บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

องค์ประกอบทางเคมีของเพกตินและชนิดน้ำตาล จะมีผลต่อการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจล ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ปริมาณเมทอกซีของเพกติน สัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำตาลชูโครส fructose syrup และ glucose syrup

เพกตินที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เพกตินชนิดเมทอกซีสูง ประเภท rapid set ปริมาณเมทอกซีที่วิเคราะห์ได้คือ 73 % Crandall และ Wicker(1986)รายงานไว้ว่า เพกตินชนิดเมทอกซีสูงประเภท rapid set มีปริมาณเมทอกซีอยู่ในช่วง 72-75 % ซึ่งเป็นช่วงปริมาณเมทอกซีของเพกตินที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ผลการวิเคราะห์สัดส่วนและชนิดน้ำตาลในน้ำตาลชูโครส fructose syrup และ glucose syrup ดังแสดงในตารางที่ 11,12 และ 13 ตามลำดับ

ตารางที่ 11 สัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำตาลชูโครส

ชนิดน้ำตาล	ปริมาณน้ำตาล(ร้อยละ w/w)
กลูโคส	53
ฟรุกโตส	47

ตารางที่ 12 สัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำตาล fructose syrup

ชนิดน้ำตาล	ปริมาณน้ำตาล(ร้อยละ w/w)
ฟรุกโตส	42
กลูโคส	50
น้ำตาลสองโมเลกุลขึ้นไป	8

ตารางที่ 13 สัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำตาล glucose syrup

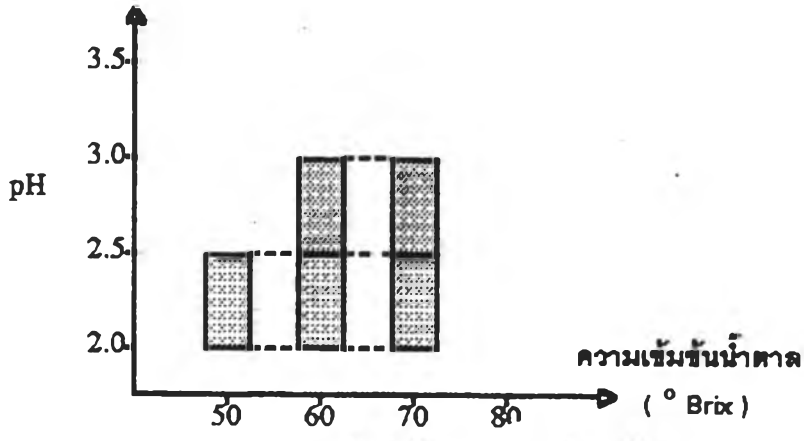
ชนิดน้ำตาล	ปริมาณน้ำตาล(ร้อยละ w/w)
กลูโคส	2.46
มอลโตส	33.93
มอลโตไตรโอส	26.09
มอลโตเตตระโอส	7.79
น้ำตาลมากกว่าสี่โมเลกุล	29.72

เมื่อวิเคราะห์สัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในน้ำตาลซูโครส พบว่าประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตส 47 %(w/w) กลูโคส 53 %(w/w) ซึ่งโดยปกติน้ำตาลซูโครสจะประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตสและกลูโคสชนิดละประมาณ 50 %(w/w) (Pancoast and Junk, 1980) จะเห็นได้ว่าองค์ประกอบและชนิดน้ำตาลในน้ำตาลซูโครสใกล้เคียงกับน้ำตาลที่ใช้ในการ

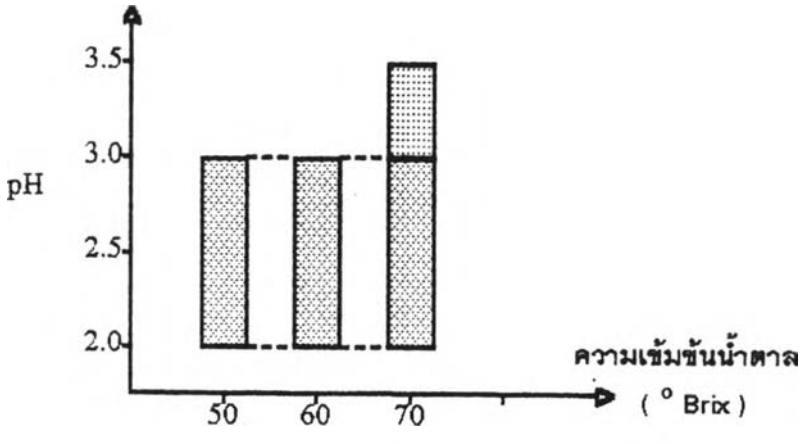
ทดลองนี้ และพบว่าในน้ำตาล fructose syrup ประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโตส 42 % (w/w) กลูโคส 50 %(w/w) และน้ำตาลสองโมเลกุลขึ้นไป 8 %(w/w)ซึ่งโดยทั่วไปน้ำตาล fructose syrup สามารถแบ่งได้เป็น 4 ชนิด คือชนิด A , B ,C และ D ทั้งนี้ขึ้นกับสัดส่วนของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันไปดังแสดงในตารางที่ 4 โดย fructose syrup ชนิด A ประกอบด้วยน้ำตาลเดกซ์โตส 50-52% ฟรุกโตส 42-43 % และน้ำตาลสองโมเลกุลขึ้นไป 5-8 %(Pancoast and Junk, 1980) จะเห็นได้ว่าน้ำตาล fructose syrup ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในช่วงของน้ำตาล fructose syrup ชนิด A สำหรับน้ำตาล glucose syrup พบว่าประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 2.46 % (w/w) มอลโตส 33.93 % (w/w) มอลโตไตรโอส 7.79%(w/w) และน้ำตาลโมเลกุลมากกว่าสี่ 29.72%(w/w) จะเห็นได้ว่า glucose syrup มีปริมาณน้ำตาลมอลโตสสูงถึง 33.93 % และมีปริมาณกลูโคสเพียง2.46 % ทั้งนี้เนื่องจาก glucose syrup จะมีสัดส่วนของน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันไปขึ้นกับขบวนการผลิตหรือสารเคมีที่ใช้ในการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล (Pancoast and Junk, 1980)

2.ศึกษาช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เกิดเจลเซกตินชนิดเมทอกซีสูงในน้ำตาลชนิดต่างๆ

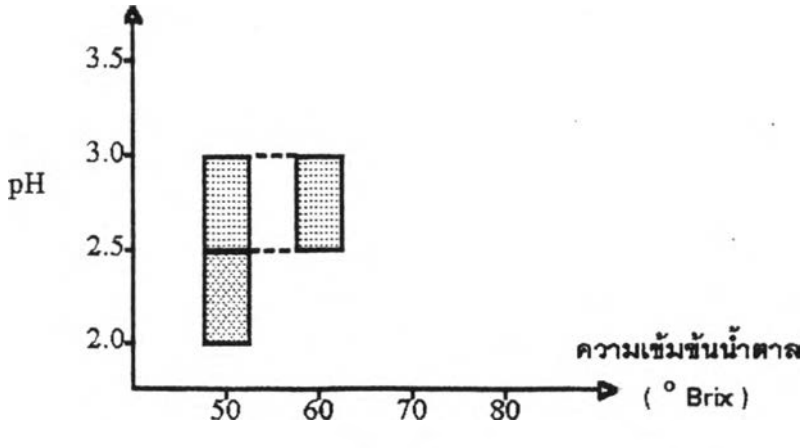
เนื่องจากช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เกิดเจลจะแตกต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดน้ำตาล ดังนั้นจึงศึกษาช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เกิดเจล โดยศึกษาในน้ำตาลซูโครส fructose syrup และ glucose syrup เลือกศึกษา pH 2.0-3.5 และความเข้มข้นน้ำตาล 50-80 ° Brix ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก จ. นำช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่เจลเกิดในน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 18 ,19 และ 20



รูปที่ 18 ช่วงpH และความเข้มข้นน้ำตาลที่เจลเกิดในน้ำตาลซูโครส



รูปที่ 19 ช่วงpH และความเข้มข้นน้ำตาลที่เจลเจลในน้ำตาล fructose syrup



รูปที่ 20 ช่วงpH และความเข้มข้นน้ำตาลที่เจลเกิดในน้ำตาล glucose syrup

การเกิดเจลของเพกตินชนิดเมทอกซีสูงขึ้นกับปริมาณเพกตินที่ละลายในน้ำ เพื่อสร้างโครงร่างตาข่าย และปริมาณพันธะระหว่างสายเพกตินซึ่งเกิดจากพันธะไฮโดรเจนและ HI เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลและปริมาณกรดเพิ่มขึ้น (pH ต่ำลง) (BeMillier, 1986; Crandall and Wicker, 1986) การละลายของเพกตินลดลงแต่พันธะระหว่างสายเพกตินเพิ่มขึ้น ดังนั้นที่ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลซึ่งมีปริมาณน้ำเหลือ (จากการละลายน้ำตาล)พอเพียงที่จะทำให้เพกตินใช้ในการละลายหมด จะพบว่าเจลเกิดได้ดีขึ้นและความแข็งแรงของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลละลายน้ำได้ดีกว่าเพกติน สมดุลระหว่างอิออนบวกของน้ำกับอิออนลบบนสายเพกตินถูกรบกวนโดยน้ำตาลซึ่งทำให้สายเพกตินถูกผลักเข้าใกล้กันมากขึ้นเป็นผลทำให้เกิด HI และพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายเพกตินเพิ่มขึ้น หากความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นจนกระทั่งความเข้มข้นของน้ำตาลสูงถึงระดับที่มีน้ำเหลือไม่พอเพียงต่อการละลายของเพกตินบางส่วน ที่ระดับนี้ปริมาณเพกตินที่ละลายจะลดลงหรือผงเพกตินเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำตาลสูงขึ้น ซึ่งทำให้ความสามารถในการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจลลดลง การที่ pH ลดลง (ปริมาณกรดเพิ่มขึ้น)เพกตินจะเกิดการ ionize น้อยลง เนื่องจากเมื่อเพกตินละลายในน้ำหมู่ COOH บนสายจะ ionize ให้ COO^- และ H^+ และเมื่ออยู่ในภาวะเป็นกรด กรดจะ ionize ให้อิออนบวก (ไฮโดรเจนอิออน) ทำให้เพกตินเกิดการ ionize ลดลง ส่งผลให้เพกตินมีแรงผลักระหว่างสายน้อยลง ซึ่งทำให้เพกตินเข้าใกล้กันและเกิดพันธะภายในโครงร่างแหมากขึ้น (Crandall and Wicker, 1986)จากรูปที่ 18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เกิดเจลในน้ำตาลซูโครส พบว่าช่วง pH 2.0-2.5 เจลเกิดในช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-70 $^\circ$ Brix และช่วง pH 2.5-3.0 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 60-70 $^\circ$ Brix สำหรับช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 80 $^\circ$Brix ไม่มีเจลเกิดขึ้นที่ทุกระดับpH แต่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยของเพกตินในสารละลายข้นหนืดของน้ำเชื่อม เนื่องจากที่ pH 2.0-2.5 การเกิด ionization ของเพกตินต่ำกว่าที่ pH 2.5-3.0 ดังนั้นที่ pH 2.5-3.0 จึงมีแรงผลักระหว่างสายเพกตินมากกว่า pH 2.0-2.5 ฉะนั้นโอกาสที่เพกตินจะเข้ามาใกล้กันจนเกิดเป็นโครงร่างเจลจึงมีน้อยกว่า เป็นผลทำให้ที่ pH 2.5-3.0 ต้องการปริมาณน้ำตาลมากกว่าที่ pH2.0-2.5เพื่อที่จะให้น้ำตาลช่วยในการทำให้สายเพกตินเข้าใกล้กันจนเกิดปริมาณ HI ระหว่างสายเพกตินพอเพียงต่อการเกิดเจล (ดังแสดงจากผลการทดลองที่ ช่วง pH 2.5-3.0 เจลไม่เกิดที่ความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครส 50°Brix แต่เกิดที่

60-70°Brix) แต่การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลมากกว่านี้ พบว่าไม่เกิดเจลที่ทุกระดับ pH เนื่องจากน้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่จะไปละลายน้ำตาล ทำให้มีน้ำไม่พอเพียงต่อการพองตัว(swelling) และการละลายของเพกตินซึ่งเป็นกลไกแรกที่จะทำให้เกิดโครงร่างแหเจล กล่าวคือเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงมากกว่าช่วง 70 °Brix จะทำให้ผงเพกตินส่วนใหญ่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ไม่มีสายโซ่ของเพกตินในสารละลายน้ำตาลเพียงพอต่อการเกิดโครงร่างแห จึงไม่สามารถเกิดเจลได้

รูปที่ 19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เกิดเจลของเพกตินในน้ำตาล fructose syrup พบว่า น้ำตาล fructose syrup ช่วง pH 2.0-3.0 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-70 °Brix ช่วง pH 3.0-3.5 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 70 °Brix จะเห็นได้ว่าช่วง pH ต่ำ (2.0-3.0) น้ำตาล fructose syrup เจลสามารถเกิดได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลกว้างกว่าในช่วง pH สูง(3.0-3.5)กล่าวคือช่วง pH ต่ำ เจลสามารถเกิดได้ทั้งในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ (50-60°Brix)และช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูง(70°Brix) ในขณะที่ช่วง pH สูงเจลเกิดได้ที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 70 °Brix เท่านั้น ทั้งนี้สามารถอธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับในน้ำตาลซูโครส

จากรูปที่ 20 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำให้เจลเกิดในน้ำตาล glucose syrup พบว่า ช่วง pH 2.0-2.5 เจลเกิดในช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50 °Brix pH 2.5 - 3.0 เจลเกิดช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-60°Brix และช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 70-80 °Brix เจลไม่เกิดที่ทุกระดับ pH แต่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอยของเพกตินในสารละลายข้นหนืดของน้ำเชื่อม จะเห็นได้ว่าช่วง pH 2.5-3.0 น้ำตาล glucose syrup เจลสามารถเกิดได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50- 60°Brix และในขณะที่ช่วง pH 2.0-2.5 เจลสามารถเกิดได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50 °Brix เท่านั้น เนื่องจากภาวะ pH 2.0-2.5 เพกตินเกิดการ ionization ต่ำกว่าที่ pH ระหว่าง 2.5-3.0 ดังนั้นที่ pH 2.0-2.5 จึงมีแรงผลักระหว่างสายเพกตินน้อยกว่า pH 2.5-3.0 ซึ่งทำให้โอกาสที่เพกตินจะเข้ามาใกล้กันจนเกิดเป็นโครงร่างแหเจลจึงมีมากกว่า ดังนั้นที่ pH 2.5-3.0 จึงต้องการปริมาณน้ำตาลมากกว่าที่ pH2.0-2.5 เพื่อที่จะให้สายเพกตินเข้าใกล้กันจนเกิด HI ภายในโครงร่างแหเจล แต่จากผลการทดลองการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจาก 50°Brix เป็น 60° Brix เจลไม่เกิดที่ pH 2.0-2.5 แต่เจลเกิดที่ pH 2.5-3.0 ซึ่งต้องการปริมาณน้ำตาลมาก

กว่าที่ pH 2.0-2.5 อาจเนื่องจากที่ความเข้มข้นน้ำตาล 60°Brix น้ำที่มีอยู่จะละลายน้ำตาลมาก จนกระทั่งเหลือปริมาณน้ำน้อยลงมากส่งผลให้สายเพกตินเข้าใกล้กันจนเกิด HI สูงขึ้น ประกอบกับที่ภาวะ pH 2.0-2.5 เพกตินเกิดการ ionization ต่ำ การละลายของเพกตินจึงต่ำกว่าที่ pH 2.5-3.0 ซึ่งทำให้เพกตินรวมกลุ่มกัน(aggregate)เป็นตะกอนและเจลไม่สามารถเกิดได้ แต่ที่ pH 2.5-3.0 ซึ่งเป็นภาวะที่มีการ ionize สูงกว่าที่ pH 2.0- 2.5 ทำให้เพกตินสามารถละลายได้มากกว่า และมีปริมาณเพกตินที่ละลายพอเพียงต่อการสร้างโครงร่างตาข่ายจึงสามารถเกิดเจลได้

จะเห็นได้ว่าน้ำตาลทั้งสามชนิดซึ่งมีสัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกันออกไปดังแสดงในตารางที่ 11, 12 และ 13 จะมีช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลในการเกิดเจลแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลต่างชนิดจะมีผลต่อ HI ต่างกัน ซึ่งเหตุผลอันหนึ่งที่ทำให้ชนิดน้ำตาลมีผลต่อ HI ต่างกันคือโครงรูปสามมิติของน้ำตาลที่เข้าไป interact กับน้ำซึ่งล้อมรอบหมู่เมทธิล หากระยะห่างระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำและน้ำตาลมีค่าใกล้เคียง 4.86° A จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิด HI ได้มาก(Back,Oakenfull and Smitt,1979) แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลและน้ำ เมื่อน้ำตาลชนิดต่างๆ เข้าไป interact กับน้ำ ดังนั้นการที่น้ำตาลมีช่วง pH และความเข้มข้นในการเกิดเจลแตกต่างกันออกไปจึงอาจเกิดเนื่องจากสาเหตุอื่นก็เป็นได้ ดังนั้นน้ำตาลแต่ละชนิดจึงมีช่วงความเข้มข้นและ pH ในการเกิดเจลต่างกัน โดยในน้ำตาลซูโครส และ fructose syrup ที่ช่วง pH ต่ำ สามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลกว้างกว่าช่วง pH สูง กล่าวคือในช่วง pH ต่ำ น้ำตาลทั้งสองชนิดสามารถเกิดเจลได้ทั้งช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำและสูง ในขณะที่ช่วง pH สูงสามารถเกิดเจลในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงเท่านั้น ส่วนน้ำตาล glucose syrup ที่ช่วงpH สูงสามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลกว้างกว่าช่วง pH ต่ำ กล่าวคือในช่วง pH สูงสามารถเกิดเจลได้ทั้งในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำและสูง ในขณะที่ช่วง pH ต่ำสามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำเท่านั้น หากต้องการผลิตภัณฑ์อาหารเจลที่มีรสชาติเปรี้ยวจัดและ/หรือหวานมากก็สามารถใช้น้ำตาลซูโครสหรือ fructose syrup ในการเตรียมเจลได้ เนื่องจากที่ช่วง pH ต่ำน้ำตาลทั้งสองชนิดนี้ และสามารถเกิดเจลได้ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงและกว้าง

จากผลการศึกษาช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลที่เจลเกิดในน้ำตาลซูโครส

fructose syrup และ glucose syrup ดังแสดงในรูปที่ 17, 18 และ 19 พบว่าในน้ำตาลซูโครส ช่วงpH 2.0-2.5 เจลเจลในช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-70 ° Brix และช่วงpH 2.5-3.0 เจลเกิดที่ความเข้มข้นน้ำตาล 60-70 ° Brix สำหรับช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 80°Brix เจลไม่เกิดที่ทุกระดับ pH ในน้ำตาล fructose syrup พบว่า ช่วงpH 2.0-3.0 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-70° Brix ช่วง pH 3.0-3.5 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 70° Brix และในน้ำตาล glucose syrup พบว่า ช่วง pH 2.0-2.5 เจลเกิดที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50° Brix ช่วง pH 2.5-3.0 เจลเกิดช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 50-60° Brix และช่วงความเข้มข้นน้ำตาล 70-80° Brix เจลไม่เกิดที่ทุกระดับ pH ดังนั้นจึงเลือกช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลกว้างที่สุดที่เจลเกิดในการศึกษาต่อไปในน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด เพื่อศึกษาผลของ pH ความเข้มข้นและชนิดน้ำตาลต่อความแข็งแรงของเจลดังนี้ น้ำตาลซูโครสช่วง pH 2.0 - 3.0 ความเข้มข้นน้ำตาล 60-70 ° Brix fructose syrup ช่วง pH 2.0-3.0 ความเข้มข้นน้ำตาล 50-70° Brix และน้ำตาล glucose syrup ช่วง pH 2.5-3.0 ความเข้มข้นน้ำตาล 50-60° Brix เพื่อศึกษาผลของ pH ความเข้มข้นและชนิดน้ำตาลต่อความแข็งแรงของเจลต่อไป

3.ศึกษาผลของ pH ความเข้มข้นและชนิดน้ำตาลต่อความแข็งแรงของเจลเพกตินชนิดเมทอกซีสูง

โดยใช้แผนการทดลอง central composite design แบบ 2 ตัวแปร โดยมี code ของตัวแปร 5 ระดับ คือ ±0, ±1, ±1.414 แผนการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8,9 และ 10 วัดความแข็งแรงของเจลโดยวัดค่า modulus และค่า firmness ผลการทดลองดังแสดงในภาคผนวก จ. และนำผลการทดลองดังกล่าวหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulusกับความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ในน้ำตาลทั้ง 3 ชนิด ด้วยวิธี multiple regression และนำค่า firmness มาหาความสัมพันธ์กับความเข้มข้นน้ำตาลและ pH เช่นเดียวกัน จะได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ 1, 2 ,3 และ 4

Firmness of fructose = $15282.3658 - 415.5044x_1 + 2.3876 x_1^2$

syrup $- 445.1123x_2^2 + 33.3295x_1x_2$ -------- 1

$R^2 = 0.9180$

Modulus of fructose = $17593.3619 - 296.8168x_1 - 3952.2869x_2$

syrup $+ 0.9090x_1^2 + 59.4675x_1x_2$ ---------2

$R^2 = 0.9222$

Firmness of glucose = $22432.9869 - 915.0622x_1 + 3740.7192x_2$

surup $+ 7.8772x_1^2 - 692.3777x_2^2$ ---------3

$R^2 = 0.9281$

Modulus of glucose = $17484.7477 - 497.8178x_1 + 4.0375x_1^2$

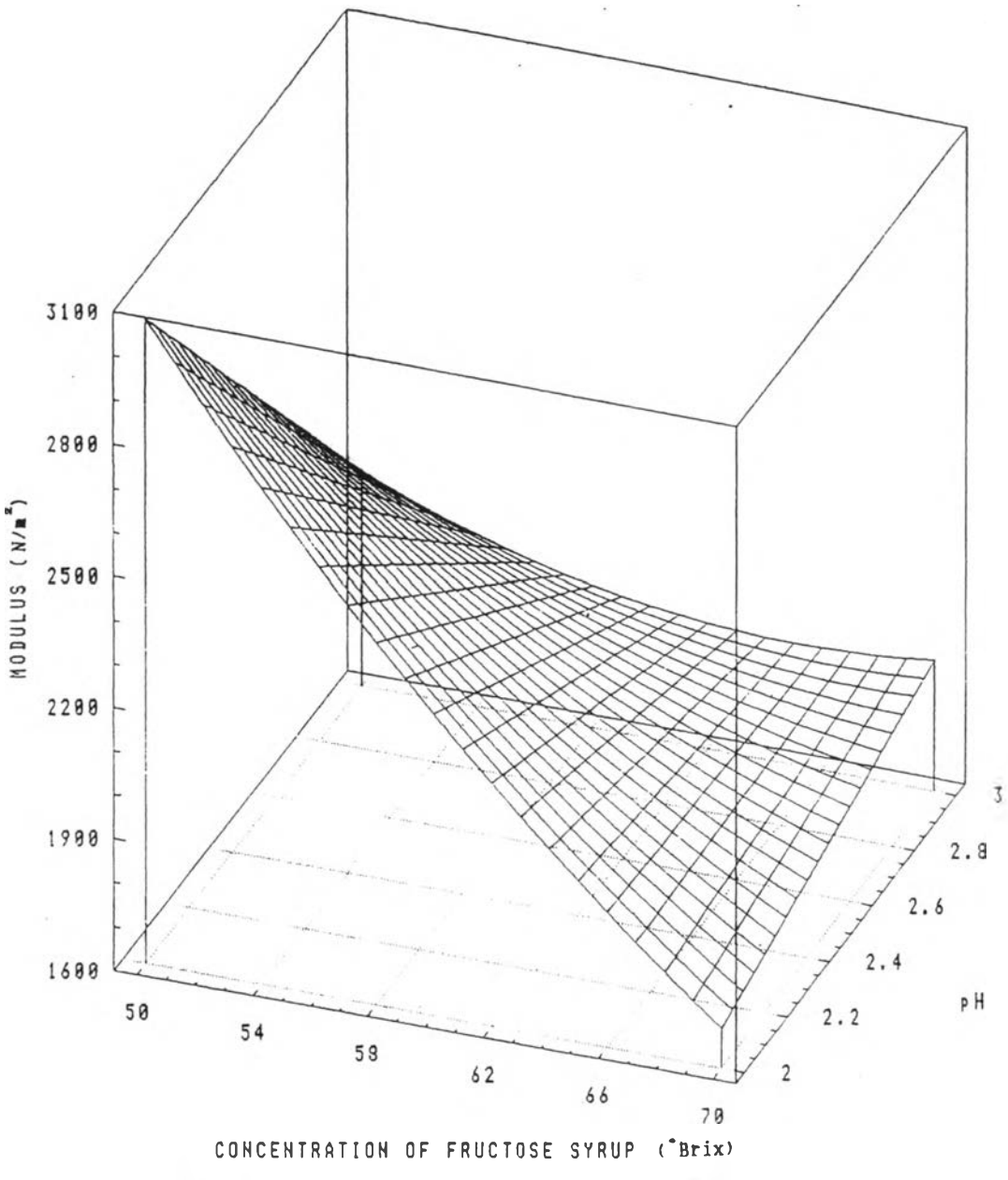
syrup $- 53.3715x_2^2$ ---------4

$R^2 = 0.7536$

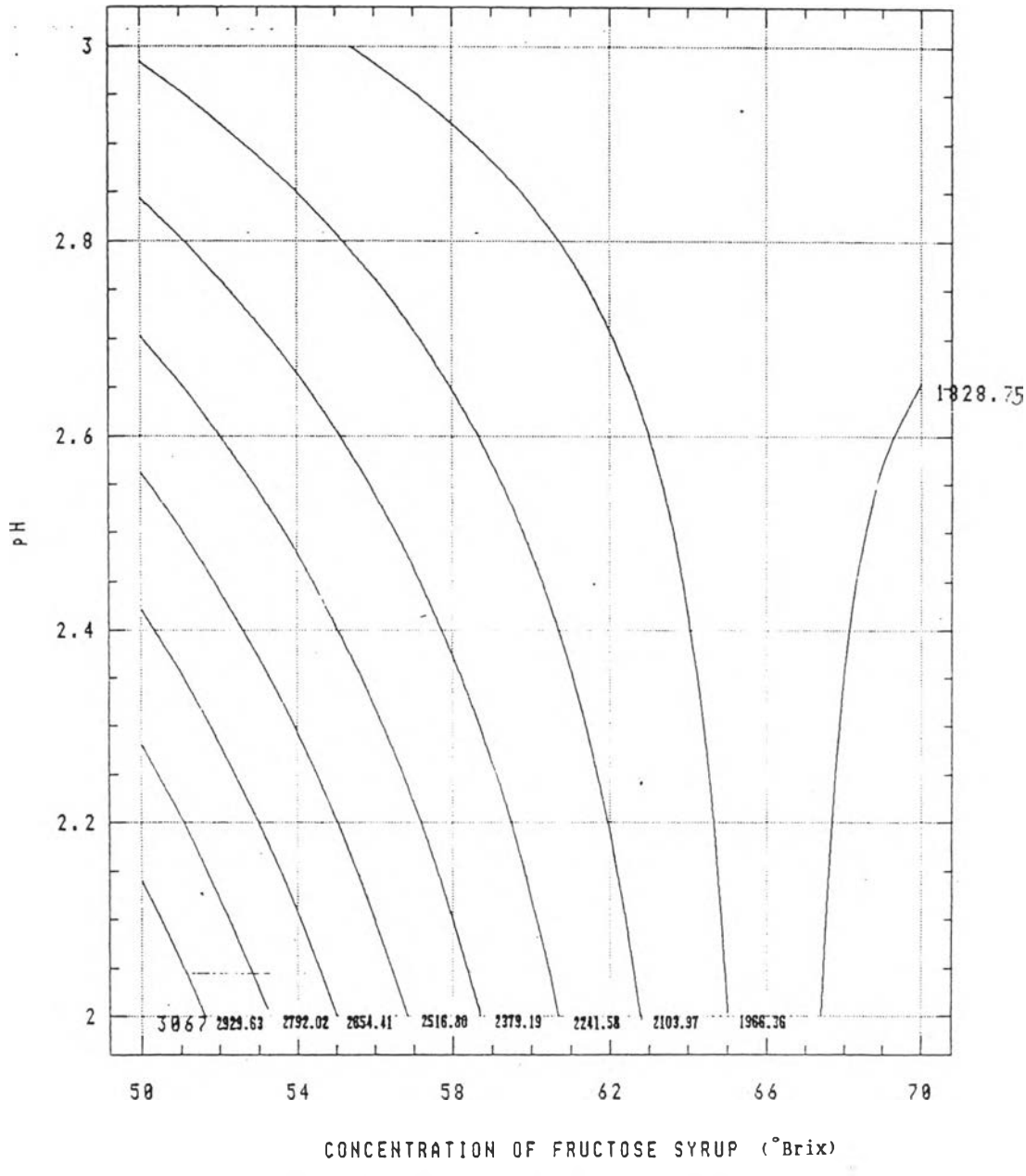
x_1 = concentration of sugar

x_2 = pH

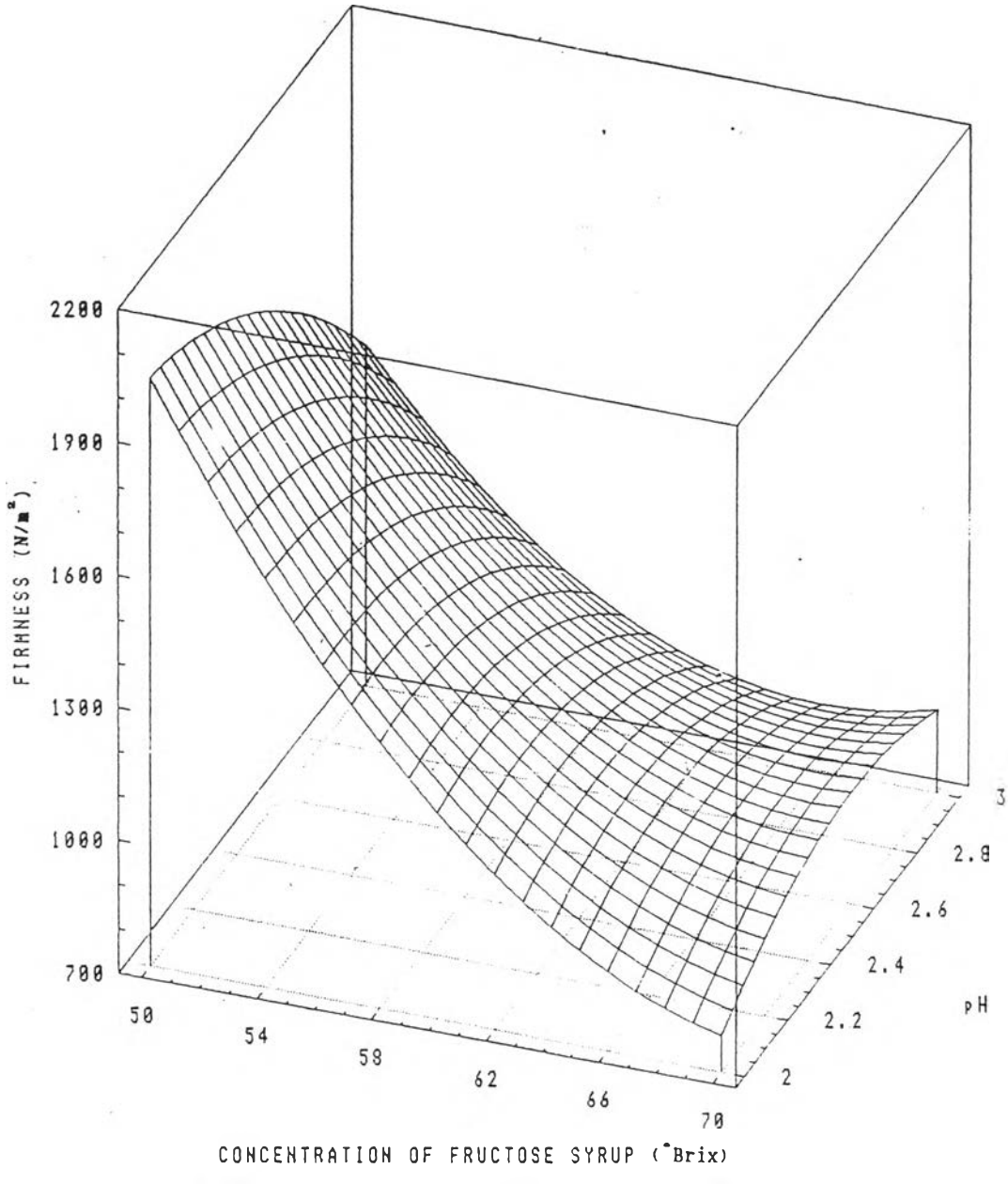
สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า modulus หรือ firmnessในน้ำตาลซูโครสมิได้นำมาแสดงเนื่องจาก จะให้ค่า R^2 ต่ำมาก คือ 0.3901 และ 0.1185 ตามลำดับ แสดงว่าความถูกต้องแม่นยำในการนำสมการความสัมพันธ์ของค่า firmness หรือค่า modulus กับ ความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ไปใช้จะน้อยมาก อาจเนื่องจากเลือกช่วงความเข้มข้นน้ำตาล และช่วง pH ที่มาทำการศึกษาแคบเกินไป ดังนั้นจึงไม่ทำการศึกษาน้ำตาลซูโครสในข้อต่อไป และนำเฉพาะสมการที่ 1-4ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์แบบ 3 มิติและ contour plot ระหว่างค่า firmness หรือค่า modulus กับความเข้มข้นน้ำตาลและค่า pH เท่านั้น พบว่าในน้ำตาล fructose syrup ค่า modulus ได้กราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 21 contour plot ดังรูปที่ 22 และค่า firmness ได้กราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 23 contour plot ดังรูปที่ 24 สำหรับน้ำตาล glucose syrup ค่า firmness จะได้กราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 25 contour plot ดังรูปที่ 26 และค่า firmness ได้กราฟ 3 มิติ ดังรูปที่ 27 contour plot ดังรูปที่ 28



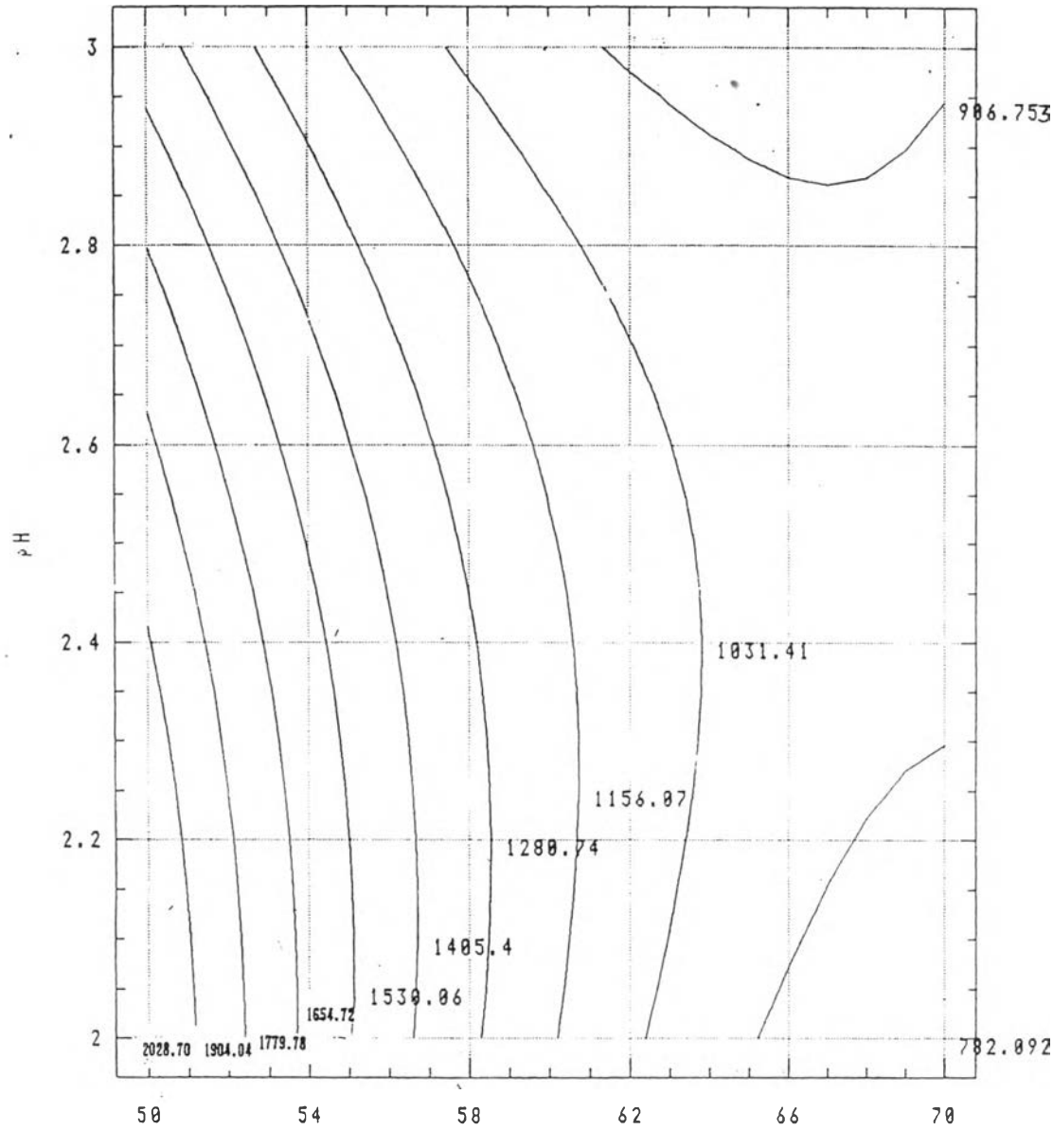
รูปที่ 21 ภาพสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า modulus ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup



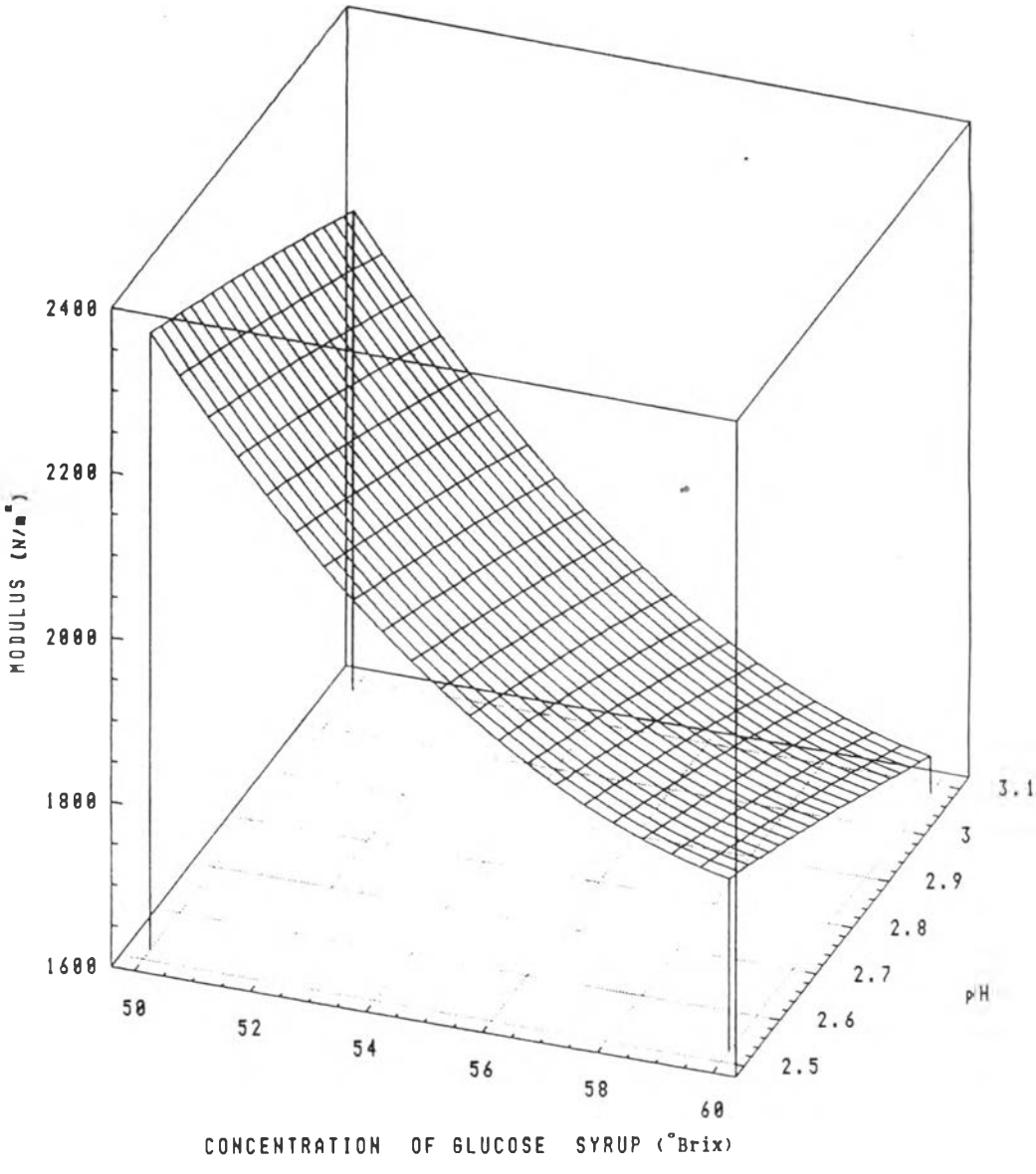
รูปที่ 22 ภาพสองมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า modulus ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup



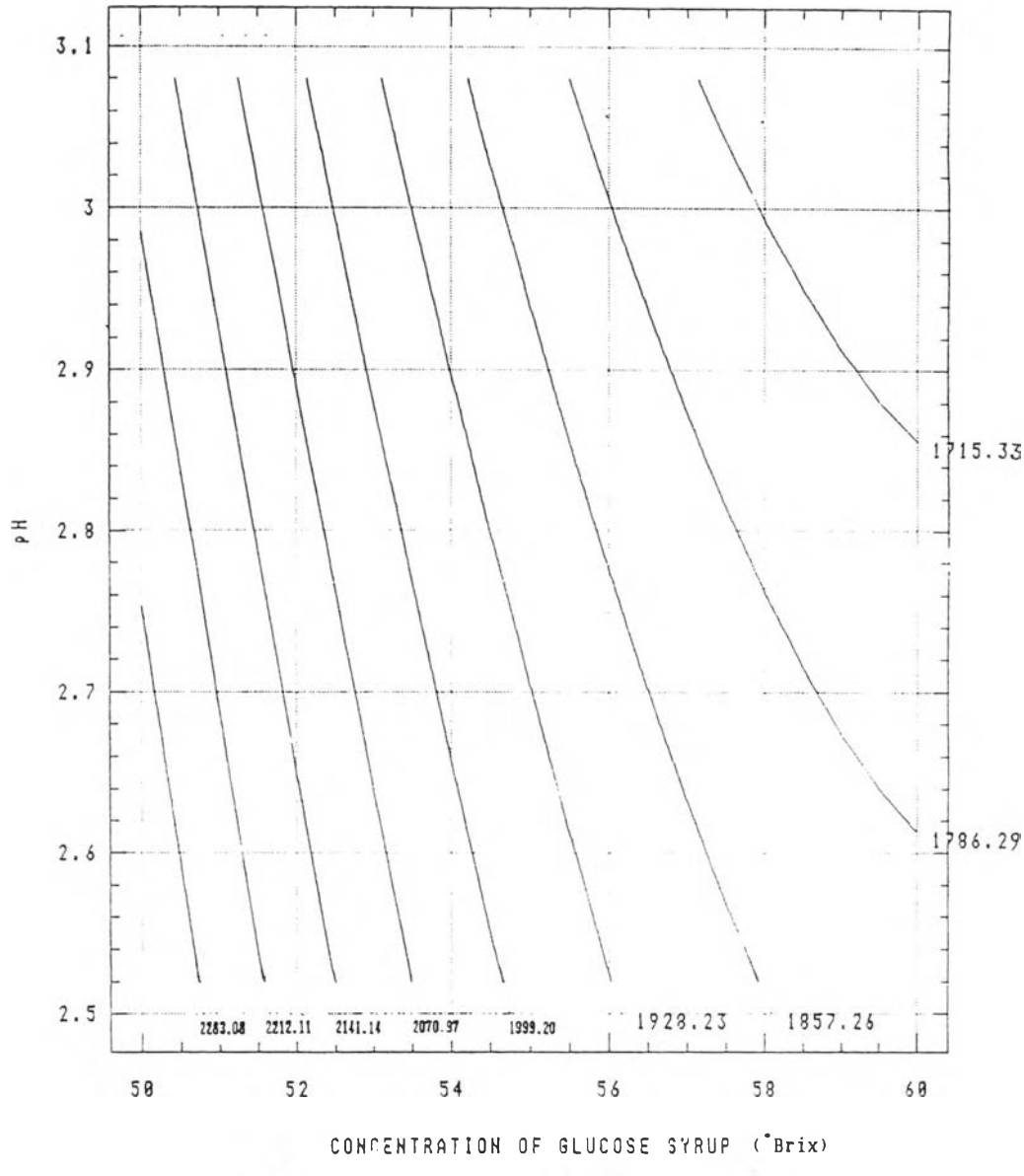
รูปที่ 23 ภาพสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup



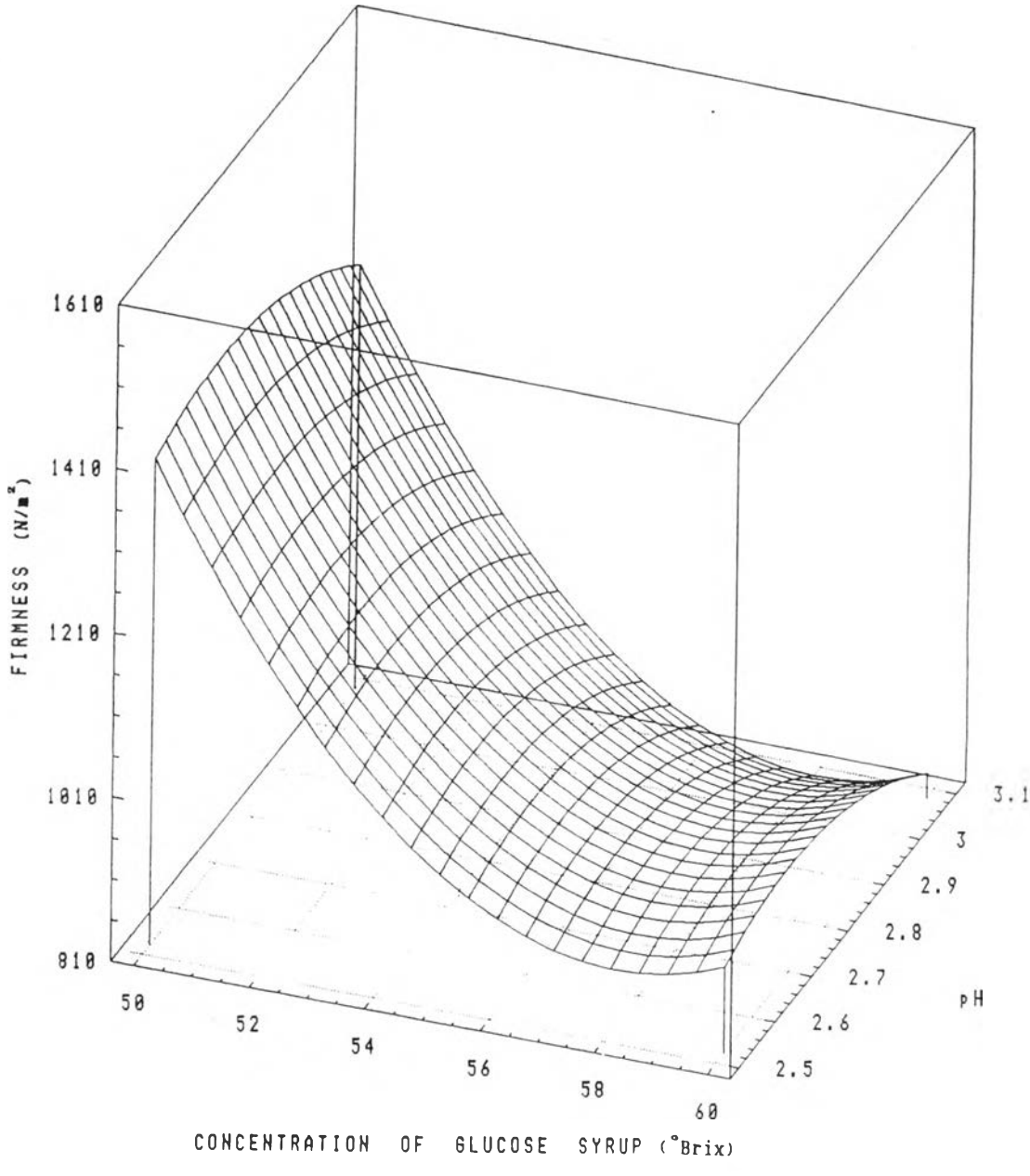
รูปที่ 24 ภาพสองมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup



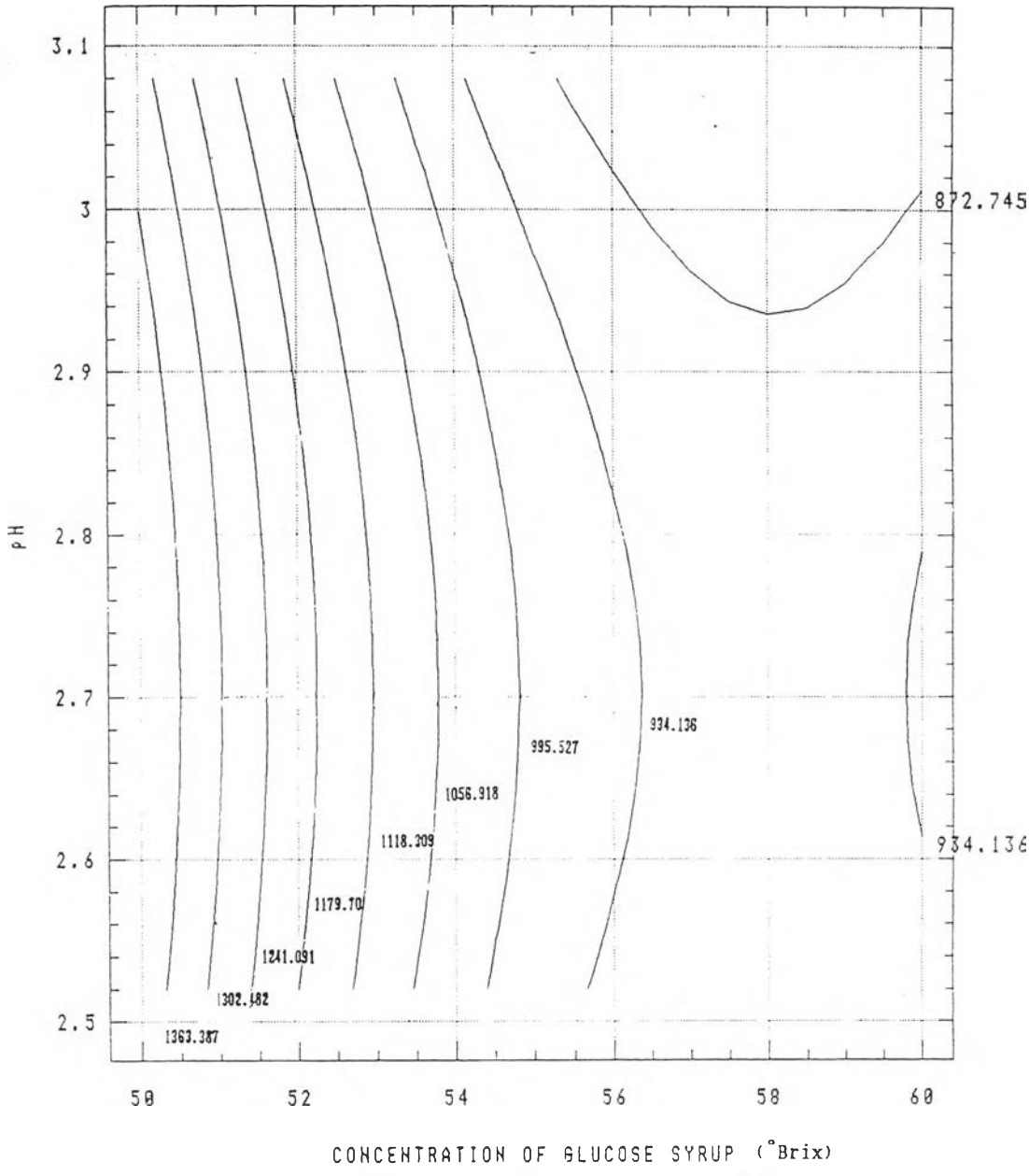
รูปที่ 25 ภาพสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า modulus ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup



รูปที่ 26 ภาพสองมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า modulus ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup



รูปที่ 27 ภาพสามมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup



รูปที่ 28 ภาพสองมิติแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup

จากกราฟ 3 มิติ รูปที่ 21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus กับความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อค่า modulus กล่าวคือเมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะทำให้ค่า modulus ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ กล่าวคือ ค่า modulus จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้นในช่วงดังกล่าว และช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงค่า modulus จะลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเกือบคงที่ หากความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว ในทุกๆ pH ที่ทำการทดลองจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า modulus โดยเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ พบว่าการเพิ่มค่า pH ที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ต่างๆ กัน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า modulus ต่างกัน กล่าวคือ การเพิ่มpH ที่แต่ละความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำจนถึงช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงช่วงหนึ่งจะทำให้ค่า modulus ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อ pH สูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นประมาณ 62-63 ° Brix จากนั้นค่า modulus จะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อ pH เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้น นอกจากนี้การแปรค่า pH และความเข้มข้นน้ำตาล จะมีผลต่อการลดลงของค่า modulus ต่างกัน กล่าวคือ การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อการลดลงของค่า modulus มากกว่าเมื่อค่า pH สูงขึ้น ความสัมพันธ์นี้จะเห็นชัดเจนเมื่อพิจารณาจาก contour plot ดังรูปที่ 22 การเปลี่ยนแปลงความถี่ของเส้นเท่าของค่า Modulus เมื่อมีการแปรความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ชี้ให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่า Modulus เมื่อมีการแปรค่าปัจจัยทั้งสองในช่วงต่าง ๆ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ การเพิ่ม pH ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ต่าง ๆ กันจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า modulus ต่างกัน กล่าวคือการเพิ่ม pH ที่แต่ละความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำถึงช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงช่วงหนึ่งค่า modulus จะลดลง โดยจะเห็นได้ชัดเจน หาก pH สูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำคือ 50-62°Brix (สังเกตจากความถี่ของเส้นเท่าของค่า modulus ที่ตัดแกนความเข้มข้นน้ำตาล) และอัตราการลดลงของค่า modulus จะน้อยลงเป็นลำดับจนกระทั่งเกือบคงที่ เมื่อ pH เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงคือ 62-67 °Brix จากนั้นค่า modulus จะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อ pH เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงสุด คือ 67-70 °Brix ทุก ๆ ความเข้มข้นน้ำตาลที่ทำการทดลองจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า modulus กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ใด ๆ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะทำให้ค่า modulus ลดลง

ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจน เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ คือ 50-64° Brix โดยค่า modulus จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้นในช่วงดังกล่าว (สังเกตจากความถี่ของเส้นเท่าของค่า modulus ที่ตัดแกน pH) อัตราการเปลี่ยนแปลงค่า modulus จะน้อยมากจนกระทั่งเกือบคงที่ เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสูงคือ 64-70 ° Brix

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus และค่าปัจจัยทั้งสองดังกล่าว ดังรูปที่ 23 และ 24 โดยพบว่า การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อค่า firmness กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะทำให้ค่า firmness ลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ กล่าวคือ ค่า firmness จะลดลงอย่างรวดเร็ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงดังกล่าว (สังเกตจากความถี่ของเส้นเท่าของค่า firmness ตัดแกน pH ในรูป 24) และช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงค่า modulus จะลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเกือบคงที่หากความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว ในทุก ๆ pH ที่ทำการทดลองจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า firmness โดยเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ พบว่าการเพิ่มค่า pH ที่ช่วงความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ต่าง ๆ กัน จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า firmness ต่างกัน กล่าวคือการเพิ่ม pH ที่แต่ละความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำจนถึงช่วงความเข้มข้นน้ำตาลประมาณ 62-63 ° Brix ค่า firmness จะลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อ pH สูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นต่ำ (สังเกตจากความถี่ของเส้นเท่าของค่า firmness ตัดแกนความเข้มข้นน้ำตาลในรูป 24) และค่า modulus จะลดลงเล็กน้อยจนกระทั่งเกือบคงที่เมื่อ pH เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสูง จากนั้นค่า modulus จะสูงขึ้นเล็กน้อยเมื่อ pH เพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสูงสุด นอกจากนี้การแปรค่า pH และความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อการลดลงของค่า modulus ต่างกัน กล่าวคือการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อการลดลงของค่า modulus มากกว่าเมื่อค่า pH สูงขึ้น

ความแข็งแรงของเจลสามารถวัดได้หลายค่า ค่า modulus และ firmness เป็นอีกสมบัติหนึ่งที่บ่งชี้ค่าความแข็งแรงของเจล (Rao, 1990) จากผลการทดลองแปรค่าความเข้มข้นน้ำตาลและ pHในเจลที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup โดยเมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ใด ๆ พบว่าค่าความแข็งแรงของเจลลดลงเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้น อาจเนื่อง

จากการที่มีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น น้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่จะไปละลายน้ำตาลที่มีปริมาณสูงขึ้นทำให้มีน้ำเหลือน้อยลงในการละลายเพกติน ปริมาณเพกตินที่สร้างโครงร่างตาข่ายลดลงทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลง

จาก contour plot รูปที่ 22 และ 24 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH ความเข้มข้นน้ำตาล และค่า modulus หรือค่า firmnessของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup พบว่าเมื่อพิจารณาที่ความเข้มข้นของน้ำตาลคงที่ ค่าความแข็งแรงของเจลจะลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น เนื่องจากที่ระดับ pH สูง เพกตินเกิดการ ionization มากกว่าที่ระดับ pH ต่ำ ดังนั้นจึงมีแรงผลักระหว่างสายมากกว่า ซึ่งทำให้โอกาสที่สายเพกตินเข้าใกล้กันจนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายเจลน้อยกว่าที่ระดับ pH สูง ดังนั้นความแข็งแรงของเจลจึงลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น

จากกราฟ 3 มิติ รูปที่ 25 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus กับความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลและ/หรือการเพิ่ม pH จะทำให้ค่า modulus จะลดลง โดยอัตราการลดลงของค่า modulus เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นจะสูงกว่าเมื่อเพิ่มค่า pH ในทุกๆ pH ที่ทำการทดลอง ค่า modulus จะลดลงเล็กน้อยเมื่อ pH สูงขึ้น และที่ pH คงที่ใด ๆการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะทำให้ค่า modulus ลดลง โดยจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ กล่าวคือ modulus จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงดังกล่าว ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูง อัตราการลดลงของค่า modulus จะน้อยมากเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้นในช่วงดังกล่าว ความสัมพันธ์นี้จะเห็นชัดเจนเมื่อพิจารณาจาก contour plot ดังรูปที่ 25 การเปลี่ยนแปลงความถี่ของเส้นเท่าของค่า modulus เมื่อมีการแปรความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ชี้ให้เห็นถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า modulus เมื่อมีการแปรค่าปัจจัยทั้งสองในช่วงต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าที่ความเข้มข้นน้ำตาลคงที่ การเพิ่ม pH มีผลทำให้ค่า modulus ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากที่ระดับ pH สูง เพกตินจะเกิดการ ionization มากกว่าที่ระดับ pH ต่ำ ดังนั้นจึงมีแรงผลักระหว่างสายมากกว่า ซึ่งทำให้โอกาสที่สายเพกตินเข้าใกล้กันจนเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายเจลน้อยกว่าที่ระดับ pH สูง ดังนั้นความแข็งแรงของเจลจึงลดลงเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ใดๆ ค่า modulus จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วง 50-56°Brix และอัตราการลดลงของค่า modulus จะน้อยมาก เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลเพิ่มขึ้นในช่วง 56-60°Brix การเปลี่ยนแปลงค่า modulus เมื่อความเข้มข้น

น้ำตาลสูงขึ้น อาจเนื่องจากการที่มีปริมาณน้ำตาลมากขึ้น น้ำส่วนใหญ่ที่มีอยู่จะไปละลายน้ำตาลที่มีปริมาณสูงขึ้นทำให้มีน้ำเหลือน้อยลงในการละลายเพกติน ปริมาณเพกตินที่สร้างโครงร่างตาข่ายลดลงทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลง

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำตาล pH และค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก glucose syrup จะเป็นไปในลักษณะเดียวกันกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus และค่าปัจจัยทั้งสองดังกล่าว ดังรูปที่ 25 และ 26 คือ การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลและ/หรือการเพิ่ม pH จะทำให้ค่า firmness จะลดลงโดยอัตราการลดลงของค่า firmness เมื่อความเข้มข้นน้ำตาลมากขึ้นจะสูงกว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น พิจารณาที่ความเข้มข้นน้ำตาลคงที่เมื่อค่า pH สูงขึ้นจะทำให้ค่า firmness ลดลงเล็กน้อย และเมื่อพิจารณาที่ pH คงที่ การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะทำให้ค่า firmness ลดลง โดยจะเห็นได้ชัดเจนในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลต่ำ และอัตราการลดลงของค่า firmness จะน้อยมากจนกระทั่งเกือบคงที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลในช่วงความเข้มข้นสูง การเปลี่ยนแปลงของค่า firmness เมื่อแปรค่าความเข้มข้นน้ำตาลและ pH นี้ สามารถอธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงค่า modulus เมื่อแปรค่าปัจจัยทั้งสอง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงค่าความแข็งแรงของเจล เมื่อแปรค่าความเข้มข้นน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ ความแข็งแรงของเจลจะลดลงเมื่อความเข้มข้นน้ำตาลสูงขึ้นและการเพิ่มค่า pH ในเจลที่เตรียมจาก glucose syrup จะทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลลดลง ส่วนเจลที่เตรียมจาก fructose syrup เมื่อแปรค่า pH จะมีการเปลี่ยนแปลงคล้ายกับในน้ำตาล glucose syrup โดยจะต่างกันเล็กน้อย กล่าวคือ การเพิ่ม pH ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลสูงสุด ค่าความแข็งแรงของเจลจะสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงในลักษณะนี้จะเกิดขึ้นในช่วงแคบ ๆ เท่านั้น การเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลจะมีผลต่อการลดลงของค่าความแข็งแรงของเจลมากกว่าการเพิ่มค่า pH ในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ที่ทำการศึกษาในเจลที่เตรียมจากน้ำตาลทั้งสองชนิด เจลที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup และglucose syrup ซึ่งมีสัดส่วนและชนิดน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบต่างกันดังในตารางที่ 12 และ13 ตามลำดับจะให้ค่าความแข็งแรงของเจลแตกต่างกันที่ช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลเดียวกัน ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาลต่างชนิดจะมีผลต่อ HI ต่างกัน ซึ่งเหตุผลอันหนึ่งที่ทำให้ชนิดน้ำตาลมีผลต่อ HI

ต่างกันคือ ซึ่งขึ้นกับโครงรูป 3 มิติของน้ำตาลที่เข้าไป interact กับน้ำซึ่งล้อมรอบหมู่เมธิล หากระยะห่างระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำและน้ำตาลมีค่าใกล้เคียง 4.36°A จะสามารถเหนี่ยวนำให้เกิด HI ได้มาก (Back, Oakenfull and Smith, 1979) แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับระยะห่างระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลและน้ำ เมื่อน้ำตาลชนิดต่างๆเข้าไป interact กับน้ำ ดังนั้นการที่น้ำตาลมีช่วง pH และความเข้มข้นในการเกิดเจลแตกต่างกันออกไปจึงอาจเกิดเนื่องจากสาเหตุอื่นก็เป็นได้ ดังนั้นน้ำตาลทั้งสองชนิดจึงให้ค่าความแข็งแรงของเจลที่ต่างกัน โดยเมื่อพิจารณาเส้นเท่าของค่า modulus หรือค่า firmness ของเจลที่เตรียมจาก fructose syrup และ glucose syrup จาก contour plot รูปที่ 22, 24, 26,28 จะเห็นได้ว่าเจลที่เตรียมจาก fructose syrup มีค่าความแข็งแรงสูงสุดของเจลสูงกว่าเจลที่เตรียมจาก glucose syrup Kawabata และคณะ (1976)พบว่าน้ำตาลฟรุกโตส กลูโคส ซูโครส ให้ค่าความแข็งแรงของเจลต่างกันในช่วงความเข้มข้นน้ำตาลและ pH เดียวกัน และเมื่อแปรค่า pH และความเข้มข้นน้ำตาล พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นน้ำตาลถึงระดับหนึ่งจะมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงของเจลลดลง และช่วงหนึ่งของการแปรค่า pH จะมีผลต่อค่าความแข็งแรงของเจลเพียงเล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองนี้

ค่าความแข็งแรงของเจลสามารถใช้เครื่องมือหลายชนิดในการวัด ซึ่งจะให้ค่าต่างๆ กัน ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของเครื่องมือ เช่น เครื่อง Redgelimeter ให้ค่าความแข็งแรงของเจลเป็นเปอร์เซนต์ sag ส่วนเครื่อง Bloom Gelometer ให้ค่าเป็น bloom เกรด เป็นต้น (The Copenhagen Pectin Factory Ltd.,1980) และในงานวิจัยนี้วัดค่าความแข็งแรงของเจลโดยใช้เครื่องที่สร้างขึ้นเองโดยวัดค่า modulus และ firmness เนื่องจากมีข้อกำจัดทางด้านเครื่องมือ และค่าความแข็งแรงของเจลซึ่งวัดได้ในงานวิจัยนี้ ก็เป็นอีกสมบัติหนึ่งที่อาจมีค่าแตกต่างจากค่าอื่นซึ่งขึ้นกับชนิดของเครื่องมือที่ใช้ในการวัด ซึ่งสามารถใช้เป็นค่าเปรียบเทียบความแข็งแรงของเจลว่ามีค่ามากน้อยเพียงใดในตัวอย่างอาหารเจลชนิดเดียวกันหรือต่างชนิด เมื่อใช้เครื่องมือชนิดนี้ตลอดการทดลอง

4.ศึกษาการยอมรับทางด้านรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ซึ่งคัดเลือกได้จาก RSM model

จากผลการทดลองดังกล่าวข้างต้น เมื่อพิจารณา contour plot ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า modulus หรือค่า firmness กับค่า pH และความเข้มข้นน้ำตาลของเจลที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ดังแสดงในรูปที่ 22, 24, 26 และ 28 ตามลำดับ พบว่าในน้ำตาลชนิดเดียวกันจะมีเส้นเท่าของค่า modulus และค่า firmness ซึ่งให้ค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากันที่ความเข้มข้นน้ำตาลและ pH หลายจุด และพบว่าในน้ำตาลทั้งสองชนิดจะให้ค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากันในช่วง pH และความเข้มข้นน้ำตาลต่างกัน ดังนั้นจะเห็นได้ว่าสามารถเตรียมเจลเพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงของเจลตามที่ต้องการได้ โดยวิธีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นน้ำตาล pH และ/หรือชนิดน้ำตาล ซึ่งจะมีผลกระทบต่อรสชาติของเจล ดังนั้นจึงศึกษาการยอมรับของผู้บริโภคทางด้านรสชาติของเจล โดยใช้เยลลี่เป็นต้นแบบในการศึกษา และเลือกเตรียมเยลลี่เพื่อให้ได้ค่าความแข็งแรงของเจลตามที่ต้องการจากค่า firmness ในน้ำตาลทั้งสองชนิด เนื่องจากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup จะให้ค่า R^2 ซึ่งทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่า firmness ความเข้มข้นน้ำตาล และ pH สูงและใกล้เคียงกันส่วนค่า modulus จะให้ R^2 ที่ต่างกันและค่อนข้างต่ำในน้ำตาล glucose syrup กล่าวคือ สมการทำนายความสัมพันธ์ระหว่างค่า firmness ความเข้มข้นน้ำตาล และ pH ในน้ำตาลfructose syrup และ glucose syrup ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9180 และ 0.9281 ส่วนค่า modulus ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.9220 และ 0.7536 ตามลำดับ และเนื่องจากผลิตภัณฑ์เยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างแข็ง ดังนั้นจึงเตรียมเยลลี่จากเส้นเท่าของค่า firmness ที่มีค่าสูง เพื่อศึกษาการยอมรับทางด้านรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดเดียวกัน

4.1 ศึกษาการยอมรับทางด้านรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดเดียวกัน ซึ่งมีค่าความแข็งแรงของเจลสูงที่คัดเลือกได้จาก RSM model

เตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup โดยเลือกความเข้มข้นน้ำตาลและระดับ pH ที่ให้ค่าความแข็งแรงของเจลสูงจากเส้นเท่าของค่า firmness ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1904.04 และ 1363.39 N/m^2 ที่ปรากฏเส้นเท่าใน contour plot ซึ่งแสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างค่า firmness ความเข้มข้นน้ำตาล และ pH ของน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ตามลำดับ (ดังรูปที่ 24 และ 28) จากข้อ 3 จำนวน 3 ภาวะต่อน้ำตาลหนึ่งชนิดโดยเลือกจุดที่ให้ค่าความเข้มข้นน้ำตาลและ pH สูงสุด กลาง และต่ำสุดบนเส้นเท่าของค่า firmness ในน้ำตาลทั้งสองชนิด เพื่อให้ได้เยลลี่ที่มีรสชาติแตกต่างกัน ซึ่งสามารถเลือกค่าความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ในการเตรียมเยลลี่ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ภาวะความเข้มข้นน้ำตาลและ pH ในการเตรียมเยลลี่ซึ่งคัดเลือกได้จาก contour plot ของน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup

ชนิดน้ำตาล	ภาวะ	
	pH	ความเข้มข้นน้ำตาล ($^{\circ}$ Brix)
fructose syrup	2.40	50.00
	2.20	50.80
	2.00	51.10
glucose syrup	3.00	50.00
	2.75	51.00
	2.52	50.60

ทดสอบการยอมรับทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติในน้ำตาลชนิดเดียวกัน โดยใช้ผู้ทดสอบแบบ semi trained panel จำนวน 20 คน ประเมินผลด้วยวิธีการทดสอบแบบ

scoring test ขนาด 7-point-scale วิเคราะห์ข้อมูลโดย ANOVA เพื่อหาความมีนัยสำคัญทางสถิติ คัดเลือกตัวอย่างเยลลี่ที่ผู้บริโภคยอมรับด้านรสชาติมากที่สุดในน้ำตาลชนิดเดียวกันโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test ผลการทดสอบด้านรสชาติดังแสดงในตารางที่ 15 และ 16 และวัดค่า firmness ของเยลลี่ที่เตรียมได้ด้วยวิธีเช่นเดียวกับข้อ 3 ผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 23

ตารางที่ 15 ค่าการประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านรสเปรี้ยว รสหวาน และความชอบรวมของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup ที่ภาวะต่างกัน

ภาวะ		คะแนนเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
pH	ความเข้มข้นน้ำตาล (°Brix)	รสเปรี้ยว	รสหวาน NS	ความชอบรวม
2.40	50.00	4.13^{c}±0.34	6.10±0.41	2.30^{c}± 0.55
2.20	50.80	5.75^{b}±0.35	6.15±0.29	5.75^{a}± 0.50
2.00	51.10	6.70^{a}±0.25	5.90±0.53	4.25^{b}± 0.60

a,b,c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)

NS= ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 16 ค่าการประเมินผลทางประสาทสัมผัสด้านรสเปรี้ยว รสหวาน และความชอบรวมของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup ที่ภาวะต่างกัน

ภาวะ		คะแนนเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน		
pH	ความเข้มข้นน้ำตาล (°Brix)	รสเปรี้ยว	รสหวาน NS	ความชอบรวม
3.00	50.00	3.35^{c} ±0.25	5.10±0.20	3.08^{c} ± 0.31
2.75	51.00	4.17^{b} ±0.19	5.28±0.21	4.15^{b} ± 0.36
2.52	50.60	5.07^{a} ±0.19	5.08±0.23	5.30^{a} ± 0.40

a,b,c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p \leq 0.05$)

NS= ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 17 ค่า firmness ของเยลลี่ที่คำนวณจากสมการและค่าที่วัดได้จริง โดยเตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup ที่ภาวะต่างกัน

ภาวะ		ค่า Firmness จากการคำนวณ (N/m^2)	ค่า Firmness ที่วัดได้ (N/m^2)	ความแตกต่าง (%)
pH	ความเข้มข้นน้ำตาล (^{o} Brix)			
2.40	50.00	1904.04	1877.00	1.42
2.20	50.80	1904.04	1875.31	1.51
2.00	51.10	1904.04	1870.72	1.75

ตารางที่ 18 ค่า firmness ของเยลลี่ที่คำนวณจากสมการและค่าที่วัดได้จริง โดยเตรียมเยลลี่จากน้ำตาล glucose syrup ที่ภาวะต่างกัน

ภาวะ		ค่า Firmness จากการคำนวณ (N/m^2)	ค่า Firmness ที่วัดได้ (N/m^2)	ความแตกต่าง (%)
pH	ความเข้มข้นน้ำตาล (^{o} Brix)			
3.00	50.00	1363.39	1340.53	1.68
2.75	51.00	1363.39	1343.54	1.52
2.52	50.60	1363.39	1340.53	1.68

จากตารางที่ 15 ซึ่งแสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup ที่ภาวะต่างกัน พบว่า คะแนนเฉลี่ยของรสหวานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในทุกตัวอย่าง ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นน้ำตาลของเยลลี่ทั้ง 3 ตัวอย่างใกล้เคียงกันคือประมาณ 50 °Brix คะแนนเฉลี่ยรสเปรี้ยวและความชอบรวมแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ในทุกตัวอย่าง โดยคะแนนรสเปรี้ยวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อ pH ของเยลลี่ต่ำลง กล่าวคือ ตัวอย่างที่มี pH 2.0 มีคะแนนเฉลี่ยของรสเปรี้ยวสูงสุด (อยู่ในช่วงเปรี้ยวมาก) ตัวอย่างที่มี pH 2.2 จะมีคะแนนเฉลี่ยของความชอบรวมสูงสุด (อยู่ในช่วงชอบปานกลาง-ชอบมาก) เนื่องจากน้ำตาล fructose syrup เข้มข้น 42% มีค่าความหวานสูงถึง 110 (บริษัทเจ้าคุณเกษตรพืชผล(เอกสาร),2532) และในตัวอย่างเยลลี่จะมีความเข้มข้นน้ำตาลสูงถึงประมาณ 50% ส่งผลให้ตัวอย่างเยลลี่ที่เตรียมได้มีความหวานมาก(คะแนนอยู่ในช่วงหวานปานกลาง - หวานมาก) ดังนั้นผู้ทดสอบชิมจึงมีความชอบตัวอย่างเยลลี่ที่มีรสเปรี้ยวซึ่งทำให้เยลลี่มีรสชาติกลมกล่อมและเข้มข้นขึ้น ตัวอย่างที่มี pH 2.4 มีคะแนนความชอบรวมต่ำสุด (อยู่ในช่วงไม่ชอบมากที่สุด-ไม่ชอบมาก)

จากตารางที่ 16 ซึ่งแสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup พบว่าคะแนนเฉลี่ยของรสหวานไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$) ในทุกตัวอย่าง เนื่องจากค่าความเข้มข้นน้ำตาลของเยลลี่ใกล้เคียงกัน คือประมาณ 50 °Brix คะแนนเฉลี่ยรสเปรี้ยวและความชอบรวมแตกต่างกัน ($p \leq 0.05$) ในทุกตัวอย่าง โดยคะแนนรสเปรี้ยวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อค่า pH ของเยลลี่ต่ำลง กล่าวคือ ตัวอย่างที่มี pH 2.52 คะแนนจะสูงสุด (อยู่ในช่วงเปรี้ยวเล็กน้อย -เปรี้ยวปานกลาง) ส่วนตัวอย่างที่มี pH 3.0 คะแนนเฉลี่ยต่ำสุด (อยู่ในช่วงไม่เปรี้ยว) ตัวอย่างที่มีpH 2.52 มีคะแนนความชอบรวมสูงสุด (อยู่ในช่วงเฉย ๆ - ชอบปานกลาง) เนื่องจากน้ำตาล glucose syrup มีค่าความหวานเพียง 35 (Pilgrim, Waller and Oakenfull, 1991) ดังนั้นผู้ทดสอบชิมจึงชอบตัวอย่างที่มีรสเปรี้ยวซึ่งจะทำให้รสชาติของเยลลี่เข้มข้นขึ้น ส่วนตัวอย่างที่มี pH 3.0 มีคะแนนความชอบรวมต่ำสุด (อยู่ในช่วงไม่ชอบมาก-ไม่ชอบ)

จากผลการทดลองวัดค่า firmness ของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ดังแสดงในตารางที่ 17 และ 18 ตามลำดับ แสดงให้เห็นความแตกต่างระหว่างค่า firmness ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และ

ค่า firmness ที่วัดได้จริงในเยลลี่ที่เตรียมได้โดยใช้สมการในการทำนายภาวะการเตรียม จะเห็นว่าค่า firmness ที่วัดได้จริงใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ กล่าวคือเมื่อเลือกภาวะการเตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ที่คาดว่าจะให้ค่า firmness เท่ากับ 1904.04 N/m^2 และ 1363.39 N/m^2 ตามลำดับ โดยเตรียม 3 ตัวอย่างต่อน้ำตาลหนึ่งชนิด และเมื่อวัดค่า firmness ของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup ทั้ง 3 ตัวอย่างมีค่าเท่ากับ 1877.00, 1875.31 และ 1870.72 N/m^2 เทียบเป็นความแตกต่างได้ 1.42, 1.51 และ 1.75 % ตามลำดับ ส่วนเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup วัดค่า firmness ได้เท่ากับ 1343.54, 1342.63 และ 1340.53 เทียบเป็นความแตกต่างได้ 1.46, 1.52 และ 1.68 % ตามลำดับ ทั้งนี้เพราะ contour plot นี้สร้างขึ้นจากสมการที่มีค่า R^2 สูง จึงมีความแม่นยำในการทำนายภาวะการเตรียมเยลลี่ค่อนข้างสูง

เตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ให้มีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากัน 2 ตัวอย่างต่อน้ำตาลหนึ่งชนิด เนื่องจากเยลลี่เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสค่อนข้างแข็ง และเส้นเท่าของค่า firmness ที่มีค่าสูงในน้ำตาล glucose syrup มีค่าเพียง 1363.89 N/m^2 ส่วนในน้ำตาล fructose syrup เส้นเท่าของค่า firmness มีค่าสูงเท่ากับ 1904.04 N/m^2 (ดังรูปที่ 24 และ28) ดังนั้นจึงเตรียมเยลลี่ที่มีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากับ 1363.89 N/m^2 โดยในน้ำตาล glucose syrup เลือกภาวะในการเตรียมจากเส้นเท่าของค่า firmness ซึ่งเป็นเส้นที่ให้ค่า firmness สูงจากรูปที่ 28 โดยเลือกเตรียมเยลลี่ที่มีความเข้มข้นน้ำตาล 50.60 °Brix pH 2.52 และความเข้มข้นน้ำตาล 51.00 °Brix pH 2.75 เนื่องจากเยลลี่ที่เตรียมจากทั้ง 2 ภาวะดังกล่าวมีคะแนนความชอบรวมสูงสุดและรองลงมาตามลำดับ ส่วนในน้ำตาล fructose syrup เลือกภาวะการเตรียมเยลลี่จากสมการทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากกราฟ contour plot (ดังรูปที่ 24) มิได้แสดงเส้นเท่าของค่า firmness ที่มีค่าเท่ากับ 1363.89 N/m^2 ไว้ในรูป และแทนค่า pH เท่ากับ 2.2 และ 2.0 (ในสมการที่ 1) เนื่องจากผลการศึกษาการยอมรับทางด้านรสชาติในข้อ 4.1 เยลลี่ที่มี pH ทั้งสองดังกล่าวมีคะแนนความชอบสูงสุดและรองลงมาตามลำดับ

4.2 ศึกษาการยอมรับทางด้านรสชาติของเยลลี่ในน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ที่มีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากันที่คัดเลือกได้จาก RSM model

นำเยลลี่ทั้ง 4 ตัวอย่าง ซึ่งเตรียมได้จากน้ำตาลทั้งสองชนิดไปทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติและความอ่อนนุ่มของเจล ประเมินผลการทดสอบวิเคราะห์ข้อมูลและคัดเลือกตัวอย่างเยลลี่ที่ผู้บริโภคชอบมากที่สุด และวัดค่า firmness เช่นเดียวกับข้อ 4.1 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัส และวัดค่า firmness ดังแสดงในตารางที่ 19 และ 20 ตามลำดับ

ตารางที่ 19 ค่าการประเมินผลทางประสาทสัมผัส ด้านรสเปรี้ยว รสหวาน ความอ่อนนุ่มของเจล และความชอบรวมของเยลลี่ที่เตรียมจาก fructose syrup และ glucose syrup ซึ่งมีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากัน

ชนิดน้ำตาล	ภาวะ		คะแนนเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน			
	PH	ความเข้มข้นน้ำตาล (^{o}Brix)	รสเปรี้ยว	รสหวาน	ความอ่อนนุ่มของเจล NS	ความชอบรวม
fructose syrup	2.2	57.15	5.50^{b}±0.31	6.70^{a}±0.25	5.70±0.41	4.47^{b}±0.32
	2.0	57.26	6.65^{a}±0.29	6.43^{a}±0.40	6.01±0.20	5.55^{a}±0.40
glucose syrup	2.75	51.00	3.32^{d}±0.30	4.33^{b}±0.42	5.80±0.45	3.30^{c}±0.50
	2.50	50.60	4.50^{c}±0.29	4.20^{b}±0.35	6.12±0.25	3.41^{c}±0.45

a,b,c ตัวเลขที่มีอักษรกำกับต่างกันจากแถวตั้งเดียวกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

NS= ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \geq 0.05$)

ตารางที่ 20 ค่า firmness ของเยลลี่ที่คำนวณจากสมการและค่าที่วัดได้จริง โดยเตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup และน้ำตาล glucose syrup ที่ภาวะต่างกัน

ชนิดน้ำตาล	ภาวะ		ค่า Firmness จากการคำนวณ (N/m^2)	ค่า Firmness ที่วัดได้ (N/m^2)	ความแตกต่าง (%)
	pH	ความเข้มข้นน้ำตาล (^oBrix)			
fructose syrup	2.2	57.15	1363.39	1344.89	1.37
	2.0	57.26	1363.39	1342.29	1.55
glucose syrup	2.75	51.00	1363.39	1343.65	1.45
	2.50	50.60	1363.39	1334.39	1.76

จากตารางที่ 19 ซึ่งแสดงผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านรสชาติและความอ่อนนุ่มของเจลในเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ที่มีค่าความแข็งแรงของเจลเท่ากัน พบว่าคะแนนเฉลี่ยของรสหวานในน้ำตาลชนิดเดียวกันจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ($p \geq 0.05$) แต่จะแตกต่างกันในน้ำตาลต่างชนิด โดยตัวอย่างเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup มีคะแนนสูงกว่าน้ำตาล glucose syrup คือคะแนนอยู่ในช่วงหวานมาก และไม่หวานถึงหวานเล็กน้อยตามลำดับ เนื่องจากน้ำตาล fructose syrup มีค่าความหวานและความเข้มข้นน้ำตาลของเยลลี่มากกว่าเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup คะแนนรสเปรี้ยวแตกต่างกันในทุกตัวอย่าง ($p \leq 0.05$) โดยมีแนวโน้มของคะแนนสูงขึ้นเมื่อ pH ลดลง กล่าวคือตัวอย่างที่มี pH 2.0 มีคะแนนสูงสุดคืออยู่ในช่วงเปรี้ยวมาก และจะไม่มีความ

แตกต่างกันทางด้านความอ่อนนุ่มของเจลในทุกตัวอย่าง ($p \geq 0.05$) เนื่องจากค่า firmness ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกันทุกตัวอย่าง (ดังตารางที่ 20) ตัวอย่างเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลทั้งสองชนิดมีคะแนนความชอบรวมต่างกัน ($p \leq 0.05$) กล่าวคือเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup จะมีคะแนนความชอบรวมต่างกันในตัวอย่างที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดนี้ และจะมีคะแนนสูงกว่าเยลลี่ที่เตรียมจาก glucose syrup ซึ่งมีคะแนนความชอบรวมไม่แตกต่างกันในเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดเดียวกันนี้ กล่าวคือเยลลี่ทั้ง 2 ตัวอย่างที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup ซึ่งมี pH 2.0 มีคะแนนความชอบรวมสูงสุด และคะแนนรองลงมาคือตัวอย่าง pH 2.2 โดยคะแนนอยู่ในช่วงชอบปานกลาง และไม่ชอบถึงเฉย ๆ ตามลำดับ ส่วนเยลลี่ทั้ง 2ตัวอย่างที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup คะแนนอยู่ในช่วงเดียวกันคือไม่ชอบ-ไม่ชอบมาก

จะเห็นได้ว่าผู้บริโภคชอบเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup มากกว่า glucose syrup ทั้งนี้เนื่องจากน้ำตาล fructose syrup เป็นน้ำตาลที่มีค่าความหวานสูงและมีกลิ่นรสดี (บริษัทเจ้าคุณเกษตรพืชผล(เอกสาร), 2532) และเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลชนิดนี้มีค่า pH ต่ำ (2.0-2.2) ดังนั้นรสชาติของเยลลี่ที่เตรียมได้จึงมีความกลมกล่อมและเข้มข้นมากกว่าเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup ซึ่งมีค่าความหวานต่ำและ pH สูงกว่า

จากผลการทดลองวัดค่า firmness ของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาลทั้งสองชนิดดังแสดงในตารางที่ 20 จะเห็นว่าค่า firmness ที่วัดได้จริงใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณไว้ กล่าวคือเมื่อเลือกภาวะการเตรียมเยลลี่จากน้ำตาล fructose syrup และ glucose syrup ที่คาดว่าจะให้ค่า firmness เท่ากับ 1363.39 N/m^2 โดยเตรียม 3 ตัวอย่างต่อน้ำตาลหนึ่งชนิด และเมื่อวัดค่า firmness ของเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล fructose syrup ทั้ง 3 ตัวอย่าง มีค่าเท่ากับ 1344.89 และ 1342.29 N/m^2 เทียบเป็นความแตกต่างได้ 1.37 และ 1.55 % ตามลำดับ ส่วนเยลลี่ที่เตรียมจากน้ำตาล glucose syrup ทั้ง 2 ตัวอย่าง วัดค่า firmness ได้เท่ากับ 1343.65 และ 1334.39 N/m^2 เทียบเป็นความแตกต่างได้ 1.45 และ 1.76 % ตามลำดับ ทั้งนี้อธิบายเหตุผลได้เช่นเดียวกับข้อ 4.1

จะเห็นได้ว่าสามารถเตรียมเจลให้มีความแข็งแรงของเจลตามที่ต้องการได้โดยการปรับเปลี่ยน pH ความเข้มข้นหรือชนิดน้ำตาล โดยรสชาติยังเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค