บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การเกิด gelatinization ของแป้ง

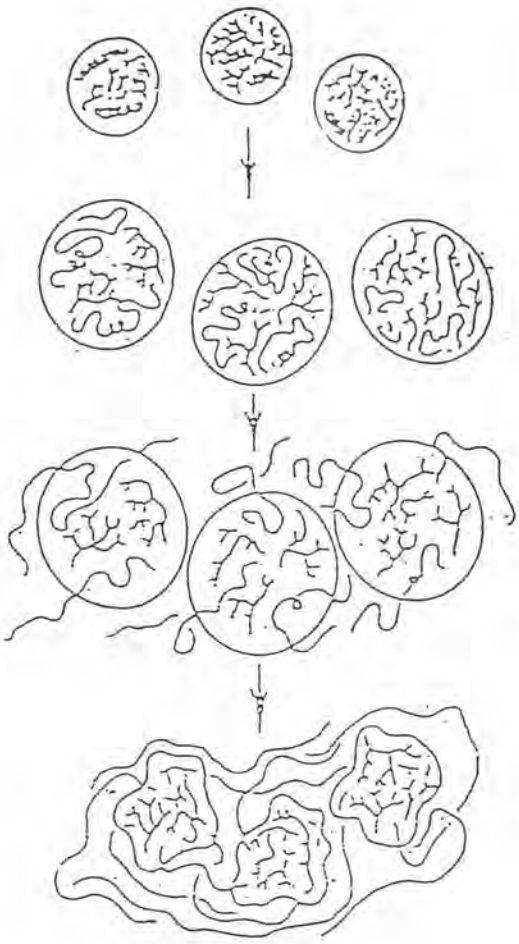
จากการศึกษาพบว่าเม็ดแป้งของแป้งที่ยังไม่สุก มีขนาดอยู่ระหว่าง 1-100 μm มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.5 และตกตะกอนได้ในน้ำเย็น (Evans และ Haisman, 1979) สำหรับเม็ดแป้งที่ยังมีความสมบูรณ์จะละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อย แต่ถ้าให้อุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลของแป้งจะมีการสั่นอย่างรุนแรง ทำให้บางส่วนของ intermolecular bond ภายในเม็ดแป้งถูกทำลายลงไป และเกิด hydrogen bond กับโมเลกุลของน้ำที่อยู่รอบ ๆ เม็ดแป้ง (Sterling, 1978) การที่น้ำสามารถซึมเข้าไปในเม็ดแป้ง ทำให้ส่วนต่าง ๆ ภายในเม็ดแป้งห่างกันมากขึ้น ส่วนของ crystalline region ลดลง และเมื่อให้ความร้อนต่อไป ส่วนของ crystalline region และ birefringence จะหายไป อุณหภูมิที่ birefringence เริ่มหายไปเรียกว่า "gelatinization point" หรือ "gelatinization temperature" ซึ่งช่วงของอุณหภูมิที่เกิดนี้จะแคบ และเม็ดแป้งที่มีขนาดใหญ่ จะเกิด gelatinization ก่อนเม็ดแป้งที่มีขนาดเล็ก (Fennema, 1985) ในระหว่างที่เกิด gelatinization เม็ดแป้งจะเกิดการบวมพองและดูดซึมน้ำเข้าไปมาก ทำให้ขนาดของเม็ดแป้งเพิ่มขึ้นมากกว่า 30 เท่า (Radley, 1976) เมื่อนำเอาเจลที่ได้ไปเซนตริฟิวจ์จะแยกออกมาเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นสารละลายใส ๆ ซึ่งมีความหนืดต่ำ กับส่วนที่เป็นตะกอน (Evans และ Haisman, 1979) สำหรับช่วงอุณหภูมิของการเกิด gelatinization ของแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ขนาดของเม็ดแป้ง และช่วงของอุณหภูมิที่เกิด gelatinization

Source	Diameter		gelatinization temperature (°C)
	Range(μm)	Mean(μm)	
Corn	21-96	15	61-72
White potato	15-100	33	62-68
Sweet potato	15-55	25-50	82-83
Tapioca	6-36	20	59-70
Wheat	2-38	20-22	53-64
Rice	3-9	5	65-73

ที่มา: Fennema (1985)

ในระยะแรกที่เกิดการ gelatinization จะมีความดันเกิดขึ้นภายในเม็ดแป้ง เนื่องจากมีน้ำซึมเข้าไป แรงดันนี้จะทำให้โมเลกุลของแป้งบางส่วนที่อยู่บริเวณผิวของเม็ดแป้งเคลื่อนตัวออกมาและเกิดเป็น membrane หุ้มเม็ดแป้งไว้ และเนื่องจาก amylose สามารถ diffuse ออกมาที่ผิวของ membrane ได้มากกว่า amylopectin จึงมี amylose บางส่วนหลุดออกไปจากเม็ดแป้ง สำหรับกลไกการเกิด gelatinization ของเม็ดแป้งแสดงไว้ดังรูปที่ 2.1



เม็ดแป้งที่ยังไม่เกิด gelatinization

เม็ดแป้งขยายตัว มีน้ำซึมเข้าไปในเม็ดแป้ง ส่วนที่เป็น crystalline region ถูกทำลาย มีการละลายของโมเลกุลของ amylose บางส่วน

เมื่อให้ความร้อนต่อไป โมเลกุลของ amylose เริ่ม diffuse ออกมาที่ผิวของเม็ดแป้ง และมีบางส่วนของโมเลกุลของ amylose หลุดออกไป

เม็ดแป้งที่เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์ เกิดร่างแหของโมเลกุล amylose ที่ผิวหน้าของเม็ดแป้ง

รูปที่ 2.1 กลไกของการเกิด gelatinization ของเม็ดแป้ง
ที่มา: Dolan และ Steffe (1989)

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิด gelatinization ของแป้ง

2.2.1 ชนิดของแป้ง

แป้งที่ได้จากแหล่งต่าง ๆ กัน จะมีโครงสร้างของเม็ดแป้งและอัตราส่วนของ amylose ต่อ amylopectin แตกต่างกันมาก ซึ่งมีผลต่อสมบัติของเจลคือ เม็ดแป้งที่มีส่วนของ crystalline region หนาแน่นมากจะดูดน้ำได้ช้า เม็ดแป้งจะแตกได้ยาก เจลที่ได้จะมีความหนืด

ต่ำและมีความเหนียวไม่มากนัก ถ้าต้องการเจลที่มีความหนืดมากขึ้นจะต้องใช้อุณหภูมิสูงขึ้นหรือใช้เวลาให้ความร้อนมากขึ้น เพื่อให้เม็ดแป้งสุกมากขึ้น และเม็ดแป้งที่มี amylose โมเลกุลยาว จะให้เจลที่หนืดมากเพราะ amylose สามารถจับกับ amylopectin ได้หลายโมเลกุลพร้อมกัน เกิดเป็นตาข่ายที่หนาแน่น ถ้าขนาดของ amylose ลดลง เจลจะมีความหนืดลดลง แต่เมื่อขนาดของ amylose ลดลงถึงจุด ๆ หนึ่ง ความหนืดจะไม่ลดลงอีก (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2528)

2.2.2 น้ำตาล

น้ำตาลมีหมู่ -OH ที่สามารถเกิด hydrogen bond กับโมเลกุลของ amylose หรือ amylopectin ทำให้การซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเม็ดแป้งลดลง การพองตัวของเม็ดแป้งเกิดได้ช้าลง ทำให้การสุกของแป้งช้าลง อุณหภูมิที่แป้งสุกสูงขึ้น เม็ดแป้งแตกตัวน้อยลง เจลที่ได้มีความหนืดลดลงและใสขึ้น โดยน้ำตาล disaccharides จะมีผลมากกว่าน้ำตาล monosaccharides (ณรงค์ นิยมวิทย์, 2528)

2.2.3 โปรตีน

โปรตีนเป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่สามารถเกาะอยู่ตามผิวของเม็ดแป้งได้ ทำให้การซึมผ่านของน้ำเข้าไปในเม็ดแป้งได้ยากขึ้น เม็ดแป้งจะบวมพองได้น้อยลง นอกจากนี้ยังทำให้ amylose หลุดออกมาจากเม็ดแป้งได้น้อยลง ทำให้เจลที่ได้มีความหนืดลดลง (Greenwood และ Munro, 1979)

2.2.4 ไขมัน

ไขมันทำให้การดูดซึมของน้ำเข้าไปในเม็ดแป้งลดลง นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อน (complex) กับ amylose มีผลให้ความหนืดของเจลและความแข็งแรงของเจลลดลง (Fennema, 1985)

2.2.5 pH

ที่ pH 5-7 จะไม่มีผลต่อความหนืดของเจลมากนัก แต่ถ้าเตรียมน้ำแป้งให้มี pH ต่ำกว่า 5.0 หรือสูงกว่า 7.0 จะได้เจลที่มีความหนืดลดลง เนื่องจากกรดหรือด่างจะไปย่อยให้แป้งมีโมเลกุลเล็กลง (Greenwood และ Munro, 1979)

2.3 สมบัติการไหลของแป้ง

ความหนืดของเจลของแป้งเกิดจากการต้านทานการไหล เนื่องจากขนาดของเม็ดแป้งที่เกิด gelatinization จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น มีการดูดซึมน้ำรอบ ๆ เข้าไปในเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีที่ว่างในการเคลื่อนที่ได้น้อยลง นอกจากนี้บางส่วนของ amylose ที่หลุดออกมาอยู่ที่ผิวหน้าของเม็ดแป้ง อาจเกี่ยวพันกับเม็ดแป้งที่อยู่ใกล้กัน ทำให้การต้านทานการไหลของเม็ดแป้งเพิ่มขึ้นด้วย (Radley, 1976)

2.3.1 สมการที่อธิบายสมบัติการไหล

แป้งเป็นของไหลประเภท non-Newtonian fluids (Schutz, 1971) ซึ่งพฤติกรรมการไหลของสารละลายแป้งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ power law ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$\tau = K\,(du/dy)^{n} + \tau_{o} \qquad (1)$$

เมื่อ τ = แรงต่อพื้นที่ ที่ใช้รักษาระดับความเร็วของชั้นของของไหลให้คงที่ (shear strees)

du/dy = shear rate

K = consistency index

n = flow-behavior index

τ_{o} = yield value

สมการ (1) สามารถเขียนในรูปของความหนืดของของไหล ได้ดังนี้

$$\tau = K\,(du/dy)^{n-1}\,(du/dy) + \tau_0 \qquad (2)$$

เมื่อ $K(du/dy)^{n-1}$ = apparent viscosity

$= \mu_a$

ซึ่งยังอาจแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ๆ ได้อีก คือ

2.3.1.1 Pseudoplastic (shear thinning) fluids

ของไหลในกลุ่มนี้จะมีค่าของ apparent viscosity ลดลง เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.2 และ 2.3) โดยไม่มีค่าของ yield และค่าของ flow-behavior index น้อยกว่า 1 และในกรณีของ pseudoplastic fluids นี้ สามารถดัดแปลงสมการ (2) ได้ดังนี้

$$\mu_a = K'\,(du/dy)^{m} \qquad (3)$$

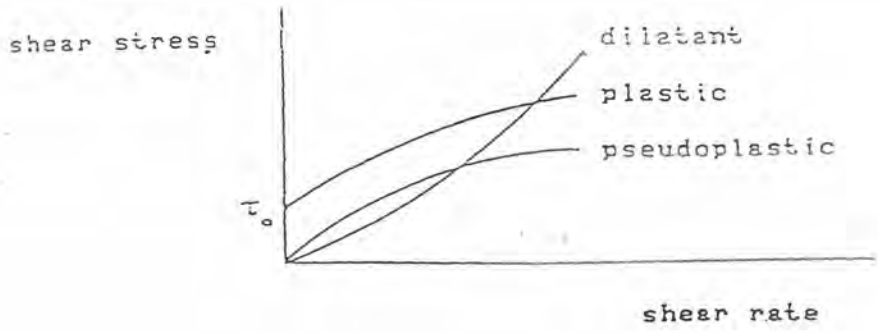
เมื่อ K' = ค่าคงที่

m = pseudoplastic constant

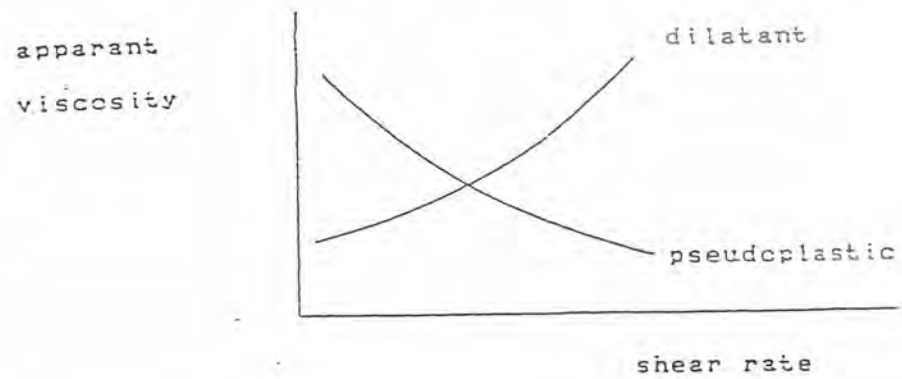
$= n-1$

2.3.1.2 Dilatant (shear thickening) fluids

ของไหลในกลุ่มนี้มีค่า apparent viscosity เพิ่มขึ้น เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.2 และ 2.3) เมื่อใช้สมการ (1) อธิบายพฤติกรรมการไหลของของไหลในกลุ่มนี้โดยมีค่าของ flow-behavior index มากกว่า 1 และไม่มีค่าของ yield



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ ของ shear stress กับ shear rate
ของ dilatant plastic และ pseudoplastic fluids

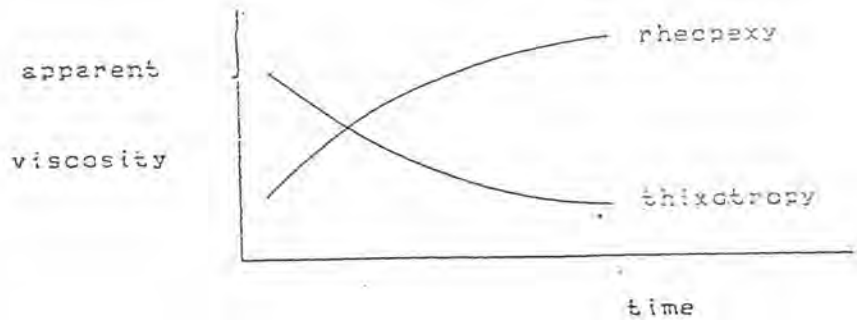


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง apparent viscosity กับ shear rate
ของ dilatant และ pseudoplastic fluids

2.3.1.3 Plastic fluids

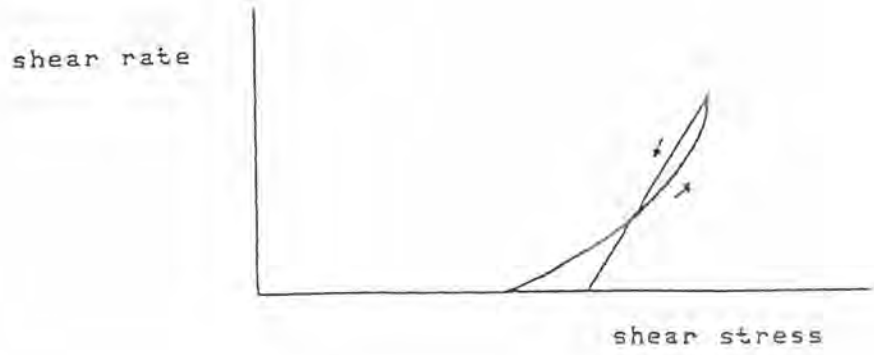
ของไหลในกลุ่มนี้มีค่า apparent viscosity ลดลง เมื่อ shear rate เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับของไหลในกลุ่ม pseudoplastic แต่จะต้องให้ shear stress กับของไหลสูงกว่าค่าของ "yield (τ_0)" ของไหลจึงจะไหลได้ (รูปที่ 2.2 และ 2.3)

นอกจากนี้ยังพบว่า สมบัติการไหลของแป้งยังเกี่ยวข้องกับเวลาที่ใช้ในการ shear คือ shear stress เป็นฟังก์ชันของเวลาที่ใช้ในการ shear เมื่อ shear rate คงที่ ของไหลที่มีพฤติกรรมแบบนี้มีอยู่ 2 กลุ่ม คือ thixotropy และ rheopexy โดย thixotropy เป็นของไหลที่ความหนืดลดลงเมื่อเวลาผ่านไป ส่วน rheopexy เป็นของไหลที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (รูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง apparent viscosity กับเวลา ของ thixotropy และ rheopexy fluids

ของไหลบางชนิดทั้งในกลุ่มของ thixotropy และ rheopexy จะมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน เช่นพวก thixotropy อาจมีลักษณะที่เรียกว่า "hysteresis" คือ เมื่อ shear rate จะมากขึ้น shear stress จะมีค่าสูงขึ้น และเมื่อเพิ่ม shear rate ไปจนถึงค่าค่าหนึ่งแล้วลดค่า shear rate ลงมา ค่า shear stress จะลดลงมา แต่จะมีค่าไม่เท่าเดิมที่ shear rate เดียวกัน ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง shear rate และ shear stress ของของไหลพวก thixotropy fluids

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติการไหลของแป้ง

2.3.2.1 วิธีเตรียม gelatinized starch

วิธีเตรียมเจลของแป้งที่แตกต่างกัน จะมีผลต่อความหนืดของเจล เช่น ในแป้งข้าวสาลี พบว่า การใช้อัตราการให้ความร้อนที่สูง จะทำให้เจลของแป้งที่ได้มีความหนืดมากกว่าการใช้อัตราการให้ความร้อนที่น้อยกว่า และความเร็วของการคนก็มีผลเช่นกัน โดยการคนที่เร็วและรุนแรง จะทำให้เจลของแป้งข้าวสาลีมีความหนืดต่ำ (Doublier, 1981) Härröd (1989) พบว่า การเตรียมเจลของ commercial cross-linked และ esterified potato starch ด้วยวิธีที่แตกต่างกันให้ค่า consistency index และ flow-behavior index ที่ต่างกัน นอกจากนี้ Odigboh และ Mohsenin (1975) ได้ทดลองอบแป้งมันสำปะหลังให้แห้ง ที่อุณหภูมิ 25 50 และ 70 °C ก่อนนำไปเตรียมเจล พบว่า แป้งมันสำปะหลังที่อบให้แห้งที่ 70 °C จะมีความหนืดต่ำสุด รองลงมาคือที่อุณหภูมิ 50 และ 25 °C ตามลำดับ

2.3.2.2 Shear rate

Evans และ Haisman (1979) พบว่า ที่อุณหภูมิ 60 °C แป้งมันสำปะหลังที่เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์ จะประพฤติตัวตามสมการ power law และมีลักษณะของ pseudoplastic fluids คือความหนืดลดลงเมื่อ shear rate เพิ่มขึ้น Doublier (1981) พบว่า แป้งข้าวสาลีจะแสดงพฤติกรรมของ pseudoplastic fluids โดยที่ shear rate ต่ำ (1-20 s^{-1}) มีค่า K เท่ากับ 0.51 ($Pa.s^n$) และค่าของ n เท่ากับ 0.64 และที่ shear rate สูง (20-700 s^{-1}) K มีค่าเท่ากับ 0.87 ($Pa.s^n$) และ n มีค่าเท่ากับ 0.47 Evans และ Haisman (1979) พบว่า ในแป้งมันฝรั่ง แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพด เมื่อเกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์และลดอุณหภูมิลงมาที่ 60 °C พบว่า จะแสดงพฤติกรรมของ pseudoplastic fluids และมีค่าของ yield strees มาเกี่ยวข้องที่ shear rate ต่ำ ๆ (0.0007-50 s^{-1})

2.3.2.3 อุณหภูมิ

ของไหลพวก non-Newtonian ส่วนใหญ่ จะมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิแสดงได้ด้วยสมการของ Arrhenius ดังนี้ (Holdsworth, 1969)

$$\mu_a = A \exp(B/T) \qquad (4)$$

เมื่อ T = อุณหภูมิสัมบูรณ์

A,B = เป็นค่าคงที่

Doublier (1981) พบว่า ที่อุณหภูมิ 50-70 °C consistency index ของแป้งข้าวสาลีจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และสามารถประมาณค่าได้ตามสมการ

$$K = K_o \exp(E/RT) \quad (5)$$

เมื่อ E = activation energy

= 5.13 Kcal/mole

R = gas constant

= 1.984 cal/mole.K

K_o = 1.51×10^{-4} Pa.s^n

2.3.2.4 <u>ความเข้มข้น</u>

ความหนืดของแป้งที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะแตกต่างกัน ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress กับ ความเข้มข้นอาจแสดงได้ตามสมการ (6) (Radley, 1976)

$$\log \tau = a + b(\log c) \quad (6)$$

เมื่อ c = ความเข้มข้นของแป้ง

a, b = เป็นค่าคงที่

Evans และ Haisman (1979) พบว่า ค่า pseudoplastic constant ของแป้งมันสำปะหลังที่ 60 °C กับความเข้มข้นของแป้งเป็นไปตามสมการ (7) และค่าของ apparent viscosity ยังขึ้นกับความเข้มข้นตามสมการ (8)

$$1/n = 1.47 + 1.27/(c-1.25) \quad (7)$$

เมื่อ c = ความเข้มข้น (%)

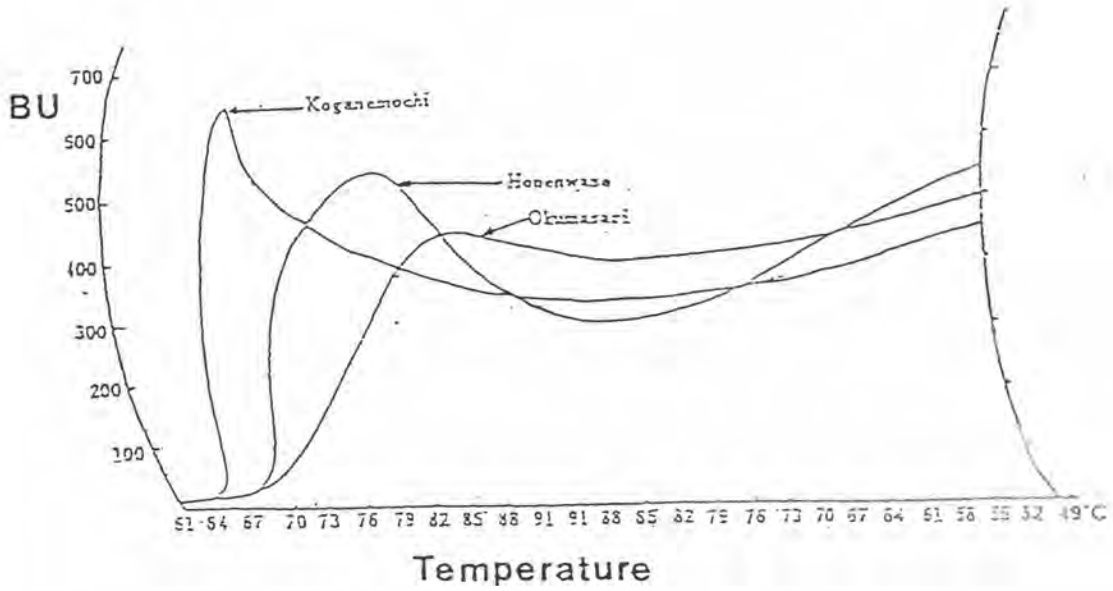
$$(\mu_{100})^{0.4} = K' /(c-1.25) \quad (8)$$

เมื่อ μ_{100} = apparent viscosity ที่ shear rate 100 s^{-1}

K' = ค่าคงที่

2.3.2.5 สายพันธุ์

Kurasawa และ คณะ(1973) ได้ศึกษา Amyloheat Viscogram ของแป้งข้าวเหนียวพันธุ์ Koganemochi (Glutinous rice) Honewase (Sticky non-glutinous rice) และ Okumasari (Less-sticky non-glutinous rice) ที่ความเข้มข้น 10 % ด้วย Ostwald Viscometer พบว่า glutinous rice starch มีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ 60-61 °C สำหรับพวก sticky non-glutinous rice starch จะเกิดขึ้นที่ 56-58 °C และ less-sticky non-glutinous rice จะเกิดขึ้นที่ 53-54 °C แต่ถ้าลดความเข้มข้นเหลือเพียง 2 % glutinous rice starch จะเกิดที่ 63 °C sticky non-glutinous rice starch จะเกิดที่ 81 °C ส่วน less-sticky non-glutinous rice starch จะเกิดที่ 90 °C และจาก Amyloheat Viscogram ที่ได้จากเครื่อง Brabender Amylograph (รูปที่ 2.6) พบว่า อุณหภูมิที่ทำให้เกิดความหนืดสูงสุด (maximum viscosity) ของ less-sticky non-glutnous rice starch จะสูงที่สุด รองลงมาคือ nonglutinous rice starch และglutinous rice starch จะต่ำที่สุด



รูปที่ 2.6 Amyloheat Viscogram ของ glutinous sticky non-glutinous และ less-sticky non-glutinous rice starch

Koganemochi: glutinous rice starch

Honewase : sticky non-glutinous rice starch

Okumasari : less-sticky non-glutinous rice starch

ที่มา : Kurasawa และ คณะ (1973)

018836