



ผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลังกับปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ผลของอุณหภูมิ ความเข้มข้น และเวลา ที่มีต่อค่าสมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียวและแป้งมันสำปะหลังขณะเกิด gelatinization ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลทั้งหมดของค่าสมบัติการไหลที่ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลาต่าง ๆ (ภาคผนวก ข) โดยใช้วิธีของ Studentized range (Glass และ Hopkins, 1984) ในการพิจารณาความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าสมบัติการไหลที่ความเข้มข้น อุณหภูมิและเวลาต่างๆ และใช้ multiple regression ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสมบัติการไหล กับความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลา

4.1.1 สมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียว

4.1.1.1 Flow-behavior index (n)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้ (ภาคผนวก ค.1) พบว่า ขณะที่แป้งข้าวเหนียวเกิด gelatinization ความเข้มข้น อุณหภูมิ และผลรวมของความเข้มข้นกับอุณหภูมิเท่านั้นที่มีผลต่อค่า flow-behavior index ส่วนเวลาและผลรวมระหว่างเวลา กับ อุณหภูมิ ความเข้มข้น หรือทั้งอุณหภูมิและความเข้มข้น ไม่มีผลต่อค่าของ flow-behavior index เมื่อคำนวณค่าเฉลี่ย flow-behavior index ของ 10 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่า flow-behavior index ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 4.1) พบว่าแป้งข้าวเหนียว

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียว ระหว่างการเกิด gelatinization ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่อุณหภูมิ *				
	65 ± 1 °C	70 ± 1 °C	75 ± 1 °C	80 ± 1 °C	85 ± 1 °C
1	2.160 a,ก	1.629 a,ข	1.556 a,ค	1.427 a,ง	1.044 a,จ
2	1.689 b,ก	1.390 b,ข	1.202 b,ค	1.073 b,ง	0.860 b,จ
3	1.117 c,ก	0.964 c,ข	0.770 c,ค	0.742 c,ง	0.650 c,จ
4	0.975 d,ก	0.816 d,ข	0.632 c,ค	0.585 d,ง	0.545 d,จ
5	0.669 e,ก	0.594 e,ข	0.480 e,ค	0.343 e,ง	0.257 e,จ

\* - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่ความเข้มข้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

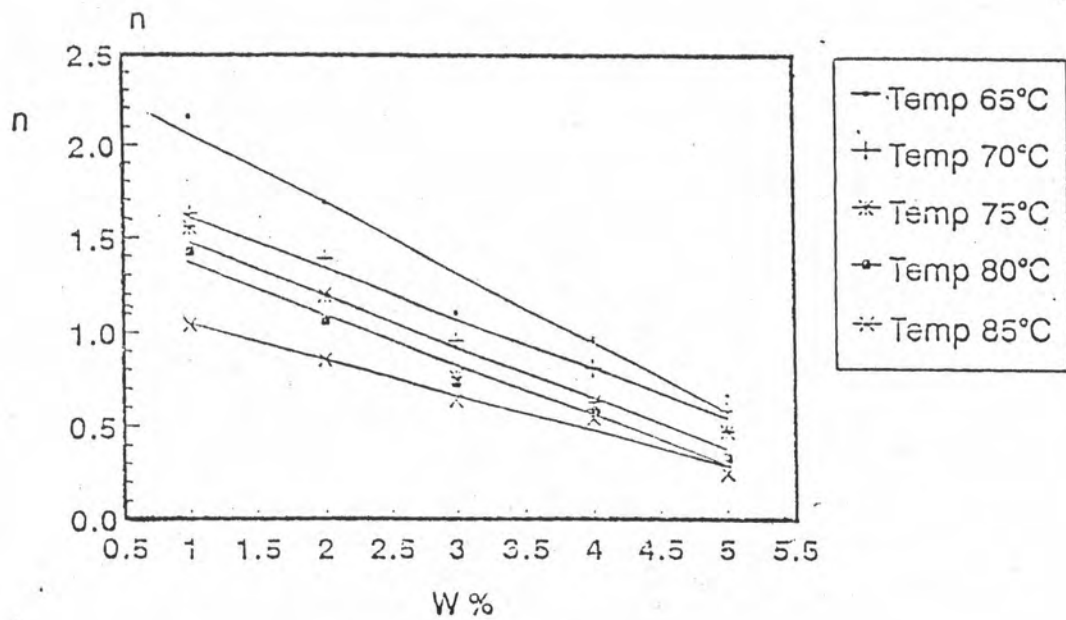
- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่อุณหภูมิต่างกัน ของแต่ละความเข้มข้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ที่ความเข้มข้นต่างกัน มีค่า flow-behavior index ในช่วงอุณหภูมิ 65-85°C แตกต่างกันอย่าง  
 มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 อุณหภูมิ 80°C  
 และ 85°C ที่มีค่า flow-behavior index ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ  
 เชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพบว่าค่า flow-behavior index ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เพราะเม็ดแป้ง  
 จะบวมพองเนื่องจากเม็ดแป้งดูดกลืนน้ำได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ลักษณะแข็งเกร็ง (rigid)  
 ของเม็ดแป้งน้อยลง เป็นผลให้ค่า flow-behavior index ลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Steffe  
 และ Dail, 1990a) และยังพบว่าแป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 มีสมบัติการไหลประเภท  
 dilatant fluids ( $n > 1$ ) ตลอดช่วงอุณหภูมิ 65-85°C แต่ที่ความเข้มข้นของแป้งข้าวเหนียว  
 ร้อยละ 2 และ 3 แป้งข้าวเหนียวมีสมบัติการไหลเปลี่ยนแปลงจากของไหลประเภท dilatant  
 fluids มาเป็นของไหลประเภท pseudoplastic fluids ( $n < 1$ ) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ส่วนที่  
 ความเข้มข้นร้อยละ 4-5 แป้งข้าวเหนียวมีสมบัติการไหลประเภท pseudoplastic fluids  
 ตลอดช่วงอุณหภูมิ 65-85°C ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Rao และคณะ  
 (1991) ซึ่งพบว่าค่า flow-behavior index ที่พบใน 25% cowpea slurry ที่ผ่านการให้ความ  
 ร้อนจนมีอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และวัดสมบัติการไหลในช่วงอุณหภูมิ 25-45°C  
 มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิต่างๆ (65-85°C) มีค่า  
 flow-behavior index ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1-5 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่  
 ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าของ flow-behavior index ลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่ม  
 ขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับค่า flow-behavior index ที่พบใน low-pulp orange  
 juice ซึ่งมีสมบัติการไหลแบบ pseudoplastic fluids (Roa และ Vitali, 1984) และ  
 ในแป้งข้าวโพด แป้งมันฝรั่ง แป้งข้าวสาลี แป้งมันสำปะหลัง และแป้งข้าวโพดตัดแปร ที่ผ่านการ  
 gelatinized แล้วลดอุณหภูมิลงมาถึง 50°C ซึ่งมีสมบัติการไหลแบบ pseudoplastic fluids  
 (Evans และ Haisman, 1979) แต่ผลการทดลองขัดแย้งกับการทดลองหาสมบัติการไหลของ  
 cross-linked waxy maize starch ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่างร้อยละ 1.82-2.72 ซึ่งผ่าน  
 การให้ความร้อนด้วย concentric tube heat exchanger จนมีอุณหภูมิ 121.1-143.3°C ซึ่ง  
 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของแป้งสูงขึ้น ค่า flow-behavior index จะเพิ่มขึ้น (Steffe และ  
 Dail, 1990a) อย่างไรก็ตามในงานทดลองต่อมาของ Steffe และ Dail (1990b) ได้พบว่า

ถ้าให้ความเข้มข้นสูงขึ้น คืออยู่ในช่วงร้อยละ 2.72-3.59 ค่าของ flow-behavior index จะลดลง เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น การที่ค่า flow-behavior index มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นในช่วงความเข้มข้นต่ำ และมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นในช่วงความเข้มข้นสูง ซึ่งขัดแย้งกับทฤษฎีที่ใช้อธิบายสมบัติของของไหลทั่ว ๆ ไป ที่พบว่า เมื่อความเข้มข้นสูง ค่า flow-behavior index มีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเข้าใจ closed-packing concentration หรือ maximum packing concentration มีค่าสูงขึ้น สำหรับในกรณีนี้ Evans และ Haisman (1979) ได้ให้ข้อเสนอแนะในกรณีดังกล่าวว่า สมบัติการไหลของแป้งที่ความเข้มข้นสูง จะต้องพิจารณา intergranular interaction ของเม็ดแป้งด้วย ซึ่งจะมีผลมากเมื่อความเข้มข้นของแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้น โดยเฉพาะ entanglement ของ amylose ที่ผิวของเม็ดแป้งที่อยู่ใกล้กัน ลักษณะของ visco-elasticity และ compressibility ของเม็ดแป้ง ไม่อาจพิจารณาว่าเม็ดแป้งแต่ละเม็ดเป็นวัตถุแข็งเกร็งและไม่มี interaction ระหว่างกันเหมือนกับที่พิจารณาสมบัติการไหลของแป้งที่ความเข้มข้นต่ำได้ ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่า เม็ดแป้งข้าวเหนียวในสารละลายแป้งข้าวเหนียวที่ใช้ในการทดลองมี intergranular interaction มากขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูง จึงทำให้ค่า flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization ที่อุณหภูมิระหว่าง 65-85°C มีค่าลดลง เมื่อความเข้มข้นสูง

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow-behavior index กับความเข้มข้น มีความสัมพันธ์กันเป็นสมการเส้นตรง (รูปที่ 4.1) และมีสมการความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index กับความเข้มข้น ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 4.2) ซึ่งพบว่า ค่า flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization มีค่าลดลงกับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 จากรูปที่ 4.1 พบว่า กราฟระหว่างค่า flow-behavior index และร้อยละของความเข้มข้นของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization มีบางช่วงที่มีค่า flow-behavior index เท่ากับ 1 แสดงว่าสมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียวถูกแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ที่ความเข้มข้นต่ำ มีสมบัติการไหลเป็น dilatant fluids และที่ความเข้มข้นสูง มีสมบัติการไหลประเภท pseudoplastic fluids

โดยช่วงรอยต่อที่มีการเปลี่ยนแปลงของประเภทของของไหล เม็ดแป้งอาจมีการเปลี่ยนแปลงบางอย่างที่ส่งผลให้สมบัติการไหลของเม็ดแป้งข้าวเหนียวเปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียว กับร้อยละของความเข้มข้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

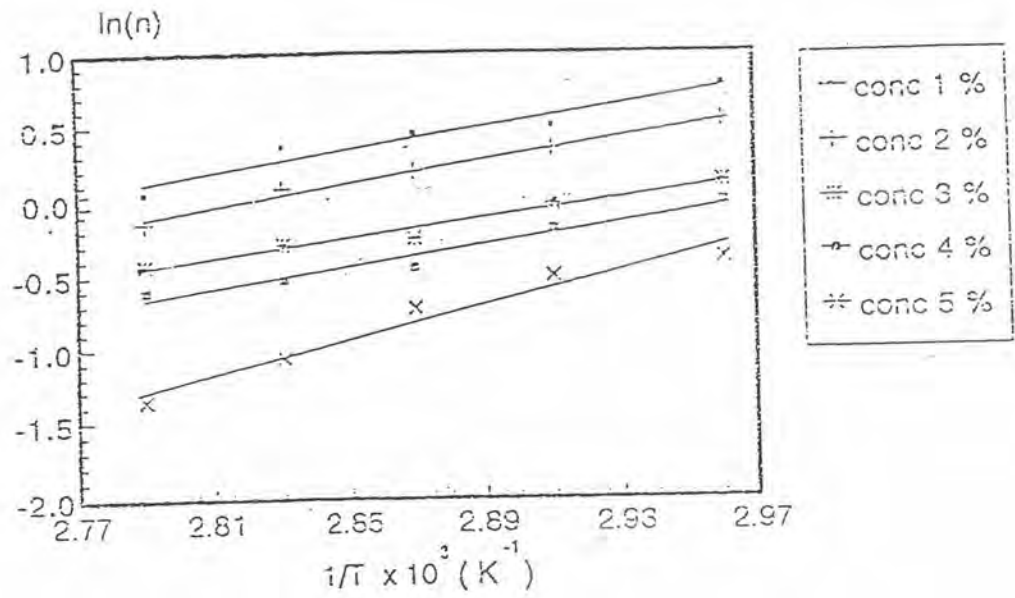


ตารางที่ 4.2 สมการ regression ของ flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวระหว่าง การเกิด gelatinization กับความเข้มข้น ในช่วงร้อยละ 1-5

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination ( $R^2$ )
65 ± 1	$n = 2.431 - 0.370 W$	0.936
70 ± 1	$n = 1.863 - 0.256 W$	0.946
75 ± 1	$n = 1.763 - 0.276 W$	0.921
80 ± 1	$n = 1.631 - 0.266 W$	0.975
85 ± 1	$n = 1.244 - 0.191 W$	0.972

\* W คือ ร้อยละของความเข้มข้น

เมื่อนำข้อมูลของแป้งข้าวเหนียวมาหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ flow-behavior index ในระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ มีความสัมพันธ์กันแบบ Arrhenius นั่นก็คือ ถ้าเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(n)$  กับ  $1/T$  จะได้กราฟเส้นตรง (รูปที่ 4.2) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow-behavior index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ค่า  $\ln(n)$  จะเพิ่มขึ้นเมื่อ  $1/T$  มีค่าเพิ่มขึ้น นั่นคือ เมื่ออุณหภูมิของแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้น ค่าของ flow-behavior index จะลดลง สำหรับค่าพลังงานกัมมันต์ (activation energy,  $E_a$ ) ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ค่าพลังงานกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ยกเว้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่ค่าพลังงานกัมมันต์มีค่าลดลง



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียว  
 กับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

ตารางที่ 4.3 สมการ regression ของ flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการศึกษาการเกิด gelatinization กับอุณหภูมิสัมบูรณ์

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	$E_a$ KJ/mol	coefficient of determination ( $R^2$ )
1	$\ln(n) = 3802.801/T - 10.507$	31.55	0.894
2	$\ln(n) = 3897.087/T - 11.003$	32.45	0.931
3	$\ln(n) = 3245.326/T - 9.510$	26.91	0.904
4	$\ln(n) = 3852.590/T - 11.419$	31.97	0.881
5	$\ln(n) = 5945.862/T - 17.906$	49.38	0.919

\* T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

เมื่อศึกษาผลของทั้งความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C ต่อค่า flow-behavior index โดยการใช้ multiple regression หาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow-behavior index กับความเข้มข้นและอุณหภูมิ พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดเป็นไปตามสมการ (9) โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.961

$$\begin{aligned}
 n &= 89.2234 + 0.0287 W^2 - 2.888 W + 0.0070 W*T \\
 &\quad - 0.4492 T + 5.7 \times 10^{-4} T^2 \\
 &= 89.2234 - 2.888 W + 0.0287 W^2 - 0.4492 T \\
 &\quad + 5.7 \times 10^{-4} T^2 + 0.0070 W*T
 \end{aligned} \tag{9}$$



$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } W &= \text{ร้อยละของความเข้มข้น} \\ T &= \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)} \end{aligned}$$

จากสมการ (9) สามารถที่จะประมาณค่า flow-behavior index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization ที่อุณหภูมิระหว่าง 65-85°C และความเข้มข้นร้อยละ 1-5 ได้ เช่นที่อุณหภูมิ 70°C ความเข้มข้นร้อยละ 3 ประมาณค่า flow-behavior index ได้เท่ากับ 0.999 แต่ค่า flow-behavior index จากการทดลองที่อุณหภูมิและความเข้มข้นดังกล่าวมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.964 (ตารางที่ 4.1) ซึ่งมีค่าผิดพลาดเพียงร้อยละ 3.63 เท่านั้น

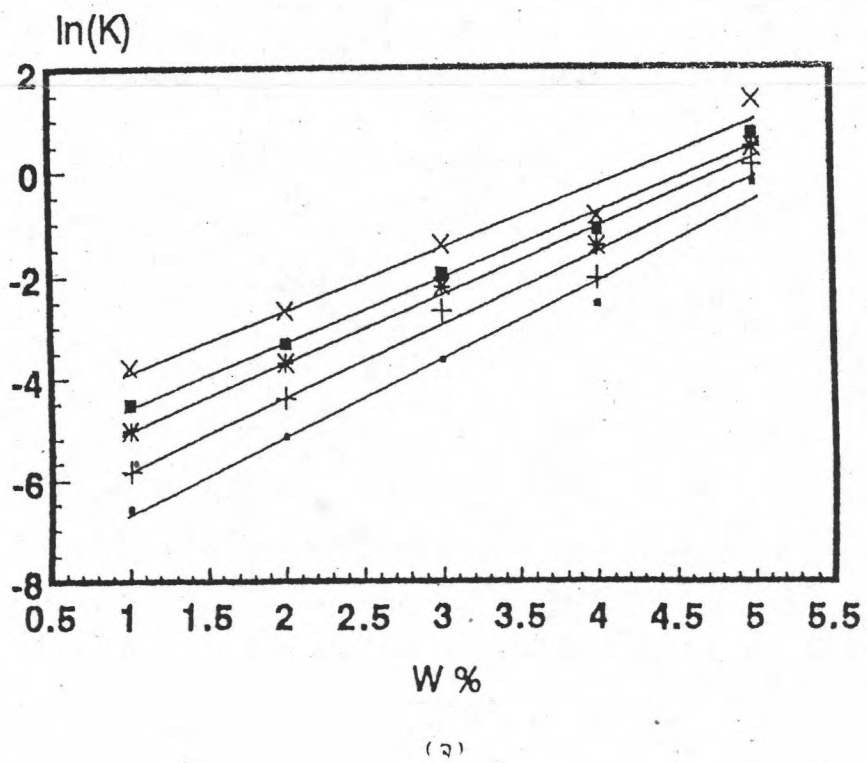
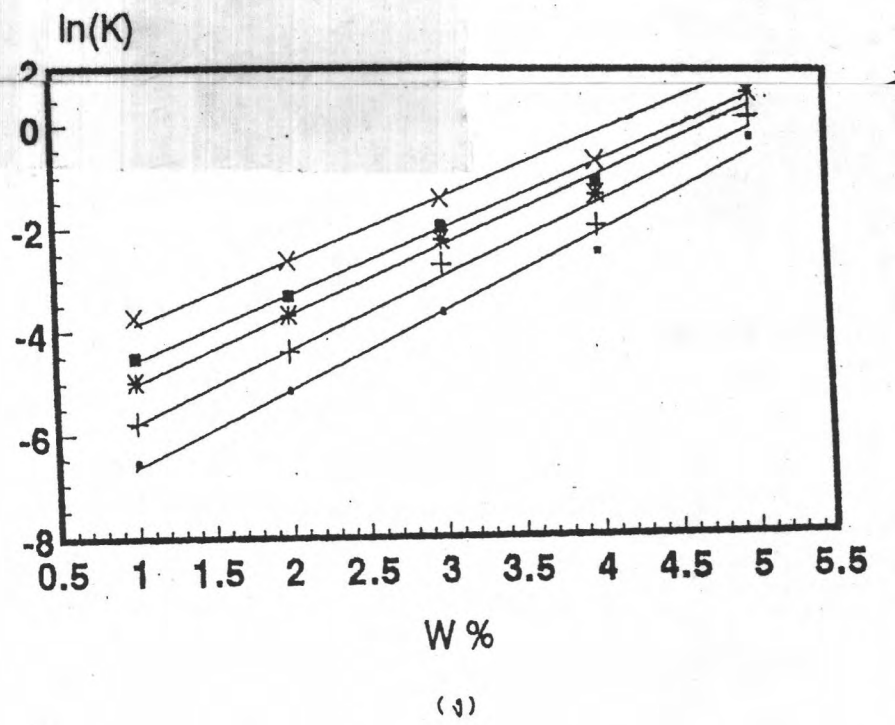
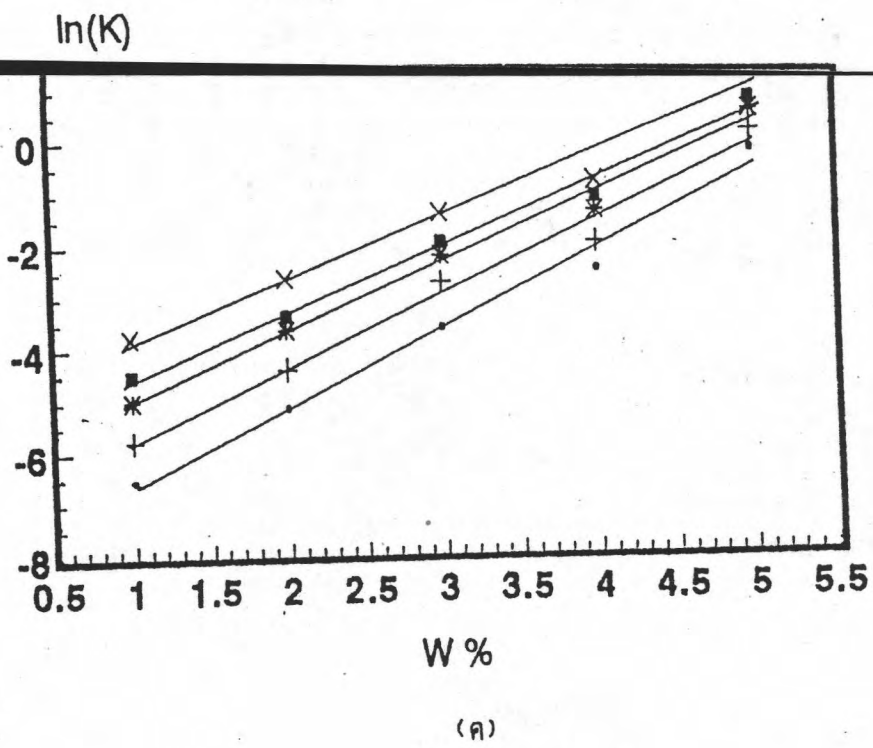
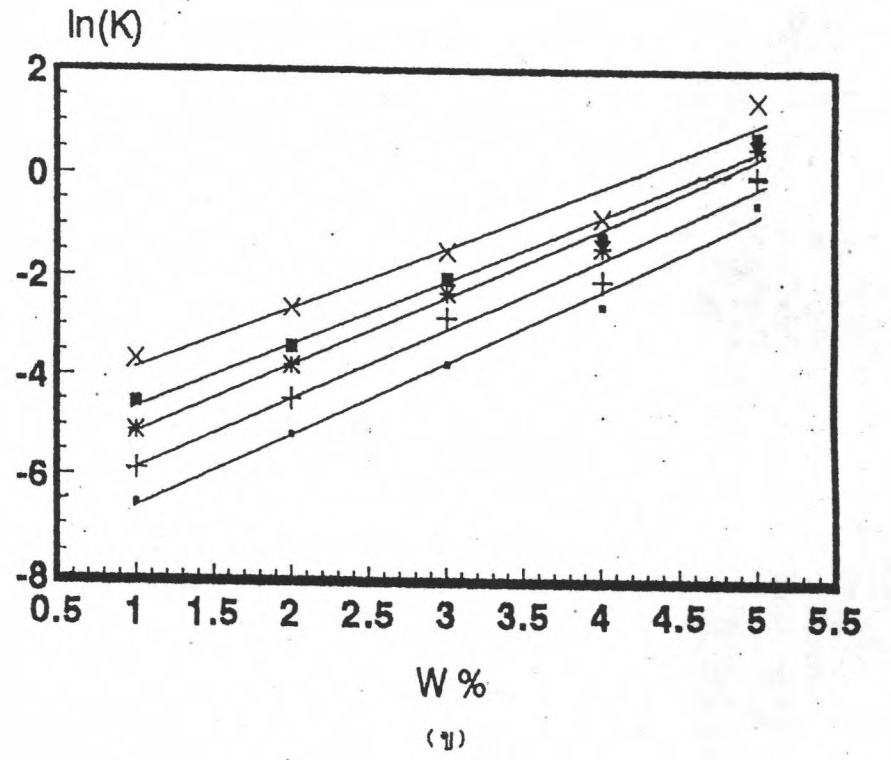
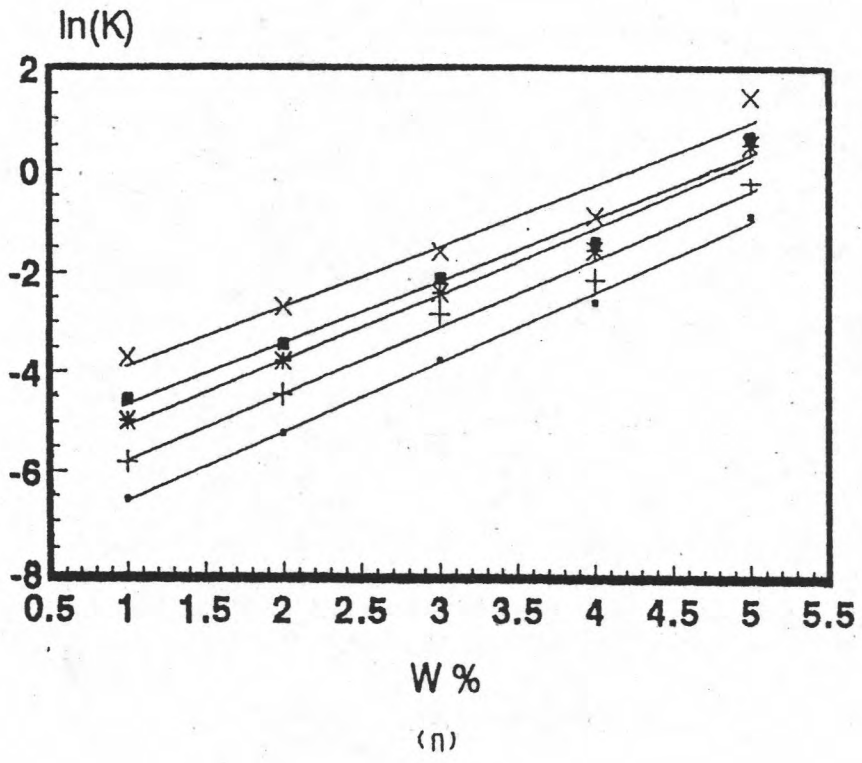
#### 4.1.1.2 Consistency index (K)

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลของความเข้มข้น อุณหภูมิ และ เวลาที่มีผลต่อค่า consistency index (ภาคผนวก ค.2) พบว่า แป้งข้าวเหนียวขณะเกิด gelatinization ที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 เวลาในช่วง 2-10 นาที และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C พบว่า ทั้งความเข้มข้น เวลา อุณหภูมิ ผลร่วมระหว่างความเข้มข้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นกับเวลา อุณหภูมิกับเวลา และผลร่วมระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและเวลา มีผลต่อค่า consistency index ของแป้งข้าวเหนียว ส่วนผลการคำนวณค่าเฉลี่ย consistency index ของ 2 ตัวอย่าง การเปรียบเทียบค่า consistency index ที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 เวลาในช่วง 2-10 นาที และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C แสดงในภาคผนวก ค.3 ซึ่งเมื่อพิจารณาเฉพาะอุณหภูมิในระหว่างการเกิด gelatinization ของแป้งข้าวเหนียว พบว่า ค่า consistency index มีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิของแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่า consistency index ที่พบใน cross-linked waxy maize starch ที่ผ่านการให้ความร้อนด้วย concentric tube heat exchanger (Steffe และ Dail, 1990a) เนื่องจากขณะที่แป้งเกิดการเกิด gelatinization ขนาดของเม็ดแป้งจะใหญ่ขึ้น (Fennema, 1985) การที่อุณหภูมิมีขนาดใหญ่ขึ้น จะมีการหมุนตัวและเคลื่อนที่ยากขึ้น จึงทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้ค่า consistency index เพิ่มขึ้น (Rao และคณะ, 1991) แต่เมื่อพิจารณาค่า consistency index ในช่วงความเข้มข้น

ต่าง ๆ (ร้อยละ 1-5) พบว่า ค่า consistency index มีค่าสูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานค่า consistency index ของ cross-linked waxy maize starch (Steffe และ Dail, 1990) และ low-pulp concentrated orange juice (Rao และ Vitali, 1984) เพราะว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นโอกาสที่เม็ดแป้งเกิดการชนกันจะมีความถี่สูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความหนืดสูงขึ้น เป็นผลให้ค่า consistency index สูงขึ้น (Rao และ คณะ, 1991) แต่เมื่อพิจารณาค่า consistency index ที่เวลาต่าง ๆ พบว่า ที่ทุกความเข้มข้น (ร้อยละ 1-5) และทุกอุณหภูมิ (65-85°C) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นตัวอย่างที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 เวลา 2 นาที อุณหภูมิ 75-80°C และที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิ 65-70°C เวลา 2-10 นาที และที่อุณหภูมิ 75°C เวลา 2 และ 4 นาที กับที่เวลา 6-10 นาที ที่มีค่า consistency index แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ consistency index ของแป้งข้าวเหนียวระหว่างเกิดการเกิด gelatinization ที่เวลา 2-10 นาที พบว่า ค่า  $\ln(K)$  ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นสมการเส้นตรงกับ ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 (รูปที่ 4.3) และสมการที่แสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้แสดงไว้ใน ส่วนตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับความเข้มข้น (total solid) ของ fruit puree (peach, pear และ apricot ที่พบ โดย Holdworth (1969)

เมื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ consistency index ของ แป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่าง consistency index กับอุณหภูมิเป็นแบบ Arrhenius ซึ่งจะมีความสัมพันธ์ระหว่างเทอมของ  $\ln(K)$  กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์เป็นสมการเส้นตรง (รูปที่ 4.4) และเมื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ดังตารางที่ 4.5 และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ดังกล่าว พบว่า  $\ln(K)$  จะเพิ่มขึ้น เมื่อ  $1/T$  มีค่าลดลง นั่นคือ



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log(K)$  ของแป้งข้าวเหนียว

กับความเข้มข้นที่อุณหภูมิต่างๆ

- อุณหภูมิ 65 °C    + อุณหภูมิ 70 °C
- \* อุณหภูมิ 75 °C    ■ อุณหภูมิ 80 °C
- × อุณหภูมิ 85 °C

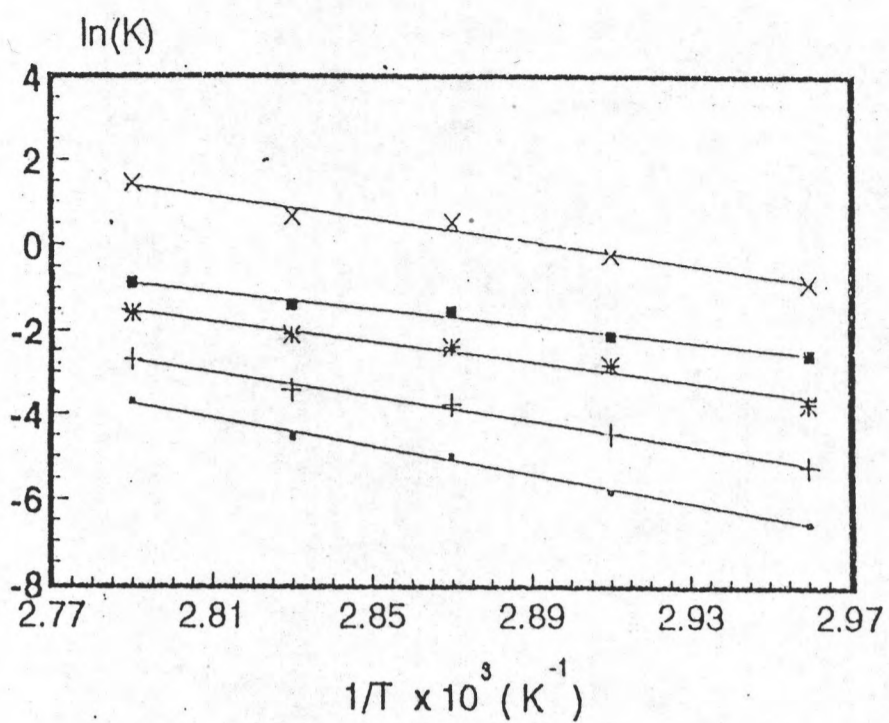
- (ก) 2 นาที    (ข) 4 นาที    (ค) 6 นาที  
 (ง) 8 นาที    (จ) 10 นาที

ตารางที่ 4.4 สมการ regression ของ consistency index ของแป้งข้าวเหนียวระหว่าง  
การเกิด gelatinization กับความเข้มข้น ในช่วงร้อยละ 1-5 ที่เวลา 2-10  
นาที

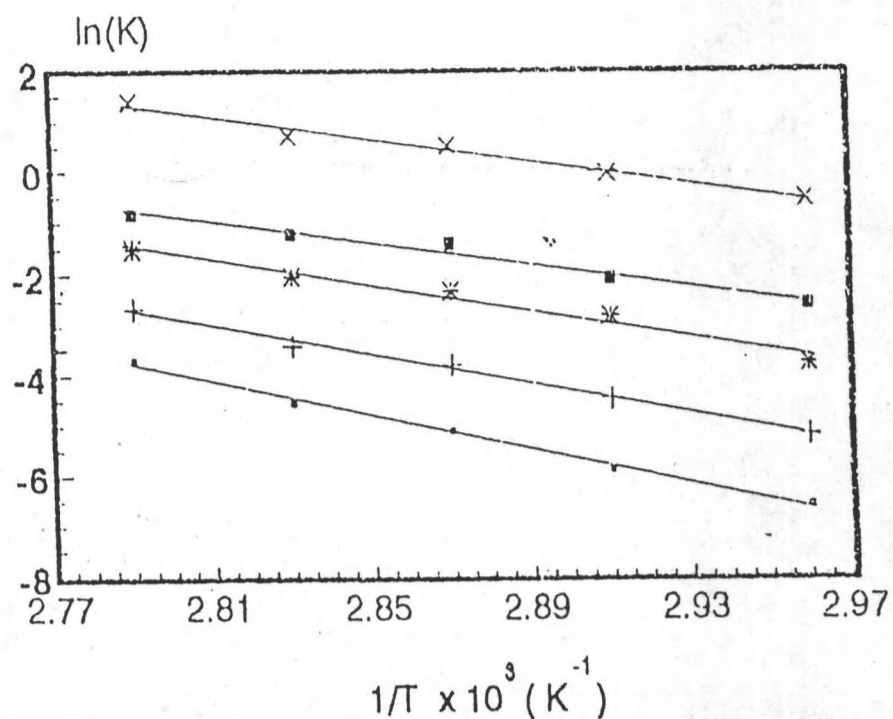
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สมการ regression *	coefficient of determination (R <sup>2</sup> )
2	65 ± 1	$\ln(K) = 1.4121 W - 8.0389$	0.993
2	70 ± 1	$\ln(K) = 1.3568 W - 7.1549$	0.986
2	75 ± 1	$\ln(K) = 1.3262 W - 6.4100$	0.983
2	80 ± 1	$\ln(K) = 1.2463 W - 5.8964$	0.978
2	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2100 W - 5.1061$	0.958
4	65 ± 1	$\ln(K) = 1.4669 W - 8.1352$	0.990
4	70 ± 1	$\ln(K) = 1.3731 W - 7.2099$	0.987
4	75 ± 1	$\ln(K) = 1.3625 W - 6.5090$	0.990
4	80 ± 1	$\ln(K) = 1.2706 W - 5.9089$	0.985
4	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2168 W - 5.1001$	0.966
6	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5128 W - 8.2264$	0.987
6	70 ± 1	$\ln(K) = 1.3999 W - 7.1919$	0.984
6	75 ± 1	$\ln(K) = 1.3261 W - 6.3599$	0.987
6	80 ± 1	$\ln(K) = 1.2599 W - 5.8479$	0.987
6	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2168 W - 5.1000$	0.966
8	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5531 W - 8.2941$	0.983
8	70 ± 1	$\ln(K) = 1.4172 W - 7.2325$	0.983
8	75 ± 1	$\ln(K) = 1.3223 W - 6.3217$	0.988
8	80 ± 1	$\ln(K) = 1.2664 W - 5.8446$	0.987
8	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2210 W - 5.1367$	0.963
10	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5531 W - 8.2941$	0.983
10	70 ± 1	$\ln(K) = 1.4285 W - 7.2384$	0.981
10	75 ± 1	$\ln(K) = 1.3304 W - 6.3593$	0.988
10	80 ± 1	$\ln(K) = 1.2720 W - 5.8464$	0.989
10	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2201 W - 5.1175$	0.963

\* W คือ ร้อยละของความเข้มข้น

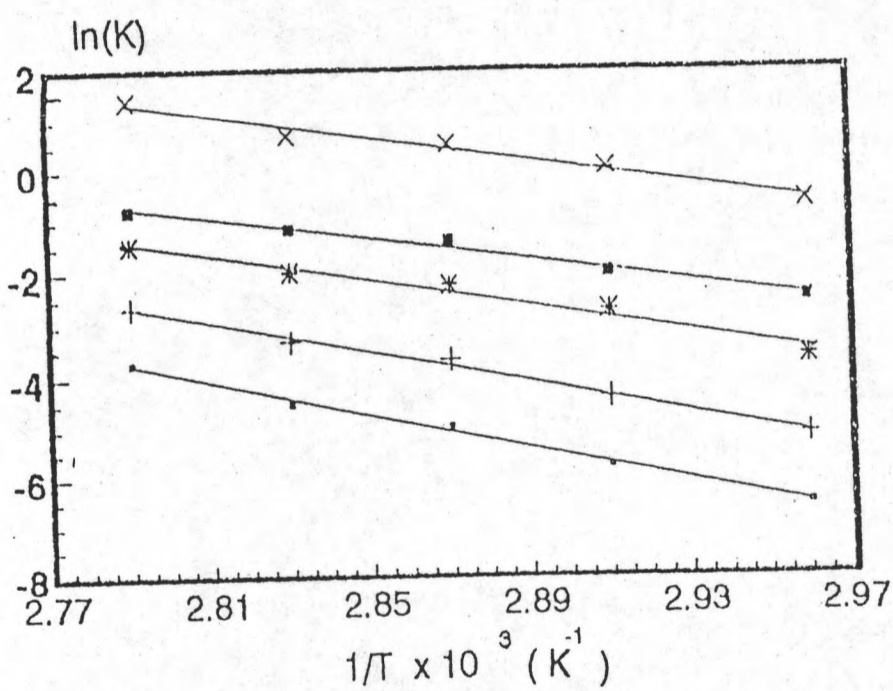




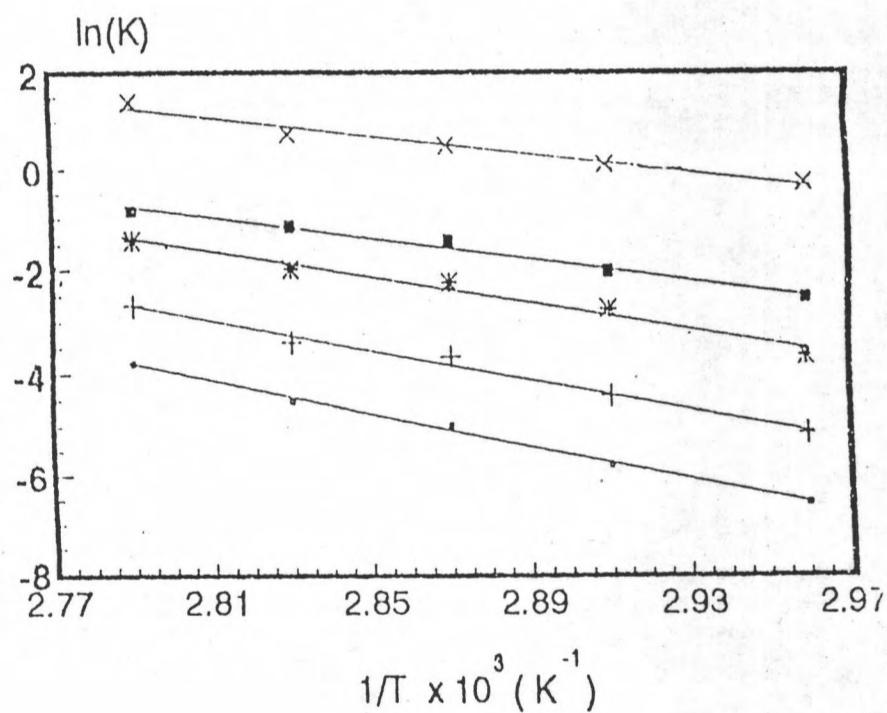
(n)



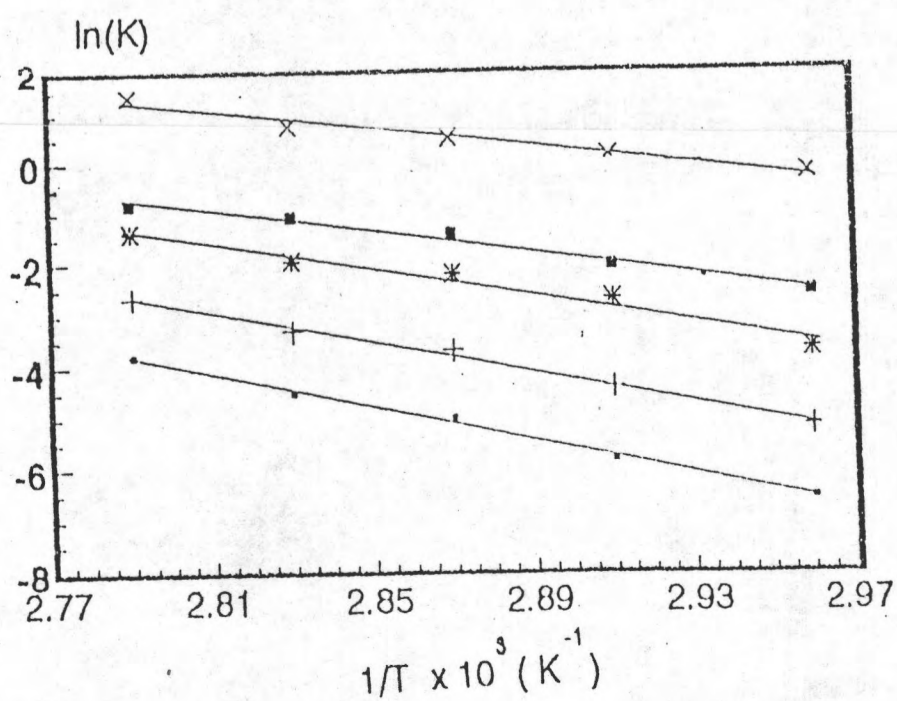
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่าง consistency index ของแป้งข้าวเหนียว กับส่วนกลับของอุณหภูมิ (เคลวิน) ที่ความเข้มข้นต่างๆ

• conce 1% + conce 2%

X conce 3% ■ conce 4%

x conce 5%

(n) 2 นาที (ข) 4 นาที (ค) 8 นาที

(ง) 8 นาที (จ) 10 นาที

ตารางที่ 4.5 สมการ regression ของ consistency index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างกาเกิด gelatinization กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่เวลา 2-10 นาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	E <sub>a</sub> KJ/mol	coefficient of determination (R <sup>2</sup> )
2	1	$\ln(K) = -17115.7372/T + 44.0505$	142.31	0.982
	2	$\ln(K) = -14795.4305/T + 38.6038$	123.02	0.984
	3	$\ln(K) = -14717.2655/T + 38.4400$	122.35	0.986
	4	$\ln(K) = -10096.6903/T + 27.3204$	83.94	0.976
	5	$\ln(K) = -13235.3602/T + 38.3423$	110.05	0.969
4	1	$\ln(K) = -17389.4659/T + 44.8086$	144.57	0.985
	2	$\ln(K) = -14838.3474/T + 38.7427$	123.36	0.988
	3	$\ln(K) = -12811.7050/T + 34.3250$	106.65	0.960
	4	$\ln(K) = -10570.9444/T + 28.7503$	87.87	0.971
	5	$\ln(K) = -11436.3622/T + 33.2717$	95.07	0.978
6	1	$\ln(K) = -17122.7725/T + 44.0689$	142.35	0.976
	2	$\ln(K) = -14841.8303/T + 38.7876$	123.27	0.986
	3	$\ln(K) = -12529.9550/T + 33.5665$	104.19	0.959
	4	$\ln(K) = -10660.9268/T + 29.0366$	88.63	0.981
	5	$\ln(K) = -10325.2825/T + 30.1200$	85.86	0.971
8	1	$\ln(K) = -16929.1253/T + 43.4978$	140.76	0.976
	2	$\ln(K) = -14676.4140/T + 38.3243$	122.02	0.983
	3	$\ln(K) = -12664.0900/T + 33.9783$	105.30	0.961
	4	$\ln(K) = -10330.8124/T + 28.0867$	85.91	0.970
	5	$\ln(K) = -9597.1443/T + 28.0721$	79.30	0.969
10	1	$\ln(K) = -16986.2489/T + 43.6572$	141.22	0.978
	2	$\ln(K) = -14717.2655/T + 38.4400$	122.35	0.986
	3	$\ln(K) = -12730.0367/T + 34.2030$	105.82	0.952
	4	$\ln(K) = -10413.7282/T + 28.3452$	86.58	0.969
	5	$\ln(K) = -9147.6700/T + 26.8014$	76.07	0.966

\* T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)



เมื่ออุณหภูมิของแป้งข้าวเหนียวสูงขึ้น ค่าของ consistency index เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Doublier (1981) ที่หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับอุณหภูมิของแป้งข้าวสาลีที่มีความเข้มข้นร้อยละ 2.5-8 อุณหภูมิ 50-70°C การที่ค่า consistency index มีค่าสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้ความหนืดของแป้งข้าวเหนียวเพิ่มขึ้นแทนที่จะลดลงดังที่พบในของเหลวทั่ว ๆ ไป ที่เป็นเช่นนี้เพราะว่า ในขณะที่แป้งเกิดการ gelatinization จะเกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเม็ดแป้งคือ เม็ดแป้งมีการดูดกลืนน้ำเข้าไป ทำให้ขนาดของเม็ดแป้งมีขนาดใหญ่ขึ้น รวมทั้งมีบางส่วน of เม็ดแป้งหลุดออกไป (Radley, 1976) ซึ่งการที่ขนาดของเม็ดแป้งที่เพิ่มขึ้นอย่างมากในขณะที่เกิดการ gelatinization เป็นผลให้ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมาก (Rao และคณะ, 1991) แต่ Doublier (1981) พบว่า แป้งข้าวสาลีที่เกิดการ gelatinization อย่างสมบูรณ์ แล้วจะไม่มีพฤติกรรมดังกล่าว คือ ความหนืดจะลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเหมือนกับของไหลทั่วไป ซึ่งแสดงว่า สมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียวมีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วง ๆ (phase transition) คือ ในช่วงที่กำลังเกิด gelatinized ที่มีการเปลี่ยนแปลงภายในเม็ดแป้ง และช่วงที่เกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์แล้ว จากการทดลองพบว่า ในแป้งข้าวเหนียวที่อุณหภูมิ 85°C ยังเกิดการ gelatinization ไม่สมบูรณ์ สำหรับค่าพลังงานกัมมันต์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 โดยพบว่า ค่าพลังงานกัมมันต์มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C ต่อค่า consistency index ที่เวลา 2-10 นาที พบว่า ความสัมพันธ์ที่ดีที่สุดของค่า consistency index กับความเข้มข้นและอุณหภูมิ เป็นไปตามตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 สมการ regression ของค่า consistency index ของแป้งข้าวเหนียว ในช่วง  
ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 อุณหภูมิ 65-85°C ที่เวลา 2-10 นาที

เวลา (นาที)	สมการ regression *	R <sup>2</sup>
2	$\ln(K) = -214.289 + 0.0726 W^2 + 4.4515 W$ $-0.0103 W*T + 1.0546 T - 0.0013 T^2$	0.985
4	$\ln(K) = -188.563 + 0.0713 W^2 + 5.5618 W$ $-0.0134 W*T + 0.8981 T - 0.0011 T^2$	0.988
6	$\ln(K) = -210.625 + 0.0706 W^2 + 5.8683 W$ $-0.0142 W*T + 1.0255 T - 0.0013 T^2$	0.987
8	$\ln(K) = -229.419 + 0.0682 W^2 + 6.3563 W$ $-0.0155 W*T + 1.1308 T - 0.0014 T^2$	0.986
10	$\ln(K) = -220.989 + 0.0648 W^2 + 6.6981 W$ $-0.0164 W*T + 1.0798 T - 0.0013 T^2$	0.986

\* W คือร้อยละของความเข้มข้น

T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)



แต่เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่า consistency index กับ เวลาในช่วง 2-10 นาที ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C พบว่า มีความสัมพันธ์ที่ต่ำที่สุด โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.986 เป็นไปตามสมการ (10)

$$\begin{aligned} \ln(K) = & -207.197 + 4.1779 W + 1.0145 T - 0.5102 t \\ & + 0.0697 W^2 - 0.0015 t^2 - 0.0013 T^2 \\ & + 0.0015 T*t - 0.0094 W*T + 0.2695 W*t \\ & - 7.5 \times 10^{-4} W*T*t \end{aligned} \quad (10)$$

เมื่อ  $t$  = เวลา (นาที)

จากสมการ (10) สามารถประมาณค่า consistency index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 1-5 อุณหภูมิอยู่ใน ช่วง 65-85°C และเวลาในช่วง 2-10 นาทีได้ เช่นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิ 80°C เวลา 4 นาที ประมาณค่า consistency index ได้เท่ากับ 2.0257 แต่ค่าเฉลี่ยของค่า consistency index ที่ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลาดังกล่าว (ภาคผนวก ค.3) มีค่าเท่ากับ 2.0541 ซึ่งมีความผิดพลาดไปร้อยละ 1.38

เนื่องจากสามารถประมาณค่า flow-behavior index และ consistency index ของแป้งข้าวเหนียวที่ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C ในระหว่างการเกิด gelatinization (สมการ 9 และ สมการ 10) จึงสามารถ อธิบายสมบัติการไหลหรือประมาณค่า apparent viscosity ที่ shear rate ใด ๆ ของแป้ง ข้าวเหนียวในช่วงที่การเกิด gelatinization ได้

#### 4.1.2 สมบัติการไหลของแป้งมันสำปะหลัง

##### 4.1.2.1 Flow-behavior index (n)

เมื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (ภาคผนวก ค.4) พบว่า ความเข้มข้น อุณหภูมิ และผลรวมของความเข้มข้นและอุณหภูมิ มีผลต่อค่า flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังเช่นเดียวกับที่พบในแป้งข้าวเหนียว จากการคำนวณค่าเฉลี่ย flow-behavior index ของ 10 ตัวอย่าง และเปรียบเทียบค่า flow-behavior index ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 4.7) พบว่า แป้งมันสำปะหลังที่ความเข้มข้นต่างกัน มีค่า flow-behavior index ในช่วงอุณหภูมิ 65-85°C แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ยกเว้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 5 อุณหภูมิ 85°C ที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยค่าของ flow-behavior index ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่ความเข้มข้นร้อยละ 1 แป้งมันสำปะหลังมีสมบัติการไหลเป็นแบบ dilatant fluids และที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 และ 5 แป้งมันสำปะหลังมีสมบัติการไหลเป็นแบบ pseudoplastic fluids ส่วนที่ความเข้มข้นร้อยละ 2 และ 3 แป้งมันสำปะหลังจะมีสมบัติการไหลเปลี่ยนแปลงจากของไหลประเภท dilatant fluids มาเป็นของไหลประเภท pseudoplastic fluids เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งการลดลงของค่า flow-behavior index เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเช่นนี้สอดคล้องกับที่พบในแป้งข้าวเหนียวและใน 25% cowpea slurry ที่ผ่านการให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และวัสดุสมบัติการไหลในช่วงอุณหภูมิ 25-45°C ซึ่งมีสมบัติการไหลประเภท pseudoplastic fluids (Rao และคณะ, 1991) นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่า flow-behavior index ในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1-5 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยที่ค่าของ flow-behavior index ลดลง เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น คือพบว่าแป้งมันสำปะหลังมีสมบัติการไหลเปลี่ยนแปลงจาก dilatant fluids มาเป็น pseudo- สำหรับการลดลงของ flow-behavior index เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้นนี้เป็นเช่นเดียวกันกับที่พบในแป้งข้าวเหนียวและใน tomato serum ที่มีความเข้มข้นร้อยละ (wt.%) 5.8-62.5 เมื่อวัสดุสมบัติการไหลที่ 90°F ซึ่งมีสมบัติการไหลเป็น pseudoplastic fluids (Harper และ Sahrici, 1965)

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่อุณหภูมิ *				
	65 ± 1 °C	70 ± 1 °C	75 ± 1 °C	80 ± 1 °C	85 ± 1 °C
1	1.821 a,ก	1.638 a,ข	1.578 a,ค	1.451 a,ง	1.302 a,จ
2	1.522 b,ก	1.280 b,ข	1.186 b,ค	1.060 b,ง	0.945 b,จ
3	1.270 c,ก	0.912 c,ข	0.771 c,ค	0.572 c,ง	0.575 c,จ
4	0.988 d,ก	0.669 d,ข	0.504 c,ค	0.456 d,ง	0.375 d,จ
5	0.630 e,ก	0.568 e,ข	0.460 e,ค	0.412 e,ง	0.359 d,จ

\* - ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่ความเข้มข้นต่างกันของแต่ละอุณหภูมิ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

- ตัวอักษรภาษาไทยที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าเฉลี่ย flow-behavior index ที่อุณหภูมิต่างกันของแต่ละความเข้มข้น แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ

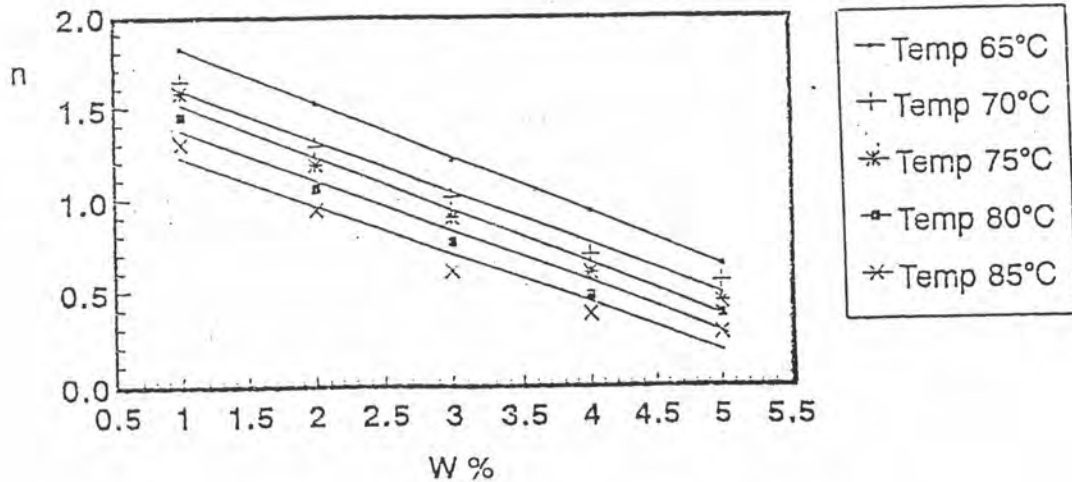
เมื่อนำข้อมูลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับ flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow-behavior index กับความเข้มข้นเป็นแบบเส้นตรง (รูปที่ 4.5) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index กับความเข้มข้น ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 4.8) พบว่า ค่า flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization มีค่าลดลงกับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5

ตารางที่ 4.8 สมการ regression ของ flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization กับความเข้มข้น ในช่วงร้อยละ 1-5

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ regression *	coefficient of determination ( $R^2$ )
65 ± 1	$n = 2.127 - 0.297 W$	0.984
70 ± 1	$n = 1.838 - 0.275 W$	0.939
75 ± 1	$n = 1.771 - 0.290 W$	0.924
80 ± 1	$n = 1.595 - 0.268 W$	0.876
85 ± 1	$n = 1.448 - 0.246 W$	0.912

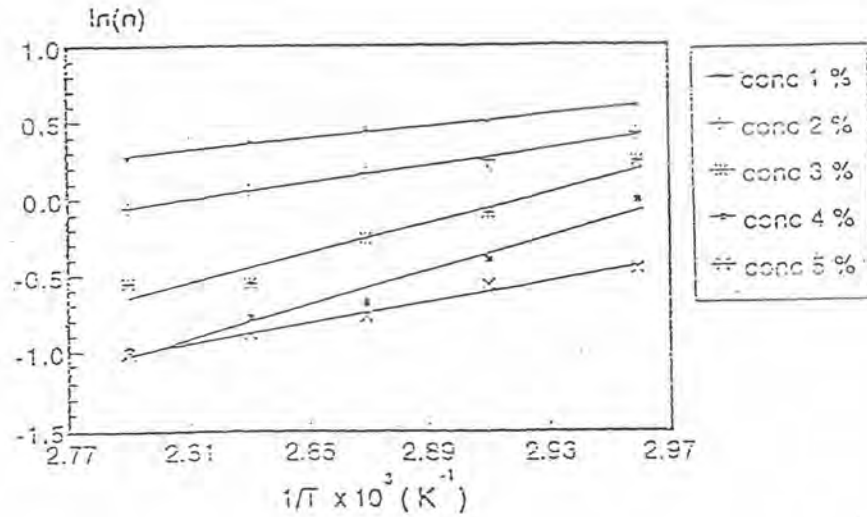
\* W คือ ร้อยละของความเข้มข้น





รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลัง กับร้อยละความเข้มข้น ที่อุณหภูมิต่างๆ

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับ flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(n)$  กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) เป็นเส้นตรง (รูปที่ 4.6) และมีสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า flow-behavior index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ตารางที่ 4.9) ซึ่งพบว่า ค่า  $\ln(n)$  จะลดลง เมื่อ  $1/T$  มีค่าลดลง คือเมื่ออุณหภูมิของแป้งมันสำปะหลังสูงขึ้น ค่าของ flow-behavior index จะลดลง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ดังกล่าวเป็นแบบ Arrhenius และมีค่าพลังงานกัมมันต์สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ยกเว้นที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ที่มีค่าพลังงานกัมมันต์ลดลง (ตารางที่ 4.9)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่าง flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลัง กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.9 สมการ regression ของ flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization กับอุณหภูมิสัมบูรณ์

ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สมการ regression *	$E_a$ KJ/mol	coefficient of determination ( $R^2$ )
1	$\ln(n) = 1915.835/T - 5.075$	15.90	0.921
2	$\ln(n) = 2763.308/T - 7.773$	22.93	0.955
3	$\ln(n) = 5001.899/T - 14.618$	41.51	0.915
4	$\ln(n) = 5349.808/T - 15.961$	44.40	0.919
5	$\ln(n) = 3501.164/T - 10.800$	29.08	0.942

\* T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

แต่เมื่อพิจารณาหาความสัมพันธ์ของค่า flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization กับความเข้มข้นช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิช่วง 65-85°C พบว่า มีความสัมพันธ์เป็นไปตามสมการ (11) ( $R^2 = 0.971$ )

$$\begin{aligned} \eta &= 113.679 - 1.324 W + 0.047 W^2 + 2.20 \times 10^{-3} W * T \\ &\quad - 0.609 T + 8.29 \times 10^{-4} T^2 \\ &= 113.679 - 1.324 W + 0.047 W^2 - 0.609 T \\ &\quad + 8.29 \times 10^{-4} T^2 + 2.20 \times 10^{-3} W * T \end{aligned} \quad (11)$$

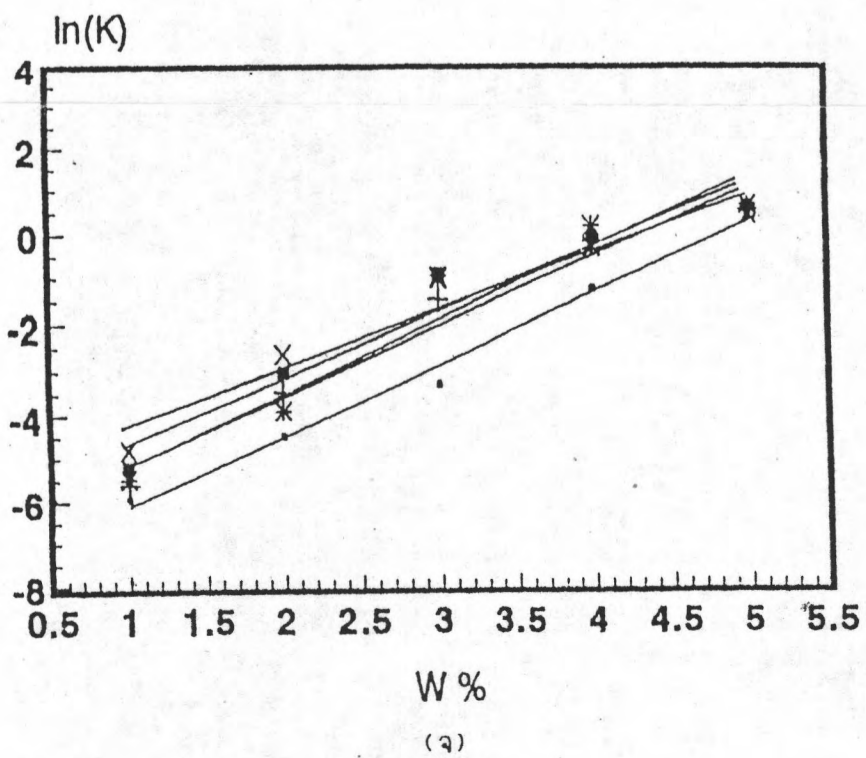
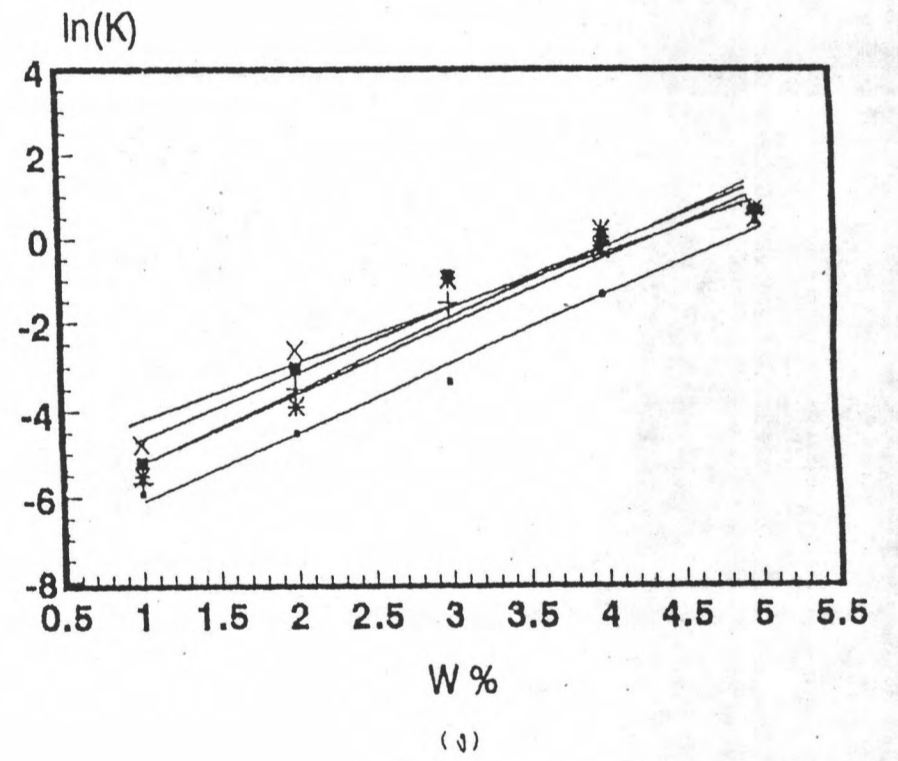
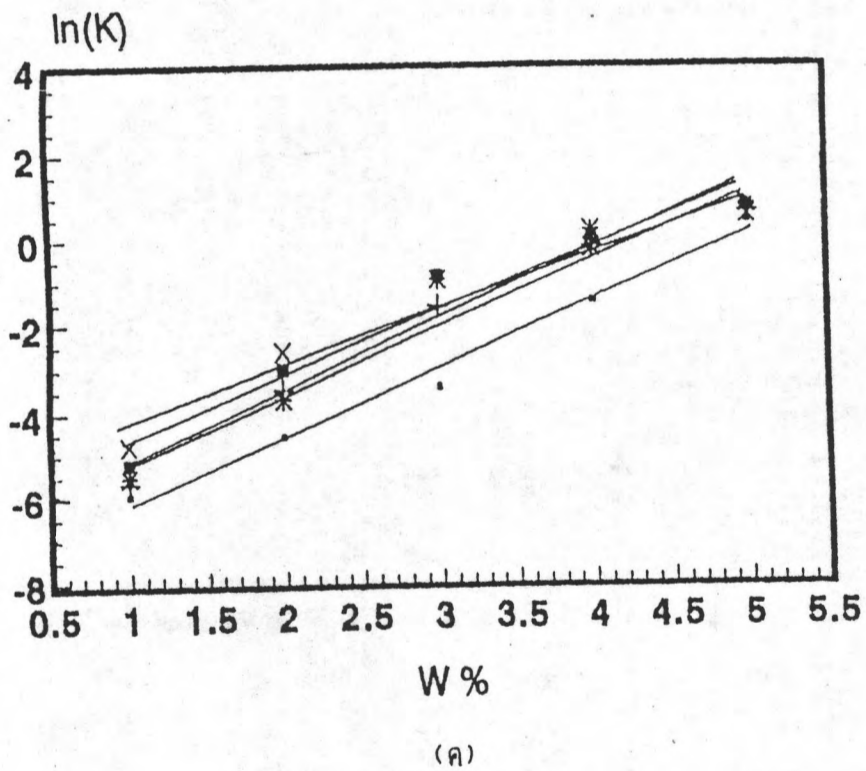
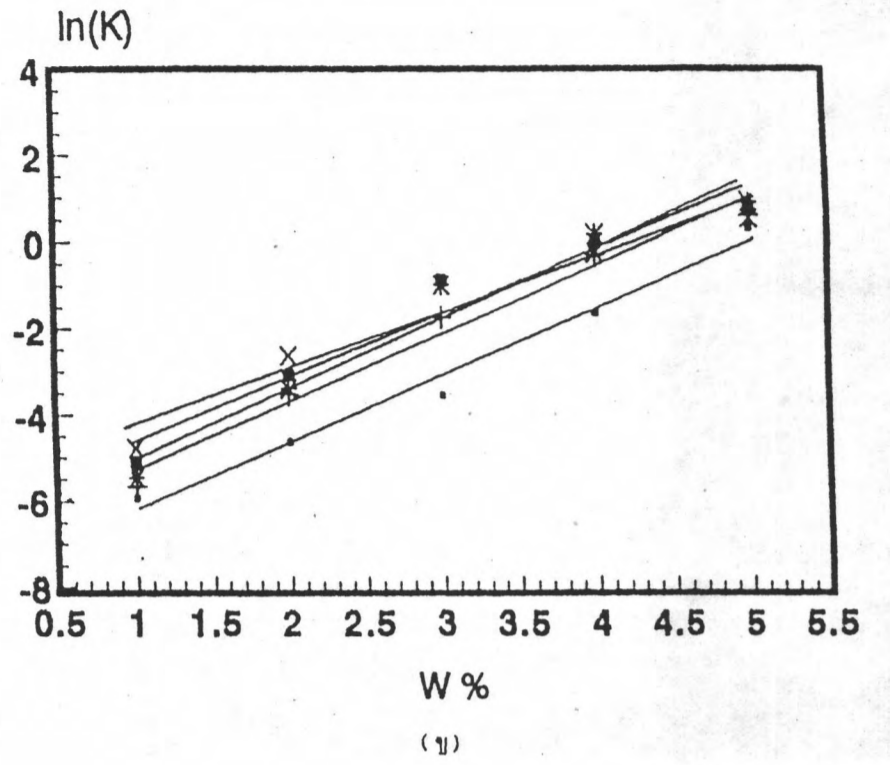
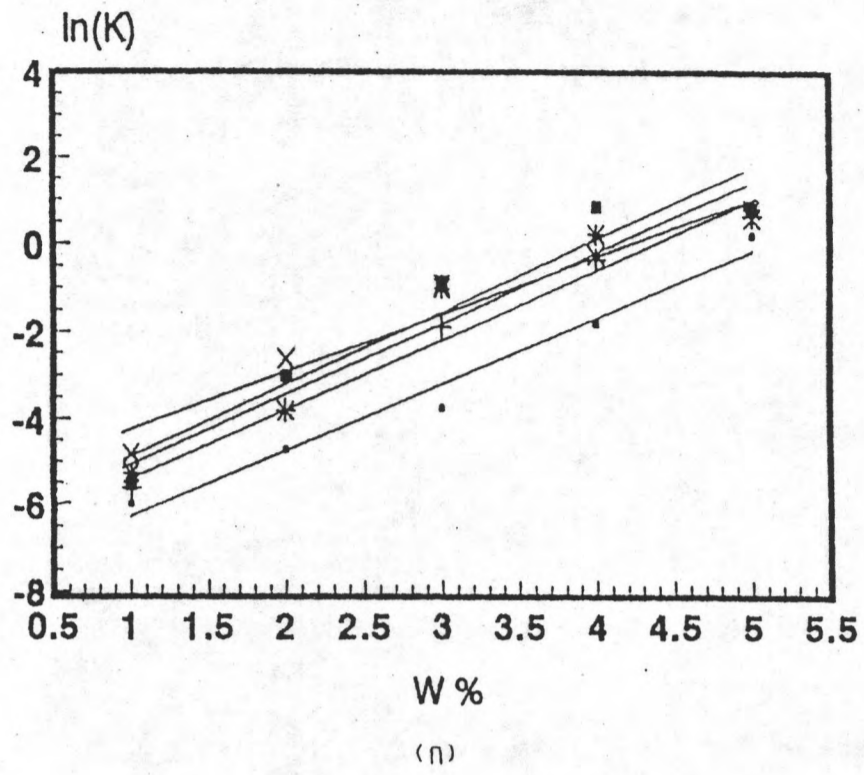
สมการ (11) อาจใช้ในการประมาณค่า flow-behavior index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 65-85°C และความเข้มข้นร้อยละ 1-5 ได้ เช่นที่อุณหภูมิ 70°C ความเข้มข้นร้อยละ 2 ประมาณค่า flow-behavior index ได้เท่ากับ 1.367 แต่ค่า flow-behavior index จากการทดลองที่อุณหภูมิและความเข้มข้นดังกล่าว มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.280 (ตารางที่ 4.7) ซึ่งมีค่าผิดพลาดไปร้อยละ 6.80

#### 4.1.2.2 Consistency index (K)

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลา ที่มีผลต่อค่า consistency index ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังเกิดการ gelatinization (ภาคผนวก ค.5) พบว่าความเข้มข้น เวลา อุณหภูมิ และอิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นกับอุณหภูมิ ความเข้มข้นกับเวลา อุณหภูมิกับเวลา และอิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นกับอุณหภูมิและเวลา มีผลต่อค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลัง สำหรับผลการคำนวณค่าเฉลี่ย consistency index ของ 2 ตัวอย่างและเปรียบเทียบค่า consistency index ที่เวลาในช่วง 2-10 นาที ความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ค.6 ซึ่งถ้าพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีค่า consistency index สูงขึ้น เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น สอดคล้องกับค่า consistency index ของแป้งข้าวเหนียว และ tomato

juice ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่างร้อยละ 5.8-30 และมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 90-150°F (Harper และ Sahrici, 1965) แต่เมื่อพิจารณาค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่า แป้งมันสำปะหลังจะมีค่า consistency index เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและจะมีค่า consistency index สูงสุดค่าหนึ่ง ซึ่งเมื่อเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นไปอีกค่า consistency index กลับมีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Odigboh และ Mohsenin (1975) ที่พบว่า ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และจะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 75°C และถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นไปอีก ความหนืดของแป้งมันสำปะหลังจะลดลง และเมื่อพิจารณาค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลัง ที่เวลาต่าง ๆ (2-10 นาที) พบว่าค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังที่เวลา 2 นาที ความเข้มข้นร้อยละ 1 อุณหภูมิ 65-85 °C ความเข้มข้นร้อยละ 2 อุณหภูมิ 70°C และ 75°C ความเข้มข้นร้อยละ 3 และ 4 อุณหภูมิ 85°C และที่เวลา 2-10 นาที ความเข้มข้นร้อยละ 3 อุณหภูมิ 70°C กับที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิ 80°C มีค่า consistency index แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นอกจากนี้ที่เวลา 2 และ 4 นาที ความเข้มข้นร้อยละ 3 อุณหภูมิ 65°C ความเข้มข้นร้อยละ 4 อุณหภูมิ 65-75°C และ 85°C มีค่า consistency index แตกต่างกับค่า consistency index ที่เวลา 4-10 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นกับค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังระหว่างการเกิด gelatinization ที่เวลา 2-10 นาที พบว่า มีความสัมพันธ์กันระหว่าง  $\ln(K)$  กับความเข้มข้นเป็นสมการเส้นตรง (รูปที่ 4.7) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับความเข้มข้น ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ (ตารางที่ 4.10) พบว่า ค่า  $\ln(K)$  ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization มีค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงกับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 เช่นเดียวกันกับที่พบในแป้งข้าวเหนียว



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(K)$  ของแป้งมันสำปะหลัง

กับความเข้มข้น ที่ เวลาและอุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ 65 °C + อุณหภูมิ 70 °C  
 \* อุณหภูมิ 75 °C ■ อุณหภูมิ 80 °C  
 × อุณหภูมิ 85 °C

(ก) 2 นาที (ข) 4 นาที (ค) 6 นาที

(ง) 8 นาที (จ) 10 นาที



ตารางที่ 4.10 สมการ regression ของ consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างเกิดการเกิด gelatinization กับความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 ที่เวลา 2-10 นาที

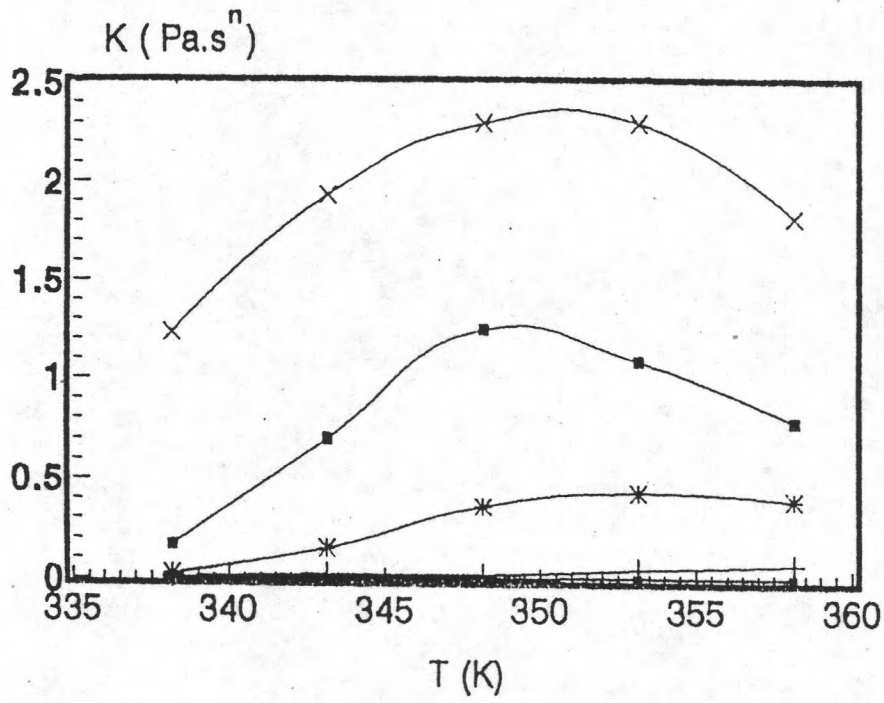
เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	สมการ regression *	coefficient of determination ( $R^2$ )
2	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5319 W - 7.8062$	0.977
2	70 ± 1	$\ln(K) = 1.6031 W - 7.0122$	0.987
2	75 ± 1	$\ln(K) = 1.6271 W - 6.6936$	0.950
2	80 ± 1	$\ln(K) = 1.4640 W - 5.9652$	0.953
2	85 ± 1	$\ln(K) = 1.3213 W - 5.5631$	0.943
4	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5503 W - 7.7365$	0.983
4	70 ± 1	$\ln(K) = 1.5774 W - 6.8496$	0.978
4	75 ± 1	$\ln(K) = 1.6098 W - 6.6039$	0.950
4	80 ± 1	$\ln(K) = 1.4864 W - 6.1035$	0.948
4	85 ± 1	$\ln(K) = 1.3009 W - 5.5184$	0.944
6	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5775 W - 7.7478$	0.987
6	70 ± 1	$\ln(K) = 1.5823 W - 6.8145$	0.971
6	75 ± 1	$\ln(K) = 1.6451 W - 6.7921$	0.945
6	80 ± 1	$\ln(K) = 1.4934 W - 6.1551$	0.943
6	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2962 W - 5.5173$	0.944
8	65 ± 1	$\ln(K) = 1.5900 W - 7.7105$	0.990
8	70 ± 1	$\ln(K) = 1.5838 W - 6.8045$	0.967
8	75 ± 1	$\ln(K) = 1.6629 W - 6.8803$	0.940
8	80 ± 1	$\ln(K) = 1.4852 W - 6.1489$	0.942
8	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2914 W - 5.5142$	0.942
10	65 ± 1	$\ln(K) = 1.6107 W - 7.7279$	0.991
10	70 ± 1	$\ln(K) = 1.5956 W - 6.7825$	0.970
10	75 ± 1	$\ln(K) = 1.6473 W - 6.8274$	0.937
10	80 ± 1	$\ln(K) = 1.4818 W - 6.1396$	0.940
10	85 ± 1	$\ln(K) = 1.2963 W - 5.5353$	0.941

\* W คือ ร้อยละของความเข้มข้น

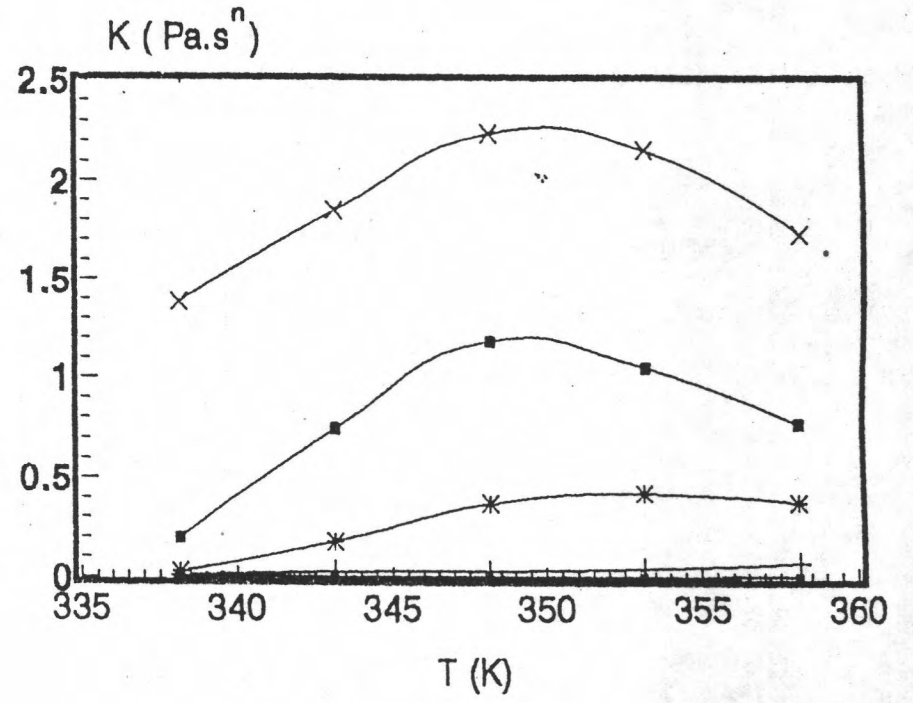


ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization พบว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ เป็นแบบพาราโบลา (รูปที่ 4.8) และหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ตารางที่ 4.11) พบว่า ค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังจะเพิ่มขึ้นแบบพาราโบลา กับอุณหภูมิ ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ คือค่า consistency index เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิกำลังสองที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-5 ซึ่งแตกต่างจากค่า consistency index ที่พบในแป้งข้าวสาลี ที่อุณหภูมิ 50-70°C ความเข้มข้นร้อยละ 2.5-8.0 (Doublier, 1981) และที่พบใน cross-linked and esterified potato starch ที่ผ่านการเกิด gelatinization แล้ว และวัดสมบัติการไหลที่ความเข้มข้นร้อยละ 3-10 อุณหภูมิ 10-90°C (Harrod, 1989) ที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index กับอุณหภูมิสัมบูรณ์จะเป็นแบบ Arrhenius

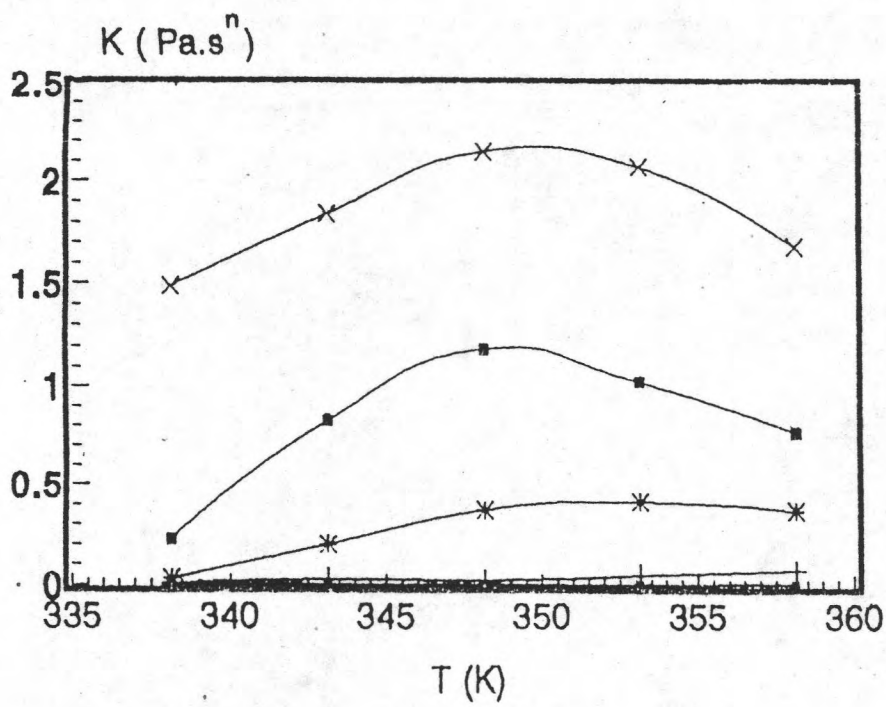
เมื่อศึกษาผลของความเข้มข้นในช่วงร้อยละ 1-5 และอุณหภูมิในช่วง 65-85°C ที่มีต่อค่า consistency index ที่เวลา 2-10 นาที พบว่า ความสัมพันธ์ดังกล่าว เป็นไปตามตารางที่ 4.12 และเมื่อพิจารณาทั้งอุณหภูมิ เวลา และความเข้มข้น ที่มีผลต่อค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในช่วงเวลา 2-10 นาที อุณหภูมิ 65-85°C และความเข้มข้นร้อยละ 1-5 สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทำ multiple regression ที่ดีที่สุด ( $R^2 = 0.975$ ) เป็นไปตามสมการ (12)



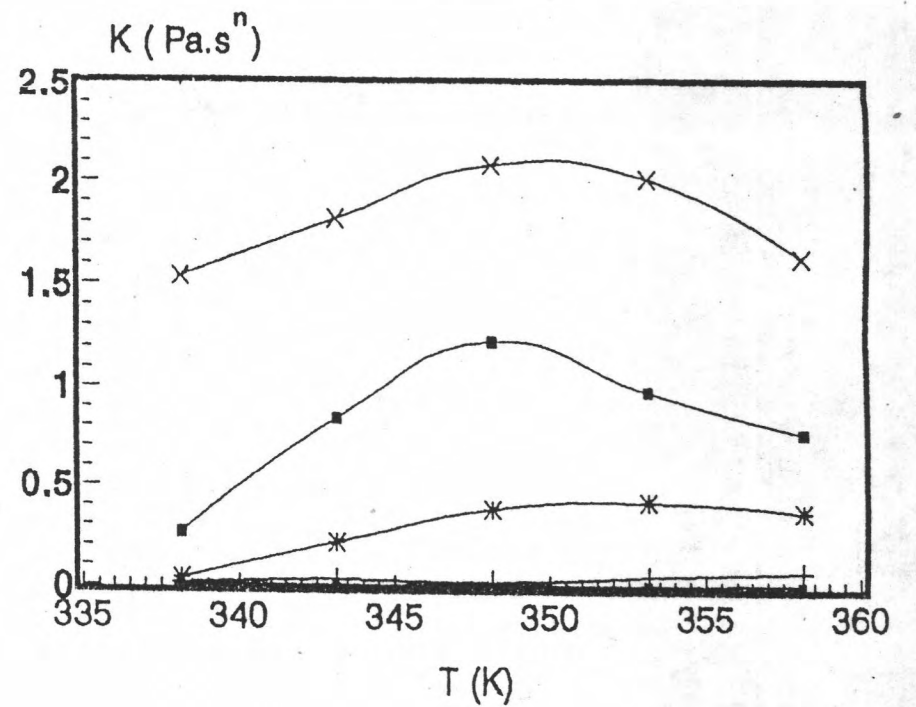
(ก)



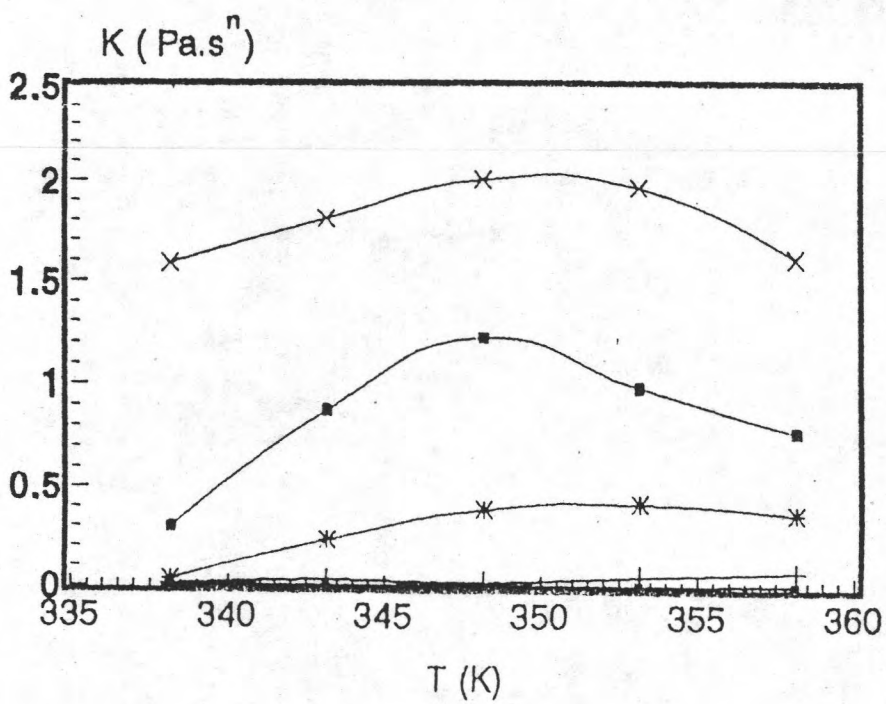
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลัง

กับอุณหภูมิ ที่เวลาและความเข้มข้นต่างๆ

- conc 1% + conc 2%

\* conc 3% ■ conc 4%

x conc 5%

(ก) 2 นาที (ข) 4 นาที (ค) 6 นาที

(ง) 8 นาที (จ) 10 นาที

ตารางที่ 4.11 สมการ regression ของ consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการศึกษาการเกิด gelatinization กับอุณหภูมิสัมบูรณ์ ที่เวลา 2-10 นาที

เวลา (นาที)	ความเข้มข้น (ร้อยละ)	สมการ regression <sup>a</sup>	R <sup>2</sup>
2	1	$K = 5.545 - 2.99 \times 10^{-4} T + 8.56 \times 10^{-7} T^2$	0.965
4	1	$K = 1.360 - 8.07 \times 10^{-5} T + 1.20 \times 10^{-5} T^2$	0.993
6	1	$K = 1.693 - 9.98 \times 10^{-5} T + 1.47 \times 10^{-5} T^2$	0.969
8	1	$K = 1.712 - 1.01 \times 10^{-2} T + 1.49 \times 10^{-5} T^2$	0.970
10	1	$K = 1.335 - 7.90 \times 10^{-5} T + 1.17 \times 10^{-5} T^2$	0.968
2	2	$K = 15.224 - 9.04 \times 10^{-2} T + 1.34 \times 10^{-4} T^2$	0.954
4	2	$K = 6.241 - 3.85 \times 10^{-2} T + 5.93 \times 10^{-5} T^2$	0.943
6	2	$K = 11.389 - 6.81 \times 10^{-2} T + 1.02 \times 10^{-4} T^2$	0.914
8	2	$K = 14.976 - 8.86 \times 10^{-2} T + 1.31 \times 10^{-4} T^2$	0.884
10	2	$K = 15.202 - 8.99 \times 10^{-2} T + 1.33 \times 10^{-4} T^2$	0.884
2	3	$K = -170.272 + 0.96 T - 1.35 \times 10^{-5} T^2$	0.958
4	3	$K = -189.322 + 1.07 T - 1.51 \times 10^{-5} T^2$	0.969
6	3	$K = -197.517 + 1.12 T - 1.58 \times 10^{-5} T^2$	0.977
8	3	$K = -208.505 + 1.18 T - 1.67 \times 10^{-5} T^2$	0.984
10	3	$K = -220.910 + 1.25 T - 1.78 \times 10^{-5} T^2$	0.987
2	4	$K = -838.319 + 4.79 T - 6.83 \times 10^{-5} T^2$	0.959
4	4	$K = -782.619 + 4.47 T - 6.38 \times 10^{-5} T^2$	0.973
6	4	$K = -784.240 + 4.49 T - 6.41 \times 10^{-5} T^2$	0.974
8	4	$K = -777.469 + 4.45 T - 6.34 \times 10^{-5} T^2$	0.937
10	4	$K = -759.963 + 4.35 T - 6.22 \times 10^{-5} T^2$	0.948
2	5	$K = -948.441 + 5.43 T - 7.76 \times 10^{-5} T^2$	0.947
4	5	$K = -785.439 + 4.50 T - 6.44 \times 10^{-5} T^2$	0.911
6	5	$K = -684.785 + 3.73 T - 5.33 \times 10^{-5} T^2$	0.922
8	5	$K = -587.582 + 3.33 T - 4.77 \times 10^{-5} T^2$	0.939
10	5	$K = -482.254 + 2.78 T - 3.98 \times 10^{-5} T^2$	0.932

\* T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

ตารางที่ 4.12 สมการ regression ของค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 1-5 อุณหภูมิ 65-85°C ที่เวลา 2-10 นาที

เวลา (นาที)	สมการ regression *	R <sup>2</sup>
2	$\ln(K) = - 814.015 - 0.1449 W^2 + 6.2802 W$ $- 0.0112 W*T + 4.5236 T - 0.0063 T^2$	0.974
4	$\ln(K) = - 768.090 - 0.1755 W^2 + 6.6638 W$ $- 0.0118 W*T + 4.2657 T - 0.0060 T^2$	0.978
6	$\ln(K) = - 677.837 + 0.1882 W^2 + 7.1847 W$ $- 0.0130 W*T + 3.7475 T - 0.0052 T^2$	0.976
8	$\ln(K) = - 608.010 - 0.1956 W^2 + 7.5416 W$ $- 0.0139 W*T + 3.3473 T - 0.0047 T^2$	0.975
10	$\ln(K) = - 573.507 - 0.2128 W^2 + 8.2893 W$ $- 0.0158 W*T + 3.1470 T - 0.0044 T^2$	0.973

\* W คือร้อยละของความเข้มข้น

T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ (เคลวิน)

$$\begin{aligned}
 \ln(K) = & - 695.657 + 6.178 W - 0.181 W^2 + 3.842 T \\
 & - 5.35 \times 10^{-2} T^2 + 0.432 t - 4.60 \times 10^{-4} t^2 \\
 & - 0.010 W*T + 0.151 W*t - 1.22 \times 10^{-3} T*t \\
 & - 4.20 \times 10^{-4} W*T*t
 \end{aligned} \tag{12}$$

เช่นเดียวกับในกรณีของแป้งข้าวเหนียว consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization ที่มีความเข้มข้นอยู่ในช่วงร้อยละ 1-5 อุณหภูมิอยู่ในช่วง 65-85°C และเวลาในช่วง 2-10 นาที สามารถประมาณได้จากสมการ (12) เช่น consistency index ที่ความเข้มข้นร้อยละ 4 อุณหภูมิ 80°C เวลา 2 นาที ของแป้งมันสำปะหลังจะมีค่าเท่ากับ 1.0687 แต่ค่าเฉลี่ยของค่า consistency index ที่ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลาดังกล่าว (ภาคผนวก ค.6) มีค่าเท่ากับ 1.0909 ซึ่งมีความผิดพลาดไปร้อยละ 2.04 เท่านั้น

เนื่องจากสามารถประมาณค่า flow-behavior index และ consistency index ของแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization ได้ จึงสามารถอธิบายสมบัติการไหลหรือประมาณค่า apparent viscosity ที่ shear rate ใด ๆ ของแป้งมันสำปะหลังในช่วงที่เกิดการ gelatinization ได้

#### 4.2 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวในระหว่างการเกิด gelatinization

##### 4.2.1 แป้งข้าวเหนียว

จากภาพที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงโพลาไรซ์ เมื่อใช้กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า เม็ดแป้งข้าวเหนียวมีขนาดเล็กมาก จนสังเกตลักษณะของ birefringence ได้ไม่ชัดเจน (รูปที่ 4.9 ก) และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของเม็ดแป้งข้าวเหนียวให้สูงขึ้นอยู่ระหว่าง 65-70°C เม็ดแป้งจะมีขนาดใหญ่ขึ้น (รูปที่ 4.9 ข-ค) เพราะเม็ดแป้งข้าวเหนียวมีการดูดกลืนน้ำเข้าไปใน



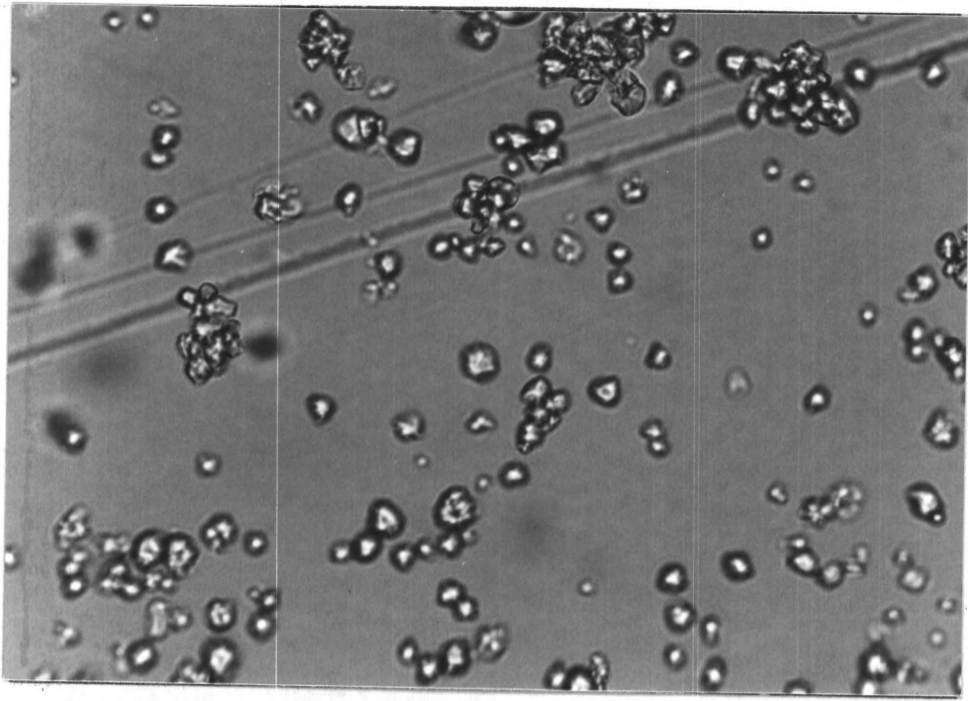
เม็ดแป้งในระหว่างการเกิด gelatinization และเม็ดแป้งข้าวเหนียวที่เกิด gelatinization แล้วจะเริ่มรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขึ้น ซึ่งสนับสนุนข้อมูลจากการทดลองหาสมบัติการไหลของแป้งข้าวเหนียวคือ ค่า consistency index มีค่าเพิ่มขึ้นระหว่างอุณหภูมิ 65-70°C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปถึง 75°C หรือมากกว่า (80-85°C) (รูปที่ 4.9 ง-ฉ) เม็ดแป้งข้าวเหนียวซึ่งเกิด gelatinization จนสมบูรณ์แล้ว จะมีลักษณะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อนและไม่สามารถแยกเม็ดแป้งแต่ละเม็ดออกจากกันได้ สำหรับค่า consistency index ที่วัดในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวนี้มีค่าเพิ่มขึ้นตลอดช่วงอุณหภูมิ 75-85°C

#### 4.2.2 แป้งมันสำปะหลัง

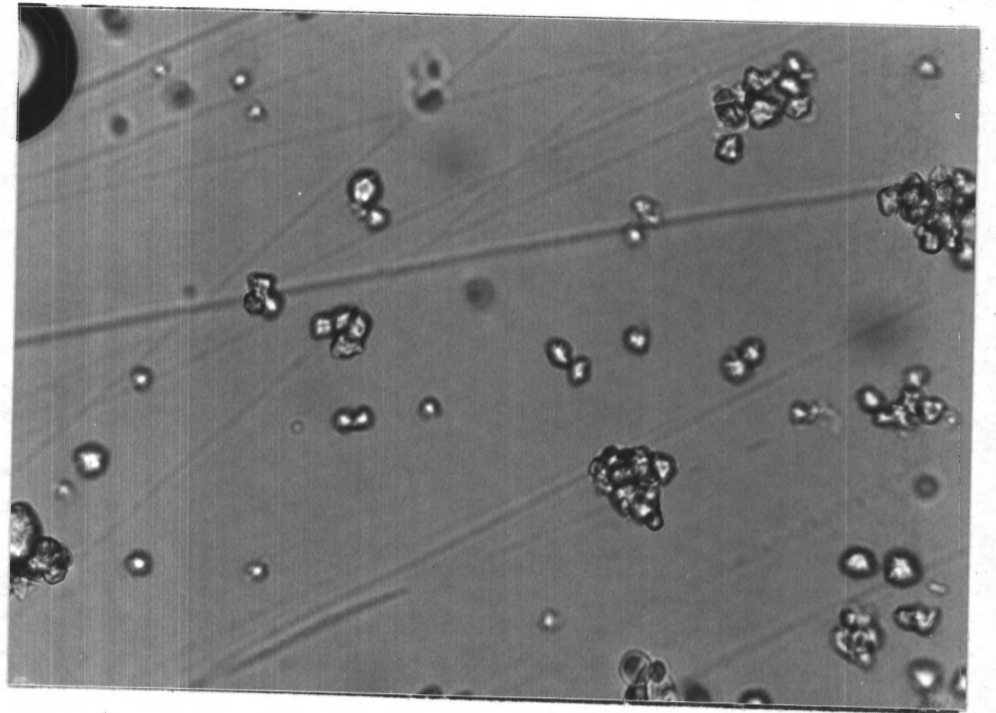
จากรูปที่ 4.10 ก พบว่า ที่อุณหภูมิ 65°C เม็ดแป้งมันสำปะหลังยังปรากฏ birefringence ซึ่งแสดงว่า ที่อุณหภูมิ 60°C เม็ดแป้งมันสำปะหลังยังไม่เกิด gelatinization แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 65°C (รูปที่ 4.10 ข) เม็ดแป้งมันสำปะหลังจะมีขนาดใหญ่ขึ้นลักษณะของ birefringence เริ่มหายไป แสดงว่าเม็ดแป้งมันสำปะหลังบางส่วนได้เกิด gelatinization ไปบ้างแล้ว ซึ่งสนับสนุนข้อมูลที่ได้จากการทดลองหาสมบัติการไหลของแป้งมันสำปะหลังที่ค่า consistency index เพิ่มขึ้น และจะเกิด gelatinization มากขึ้นที่อุณหภูมิ 70-75°C (รูปที่ 4.10 ค-ง) ซึ่งในช่วงอุณหภูมินี้ยังสามารถมองเห็นเม็ดแป้งมันสำปะหลังที่เกิดการบวมพองได้เป็นเม็ดอย่างสมบูรณ์ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นไปอีกคืออยู่ในช่วง 80°C จะไม่เห็นลักษณะของ birefringence อีก (รูปที่ 4.10 ฉ) แสดงว่า เม็ดแป้งมันสำปะหลังเกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์แล้ว และลักษณะของเม็ดแป้งมันสำปะหลังในช่วงอุณหภูมิ 80°C นี้แตกต่างจากเม็ดแป้งมันสำปะหลังในช่วงอุณหภูมิ 70-75°C คือ มีเม็ดแป้งมันสำปะหลังบางส่วนที่เริ่มแตกออก ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการหาสมบัติการไหลของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการเกิด gelatinization คือ ในช่วงอุณหภูมิ 65-75°C ที่ค่า consistency index มีค่าสูงขึ้น และจะลดลง เมื่ออุณหภูมิสูงไปกว่า 75°C ซึ่งเป็นช่วงที่เม็ดแป้งมันสำปะหลังแตก ทำให้ความหนืดของเจลแป้งมันสำปะหลังมีค่าลดลงส่วนที่อุณหภูมิ 85°C (รูปที่ 4.10 ฉ) ลักษณะของเม็ดแป้งจะไม่แตกต่างกับเม็ดแป้งที่อุณหภูมิ 80°C เนื่องจากเม็ดแป้งเกิด gelatinization โดยสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และการเปลี่ยนแปลงค่า consistency index ของแป้งมันสำปะหลังในระหว่างการ



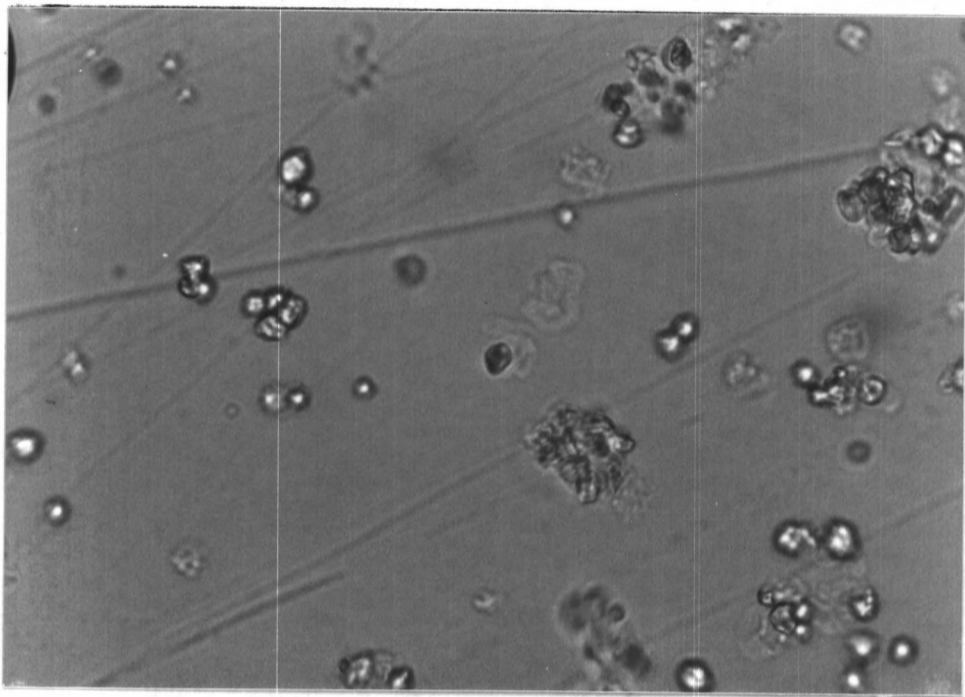
เกิด gelatinization กับอุณหภูมิจึงมีลักษณะที่มีการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วง ๆ คือ ช่วงก่อนและหลัง  
การเกิด gelatinization อย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่งผลให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า consistency  
index กับอุณหภูมิ เป็นแบบสมการพาราโบลา



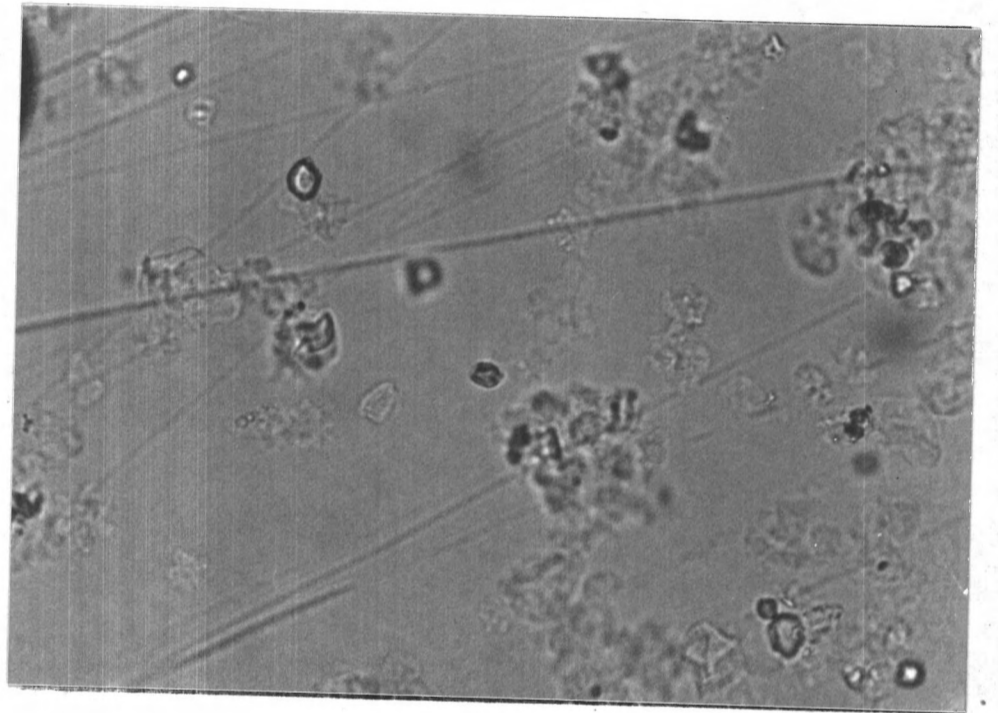
(ก)



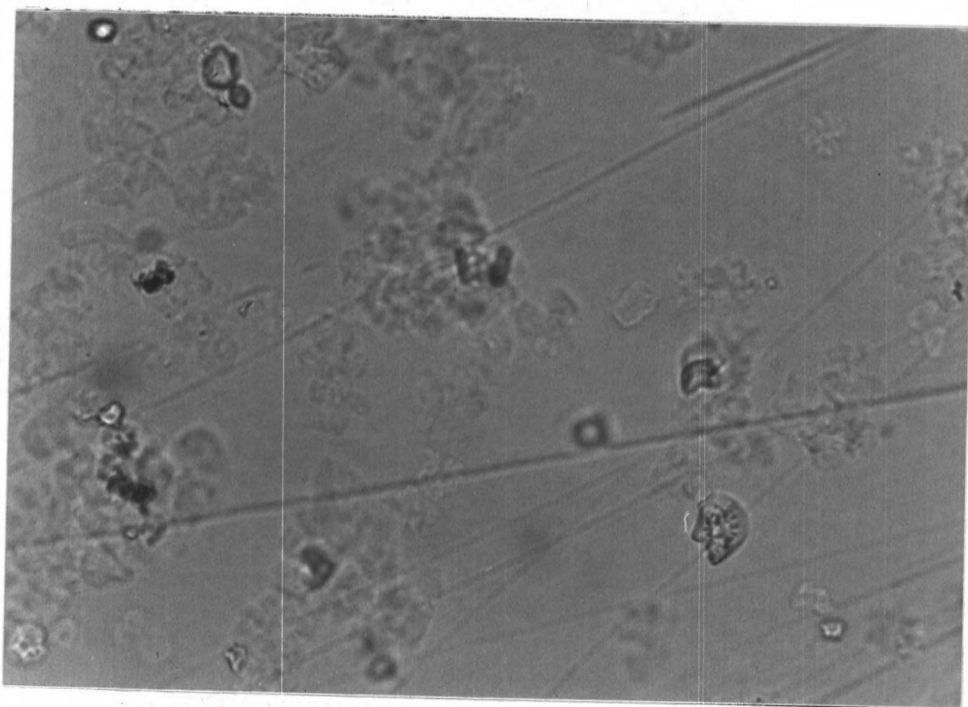
(ข)



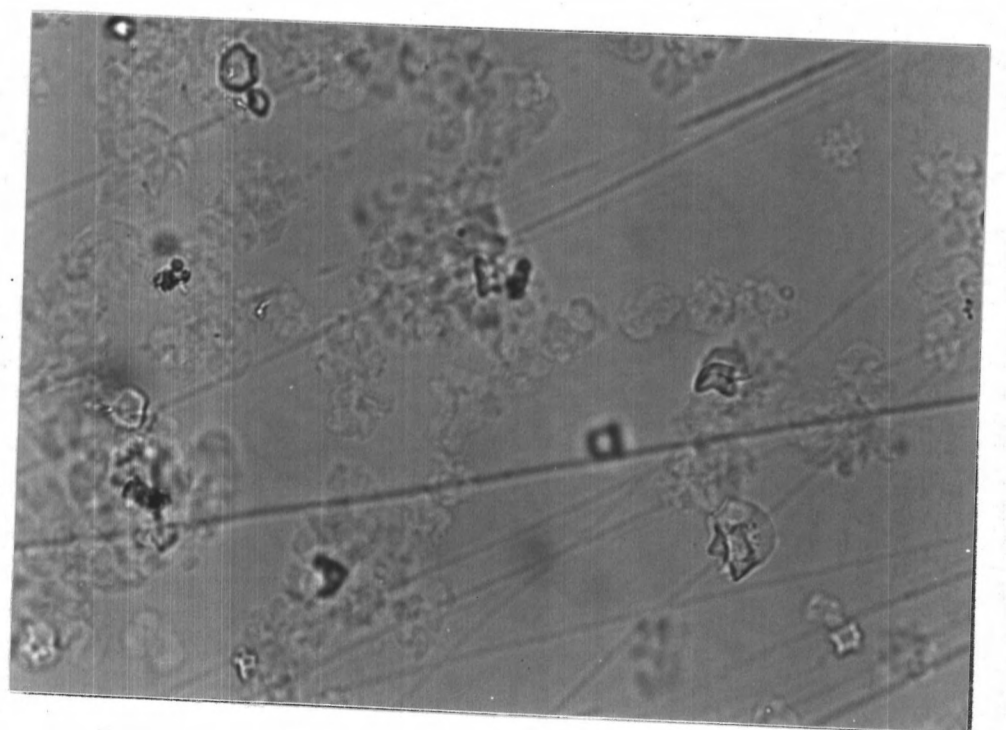
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

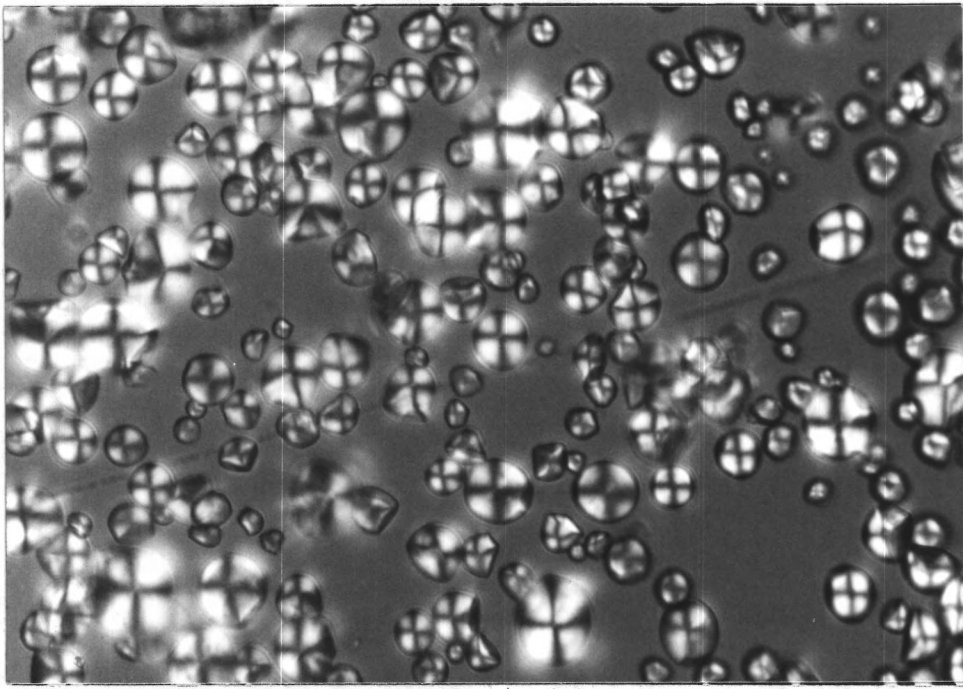
รูปที่ 4.9 เม็ดแป้งข้าวเหนียวถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 500 เท่า

(ก) อุณหภูมิ 60 °C ใช้แสงโพลาไรซ์ (ข) อุณหภูมิ 65 °C ใช้แสงโพลาไรซ์

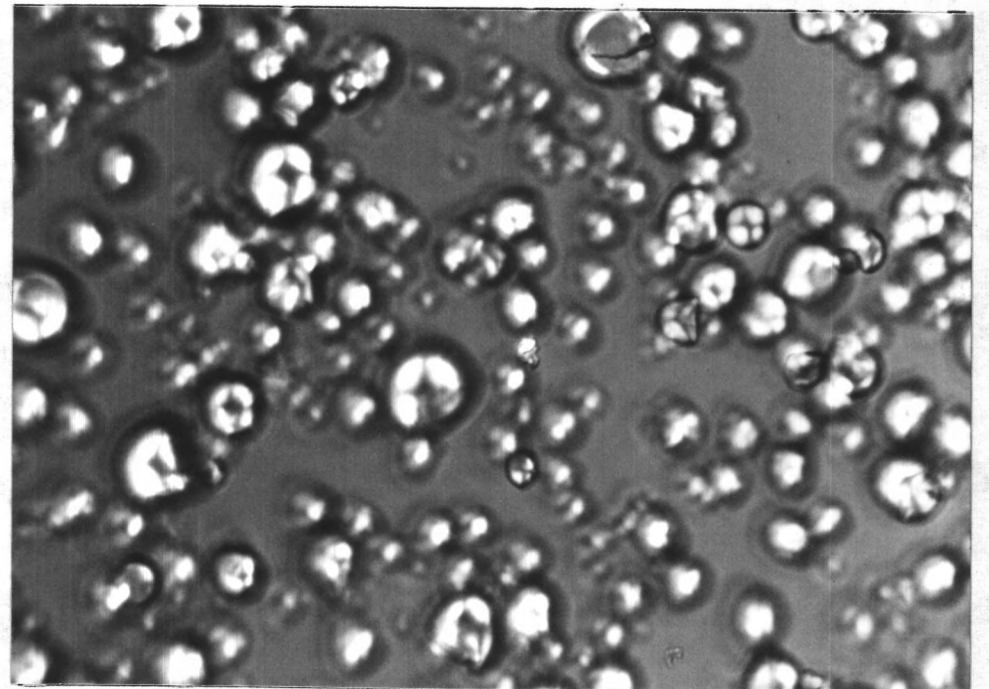
(ค) อุณหภูมิ 70 °C ใช้แสงโพลาไรซ์ (ง) อุณหภูมิ 75 °C

(จ) อุณหภูมิ 80 °C (ฉ) อุณหภูมิ 85 °C

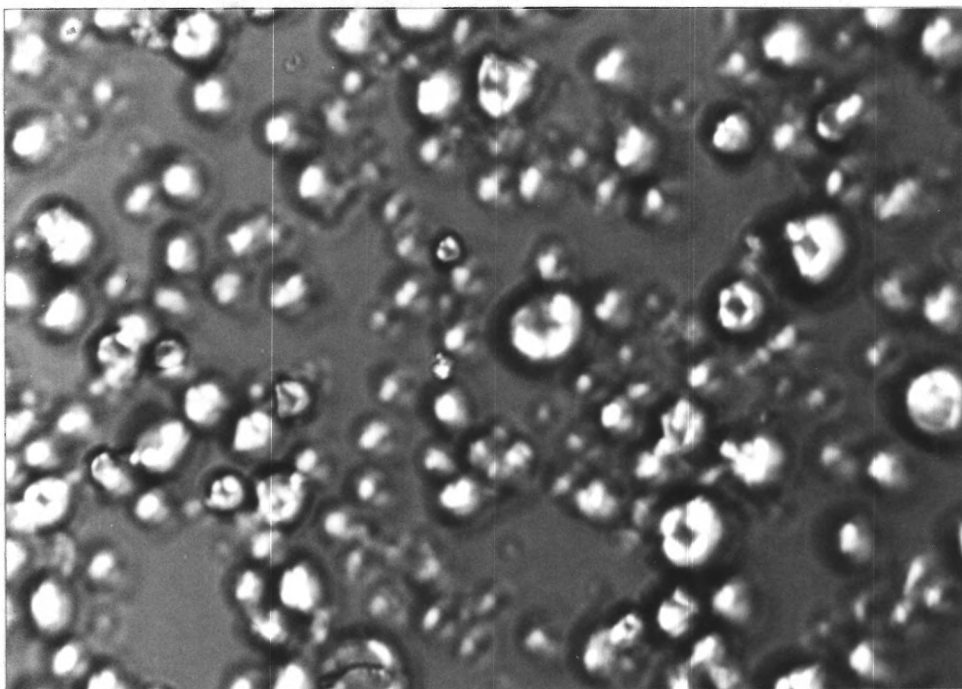




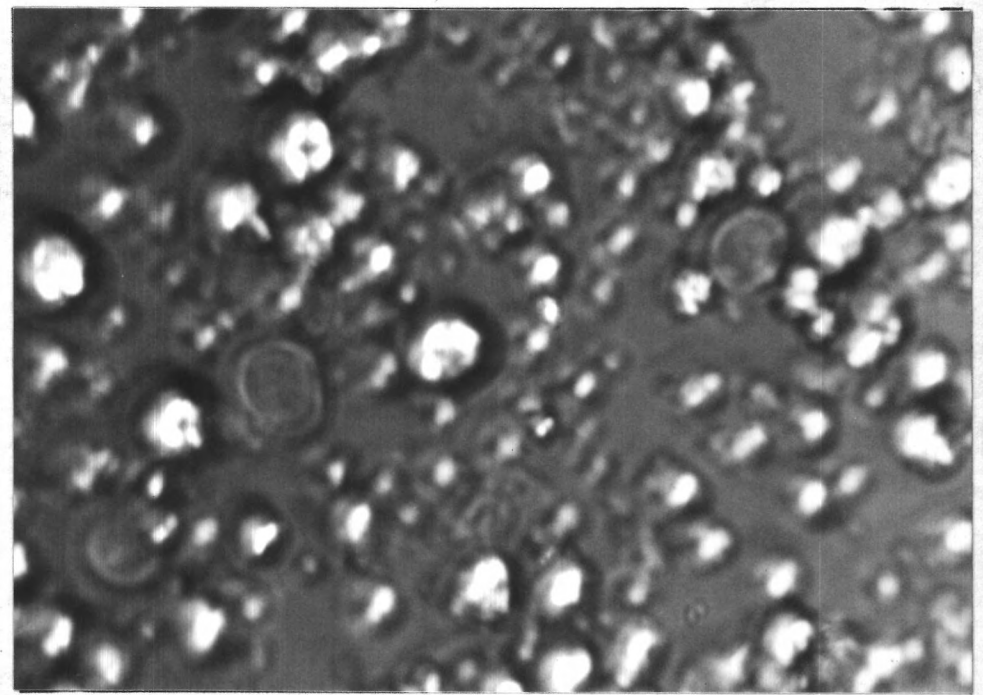
(ก)



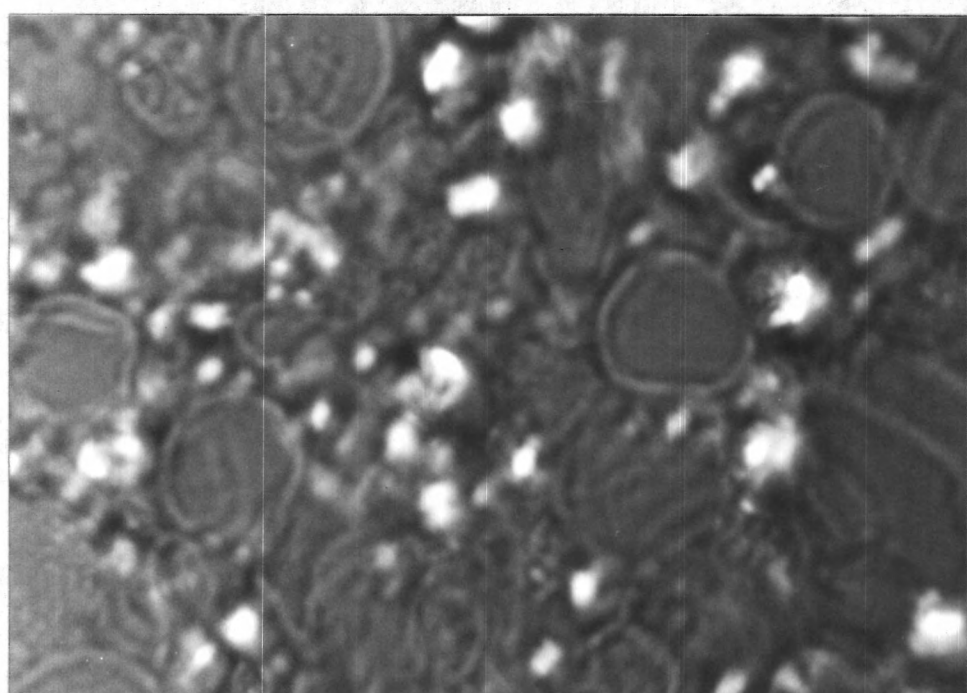
(ข)



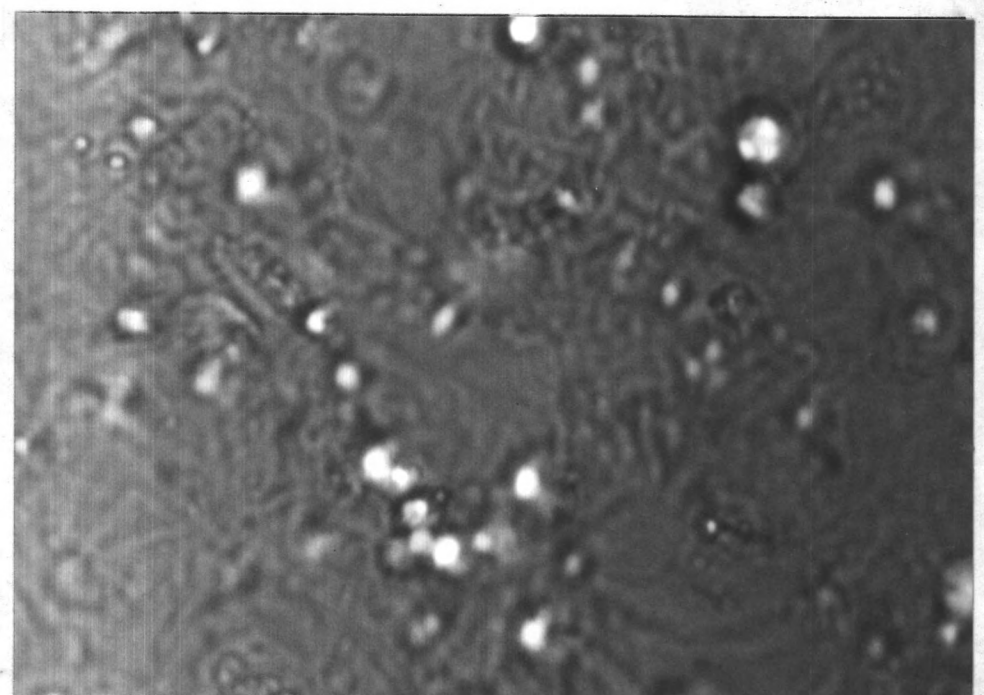
(ค)



(ง)



(จ)



(ฉ)

รูปที่ 4.10 เม็ดแป้งมันสำปะหลังถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 500 เท่า โดยใช้แสง โพลารไรซ์

(ก) อุณหภูมิ 60 °C (ข) อุณหภูมิ 65 °C

(ค) อุณหภูมิ 70 °C (ง) อุณหภูมิ 75 °C

(จ) อุณหภูมิ 80 °C (ฉ) อุณหภูมิ 85 °C