้ จาก Power Law Model สามารถที่จะอธิบายพฤติกรรมการไหลของสารละลายเจลลอสได้ โดยดัชนีความคงตัวของสารสกัดเจลลอสที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ค่า k อยู่ในช่วง 0.68 - 0.84 Pa.s และ 11.65 - 14.57 Pa.s ตามลำดับ แสดงว่าเจลลอสที่สกัดได้ที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส มีความหนืดสูงกว่าที่สกัดอุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส

จากการทดลองของอรรถวิทย์ (2540) ได้สกัดเจลลอสที่ 25 - 30 องศาเซลเซียส และ 85 - 90 องศาเซลเซียส วัดค่า Apparent viscosity ของสารละลายเจลลอสเข้มข้นร้อยละ 3 อยู่ในช่วง 0.7538 - 0.7662 Pa.s และ 1.5150 - 1.7570 Pa.s ตามลำดับ เนื่องจากเจลลอสเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่อยู่ในเนื้อเมล็ดมะขาม และเป็นส่วนที่ละลายน้ำได้ ดังนั้นการให้ความร้อนในการสกัดจะทำให้เจลลอส ละลายออกมามากขึ้น ส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น

ค่า n (flow behavior index) ของสารละลายเจลลอสที่สกัดที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 และ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส มีค่า $n = 0.99$ และ 0.91 ตามลำดับ ในทุก pH ของการสกัด และมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ $P < 0.05$ แสดงในตารางที่ 4.3 ซึ่ง n จากทั้ง 2 สภาวะการสกัดมีค่าน้อยกว่า 1 แสดงว่าเจลลอสที่สกัดได้จากทั้ง 2 สภาวะมีแนวโน้มพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติก

อย่างไรก็ตามเจลโลสที่สกัดที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส แสดงพฤติกรรมใกล้เคียงกับสารละลายนิวโตเนียนมากเนื่องจากค่า n เข้าใกล้ 1

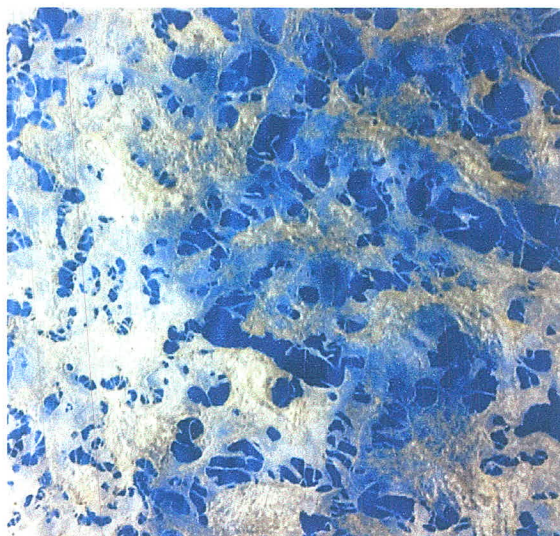
จากงานวิจัยของวันเซ็ง (2553) กล่าวว่าที่ความเข้มข้นของเจลโลสเจือจางมากๆ สารละลายจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนิวโตเนียน $n = 1$ แต่เมื่อความเข้มข้นของเจลโลส มากขึ้น สารละลายจะแสดงพฤติกรรมการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ประเภทซูโดพลาสติก หรือ shear thinning ซึ่งขณะที่สารละลายมีการไหลความหนืดของสารละลายจะลดลงโดยพฤติกรรมแบบ shear thinning จะเด่นชัดมากขึ้นเมื่อสารละลายเจลโลสมีความเข้มข้นมากขึ้น และจากการทดลองของ Pongsawatmanit *et al.* (2006) ได้รายงานว่าสารละลายเจลโลสที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 วัดที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส มีค่า $n = 0.79$ และ $K = 2.58$ Pa.s ซึ่ง $n < 1$ จะแสดงสมบัติการไหลแบบนอนนิวโตเนียน ประเภทซูโดพลาสติกเช่นกัน

ตารางที่ 4.3 ดัชนีบ่งบอกพฤติกรรมการไหลของของไหล (n) และ ดัชนีความคงตัว (k) ของเจลโลส สกัดที่อุณหภูมิ 27.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส และเจลโลสสกัดที่อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ pH = 3, 4 และ 5

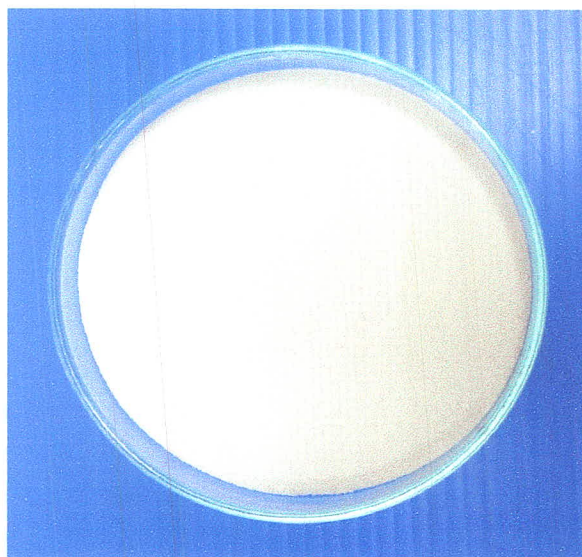
อุณหภูมิการสกัด	pH	n	k (Pa.s)
27.5 ± 2.5 (องศาเซลเซียส)	3	0.99 ± 0.00^a	0.84 ± 0.04^a
	4	0.99 ± 0.01^a	0.68 ± 0.04^a
	5	0.99 ± 0.04^a	0.77 ± 0.05^a
87.5 ± 2.5 (องศาเซลเซียส)	3	0.91 ± 0.00^b	12.54 ± 0.36^b
	4	0.91 ± 0.00^b	14.57 ± 1.41^c
	5	0.91 ± 0.00^b	11.65 ± 1.37^b

หมายเหตุ : ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ \pm ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เนื่องจากสภาวะในการสกัดที่อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ pH = 4 ได้สารละลายเจลโลสที่มีความหนืดสูงที่สุด จึงได้ทดลองศึกษาเจลโลสที่สกัด ณ สภาวะนี้ เจลโลสที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นใยสีขาว มีความเหนียว สามารถฉีกแยกออกจากกันได้ เมื่อทำแห้งจะมีลักษณะสีขาวขุ่น เชื่อมติดกันเป็นร่างแห และเมื่อบดเป็นผงละเอียดจะได้ผงเจลโลสที่มีลักษณะ ดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ โดยปริมาณผลผลิตเจลโลสคิดเป็นร้อยละ 48.37 ± 1.56



รูปที่ 4.5 เส้นใยเจลโลสที่ผ่านการทำแห้งที่ได้จากการทดลอง



รูปที่ 4.6 ผงเจลโลสที่ผ่านการบดละเอียดที่ได้จากการทดลอง

ตารางที่ 4.4 องค์ประกอบทางเคมีของผงเจลโลส

องค์ประกอบ	เจลโลส ¹ (ร้อยละ)	เจลโลส ² (ร้อยละ)
ความชื้น	9.62 ± 1.63	7.80 ± 0.04
โปรตีน (% N × 6.25)	15.84 ± 0.51	8.05 ± 0.18
ไขมัน	0.17 ± 0.07	-
เถ้า	1.29 ± 0.17	2.25 ± 0.22

หมายเหตุ : ¹ ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

² Marathe *et al.*, 2002

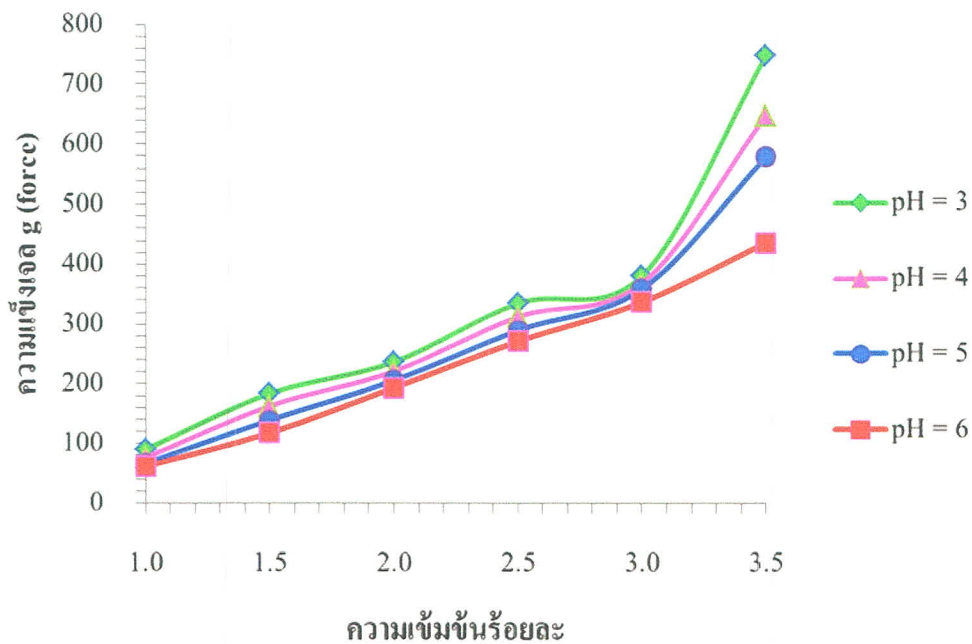
4.4 ศึกษาผลของความเป็นกรด - ด่าง (pH) และความเข้มข้นของเจลโลสต่อพฤติกรรม

การเกิดเจล

จากการศึกษาสมบัติทางรีโอโลยีของสารละลายเจลโลสสามารถเลือกผงเจลโลสสกัดที่อุณหภูมิ 87.5 ± 2.5 องศาเซลเซียส ที่ pH = 4 เนื่องจากที่สภาวะนี้สารละลายเจลโลสที่ได้มีค่าดัชนีความคงตัวหรือความหนืดเท่ากับ 14.57 ± 1.41 Pa.s ซึ่งมีค่าสูงสุด จึงนำผงเจลโลสที่ได้มาศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจลโดยศึกษาระดับของ pH และความเข้มข้นของเจลโลสต่อพฤติกรรมการเกิดเจล จากการทดลอง พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเจลโลส จากร้อยละ 1 ไปจนถึง 3.5 ค่าความแข็งเจล มีค่าสูงขึ้นทุก pH ที่ทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.5 และเมื่อระดับของ pH สูงขึ้นที่ร้อยละความเข้มข้นของเจลโลสเท่ากันผลของค่าความแข็งเจลจะลดลงตามลำดับ

จากรายงานของ Marathe *et al.* (2002) กล่าวว่าสารละลายเจลโลส สามารถฟอร์มตัวเป็นเจลได้เมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลอยู่ที่ร้อยละ 40 - 70 และจะมีความคงตัวสูงแม้จะอยู่ในช่วงความเป็นกรด - ด่าง ที่กว้างและยังคงตัวต่อความร้อนได้ดี จากค่าความแข็งเจลที่ระดับ pH และร้อยละความเข้มข้นของเจลโลสที่แตกต่างกัน พบว่าที่ pH = 3 จะให้ค่าความแข็งเจลสูงที่สุดเมื่อร้อยละเจลโลสที่ใช้ในการทดลองเท่ากันกับที่ระดับ pH อื่นๆ

จากตารางที่ 4.6 ที่แสดงค่าทางสถิติของปัจจัยความเป็นกรด - ด่าง (pH) และความเข้มข้นของเจลโลส รวมถึงศึกษาอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัยในการทดลอง พบว่า ที่ปัจจัย pH ทำให้ค่าความแข็งเจลที่ได้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อความเข้มข้นของเจลโลสเพิ่มสูงขึ้น จากร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0 2.5, 3.0 และ 3.5 พบว่าระดับความเข้มข้นของเจลโลสมีผลทำให้ค่าความแข็งเจลมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4.7 เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของปัจจัย pH และความเข้มข้น พบว่า ที่ปัจจัย pH = 3, 4, 5 และ 6 เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 จะทำให้ค่าความแข็งเจลเพิ่มขึ้น และเมื่อปัจจัย pH เพิ่มสูงขึ้น ค่าความแข็งเจลจะลดลง



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 ที่ปัจจัย pH = 3, 4, 5 และ 6

ตารางที่ 4.6 แสดงค่าทางสถิติของความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นของเจลโลสที่มีผลต่อค่าความแข็งแรง

Source	df	F	Sig.
pH	3	95.777	.000
Concentration	5	1450.767	.000
pH * Concentration	15	21.275	.000

ตารางที่ 4.5 ผลของความเป็นกรด-ด่าง (pH) และความเข้มข้นของเจลโลส ต่อค่าความแข็งของเจลที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน*

pH	ค่าความแข็งเจล g (force) ที่ร้อยละความเข้มข้นแตกต่างกัน**					
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
3	^A 89.70 ± 0.60 ^f	^A 183.25 ± 3.43 ^e	^A 236.17 ± 12.80 ^d	^A 334.22 ± 5.08 ^c	^A 380.40 ± 6.79 ^b	^A 746.28 ± 46.24 ^a
4	^B 75.86 ± 2.07 ^f	^B 162.44 ± 4.51 ^e	^B 220.64 ± 11.97 ^d	^B 311.69 ± 11.60 ^c	^B 367.94 ± 19.83 ^b	^B 646.73 ± 29.46 ^a
5	^C 66.14 ± 3.49 ^f	^C 138.85 ± 8.37 ^e	^C 205.18 ± 5.24 ^d	^C 289.02 ± 10.96 ^c	^C 358.35 ± 3.97 ^b	^C 578.41 ± 44.18 ^a
6	^D 61.48 ± 0.45 ^f	^D 117.39 ± 5.00 ^e	^D 193.15 ± 5.37 ^d	^D 270.63 ± 11.30 ^c	^D 336.19 ± 7.18 ^b	^D 435.76 ± 23.25 ^a

หมายเหตุ : ^{ABC...} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกัน ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวตั้งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

^{abc...} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ตัวอักษรที่กำกับต่างกันในแนวนอนมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

* ในสารละลายน้ำตาล 50 องศาบริกซ์

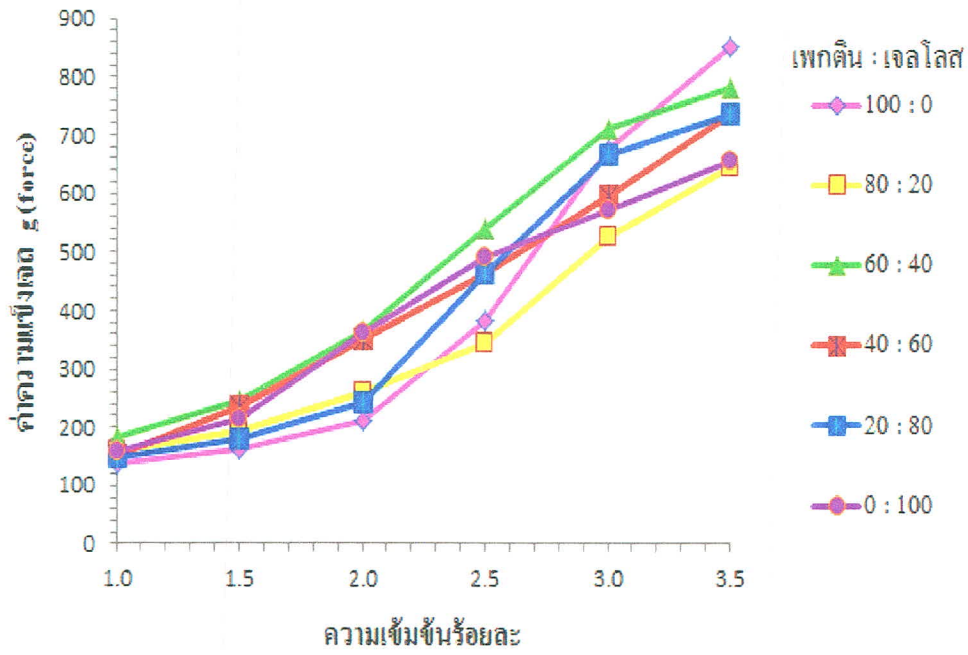
** ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

4.5 ศึกษาผลของสัดส่วนเพกตินและเจลโลสต่อพฤติกรรมการเกิดเจล

จากระดับความเป็นกรด - ด่าง (pH) และความเข้มข้นของเจลโลส พบว่าที่ pH = 3 จะให้ค่าความแข็งเจลสูงสุด และที่ pH นี้ยังมีการใช้กับอาหารที่เป็นกรดสูง เช่น แยม ซอส มายองเนส เป็นต้น ดังนั้นจึงเลือก pH = 3 เพื่อใช้ในการศึกษาผลของสัดส่วนเพกตินและเจลโลสต่อพฤติกรรมการเกิดเจล โดยการเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซิลสูงจะต้องมีองค์ประกอบที่เหมาะสมคือ ปริมาณน้ำตาลร้อยละ 55 - 65 ค่าความเป็นกรด-ด่าง 2.9 - 3.1 เจลที่ได้จะไม่มีการผันกลับเมื่อได้รับความร้อนหรือแรงเฉือน เจลมีลักษณะนิ่ม แต่ไม่ละลายเมื่อให้ความร้อนและ เจลอาจมีการไหลซึมออกมาของของเหลวที่เป็นส่วนประกอบของเจล ซึ่งการเกิดลักษณะเช่นนี้เรียกว่า การเกิดซินเนอริซิส (Oakenfull, 1991) โดยกำหนดค่าความเป็นกรดที่ pH = 3 มาใช้ในการศึกษาพฤติกรรมการเกิดเจล โดยศึกษาสัดส่วนของเพกตินต่อเจลโลส และร้อยละความเข้มข้นโดยวัดค่าความแข็งของเจล

จากการทดลองในตารางที่ 4.7 เมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณเจลโลสถึงร้อยละ 60 ทำให้ค่าความแข็งเจลสูงขึ้น ยกเว้นที่ร้อยละความเข้มข้น 3.5 ในขณะที่การเพิ่มสัดส่วนเจลโลสมากกว่าร้อยละ 60 กลับทำให้ค่าความแข็งเจลลดลง ที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0 ถึง 2.5 และการใช้เจลโลสทดแทนเพกตินทั้งหมด ทำให้ค่าความแข็งเจลสูงกว่าการใช้เพกตินอย่างเดียว แต่ที่ความเข้มข้น 3.0 และ 3.5 การใช้เพกตินทั้งหมดจะให้ค่าความแข็งเจลสูงกว่า ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าหากผลิตภัณฑ์ต้องการเพิ่มความแข็งของเจลอาจสามารถใช้เจลโลสทดแทนเพกตินเพื่อทดแทนการใช้เพกตินในผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ โดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารที่ทำให้เกิดเจล และถ้าสามารถผลิตผงเจลโลสจากเมล็ดมะขามได้ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเนื้อเมล็ดมะขามด้วยต้นทุนที่ไม่แพง ก็จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้

จากตารางที่ 4.8 ที่แสดงค่าทางสถิติของสัดส่วนของเพกตินต่อเจลโลส และความเข้มข้น รวมถึงศึกษาอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัยในการทดลอง พบว่า สัดส่วนเพกตินต่อเจลโลส ทำให้ค่าความแข็งเจลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะมีผลทำให้ค่าความแข็งเจลเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของสัดส่วนเพกตินต่อเจลโลสและความเข้มข้น พบว่าค่าความแข็งเจลมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งเจล พบว่า ที่สัดส่วนเจลโลสจนถึงร้อยละ 60 จะทำให้ค่าความแข็งของเจลนั้นสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มเจลโลสเป็นร้อยละ 80 ถึง 100 จะทำให้ค่าความแข็งของเจลนั้นลดลง



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าความแข็งแรงเจลที่ความเข้มข้นร้อยละ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 และ 3.5 ที่สัดส่วนของเพกตินต่อเจลาติน 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 และ 0:100

ตารางที่ 4.7 ค่าความแข็งเจลต่อสัดส่วนของเพกตินต่อเจลโลสที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน ที่ pH = 3*

เพกติน/เจลโลส	ค่าความแข็งเจล (กรัม) ที่ร้อยละความเข้มข้นแตกต่างกัน**					
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
100:0	^B 138.63 ± 16.21	^E 162.85 ± 18.78	^C 210.44 ± 18.10	^D 380.93 ± 19.50	^B 673.64 ± 17.80	^A 848.78 ± 15.71
80:20	^B 147.29 ± 19.95	^C 178.05 ± 14.01	^B 241.06 ± 16.11	^C 460.80 ± 18.26	^B 664.40 ± 22.92	^C 735.13 ± 28.92
60:40	^B 151.07 ± 15.57	^{AB} 236.76 ± 18.14	^A 350.24 ± 18.31	^C 463.46 ± 24.41	^C 596.21 ± 27.07	^C 733.57 ± 28.81
40:60	^A 182.66 ± 18.49	^A 247.39 ± 25.30	^A 364.18 ± 22.99	^A 538.56 ± 24.41	^A 708.68 ± 20.22	^B 779.88 ± 17.49
20:80	^B 159.40 ± 15.38	^{CD} 194.04 ± 19.99	^B 261.27 ± 18.40	^C 345.03 ± 22.20	^E 526.34 ± 19.38	^D 643.46 ± 29.06
0:100	^B 158.92 ± 24.57	^{BC} 215.65 ± 16.55	^A 362.74 ± 16.42	^B 489.06 ± 10.79	^D 571.38 ± 15.54	^D 654.26 ± 23.86

หมายเหตุ : ^{ABC...} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสัดส่วนที่แตกต่างกัน ในแต่ละคอลัมน์โดยตัวอักษรที่กำกับต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

* ในสารละลายน้ำตาล 50 องศาบริกซ์

** ค่าในตารางคือค่าเฉลี่ยจากการวัด 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าทางสถิติสัดส่วนของเพกตินต่อเจลโลสและความเข้มข้นที่มีผลต่อค่าความแข็ง
เจล

Source	df	F	Sig.
Concentration	5	4635.168	.000
Ratio	5	118.515	.000
Concentration *	25	39.247	.000
Ratio			