บทที่ 4

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบ

ข้าวหักที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นข้าวหักพันธุ์ข้าวหอมมะลิชนิด Screening คือ มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1/4 ถึง 1/3 ของเมล็ดข้าวปกติ นำมาบดให้เป็นแป้ง โดยกำหนดขนาดของเม็ดแป้งให้สามารถลอดผ่านตะแกรงขนาด 200 mesh แล้วนำมาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีจะให้ผลดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 องค์ประกอบทางเคมีของแป้งข้าวเจ้าซึ่งได้จากข้าวหักพันธุ์ข้าวหอมมะลิ

องค์ประกอบ	ปริมาณ (ร้อยละ)[1]
ความชื้น	10.99 ± 0.27
โปรตีน	6.49 ± 0.44
ไขมัน	1.36 ± 0.26
เส้นใย	0.22 ± 0.02
เถ้า	0.76 ± 0.02
คาร์โบไฮเดรต	80.18[2]

หมายเหตุ 1 ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2 ค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง

จากตารางที่ 5 พบว่า แป้งข้าวเจ้าที่ผลิตจากข้าวหักพันธุ์ข้าวหอมมะลิจะให้ปริมาณคาร์โบไฮเดรตเฉลี่ยร้อยละ 80.18 ซึ่งค่านี้จะนำไปใช้ในการคำนวณหาค่า DE ในขั้นตอนต่อไป ข้อสังเกตประการหนึ่งของผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่า ปริมาณของเถ้าค่อนข้างสูงทั้งนี้เพราะปลายข้าวหักที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีการปนเปื้อนของกรวดทรายและเปลือกข้าวมากแม้จะมีการคัดออกในขั้นตอนก่อนการนำมาบดแล้วก็ตาม

<u>การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลว</u>

ขั้นตอนแรกทำการทดลองแบบลองผิดลองถูก (Trial and error) โดยยึดหลักการว่า จะใช้ปัจจัยตัวแปรที่ต้องการศึกษาแต่ละตัวในปริมาณต่ำที่สุด เพื่อประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 10-20 จะต้องใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เท่ากับร้อยละ 0.02 ถึง 0.08 อุณหภูมิเท่ากับ 80 ถึง 90 °ซ. เวลา 75 ถึง 105 นาที และเมื่อนำมาศึกษาต่อโดยใช้แผนการทดลองแบบ Box and Behnken design สภาวะการทดลองแสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 สภาวะและตัวแปรที่ต้องการศึกษา

ลำดับ	สภาวะที่ใช้		
	เอนไซม์(ร้อยละ)	อุณหภูมิ(°ซ.)	เวลา(นาที)
1	0.02	80	90
2	0.02	90	90
3	0.08	80	90
4	0.08	90	90
5	0.02	85	75
6	0.02	85	105
7	0.08	85	75
8	0.08	85	105
9	0.05	80	75
10	0.05	80	105
11	0.05	90	75
12	0.05	90	105
13	0.05	85	90
14	0.05	85	90
15	0.05	85	90

การวิเคราะห์และประเมินสมบัติทางเคมีของมอลโทเดกซ์ทริน

1. การวิเคราะห์ค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายของมอลโทเดกซ์ทริน

เมื่อนำลภาวะที่ต้องการศึกษาทั้งหมดตามตารางที่ 6 มาทำการวิเคราะห์ค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายได้ (% Liquefied starch) จะให้ผลดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การศึกษาสมบัติทางเคมีบางประการของมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้

ลำดับที่	สภาวะการผลิต			DE	% Liquefied starch
	เอนไซม์(ร้อยละ)	อุณหภูมิ(°ซ)	เวลา(นาที)		
1	0.02	80	90	10.60 ± 0.36	44.26 ± 0.56
2	0.02	90	90	10.09 ± 0.00	43.29 ± 0.23
3	0.08	80	90	19.22 ± 0.35	61.47 ± 0.59
4	0.08	90	90	17.63 ± 0.27	59.73 ± 1.61
5	0.02	85	75	9.39 ± 0.08	35.61 ± 0.11
6	0.02	85	105	14.34 ± 0.26	50.26 ± 0.30
7	0.08	85	75	17.95 ± 0.54	59.54 ± 0.67
8	0.08	85	105	20.11 ± 0.54	63.98 ± 0.23
9	0.05	80	75	15.35 ± 0.45	56.34 ± 0.15
10	0.05	80	105	17.32 ± 0.18	58.67 ± 0.11
11	0.05	90	75	13.01 ± 0.54	45.46 ± 0.26
12	0.05	90	105	16.62 ± 0.63	56.28 ± 0.16
13	0.05	85	90	14.33 ± 0.27	50.64 ± 1.07
14	0.05	85	90	14.43 ± 0.37	50.26 ± 1.11
15	0.05	85	90	14.27 ± 0.54	49.73 ± 1.71

จากตารางที่ 7 สังเกตได้ว่า ค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายได้มีแนวโน้มเป็นไปในแนวทางเดียวกัน คือ เมื่อค่า DE มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าปริมาณแป้งที่ละลายได้ก็จะมีค่าสูงขึ้น ในขณะที่เมื่อค่า DE มีค่าลดลง ปริมาณแป้งที่ละลายได้ก็จะมีค่าต่ำลงทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสในการย่อยสลายสายโมเลกุลของแป้งจะมีความสัมพันธ์กับค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายได้นั่นคือ เมื่อค่า DE มีค่าเพิ่มสูงขึ้นแสดงว่า เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสทำการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งเพิ่มขึ้น สายโมเลกุลของแป้งจะมีขนาดเล็กลง ทำให้ปริมาณแป้งที่ละลายได้มีค่าสูงขึ้น

เมื่อนำค่า DE และสภาวะในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวมาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (ANOVA) พบว่า ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสและเวลาในการผลิตของการทดลองนี้ จะมีผลต่อค่า DE ของมอลโทเดกซ์ทรินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ในขณะที่อุณหภูมิในการผลิตจะไม่มีผลต่อค่า DE นั่นคือความแตกต่างของอุณหภูมิในช่วง 80-90 °ซ. นั้น จะให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ไม่แตกต่างกันทางสถิติทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่กำหนดในสภาวะการผลิตคือ 80-90 °ซ. เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม (optimum temperature) ในการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (Kennedy, 1987) จึงให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ซึ่งเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE ความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาในการผลิตสำหรับช่วงอุณหภูมิ 80-90 ด้วยวิธี Multiple regression จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5

$$Y = 32.474284 + 272.03312\ X_1 - 0.729212\ X_2 - 54.91453\ X_1^2 + 0.005069\ X_2^2 - 1.55\ X_1X_2 \quad \ldots\ldots (5)$$

$$R^2 = 0.95$$

โดย Y คือ ค่า Dextrose equivalent (DE)

X_1 คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (ร้อยละ)

X_2 คือ เวลาที่ใช้ในการผลิต (นาที)

อย่างไรก็ตามถ้าต้องการจะหาความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ศึกษาทั้งหมดอันได้แก่ ความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส (X_1) อุณหภูมิ (X_2) และเวลา (X_3) ในการผลิต จะให้ความสัมพันธ์แสดงดังสมการที่ 6

$$Y = 102.21162 + 424.31019\ X_1 - 1.10567\ X_2 - 1.19908\ X_3 - 47.68519\ X_1^2 + 0.00338\ X_2^2 + 0.00510\ X_3^2 - 1.8\ X_1X_2 - 1.55\ X_1X_3 + 0.00547\ X_2X_3 \quad \ldots\ldots\ldots (6)$$

$$R^2 = 0.98$$

จากสมการทั้งสองพบว่า ค่า R^2 ของสมการที่ 6 มีค่าสูงกว่าค่า R^2 ของสมการที่ 5 ดังนั้นความถูกต้องเที่ยงตรงของสมการที่ 6 ในการนำไปทำนายสภาวะการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE แตกต่างกันจึงมีมากกว่าสมการที่ 5 ซึ่งการทดลองนี้จะนำสมการที่ 6 มาใช้ทำนายสภาวะต่างๆในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวต่อไปแต่เนื่องจากการคำนวณค่าความแปรปรวน (ANOVA) ข้างต้นระบุว่า อุณหภูมิของการผลิตในช่วง 80-90 °ซ. เป็นปัจจัยที่ไม่ทำให้มีค่า DE แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยอุณหภูมิในการผลิตเป็นปัจจัยคงที่ในการแปลงค่าสมการที่ 6 ซึ่งจะได้ค่าความสัมพันธ์ใหม่ระหว่างค่า DE ความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาในการผลิตที่อุณหภูมิ 80 85 และ 90 °ซ. แสดงดังสมการที่ 7 8 และ 9

อุณหภูมิ 80 °ซ. จะได้สมการ คือ

$$Z = 35.40946 - 0.76172\ X + 280.31019\ Y + 0.00510\ X^2 - 47.68519\ Y^2 - 1.55\ XY \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

อุณหภูมิ 85 °ซ. จะได้สมการ คือ

$$Z = 32.6721 - 0.73439\ X + 271.31019\ Y + 0.00510\ X^2 - 47.68519\ Y^2 - 1.55\ XY \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

อุณหภูมิ 90 °ซ. จะได้สมการ คือ

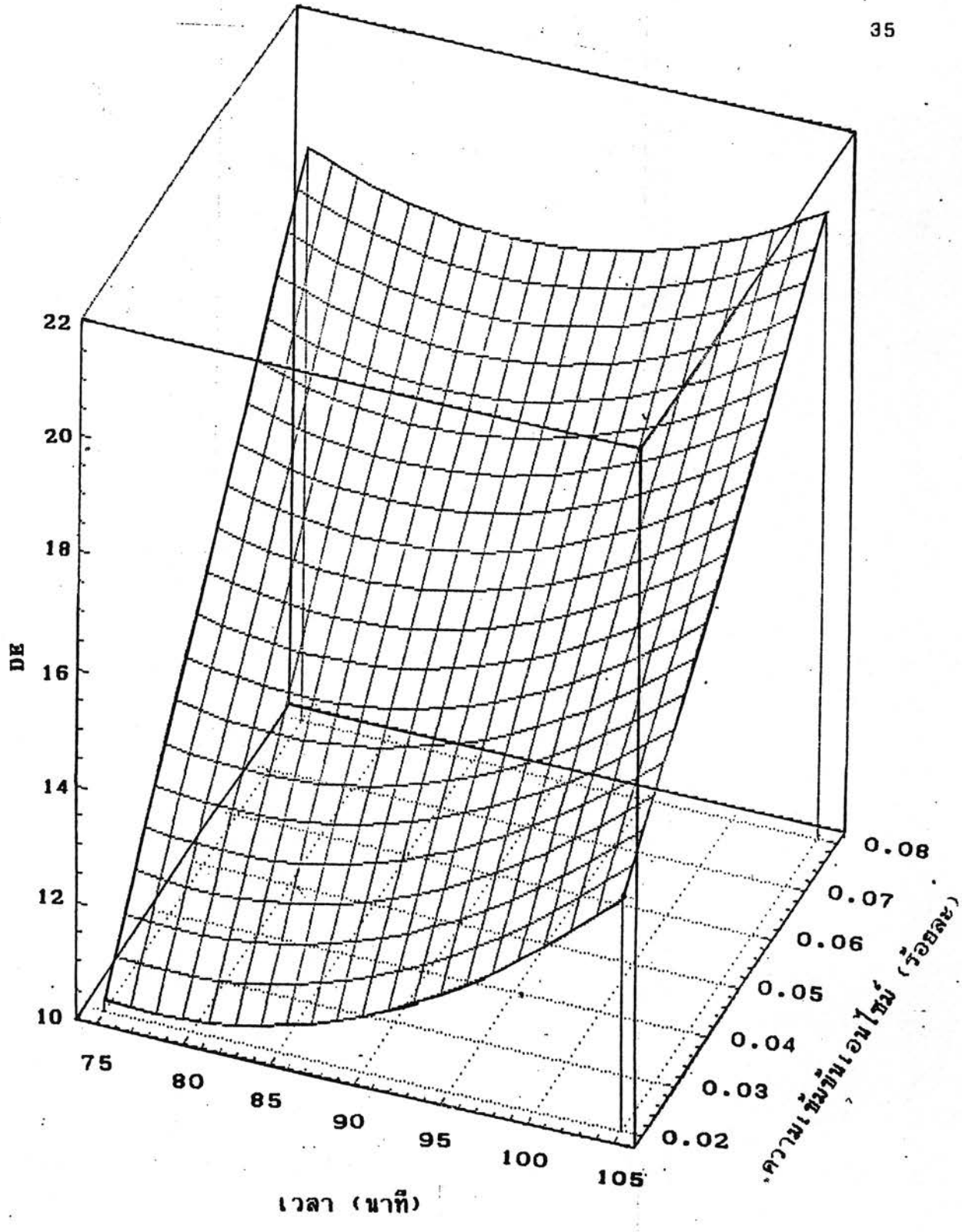
$$Z = 30.10389 - 0.70705\ X + 262.31019\ Y + 0.00510\ X^2 - 47.68519\ Y^2 - 1.55\ XY \quad \text{.....(9)}$$

โดย Z คือ ค่า Dextrose equivalent (DE)

X คือ เวลาในการผลิต (นาที)

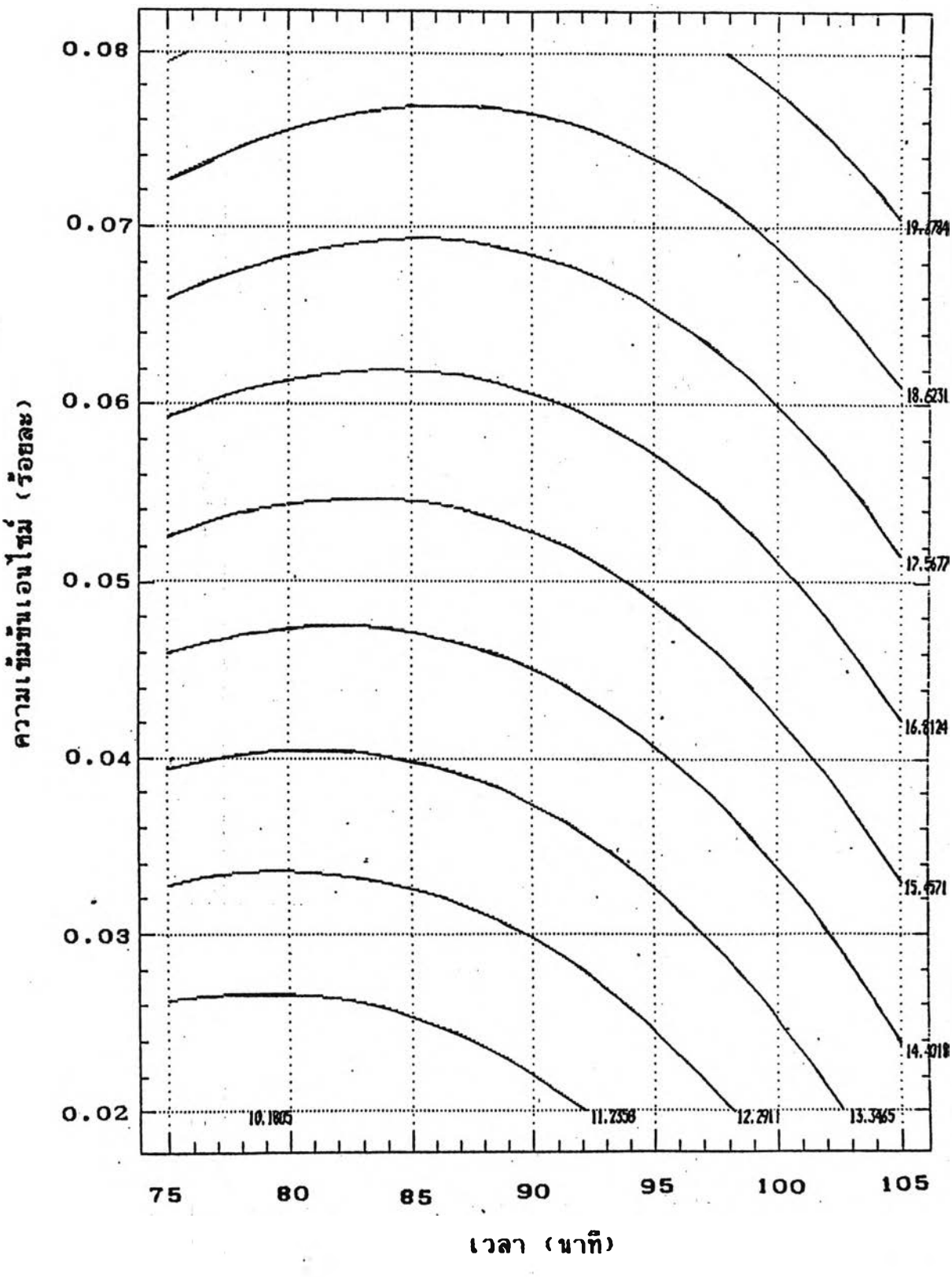
Y คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ (ร้อยละ)

เมื่อนำสมการที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส เวลาที่ใช้ในการผลิตและค่า DE ที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ พบว่า ที่อุณหภูมิ 80 °ซ. จะให้ลักษณะของกราฟสามมิติ (surface plot) ดังรูปที่ 5 และกราฟสองมิติ (contour plot) ดังรูปที่ 6 ที่อุณหภูมิ 85 °ซ. จะให้ลักษณะของกราฟสามมิติดังรูปที่ 7 และกราฟสองมิติดังรูปที่ 8 ที่อุณหภูมิ 90 °ซ. จะให้ลักษณะของกราฟสามมิติดังรูปที่ 9 และกราฟสองมิติดังรูปที่ 10 ซึ่งจากกราฟสามมิติและสองมิติทั้งหมดจะเห็นได้ว่ากราฟทั้งหมดสามารถใช้ในการทำนายค่า DE จากสภาวะในการผลิตที่แตกต่างกันและยังพบว่าสามารถผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE เท่ากันในสภาวะการผลิตที่แตกต่างกันได้ ซึ่งเมื่อทดลองนำไปใช้ในการทำนายค่า DE และปัจจัยที่เป็นสภาวะในการผลิตจริงพบว่าความสัมพันธ์ตามกราฟและสมการที่ได้สามารถนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

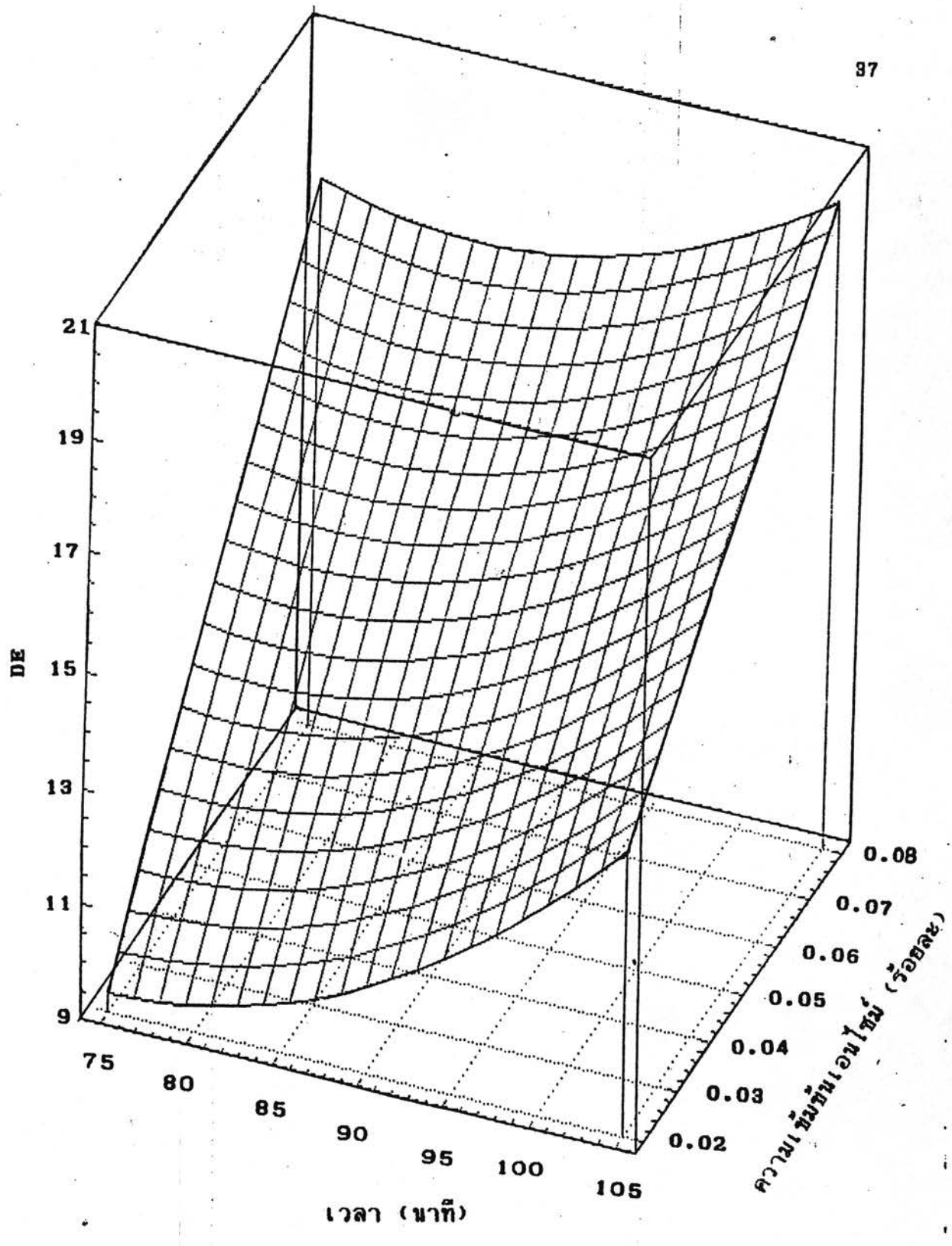


รูปที่ 5 surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 80 °ซ.

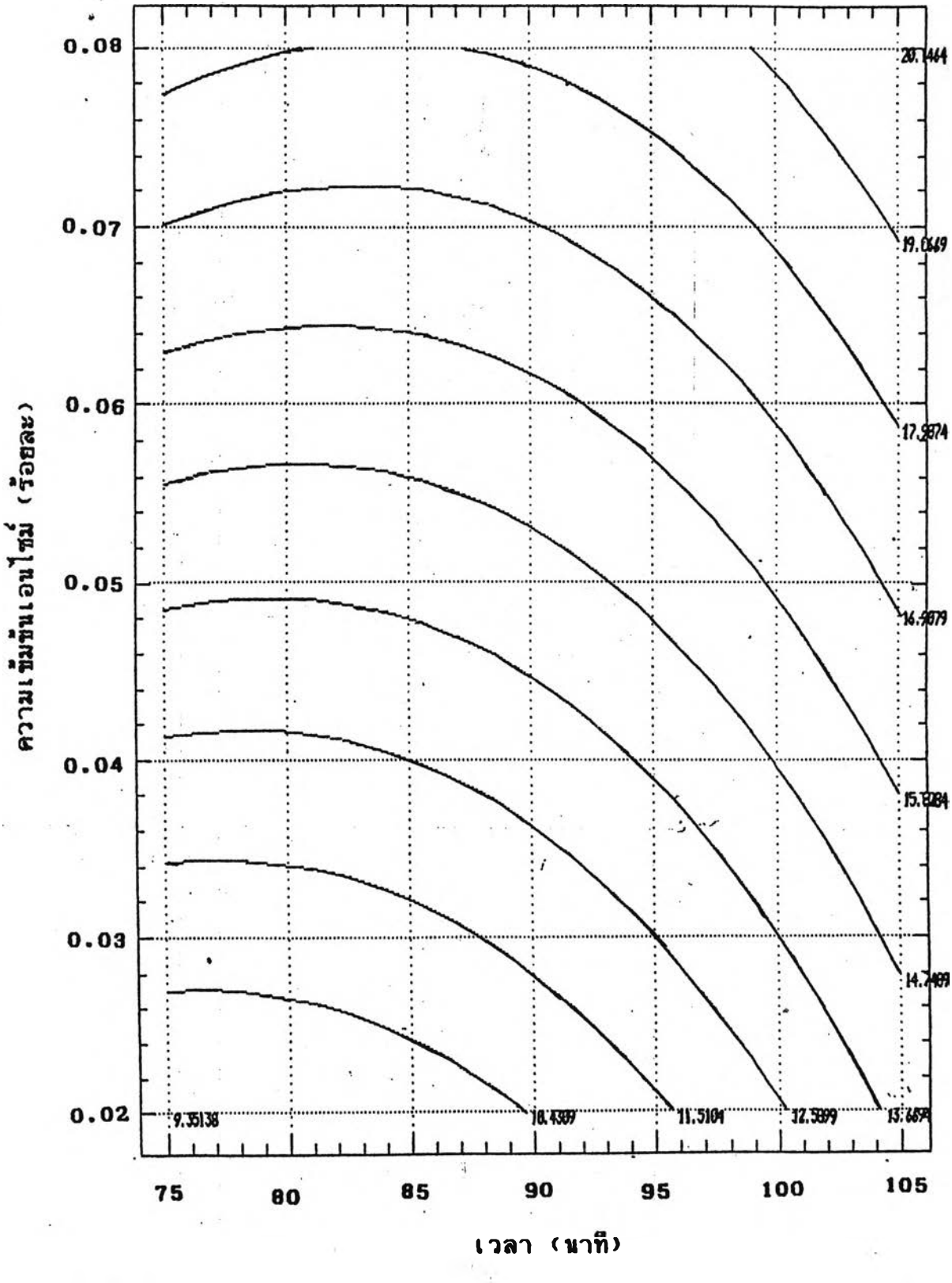
I 17775761



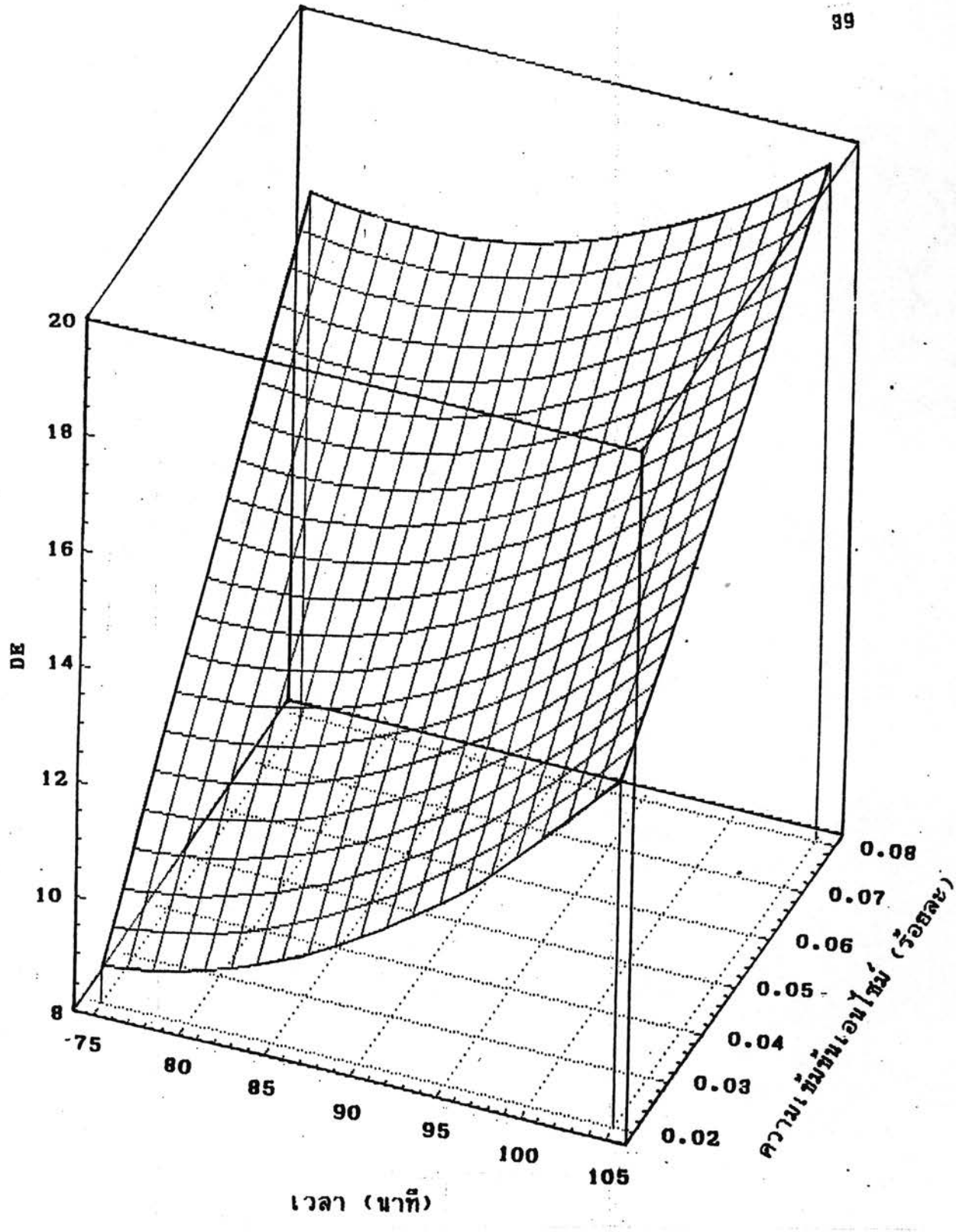
รูปที่ 6 contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 80 °ซ.



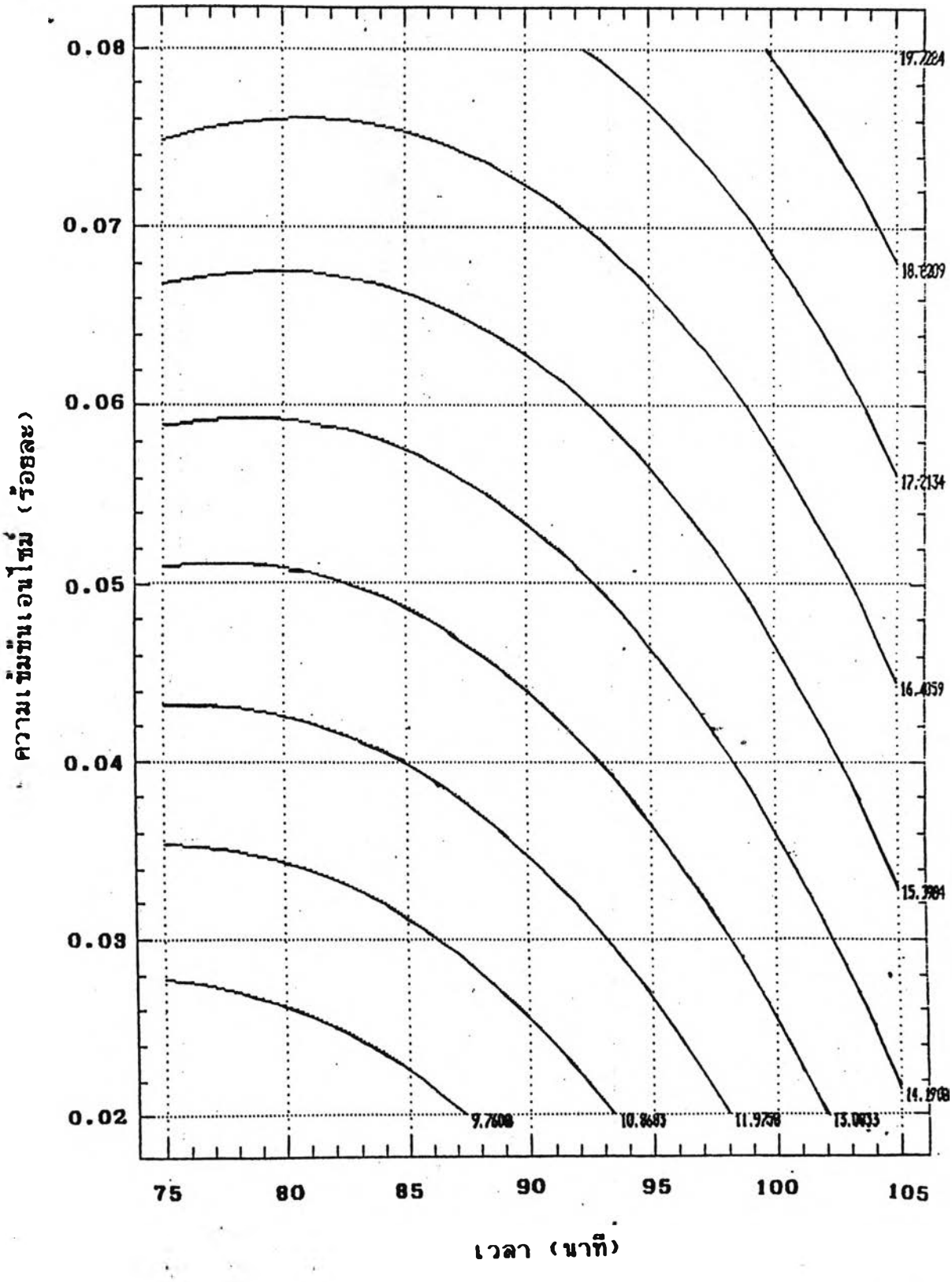
รูปที่ 7 surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 85 °ซ.



รูปที่ 8 contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 85 °ซ.



รูปที่ 9 surface plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 90 °ซ.



รูปที่ 10 contour plot ของความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE เวลาและความเข้มข้นเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 90 °ซ.

จากรูปที่ 5 ถึง 10 พบว่า ค่า DE จะแปรผันตามความเข้มข้นของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส เมื่อกำหนดให้เวลาในการผลิตมีค่าคงที่ ทั้งนี้เพราะเมื่อมีปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสมากโอกาสที่เอนไซม์จะเข้าทำปฏิกิริยาย่อยสายโมเลกุลของแป้งก็จะมีมากขึ้นทำให้โมเลกุลของแป้งถูกทำลายเพิ่มขึ้น ค่า DE ที่ได้จึงมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในขณะเดียวกันเมื่อกำหนดให้ความเข้มข้นของเอนไซม์มีค่าคงที่ จะสังเกตได้ว่า ค่า DE จะแปรผันตามเวลาในการผลิตนั่นคือ เมื่อเวลาในการผลิตเพิ่มขึ้นค่า DE จะมีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสเป็นแบบ multiple attack คือเอนไซม์จะเข้าจับกับสารตั้งต้นได้หลายครั้ง โดยเอนไซม์จะทำการย่อยพันธะ α-1,4 glycosidic ของสารละลายแป้ง หลังจากนั้นเอนไซม์จะแยกตัวออกเพื่อเข้าทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของแป้งตัวต่อไปดังนั้นเมื่อใช้เวลาในการผลิตนานโอกาสที่โมเลกุลแป้งจะถูกทำลายก็มีมากขึ้นเป็นผลให้ค่า DE เพิ่มสูงขึ้น (Banks and Greenwood, 1968) จากกราฟสองมิติรูปที่ 6 8 และ 10 แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE เท่ากันจากสภาวะการผลิตคือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกันดังนั้นสามารถเลือกค่าปัจจัยตัวแปรในสภาวะการผลิตให้ได้ค่า DE ที่ต้องการหรือใช้สมการในการทำนายค่า DE จากสภาวะในการผลิตที่กำหนดได้ โดยการทดลองลำดับต่อไปจะมีการคัดเลือกสภาวะในการผลิตมาทดลองผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

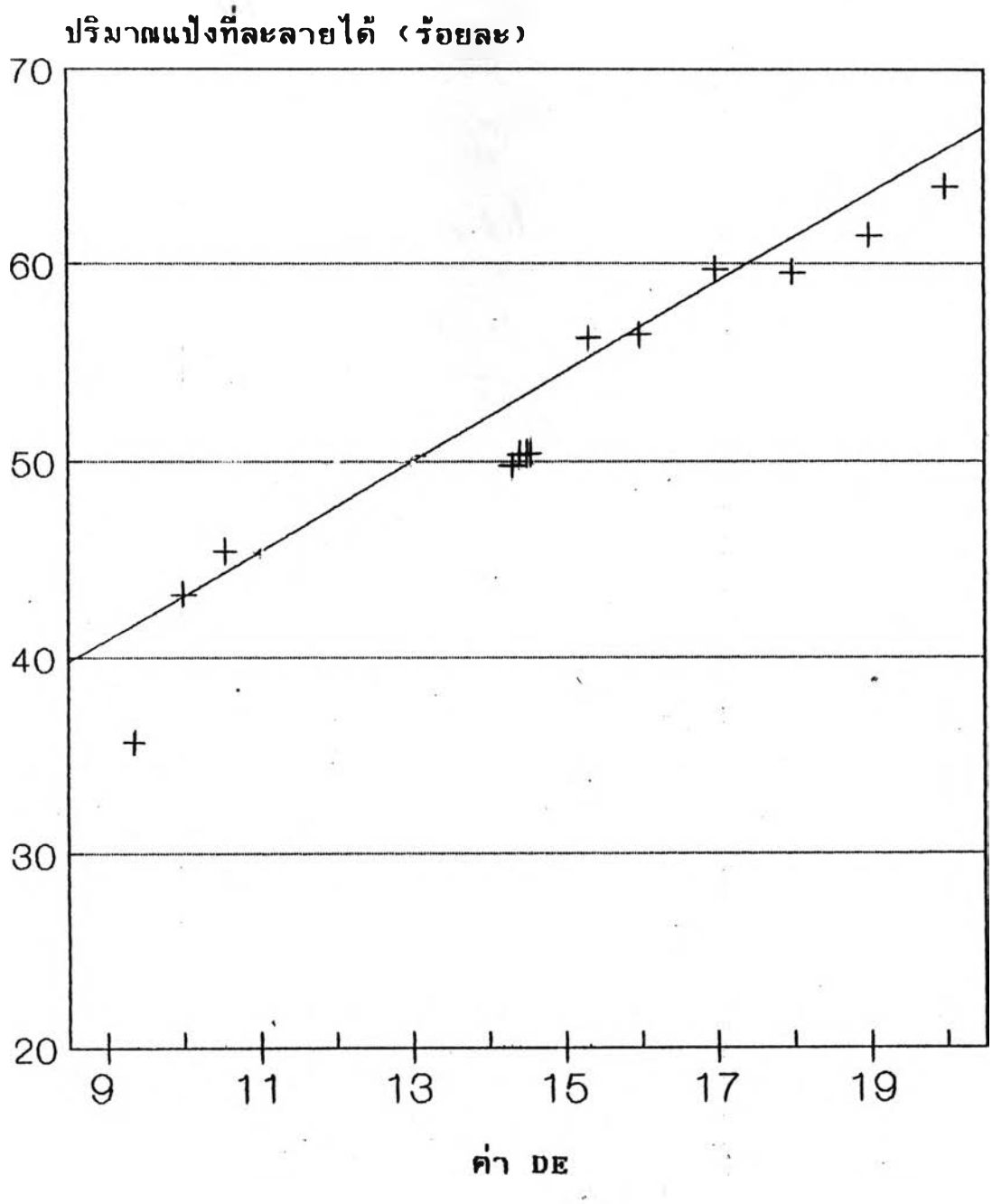
เมื่อพิจารณาปริมาณแป้งที่ละลายในผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้พบว่าปริมาณแป้งที่ละลายจะแปรผันโดยตรงกับค่า DE นั่นคือ เมื่อค่า DE มีค่าเพิ่มขึ้น ปริมาณแป้งที่ละลายได้จะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ในทางกลับกันเมื่อค่า DE มีค่าน้อยลงปริมาณแป้งที่ละลายได้ก็จะมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากเมื่อค่า DE เพิ่มสูงขึ้นแสดงว่า เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสทำการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งเพิ่มขึ้น สายโมเลกุลของแป้งจะมีขนาดเล็กลงเป็นผลให้ปริมาณแป้งที่ละลายได้มีค่าสูงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายได้สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 10 และกราฟรูปที่ 11

$$Y = 16.58706 + 2.38901\ X \quad \text{.....(11)}$$

$$R^2 = 0.95$$

โดย Y คือ ปริมาณแป้งที่ละลาย

X คือ ค่า DE



รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE และปริมาณแป้งที่ละลายได้ของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลว

2. การหาค่า Residual activity ของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลส

การหาค่า Residual activity ของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์หลังจากเอนไซม์ทำการย่อยโมเลกุลของแป้งจนมีค่า DE ตามที่ต้องการ ซึ่งมีการศึกษาพบว่า การใช้เอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสที่ทนความร้อนสูงในการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งจะมีข้อเสีย คือ การยับยั้งเอนไซม์ด้วยความร้อนจะทำได้ยาก (Wiseman, 1985; Wingard et al, 1979) ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงใช้วิธีการลดค่าความเป็นกรด-ด่างในการผลิตควบคู่ไปกับการใช้ความร้อนสูงในการยับยั้งปฏิกิริยาของเอนไซม์ โดยควบคุมให้ระดับความเป็นกรด-ด่างในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินมีค่าประมาณ 3.7-4.0 แล้วนำไปทำให้ร้อนที่อุณหภูมิ 100 °ซ. เป็นเวลา 20 นาที ซึ่งเมื่อนำมาทดสอบ Residual activity ของเอนไซม์พบว่าสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสได้ทั้งหมด จึงกล่าวได้ว่าสภาวะที่ใช้นี้จะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อควรระวังในการทดลองอีกประการคือ ถ้าปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าต่ำเกินไปเช่น ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 2 เมื่อนำไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 °ซ. อาจมีการย่อยสลายโมเลกุลของแป้งเนื่องจากปฏิกิริยาของกรดทำให้ค่า DE ของผลิตภัณฑ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้น

<u>การวิเคราะห์และประเมินสมบัติทางกายภาพของมอลโทเดกซ์ทริน</u>

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวโดยการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด ค่าความหนืดและค่า DE ซึ่งขั้นตอนในการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน คือ ก่อนและหลังการทำให้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินเข้มข้น โดยขั้นตอนหลังการทำให้เข้มข้นนั้นจะควบคุมปริมาณของแข็งทั้งหมดของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้ให้มีค่าคงที่ประมาณร้อยละ 52 โดยน้ำหนัก และเมื่อนำมาวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 15 °ซ. ให้ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้ ณ อุณหภูมิ 15°ซ.

ลำดับที่	DE	สมบัติทางกายภาพของมอลโทเดกซ์ทริน			
		ก่อนทำให้เข้มข้น		หลังทำให้เข้มข้น	
		ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	ความหนืด (mPas)	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	ความหนืด (mPas)
1	10.60 ± 0.36	19.35 ± 1.09	38.2 ± 0.85	52.07± 1.59	851 ± 26.87
2	10.09 ± 0.00	18.79 ± 0.47	40.0 ± 2.26	51.13± 0.11	895 ± 4.24
3	19.22 ± 0.35	23.92 ± 0.36	27.4 ± 0.28	51.82± 0.12	136 ± 14.14
4	17.63 ± 0.27	23.96 ± 0.15	27.4 ± 0.85	51.85± 0.64	197.5±12.02
5	9.39 ± 0.08	18.51 ± 0.03	43.2 ± 2.26	52.69± 1.46	1831 ± 9.90
6	14.34 ± 0.26	20.95 ± 0.50	30.2 ± 0.85	52.78± 0.39	356 ± 5.66
7	17.95 ± 0.54	23.62 ± 0.57	28.1 ± 0.71	52.53± 1.78	185 ± 29.70
8	20.11 ± 0.54	24.02 ± 0.51	26.4 ± 0.85	52.52± 0.72	117 ± 4.24
9	15.35 ± 0.45	22.63 ± 0.80	27.0 ± 0.28	51.53± 0.12	329 ± 4.24
10	17.32 ± 0.18	23.46 ± 0.13	27.8 ± 2.55	53.28± 2.12	192 ± 31.11
11	13.01 ± 0.54	21.41 ± 0.26	29.6 ± 0.57	51.39± 0.86	581 ± 21.21
12	16.62 ± 0.63	23.61 ± 1.03	28.2 ± 0.28	53.02± 1.78	308 ± 39.60
13	14.33 ± 0.27	22.04 ± 0.49	29.3 ± 0.14	52.68± 2.09	359 ± 1.41
14	14.43 ± 0.37	21.42 ± 0.12	30.2 ± 0.28	51.21± 0.09	344 ± 5.66
15	14.27 ± 0.54	21.59 ± 0.29	30.6 ± 0.28	51.92± 0.08	355 ± 21.21

จากตารางที่ 8 สังเกตได้ว่าเมื่อกำหนดค่า DE ให้มีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกัน ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่เมื่อกำหนดให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดคงที่ ความหนืดจะมีค่าลดลงเมื่อค่า DE เพิ่มสูงขึ้น โดยผลการทดลองจะสอดคล้องกับตารางที่ 4 (Whistler et al., 1984) ซึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สามารถนำมาใช้ปรับปรุงสมบัติการไหลของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวเพื่อนำไปใช้ทดแทนผลิตภัณฑ์อื่นๆที่มีสมบัติการไหลใกล้เคียงกัน โดยจะทำการทดลองในลำดับต่อไป

เนื่องจากมอลโทเดกซ์ทรินในทางการค้าที่มีค่า DE ตั้งแต่ 10 ขึ้นไปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 10-14 และ 15-19 (Whistler et al., 1984) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะคัดเลือกผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินออกมา 3 ตัวอย่าง โดยสองตัวอย่างแรกทำการคัดเลือกด้วยการกำหนดสภาวะในการผลิตจากกราฟ ในขณะที่ตัวอย่างที่สามจะเป็นการกำหนดค่า DE และสภาวะบางปัจจัยเพื่อพิสูจน์ว่า สมการที่ได้สามารถทำนายค่า DE ที่สภาวะต่างๆ ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวจากแป้งข้าวเจ้าได้หรือไม่

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า DE ความเข้มข้นของเอนไซม์และเวลาที่ใช้ในการผลิต โดยการกำหนดอุณหภูมิให้มีค่า 80 °ซ. 85 °ซ. และ 90 °ซ. ซึ่งแสดงดังกราฟรูปที่ 6 8 และ 10 นั้น สามารถที่จะนำสภาวะต่างๆในกราฟมาใช้ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วงที่ต้องการได้ทุกระดับอุณหภูมิ แต่เพื่อต้องการแสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนในสภาวะการผลิต จึงคัดเลือกสภาวะการผลิตโดยเลือกใช้สภาวะการผลิตที่อุณหภูมิ 80 °ซ. ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 15-19 โดยกำหนดสภาวะในการผลิตจากกราฟรูปที่ 6 และคัดเลือกสภาวะในการผลิตที่อุณหภูมิ 90 °ซ. เพื่อผลิตมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE อยู่ในช่วง 10-14 โดยกำหนดสภาวะในการผลิตจากกราฟรูปที่ 10 ส่วนตัวอย่างที่สามจะคัดเลือกค่า DE เท่ากับ 15 ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของค่า DE ที่ได้จากงานวิจัยในครั้งนี้ โดยจะทำการผลิตที่อุณหภูมิ 85 °ซ.

การคัดเลือกสภาวะในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 10-14 โดยใช้กราฟรูปที่ 10 นั้นพบว่า ค่า DE ในช่วง 10-14 นี้ จะต้องใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์

ประมาณร้อยละ 0.02-0.0585 ปริมาตรต่อน้ำหนัก ระยะเวลาในการผลิตเท่ากับ 75-105 นาที โดยอุณหภูมิในการผลิตเท่ากับ 90 °ซ. ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกสภาวะในการผลิต คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.05 ปริมาตรต่อน้ำหนัก เวลา 75 นาที อุณหภูมิ 90 °ซ. โดยทำการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวตามแผนผังการผลิตรูปที่ 4 แล้วนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ค่า DE จะให้ค่า DE เท่ากับ 12.88 เมื่อนำสภาวะที่กำหนดนี้มาคำนวณด้วยสมการที่ 8 จะให้ค่า DE เท่ากับ 12.93 โดยจะมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 0.4

การผลิตมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE ในช่วง 15-19 โดยใช้กราฟรูปที่ 6 นั้น เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า ค่า DE ในช่วง 15-19 จะต้องใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ประมาณร้อยละ 0.029-0.08 ปริมาตรต่อน้ำหนัก ระยะเวลาในการผลิตเท่ากับ 75-105 นาที โดยอุณหภูมิในการผลิตเท่ากับ 80 °ซ. ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกสภาวะในการผลิต คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์ร้อยละ 0.05 ปริมาตรต่อน้ำหนัก เวลา 105 นาที อุณหภูมิ 80 °ซ. โดยทำการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวตามที่ได้กล่าวมาแล้ว นำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ค่า DE จะได้ค่า DE เท่ากับ 17.27 และเมื่อนำสภาวะที่กำหนดนี้ไปหาค่า DE ตามสมการที่ 6 จะได้ค่า DE เท่ากับ 17.39 โดยจะมีความแตกต่างคิดเป็นร้อยละ 0.7

ส่วนการทดลองที่ 3 เป็นการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินโดยกำหนดค่า DE ให้มีค่าเท่ากับ 15 อุณหภูมิ 85 °ซ. และความเข้มข้นของเอนไซม์เท่ากับร้อยละ 0.05 ปริมาตรต่อน้ำหนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟรูปที่ 8 พบว่า จะต้องใช้เวลาในการผลิตเท่ากับ 95 นาทีและเมื่อนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้มาวิเคราะห์ค่า DE จะให้ค่า DE เท่ากับ 15.33 โดยมีความแตกต่างจากค่า DE ที่กำหนดคือ 15 คิดเป็นร้อยละ 2.2 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่า DE จากสมการและการทดลอง ในการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวจากแป้งข้าวเจ้า DE 10-20

ความเข้มข้นเอนไซม์(ร้อยละ)	อุณหภูมิ (°ซ.)	เวลา (นาที)	DE สมการ	DE การทดลอง
0.05	80	105	17.39	17.27
0.05	85	95	15.00	15.33
0.05	90	75	12.93	12.88

จากตารางที่ 9 พบว่า ค่า DE ที่ได้จากการทดลองจะแตกต่างจากค่า DE ที่ได้จากสมการเพียงเล็กน้อยคือ เมื่อทำการผลิตมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่อุณหภูมิ 80 85 และ 90 °ซ. จะให้ความแตกต่างระหว่างค่า DE ของมอลโทเดกซ์ทรินที่ได้จากการทดลองและจากสมการคิดเป็นร้อยละ 0.7 2.2 และ 0.4 ตามลำดับ

การศึกษาสมบัติการไหลของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทริน

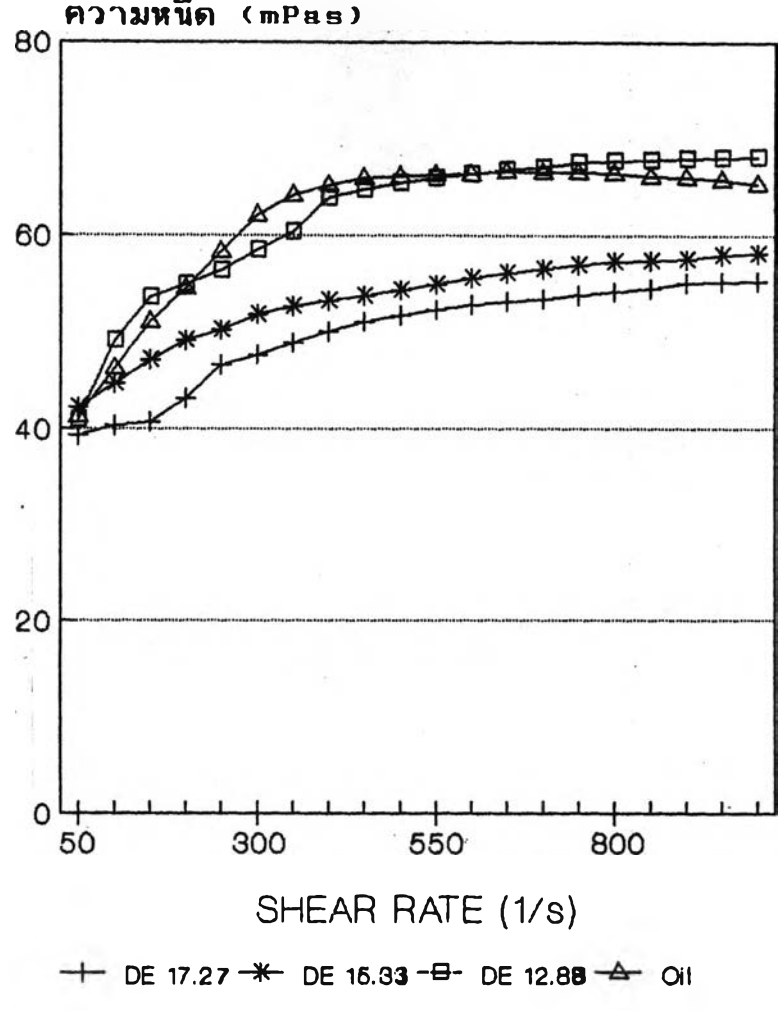
การนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้ไปใช้ประโยชน์ จะคำนึงถึงสมบัติการไหลเป็นสำคัญ ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะการไหลและลักษณะปรากฏของมอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้พบว่า มีความเป็นไปได้สูงมากที่จะนำไปใช้ทดแทนน้ำมัน จึงได้นำน้ำมันพืชที่มีจำหน่ายในท้องตลาดหนึ่งยี่ห้อมาหาค่าความหนืด เพื่อนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินตัวอย่างที่ผลิตขึ้นทั้ง 3 ตัวอย่าง (จากตารางที่ 9) มาปรับให้มีค่าความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันพืชซึ่งมีความหนืดเท่ากับ 113.6 mPas ซึ่งวัดด้วยเครื่อง Brook field โดยใช้เข็มเบอร์ 2 และกำหนดความเร็วรอบในการหมุนเท่ากับ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 15 °ซ. ทำการ

ทดลองโดยนำตัวอย่างมอลโทเดกซ์ทรินทั้งสามไปทำให้เข้มข้นขึ้นเพื่อปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดทำให้มีความหนืดอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำมันพืช ซึ่งผลการปรับปริมาณของแข็งทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด ปริมาณของแข็งและค่า DE ของผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลว

DE	ค่าที่ได้จากการทดลอง	
	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	ความหนืดที่ 15°ซ. (mPas)
12.88	42.44	110.4
15.33	46.01	104.8
17.27	48.27	102.0

นำตัวอย่างมอลโทเดกซ์ทรินทั้ง 3 ตัวอย่างที่ได้จากตารางที่ 10 มาหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด (apparent viscosity) และ shear rate ด้วยเครื่องวัดความหนืด Haake จะให้ผลดังรูปที่ 12 และเมื่อนำคำนวณค่า flow-behavior index (n) และ consistency index (K) จะให้ผลดังตารางที่ 11



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ shear rate ของน้ำมันพืชตัวอย่างและผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE ต่างๆ ณ อุณหภูมิ 25 °ซ.

ตารางที่ 11 สมบัติการไหลบางประการของน้ำมันพืชและตัวอย่างผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทริน ที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27

ผลิตภัณฑ์	Flow-behavior index (n)	Consistency index (K)
น้ำมันพืช	0.98	0.08
มอลโทเดกซ์ทริน DE 12.88	0.97	0.06
มอลโทเดกซ์ทริน DE 15.33	0.95	0.07
มอลโทเดกซ์ทริน DE 17.27	0.99	0.07

จากตารางที่ 11 พบว่า flow-behavior index และ consistency index ของน้ำมันพืชตัวอย่างและผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งค่า flow-behavior index นี้เป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดสมบัติการไหลของวัตถุ จากตารางพบว่ามีค่าเข้าใกล้ 1 มาก ดังนั้นสามารถล่าวได้ว่า ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินและน้ำมันพืชตัวอย่างมีสมบัติการไหลใกล้เคียงกับ Newtonian fluids และเมื่อพิจารณาค่า consistency index พบว่า จะมีค่าแตกต่างจากน้ำมันคิดเป็นร้อยละ 25.0 12.5 และ 12.5 ในผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27 ตามลำดับ แต่เมื่อพิจารณาผลโดยรวมแล้วสรุปได้ว่า ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ผลิตได้น่าจะสามารถใช้ทดแทนน้ำมันพืชซึ่งจะนำไปทดลองทำผลิตภัณฑ์เพื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคต่อไป

ในปัจจุบันมีการนำมอลโทเดกซ์ทรินมาใช้ในอาหารเนื่อลดพลังงานกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นในการทดลองนี้จึงมีการนำตัวอย่างผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวทั้ง 3 ตัวอย่างที่ผลิตได้ไปหาค่าพลังงานด้วยเครื่อง Bomb calorimeter พบว่า ตัวอย่างผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 จะให้ค่าพลังงานเท่ากับ 3.60 kcal/g เมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นร้อยละ 42.44 โดยน้ำหนัก ขณะที่ตัวอย่างมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE เท่ากับ 15.33 จะให้ค่าพลังงานเท่ากับ 3.62 kcal/g เมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเป็นร้อยละ 46.01 โดยน้ำหนัก และตัวอย่างมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE เท่ากับ 17.27 จะให้ค่าพลังงานเท่ากับ 3.63 kcal/g เมื่อมีปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 48.27 โดยน้ำหนัก ซึ่งผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าพลังงานของตัวอย่างมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27

DE	ปริมาณของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	พลังงาน (kcal/g)
12.88	42.44	3.60
15.33	46.01	3.62
17.27	48.27	3.63

การผลิตน้ำสลัดชนิดข้นจากผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลว

Federal standards ของอเมริกากำหนดว่าผลิตภัณฑ์ mayonnaise จะต้องมีน้ำมันเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Matz, 1962) ดังนั้นงานวิจัยนี้จะนำผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินที่ได้มาใช้ทดแทนน้ำมันพืชบางส่วนในการผลิตน้ำสลัดชนิดข้น (ภาคผนวก จ) โดยใช้อัตราส่วนระหว่างน้ำมันต่อมอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวเท่ากับร้อยละ 50 และเมื่อนำไปทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบจำนวน 15 คน ให้ผลดังตารางที่ 13

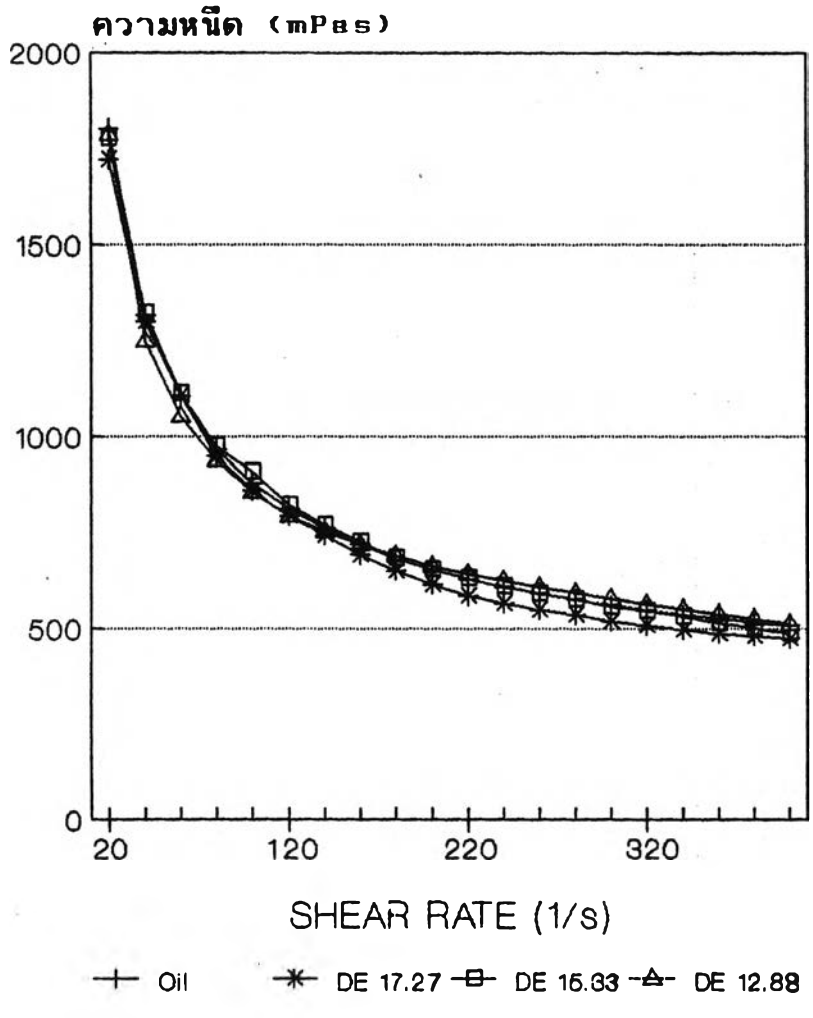
ตารางที่ 13 ผลการทดสอบชิมผลิตภัณฑ์น้ำสลัดเมื่อมีอัตราส่วนร้อยละของน้ำมันพืชต่อมอลโทเดกซ์ทริน (DE 12.88 15.33 และ 17.27) เป็น 100:0 และ 50:50

น้ำสลัดชนิดข้น	สี	กลิ่น	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	ลักษณะปรากฏ
	ns	ns	ns	ns	ns
100% น้ำมันพืช	7.93±0.59	7.87±0.74	8.33±0.49	7.60±0.51	8.47±0.52
50%มอลโทเดกซ์ทริน DE 12.88	8.00±0.53	7.73±0.70	8.27±0.46	7.67±0.49	8.67±0.49
50%มอลโทเดกซ์ทริน DE 15.33	7.97±0.44	7.82±0.70	8.34±0.48	7.65±0.55	8.67±0.46
50%มอลโทเดกซ์ทริน DE 17.27	8.00±0.38	7.67±0.49	8.27±0.46	7.73±0.46	8.73±0.46

หมายเหตุ ns หมายถึง ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ค่าที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จากตารางที่ 13 พบว่า สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและลักษณะปรากฏของน้ำสลัดชนิดข้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 นั่นคือ ผลิตภัณฑ์น้ำสลัดที่ผลิตโดยใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชผสมมอลโทเดกซ์ทรินเป็นวัตถุดิบในอัตราส่วนร้อยละ 50 จะให้ผลการยอมรับของผู้บริโภคไม่แตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินทั้งสามตัวอย่างซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบพบว่า ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินตัวอย่างจะมีกลิ่นของข้าวสุกแต่เนื่องจากองค์ประกอบอื่นๆที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำสลัดชนิดข้น เช่น น้ำมะนาว ซึ่งมีกลิ่นรบกวนกลิ่นข้าวสุกของมอลโทเดกซ์ทรินทำให้ผู้ทดสอบชิมไม่สามารถบอกความแตกต่างของน้ำสลัดชนิดข้นที่ผลิตได้เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำสลัดชนิดข้นที่ผลิตจากน้ำมันพืชซึ่งไม่มีการผสมมอลโทเดกซ์ทริน และเมื่อนำไปหาลักษณะการไหลของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดโดยการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืด (apparent viscosity) และ shear rate จะให้ผลดังรูปที่ 13 เมื่อนำไปหาค่า flow-behavior index (n) และ yield value (K) จะให้ผลดังตารางที่ 14 ซึ่งพบว่าน้ำสลัดชนิดข้นที่ใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชผสมมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27 จะมี flow-behavior index ใกล้เคียงกันคือ 1.16 1.12 1.27 และ 1.27 ตามลำดับและเมื่อพิจารณา yield value พบว่า น้ำสลัดชนิดข้นที่ใช้น้ำมันพืชและน้ำมันพืชผสมมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27 จะมีค่า yield value เท่ากับ 26.29 25.79 29.87 และ 27.60 ตามลำดับ ซึ่งลักษณะของน้ำสลัดชนิดน้ำข้นที่ผลิตได้จากวัตถุดิบทั้งสองชนิดจะมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาลักษณะโดยรวม คือ สมบัติการไหลและการทดสอบการยอมรับของผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสสรุปได้ว่า สามารถใช้ผลิตภัณฑ์มอลโทเดกซ์ทรินชนิดเหลวที่ผลิตได้ทดแทนน้ำมันพืชในอัตราส่วนร้อยละ 50 สำหรับการผลิตน้ำสลัดชนิดข้นและน้ำสลัดชนิดข้นซึ่งทดแทนด้วยมอลโทเดกซ์ทรินที่มีค่า DE เท่ากับ 12.88 15.33 และ 17.27 สามารถลดค่าพลังงานจากน้ำสลัดชนิดข้นที่ผลิตจากน้ำมันพืชเท่ากับ 1620 1614 และ 1611 kcal/g ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดและ shear rate ของน้ำสลัดชนิดข้น ที่อุณหภูมิ 25 °ซ.

ตารางที่ 14 สมบัติการไหลบางประการของผลิตภัณฑ์น้ำสลัดชนิดข้น

ผลิตภัณฑ์	Yield value (n)	Flow-behavior index (K)
น้ำสลัด (น้ำมันพืช 100%)	26.29	1.16
น้ำสลัด (น้ำมันผสมโทเดกซ์ทริน DE 12.88 ร้อยละ 50	25.79	1.12
น้ำสลัด (น้ำมันต่อมอลโทเดกซ์ทริน DE 15.33 ร้อยละ 50	29.87	1.27
น้ำสลัด (น้ำมันผสมโทเดกซ์ทริน DE 17.27 ร้อยละ 50	27.60	1.27