

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

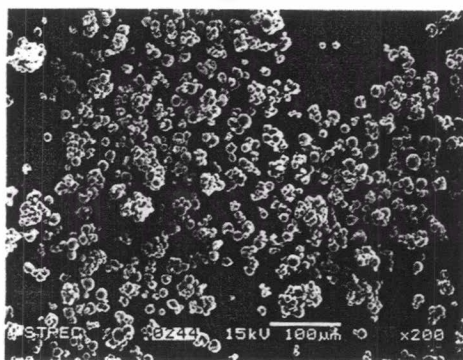
#### 4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของแป้งมันสำปะหลัง

##### 4.1.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

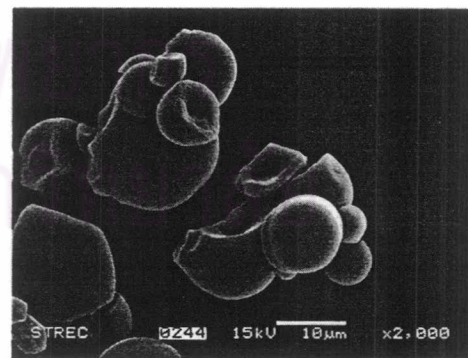
แป้งมันสำปะหลังที่ใช้ในการทดลอง มีลักษณะเป็นผงละเอียด สีขาว ดังรูปที่ 4.1 เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า เม็ดแป้งมันสำปะหลังมีรูปร่างลักษณะเป็นทรงกลม มีรอยบุ๋มเข้าไปทางด้านใดด้านหนึ่งของเม็ดแป้ง มีขนาดอนุภาคโดยทั่วไปประมาณ 2-20 ไมครอน มีสีขาว ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ภาพแสดงลักษณะของแป้งมันสำปะหลัง



(ก)



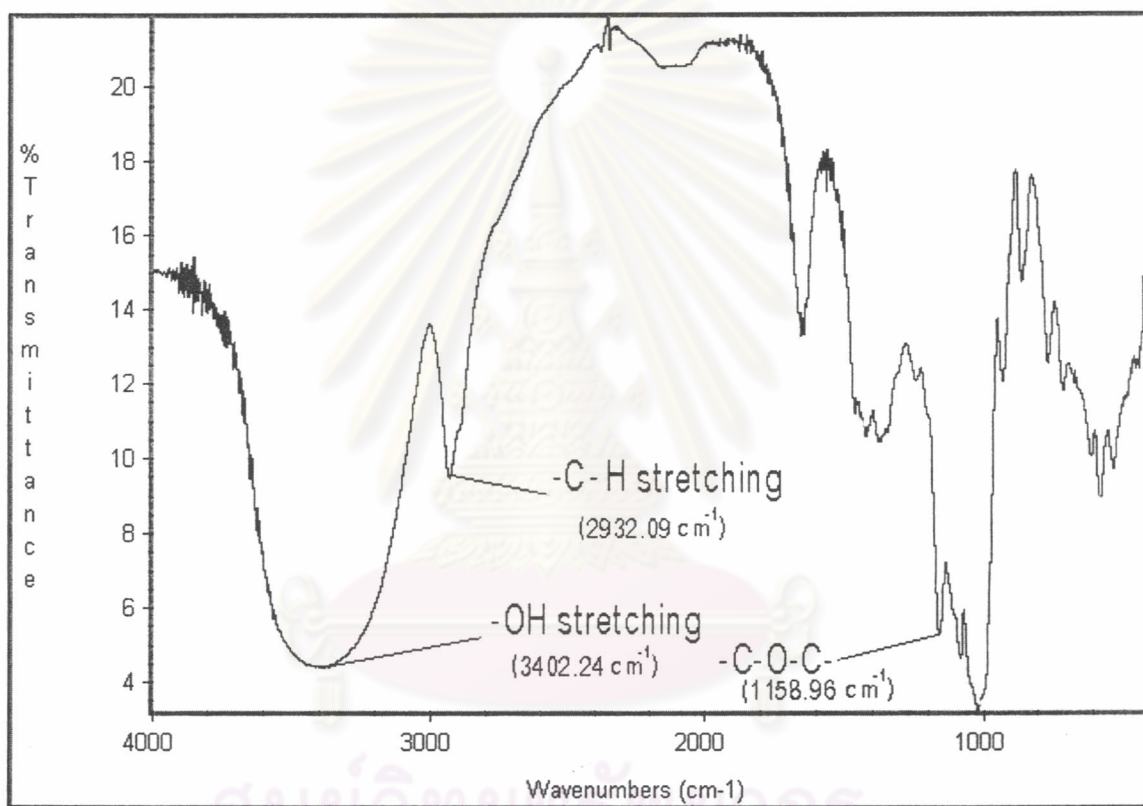
(ข)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแป้งมันสำปะหลังที่กำลัง

ขยาย (ก) 200 เท่า และ (ข) 2000 เท่า

#### 4.1.2 โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลัง

จากการวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคฟูรีเออร์ทรานสฟอร์มอินฟราเรด-สเปกโทรสโกปี (FT-IR) ดังรูปที่ 4.3 พบว่า แป้งมันสำปะหลังมีโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล ดังแสดงให้เห็นได้จาก -OH stretching ที่พีก 3402.24  $\text{cm}^{-1}$  หมู่ไฮโดรคาร์บอน ดังแสดงให้เห็นได้จาก -C-H stretching ที่พีก 2932.09  $\text{cm}^{-1}$  และหมู่อีเทอร์ ดังแสดงให้เห็นได้จาก -C-O-C- stretching ที่พีก 1158.96  $\text{cm}^{-1}$



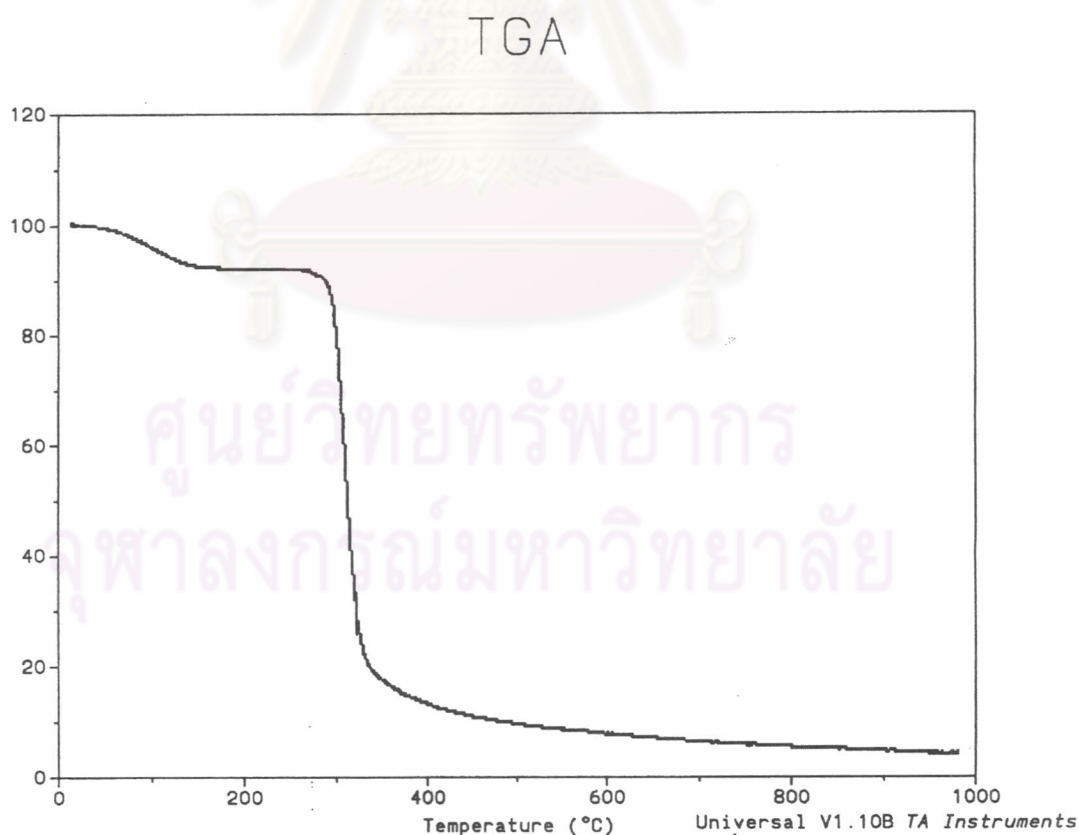
รูปที่ 4.3 FT-IR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง

### 4.1.3 สมบัติทางความร้อนของแป้งมันสำปะหลัง

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิค 2 เทคนิค คือ TGA และ DSC

#### 4.1.3.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer: TGA)

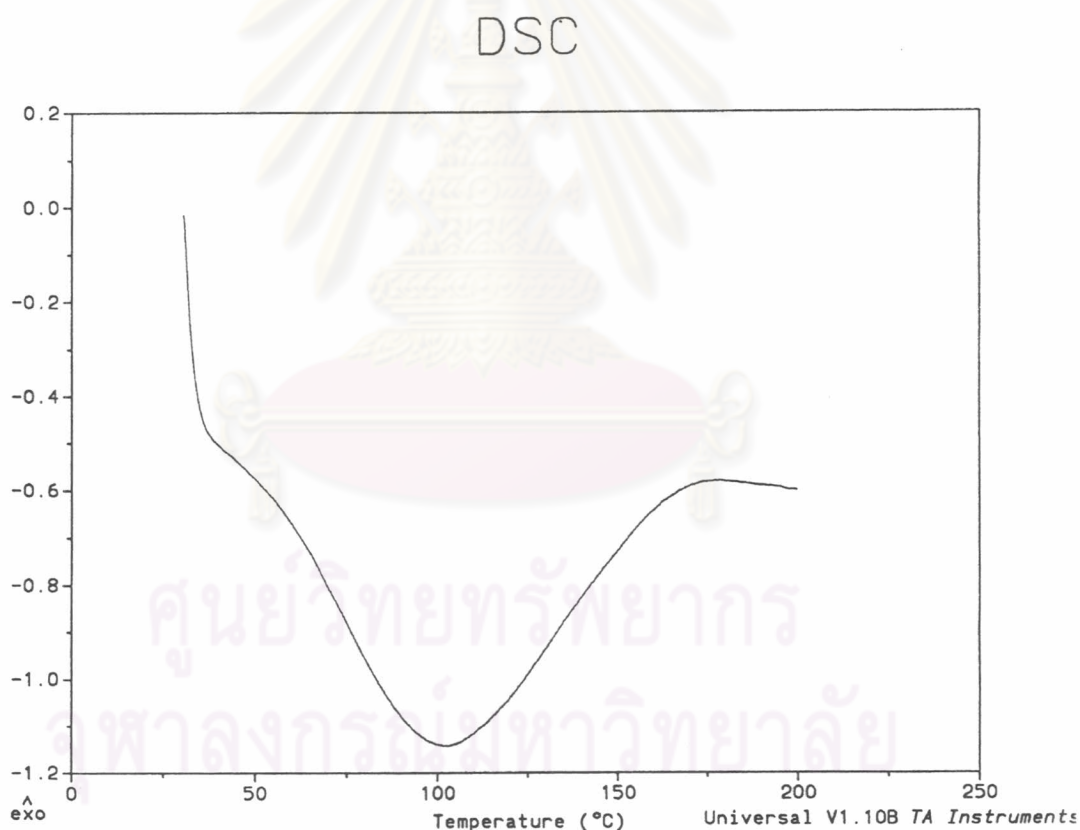
จากการตรวจสอบและวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของแป้งมันสำปะหลังด้วยเครื่อง TGA ดังรูปที่ 4.4 พบว่า แป้งมันสำปะหลังแสดงการเปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิประมาณ 85.2 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงถึงการสูญเสียน้ำหนักอันเกิดจากความชื้นที่มีอยู่ในแป้งมันสำปะหลัง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไปเรื่อยๆ พบว่า ไม่มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักจนถึงอุณหภูมิประมาณ 298.5 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัว (thermal decomposition,  $T_d$ ) ของแป้งมันสำปะหลังนั่นเอง



รูปที่ 4.4 TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง

#### 4.1.3.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC)

จากผลการวิเคราะห์ด้วย TGA ข้างต้น พบการเปลี่ยนแปลงในช่วงอุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส เกิดจากการสูญเสียความชื้นที่มีอยู่ในเม็ดแป้งมันสำปะหลัง โดยโมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลเป็นจำนวนมาก จึงทำให้สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับความชื้นได้ง่าย และเมื่อมีการให้พลังงานความร้อนกับแป้งมันสำปะหลังดังกล่าว ทำให้ความชื้นในเนื้อแป้งค่อยๆ ลดลงพร้อมๆ กับการสลายตัวของพันธะไฮโดรเจน จึงทำให้เส้นกราฟ DSC ที่ได้มีลักษณะกว้าง (broad) โดยมีจุดต่ำสุดของกราฟอยู่ที่ประมาณ 100 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 DSC เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง

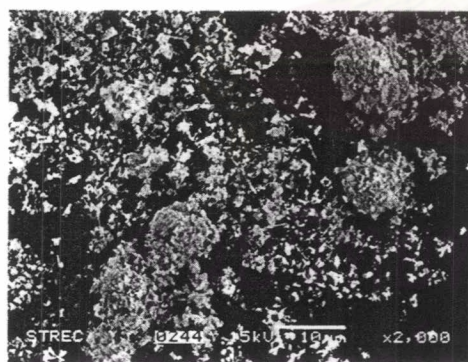
## 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติต่างๆของกาอลิน

### 4.2.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยา

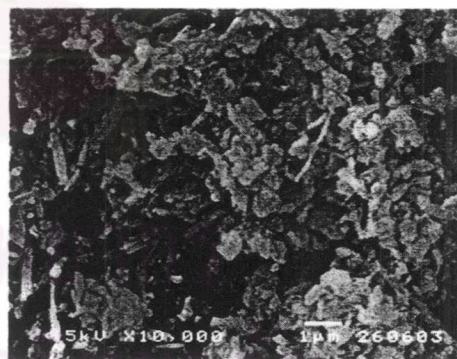
กาอลินที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นชนิดที่มีความละเอียดสูง มีลักษณะเป็นผง สีน้ำตาลอ่อน ดังรูปที่ 4.6 เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่า รูปร่างของอนุภาคกาอลินมีลักษณะเป็นแท่ง โดยมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเท่ากับ 0.3 ไมครอน (อ้างอิงจากข้อมูลทางเทคนิคของบริษัท CERAMICS R US จำกัด) ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 ภาพแสดงลักษณะของกาอลิน



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของกาอลินที่กำลังขยาย

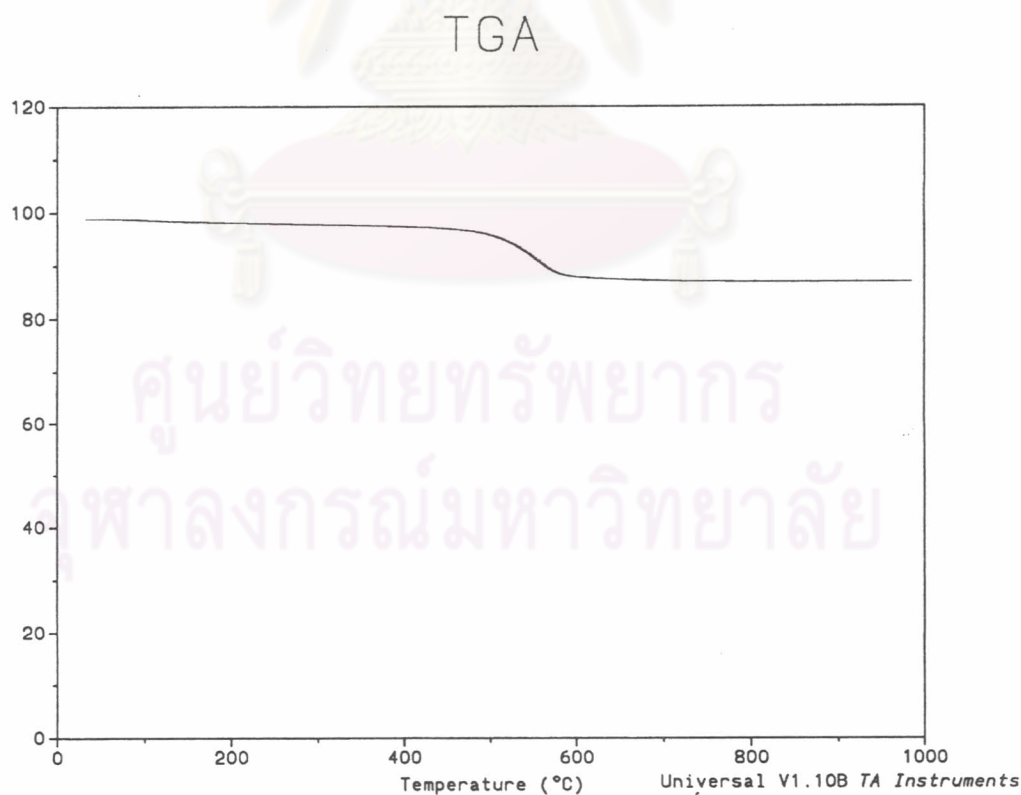
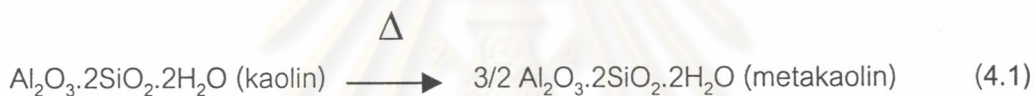
(ก) 2,000 เท่า และ (ข) 10,000 เท่า

#### 4.2.2 สมบัติทางความร้อนของเกาลิน

งานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของเกาลินด้วยกัน 2 เทคนิค คือ TGA และ DSC

##### 4.2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer: TGA)

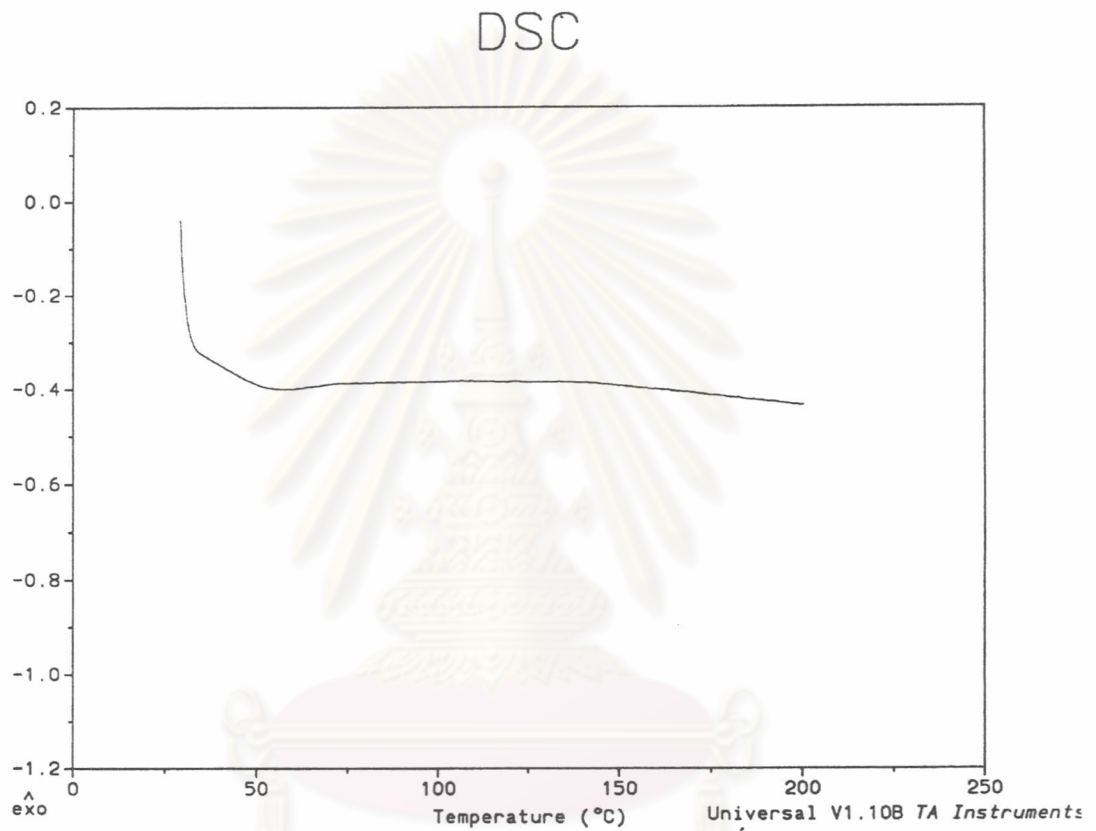
จากการตรวจสอบและวิเคราะห์เสถียรภาพทางความร้อนของเกาลินด้วย TGA ดังรูปที่ 4.8 พบว่า เกาลินแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 2 ครั้ง ครั้งแรกที่อุณหภูมิประมาณ 93.1 องศาเซลเซียส เกิดจากการสูญเสียความชื้นที่มีอยู่ในเกาลิน และครั้งที่สองที่อุณหภูมิประมาณ 505.5 องศาเซลเซียส เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮดรอกซิเลชัน (dehydroxylation) [39] และก่อตัวเป็นผลึกเมตาเกาลิน (metakaolin) ดังสมการที่ 4.1



รูปที่ 4.8 TGA เทอร์โมแกรมของเกาลิน

#### 4.2.2.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC)

จากรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงผลการวิเคราะห์ด้วย DSC พบว่า เกาลินไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา

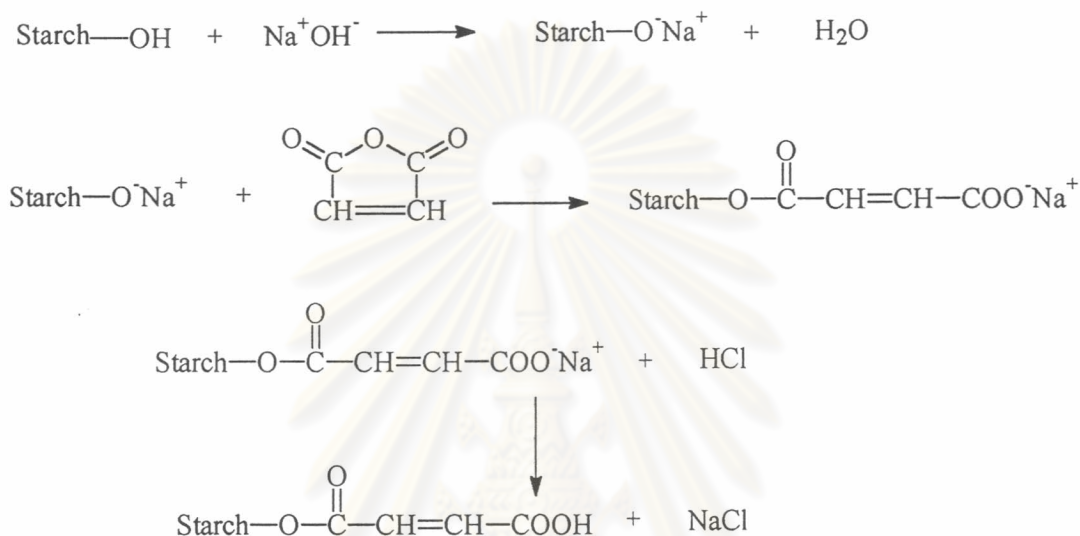


รูปที่ 4.9 DSC เทอร์โมแกรมของเกาลิน

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 4.3 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์

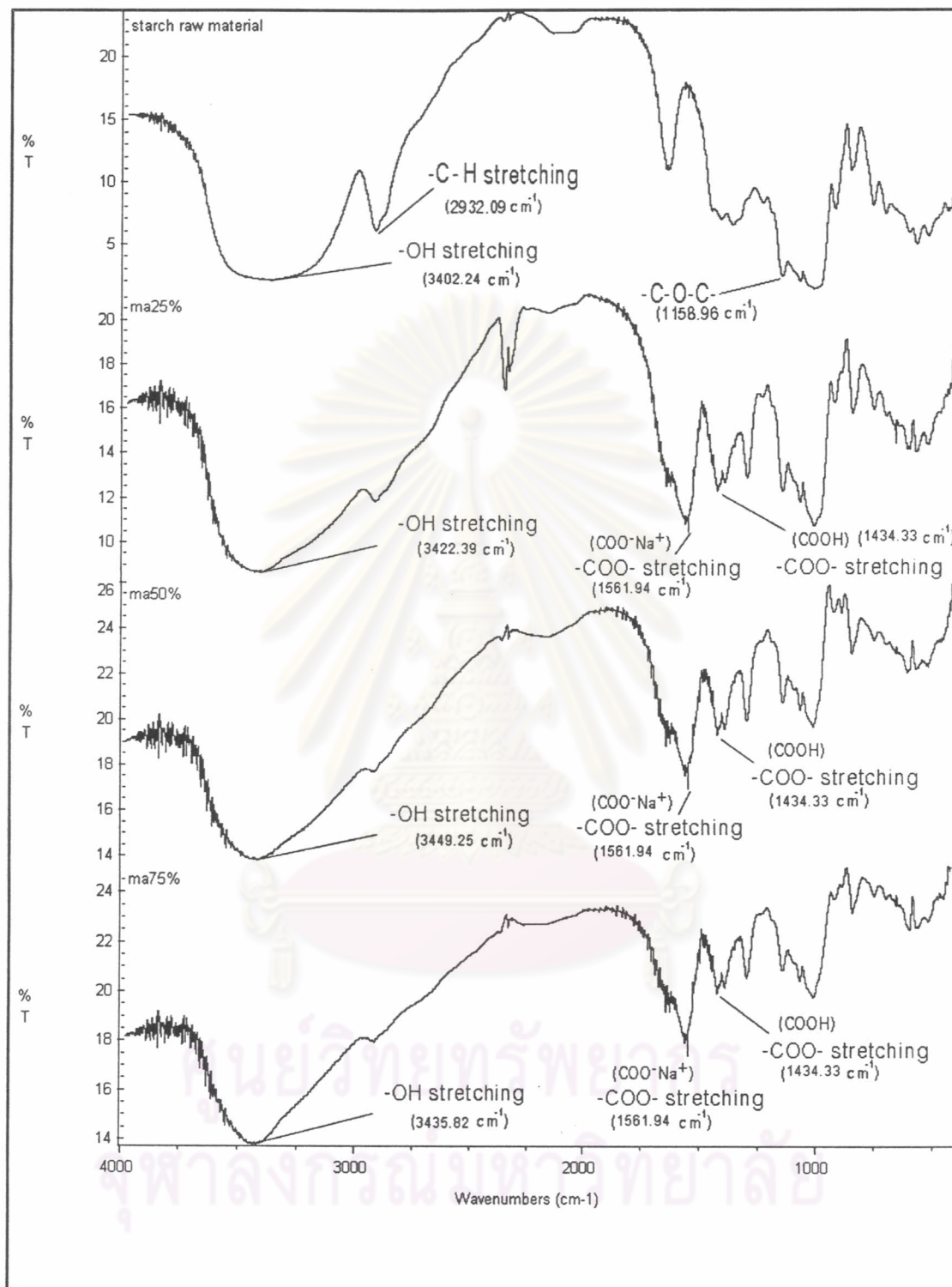
ในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ตามลำดับนั้น ปฏิกิริยาการดัดแปรที่เกิดขึ้นสามารถแสดงดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ปฏิกิริยาการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์

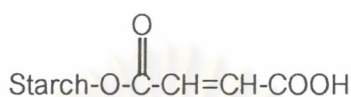
จากปฏิกิริยาการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ดังรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่า หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งจะถูกแทนที่ด้วยหมู่เอสเทอร์ ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างแป้งกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ดังนั้น ในการวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและไม่ผ่านการดัดแปร ด้วยเทคนิค FT-IR สเปกโทรสโกปี จะพิจารณาจากหมู่ฟังก์ชันทั้งสองเป็นหลัก ซึ่งแสดงผลในรูปที่ 4.11 เมื่อเปรียบเทียบพีกที่แสดงถึง -OH stretching ของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านการดัดแปรและของแป้งมันสำปะหลังที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ 25% 50% และ 75% ณ wavenumber ที่  $3402.24 \text{ cm}^{-1}$   $3422.39 \text{ cm}^{-1}$   $3449.25 \text{ cm}^{-1}$  และ  $3435.82 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น ความกว้างของพีกดังกล่าวจะลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นเพราะการแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิลด้วยหมู่เอสเทอร์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของแป้งลดลง ซึ่งส่งผลให้การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดอันเกิดจากการสั่นอย่างต่อเนื่องของพันธะไฮโดรเจนลดลงด้วย พีกจึงมีความกว้างลดลงนั่นเอง



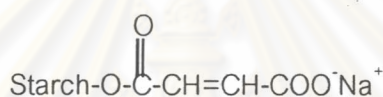


รูปที่ 4.11 FT-IR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังที่ไม่ได้ดัดแปรและที่ดัดแปรด้วยมาเลอิก แอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% (จากบนลงล่าง)

นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาถึงพีคที่แสดงการเกิด  $\text{-COO-}$  stretching พบว่ามีหลายแบบ ทั้งนี้เป็นเพราะนอกเหนือจาก  $\text{-COO-}$  stretching ของหมู่เอสเทอร์ในช่วงประมาณ  $1700\text{ cm}^{-1}$  แล้ว ยังพบ  $\text{-COO-}$  stretching ของหมู่คาร์บอกซิลิก ( $\text{COOH}$ ) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ที่  $1436.12\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งพีคดังกล่าวนี้ไม่ปรากฏใน FT-IR สเปกตรัมของแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร จึงเป็นการยืนยันว่าแป้งดัดแปรที่ได้มีโครงสร้างทางเคมี ดังต่อไปนี้



นอกจากนี้ ยังพบพีค  $\text{COO}^-$  stretching ของ  $\text{COO}^-\text{Na}^+$  ในแป้งดัดแปรทั้งสามสูตร ณ wavenumber ที่  $1561.94\text{ cm}^{-1}$  ซึ่งแสดงว่าแป้งดัดแปรที่ได้นี้ยังคงมีโครงสร้างทางเคมีที่เป็น



รวมอยู่ด้วย ที่เป็นเช่นนี้น่าจะเป็นเพราะในผลิตภัณฑ์ที่เตรียมได้นั้น ไม่ได้มีการกำจัดโซเดียมคลอไรด์ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการทำให้สารละลายแป้งดัดแปรเป็นกลางด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เนื่องจากเป็นความพยายามในการลดขั้นตอนของกระบวนการผลิตลง จึงมีความเป็นไปได้ที่โซเดียมไอออนส่วนหนึ่งยังคงรวมตัวอยู่กับแป้ง ซึ่งโซเดียมคลอไรด์ที่เหลืออยู่นี้ อาจจะมีผลหรือไม่มีผลต่อสมบัติต่างๆของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

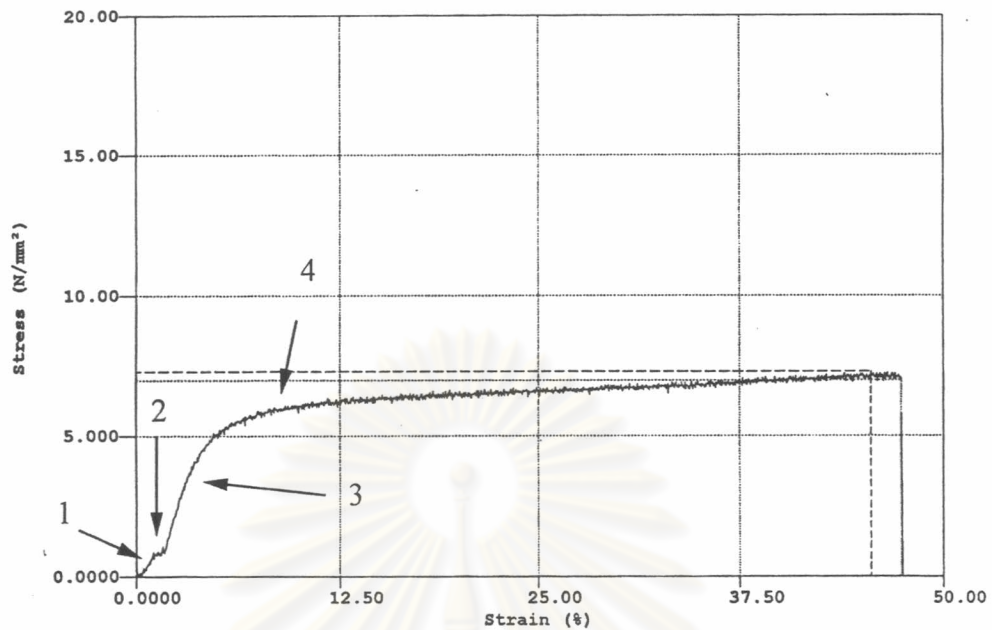
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### 4.4 สมบัติด้านแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและเกาลิน

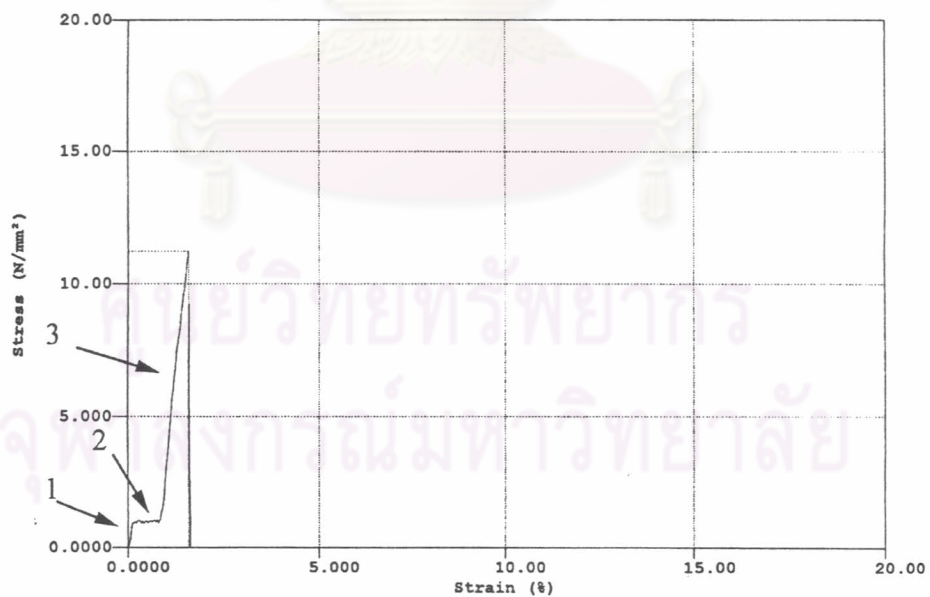
สมบัติด้านแรงดึงเป็นสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของวัสดุ ซึ่งใช้ประกอบการพิจารณาเลือกวัสดุ เพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ในงานวิจัยนี้จะทดสอบสมบัติของวัสดุเชิงประกอบตามมาตรฐาน ASTM D638-00 โดยศึกษาถึงผลของปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์ ปริมาณเกาลิน ตลอดจนผลของการเติมกลีเซอรอลในวัสดุเชิงประกอบ ที่มีต่อความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ความทนแรงดึง ความสามารถในการยืดดึง และค่ามอดุลัสยืดหยุ่น ซึ่งผลการทดลองดังกล่าว คำนวณจากค่าเฉลี่ยของชิ้นงานทดสอบจำนวน 6 ชิ้นงานต่อหนึ่งสูตรการทดลอง

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.12 ซึ่งเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น (stress) และความเครียด (strain) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล และมีเกาลินน้อยกว่า 40 phr จะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟสามารถแบ่งได้เป็น 4 ช่วง กล่าวคือ ในช่วงแรกเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ความเครียดเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเค้น จากนั้นความเค้นจะเริ่มคงที่ ความเครียดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงที่ 2 ส่วนเส้นกราฟในช่วงที่ 3 จะมีลักษณะเช่นเดียวกับกราฟในช่วงที่ 1 จากนั้นเส้นกราฟเริ่มโค้งพร้อมทั้งเกิดจุดคราก (yield point) ซึ่งเป็นจุดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานอย่างถาวร หลังจากจุดนี้ความเครียดของเส้นกราฟเพิ่มขึ้น ส่วนความเค้นจะเริ่มคงที่อีกครั้ง โดยกราฟดังกล่าวแสดงลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งและเหนียว (hard and tough) [3] เนื่องจากมีค่าความเค้นและความเครียดสูง

ส่วนวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% มีปริมาณเกาลินมากกว่า 40 phr และวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% ในทุกปริมาณเกาลิน สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงเพียง 3 ช่วง และไม่พบการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงที่ความเค้นเริ่มคงที่และความเครียดเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.13 โดยกราฟดังกล่าวแสดงลักษณะของวัสดุที่มีความแข็งและเปราะ (hard and brittle) [3] เนื่องจากมีค่าความเค้นสูงและความเครียดมีค่าต่ำมาก

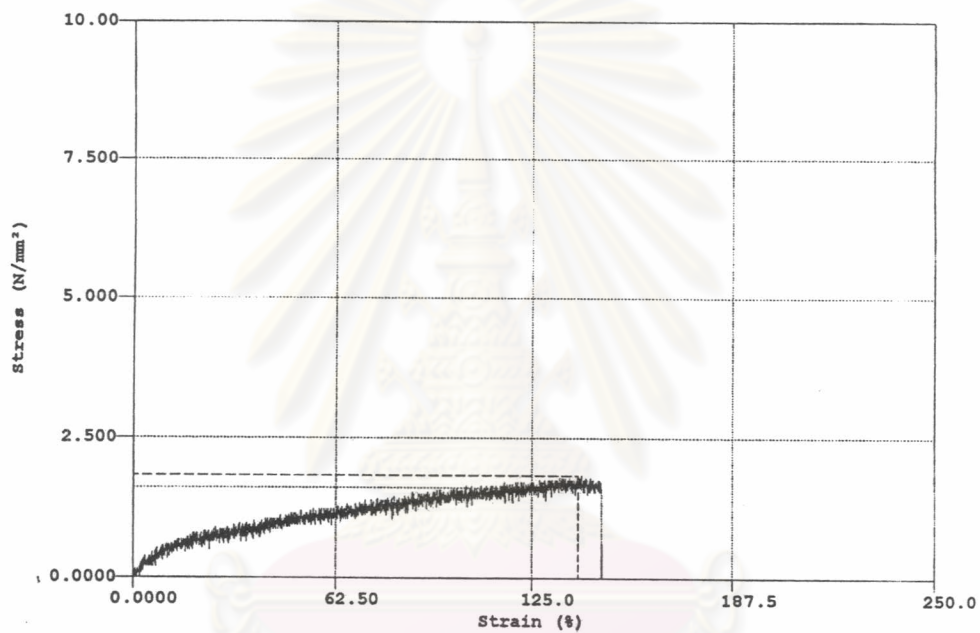


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีปริมาณกาถลินไม่เกิน 40 phr เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% มีปริมาณกาถลินมากกว่า 40 phr และวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% และมีปริมาณกาถลินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

สำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีการเติมกลีเซอรอล 20 phr พบว่า เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะแตกต่างจากในกรณีที่ไม่เติมกลีเซอรอลโดยสิ้นเชิง กล่าวคือ จะไม่พบการเปลี่ยนแปลงเป็นช่วงๆ แต่จะพบเพียงว่า ความเครียดและความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกันในทุกสูตรการทดลอง ดังรูปที่ 4.14 ซึ่งกราฟดังกล่าวแสดงลักษณะของวัสดุที่มีความอ่อนและไม่แข็งแรง (soft and weak) [3] เนื่องจากมีค่าความเค้นต่ำและความเครียดมีค่าสูง



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ที่มีปริมาณเกลาลินต่างๆกัน และมีการเติมกลีเซอรอล 20 phr

#### 4.4.1 ความทนแรงดึง

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปร 25% กับปริมาณเกลาลิน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ดังตารางที่ 4.1 พบว่า การเติมเกลาลิน จะทำให้ความสามารถในการทนแรงดึงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาคเกลาลินเป็นสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound) มีผลึกเป็นแท่งและแข็ง จึงทำให้สามารถรับแรงที่มากระทำกับชิ้นงานได้เพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าความทนแรงดึงในตารางที่ 4.1 มีการ

กระจายของข้อมูลค่อนข้างมาก โดยเฉพาะวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% ซึ่งอธิบายได้ว่า เป็นผลมาจากข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonuniformity) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ กล่าวคือ ในขั้นตอนการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ เมื่อปริมาณมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพิ่มขึ้น ต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ในการเร่งปฏิกิริยามากขึ้น ส่งผลให้ต้องให้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกในการทำให้เป็นกลางในปริมาณที่สูงตามไปด้วย จากภาพถ่าย SEM ในรูปที่ 4.15 และ 4.16 พบว่า โซเดียมคลอไรด์ซึ่งเป็นเกลือที่เป็นผลพลอยได้จากการทำปฏิกิริยาของกรดไฮโดรคลอริกและแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ที่ยังไม่ทำให้เป็นกลาง เกาะกลุ่มอย่างไม่เป็นระเบียบภายในชิ้นงาน ก่อให้เกิดความไม่เป็นเนื้อเดียวกันของชิ้นงาน ส่งผลให้การกระจายของข้อมูลที่ได้มีค่าค่อนข้างสูง

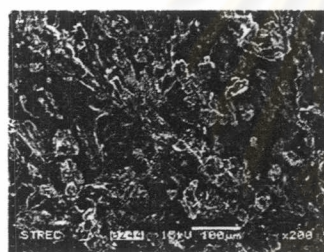
ตารางที่ 4.1 ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ณ ปริมาณกาลินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

ปริมาณกาลิน (phr)	ค่าความทนแรงดึง (MPa)		
	แป้งดัดแปร 25%	แป้งดัดแปร 50%	แป้งดัดแปร 75%
0	6.95±0.70	11.70±0.89	7.96±0.81
10	13.26±0.94	10.07±3.15	7.69±2.18
20	11.33±0.80	10.00±4.98	11.15±3.42
30	10.46±0.55	13.05±2.34	9.09±2.32
40	8.26±0.35	12.68±1.06	16.48±2.63
50	14.06±2.08	6.71±1.42	12.72±2.16
60	14.24±1.59	9.78±3.76	15.07±2.05

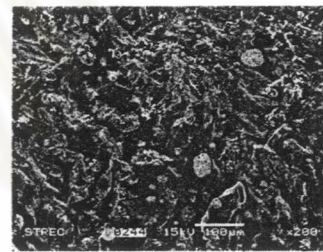
การเติมกลีเซอรอลทำให้ความทนแรงดึงของชิ้นงานที่เตรียมจากวัสดุเชิงประกอบแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ทั้งที่มีและไม่มี การเติมกาลินลดลงอย่างมาก ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ [45] แทรกอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งดัดแปรและ/หรือกาลิน ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างๆในระบบลดลง เช่นเดียวกับสูตรที่ไม่มี การเติมกลีเซอรอล วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% ยังพบการกระจายตัวของผลึกโซเดียมคลอไรด์ที่ไม่เป็นระเบียบ ทำให้เกิดข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonuniformity) เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.2 ความทนแรงดึงของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% ณ ปริมาณกาละลินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

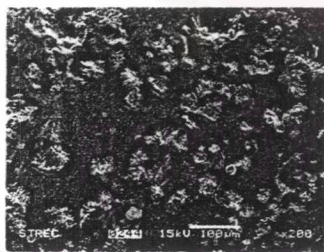
ปริมาณกาละลิน (phr)	ความทนแรงดึง (MPa)		
	แป้งตัดแปร 25%	แป้งตัดแปร 50%	แป้งตัดแปร 75%
0	0.72±0.02	1.18±0.26	1.19±0.07
10	0.75±0.11	0.98±0.17	1.39±0.22
20	1.27±0.06	1.12±0.05	1.84±0.17
30	1.65±0.13	1.32±0.07	0.76±0.14
40	2.27±0.18	1.37±0.09	1.81±0.16
50	1.61±0.10	2.14±0.16	1.39±0.21
60	2.56±0.13	1.73±0.13	1.60±0.12



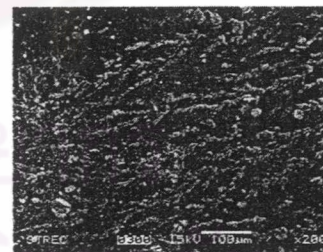
(ก)



(ข)

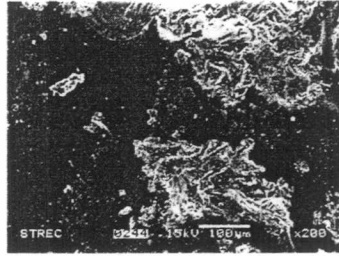


(ค)

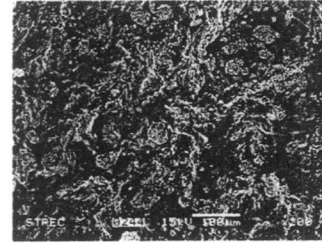


(ง)

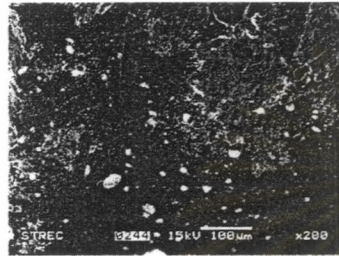
รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากแป้งตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และมีปริมาณกาละลิน 0 phr (ก) 10 phr (ข) 30 phr (ค) และ 50 phr (ง) เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ที่กำลังขยาย 200 เท่า



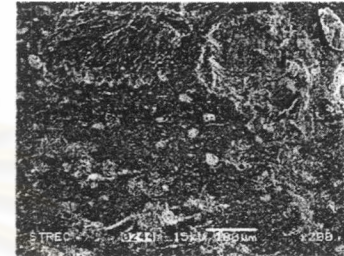
(ก)



(ข)

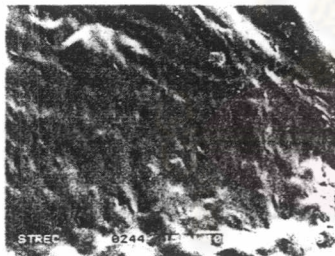


(ค)

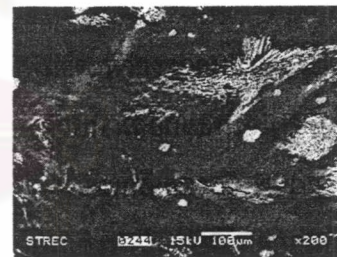


(ง)

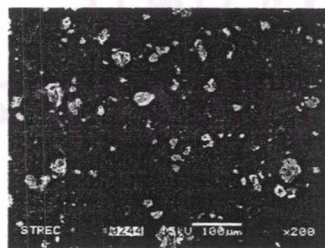
รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 75% และมีปริมาณกราฟีน 0 phr (ก) 10 phr (ข) 30 phr (ค) และ 50 phr (ง) เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ที่กำลังขยาย 200 เท่า



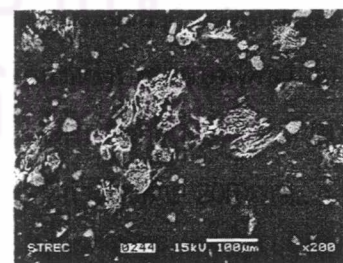
(ก)



(ข)



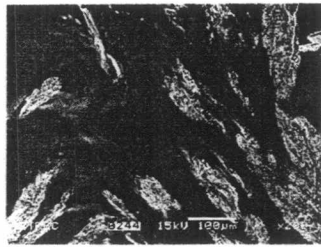
(ค)



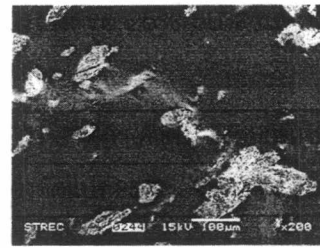
(ง)

รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และมีปริมาณกราฟีน 0 phr (ก) 10 phr (ข) 30 phr (ค) และ 50 phr (ง) เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr ที่กำลังขยาย 200 เท่า

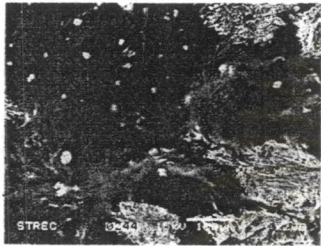




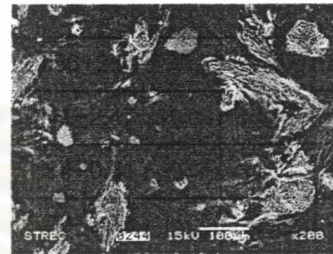
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.18 ภาพถ่าย SEM ของวัสดุเชิงประกอบที่ได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 75% และมีปริมาณเกาลิน 0 phr (ก) 10 phr (ข) 30 phr (ค) และ 50 phr (ง) เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr ที่กำลังขยาย 200 เท่า

#### 4.4.2 ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาด

จากตารางที่ 4.3 สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดได้อย่างชัดเจนสำหรับวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% กล่าวคือ เมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากเกาลินที่เติมลงไป เปรียบเสมือนสิ่งแปลกปลอมในวัสดุ เมื่อถูกแรงดึงจึงทำให้เนื้อของแป้งดัดแปรที่มีอนุภาคเกาลินแทรกตัวอยู่ เกิดการแยกตัวออกจากกันได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดที่ปริมาณเกาลินไม่เกิน 30 phr ยังมีค่าอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ส่วนสูตรของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% พบว่า ไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาด เมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonuniformity) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ อันเป็นผลมาจากผลึกโซเดียมคลอไรด์

ตารางที่ 4.3 ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปร ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเกล็ดดินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

ปริมาณเกล็ดดิน (phr)	ค่าความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาด (%)		
	แป้งดัดแปร 25%	แป้งดัดแปร 50%	แป้งดัดแปร 75%
0	50.90±4.74	1.96±0.69	1.16±0.09
10	25.54±3.24	1.66±0.25	1.98±0.59
20	24.53±4.53	2.12±0.28	1.80±0.32
30	19.56±2.81	1.26±0.15	1.54±0.18
40	7.41±2.47	1.41±0.11	1.83±0.16
50	1.84±0.31	1.25±0.25	1.88±0.50
60	3.09±0.70	1.82±0.19	1.39±0.12

ส่วนความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปร ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเกล็ดดินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr ดังตารางที่ 4.4 พบว่า กลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรที่ไม่มีกลีเซอรอล ทั้งนี้ เนื่องจากกลีเซอรอลมีสมบัติเป็นพลาสติกไซเซอร์ [45] แทรกตัวอยู่ระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง ดัดแปรทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างๆในระบบลดลง ส่งผลให้เมื่อมีแรงมากระทำกับ วัสดุ วัสดุสามารถยึดตัวออกได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.4 ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาดของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปร ด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเกล็ดดินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

ปริมาณเกล็ดดิน (phr)	ความสามารถในการยึดดึง ณ จุดขาด (%)		
	แป้งดัดแปร 25%	แป้งดัดแปร 50%	แป้งดัดแปร 75%
0	192.42±26.87	25.96±10.45	20.87±3.31
10	198.30±8.89	76.69±32.48	18.02±7.77
20	202.67±15.82	65.92±8.83	24.06±3.23
30	159.37±51.00	74.98±11.51	27.51±6.04
40	101.95±6.65	66.39±7.07	35.45±13.21
50	89.76±28.89	49.81±6.59	45.66±12.02
60	94.14±10.69	49.12±5.09	34.88±8.96

#### 4.4.3 มอดุลัสยืดหยุ่น

สำหรับมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเส้นใยต่างกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ดังตารางที่ 4.5 จะให้ผลคล้ายคลึงกับความทนแรงดึง กล่าวคือ การเติมเส้นใยทำให้มอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาคเส้นใยเป็นสารประกอบอนินทรีย์ (inorganic compound) มีผลึกเป็นแท่งและแข็ง จึงทำให้สามารถรับแรงที่มากกว่ากับชิ้นงานได้เพิ่มมากขึ้น ส่วนมอดุลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 50% และ 75% พบข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonuniformity) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ อันเป็นผลมาจากผลึกไซเดียมคลอไรด์ ทำให้มอดุลัสยืดหยุ่นที่ได้มีการกระจายของข้อมูลค่อนข้างมาก

เมื่อมีการเติมกลีเซอรอลลงในวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเส้นใยต่างกัน ดังตารางที่ 4.6 จะทำให้มอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ [45] แทรกตัวอยู่ระหว่างสายไซโมเลกุลของแป้งดัดแปรทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลต่างๆในระบบลดลง ส่งผลให้เมื่อมีแรงมากระทำกับวัสดุ วัสดุสามารถยืดตัวออกได้มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ [45] จะมีค่ามอดุลัสยืดหยุ่นมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเกล็ดดินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

ปริมาณเกล็ดดิน (phr)	ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)		
	แป้งดัดแปร 25%	แป้งดัดแปร 50%	แป้งดัดแปร 75%
0	76.89±27.41	812.35±221.43	1621.33±115.05
10	657.12±85.87	381.82±134.38	316.97±89.66
20	439.00±69.48	407.47±110.82	520.95±140.74
30	388.42±77.08	2095.33±110.84	674.18±207.86
40	324.18±94.20	1348.45±215.49	634.25±167.65
50	786.95±156.16	867.70±256.03	787.73±192.66
60	1009.42±136.27	511.70±224.47	479.28±26.27

ตารางที่ 4.6 มอดูลัสยืดหยุ่นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% 50% และ 75% และมีปริมาณเกล็ดดินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

ปริมาณเกล็ดดิน (phr)	ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น (MPa)		
	แป้งดัดแปร 25%	แป้งดัดแปร 50%	แป้งดัดแปร 75%
0	0.47±0.11	27.17±15.06	84.28±24.05
10	0.59±0.34	7.14±2.40	94.71±23.41
20	1.08±0.15	25.33±5.54	64.97±20.53
30	0.54±0.08	9.74±3.24	33.63±16.23
40	3.04±0.84	11.01±2.57	68.80±15.54
50	3.14±0.67	7.97±0.82	21.82±10.43
60	4.35±1.17	2.85±1.25	66.63±12.04

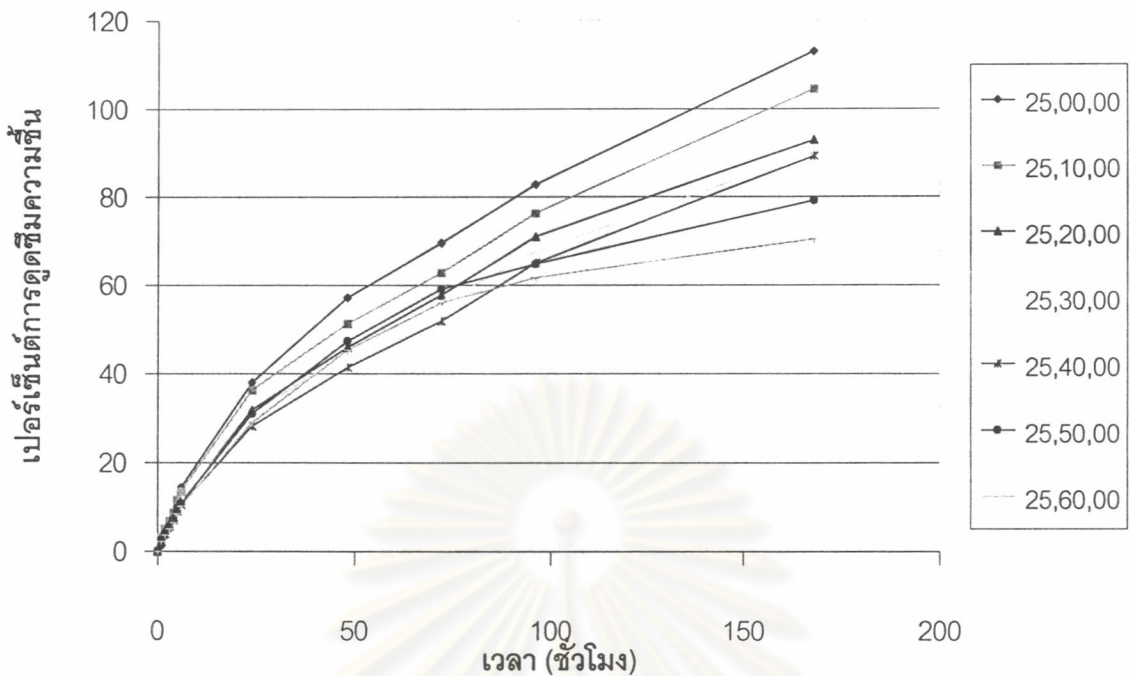
จากผลของสมบัติเชิงกลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรและเกล็ดดิน พบว่าการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์มากกว่า 25% พบข้อบกพร่อง (defects) ที่เกิดจากความไม่เป็นเนื้อเดียวกัน (nonuniformity) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้ ดังนั้นในการทดลองต่อมา จึงมุ่งเน้นเฉพาะวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เท่านั้น

#### 4.5 ความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จาก แป้งดัดแปรและเกาลิน

##### 4.5.1 ความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้ง ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้ง  
ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ดังแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่า การดูด  
ซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบนี้เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ในทุกสูตรการ  
ทดลอง และเมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น ทำให้การดูดซึมความชื้นลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอนุภาค  
เกาลินเนื่องจากเกาลินไม่ดูดซึมความชื้น [40] และมีขนาดอนุภาคที่เล็กมาก จึงสามารถแทรกตัว  
อยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งดัดแปรได้ง่าย จึงทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปเกิด  
พันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า วัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีเกาลินจะมี  
เปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นมากที่สุด เนื่องจากแป้งดัดแปรสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับ  
โมเลกุลของน้ำได้ง่าย และวัสดุเชิงประกอบที่มีเกาลิน 60 phr มีเปอร์เซ็นต์การดูดซึมความชื้นน้อย  
ที่สุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

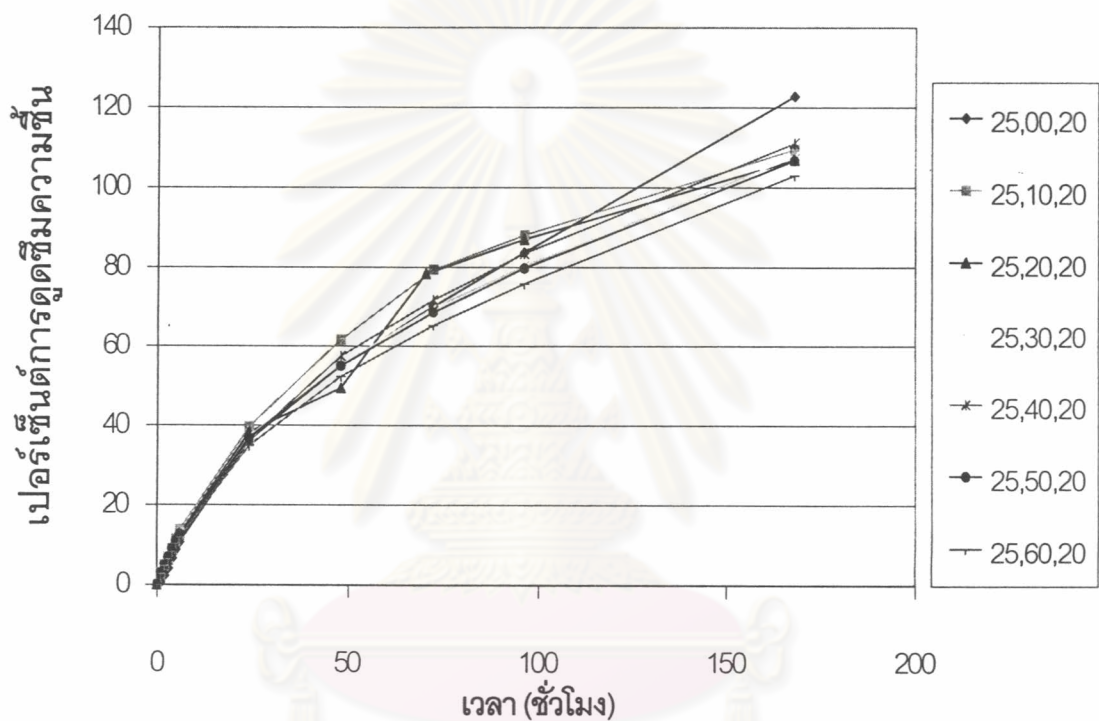


รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซึมในช่วงเวลาต่างๆของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแบ่งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีปริมาณเกาลินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

4.5.2 ความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแบ่งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

รูปที่ 4.20 แสดงความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแบ่งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีกลีเซอรอล 20 phr พบว่า การดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบนี้เพิ่มขึ้น เมื่อเวลาที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นในทุกสูตรการทดลอง และเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการดูดซึมความชื้นของวัสดุเชิงประกอบนี้มากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาที่ทดสอบในทุกสูตรการทดลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบกับในกรณีที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.5.1 การมีกลีเซอรอลทำให้แบ่งดัดแปรดูดซึมความชื้นได้มากขึ้น ภายใต้ภาวะที่มีความชื้นอิ่มตัว ทั้งนี้เนื่องมาจากกลีเซอรอลจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแบ่ง ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของแบ่งเพิ่มขึ้น จึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวผ่านเข้าไปและเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแบ่งได้เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง [45] อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาผลของเกาลินที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมความชื้นของแบ่งดัดแปรดังกล่าวนี้ ยังคงพบว่า ให้ผลกระทบเช่นเดียวกับแบ่งดัดแปร สูตรที่ไม่ได้เติมกลีเซอรอล กล่าวคือ เมื่อ

ปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น การดูดซึมความชื้นลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอนุภาคเกาลินซึ่งมีขนาดเล็กมาก สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างช่องว่างต่างๆที่เกิดขึ้น ประกอบกับการที่เกาลินเป็นสารที่มีความสามารถในการดูดซึมความชื้นต่ำมาก หรืออาจกล่าวได้ว่า ไม่ดูดซึมความชื้น [40] จึงทำให้โมเลกุลของน้ำไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปได้ และเกิดพันธะไฮโดรเจนกับโมเลกุลของแป้งได้ ดังนั้นเมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น ช่องว่างที่โมเลกุลของน้ำสามารถแทรกตัวเข้าไปได้จึงมีน้อยลง



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นที่ถูกดูดซึมในช่วงเวลาต่างๆของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีปริมาณเกาลินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## 4.6 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบจากแป้งดัดแปรและเกาลิน

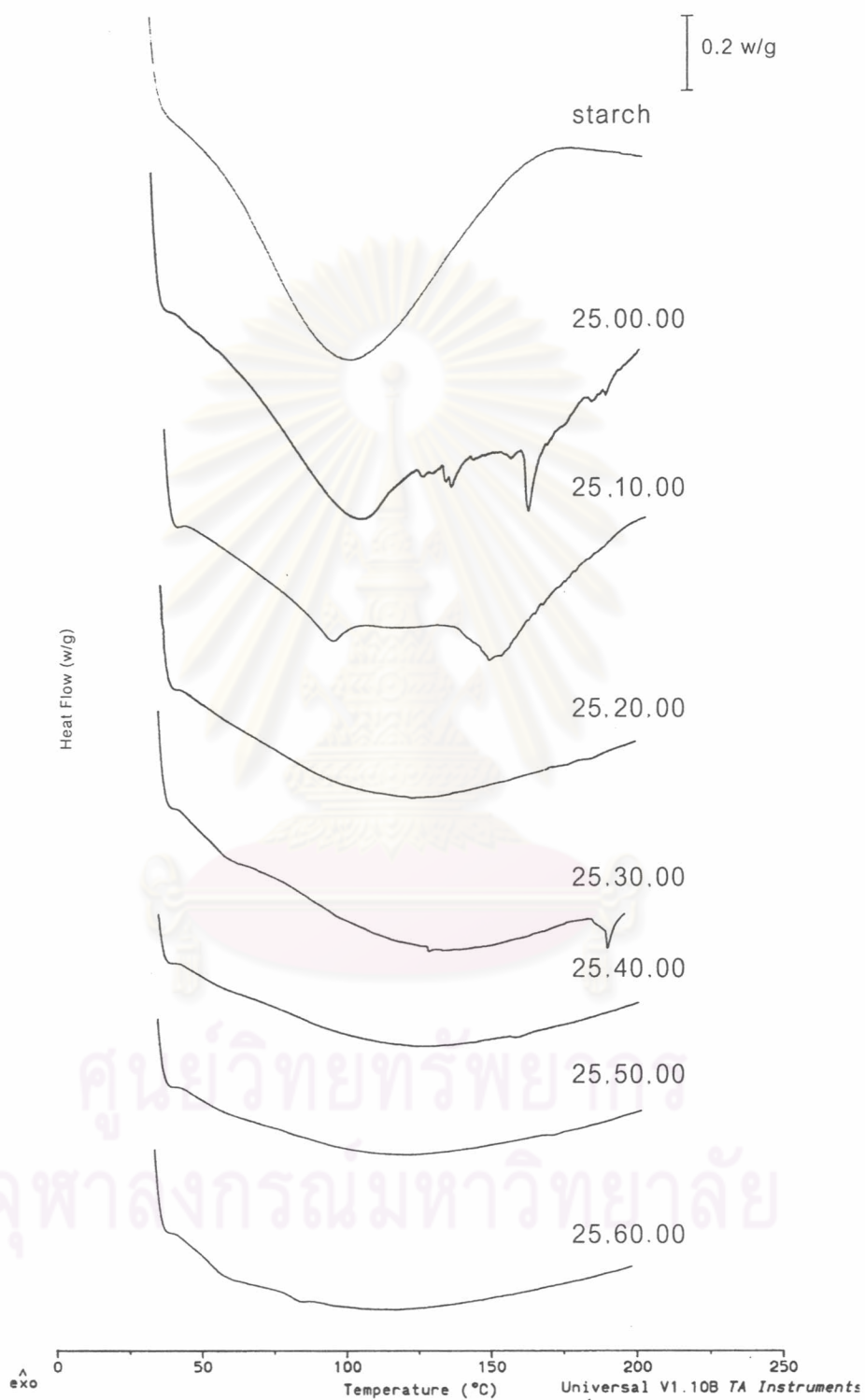
### 4.6.1 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter: DSC)

#### 4.6.1.1 สมบัติทางความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วย DSC ของแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

ผลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่วิเคราะห์ด้วยเครื่องดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริมิเตอร์ ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล ที่ปริมาณเกาลินต่างกัน แสดงได้ในรูปที่ 4.21 พบว่า เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบลักษณะของกราฟพบว่า เมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น จะทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนน้อยลง กล่าวคือ ในแป้งที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปร เนื่องจากเมื่อมีการเติมเกาลิน อนุภาคเกาลินที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งดัดแปร โมเลกุลของแป้งเมื่อได้รับพลังงานจะสามารถเคลื่อนไหวได้ง่าย จึงทำให้เห็นการดูดความร้อนได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อเติมเกาลินลงไป อนุภาคของเกาลินสามารถไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งได้ และอาจจะยึดเหนี่ยวโมเลกุลของแป้งเข้าไว้ด้วยกัน จึงทำให้โมเลกุลของแป้งดัดแปรเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงทำให้ไม่สามารถเห็นการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนได้ชัดเจน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



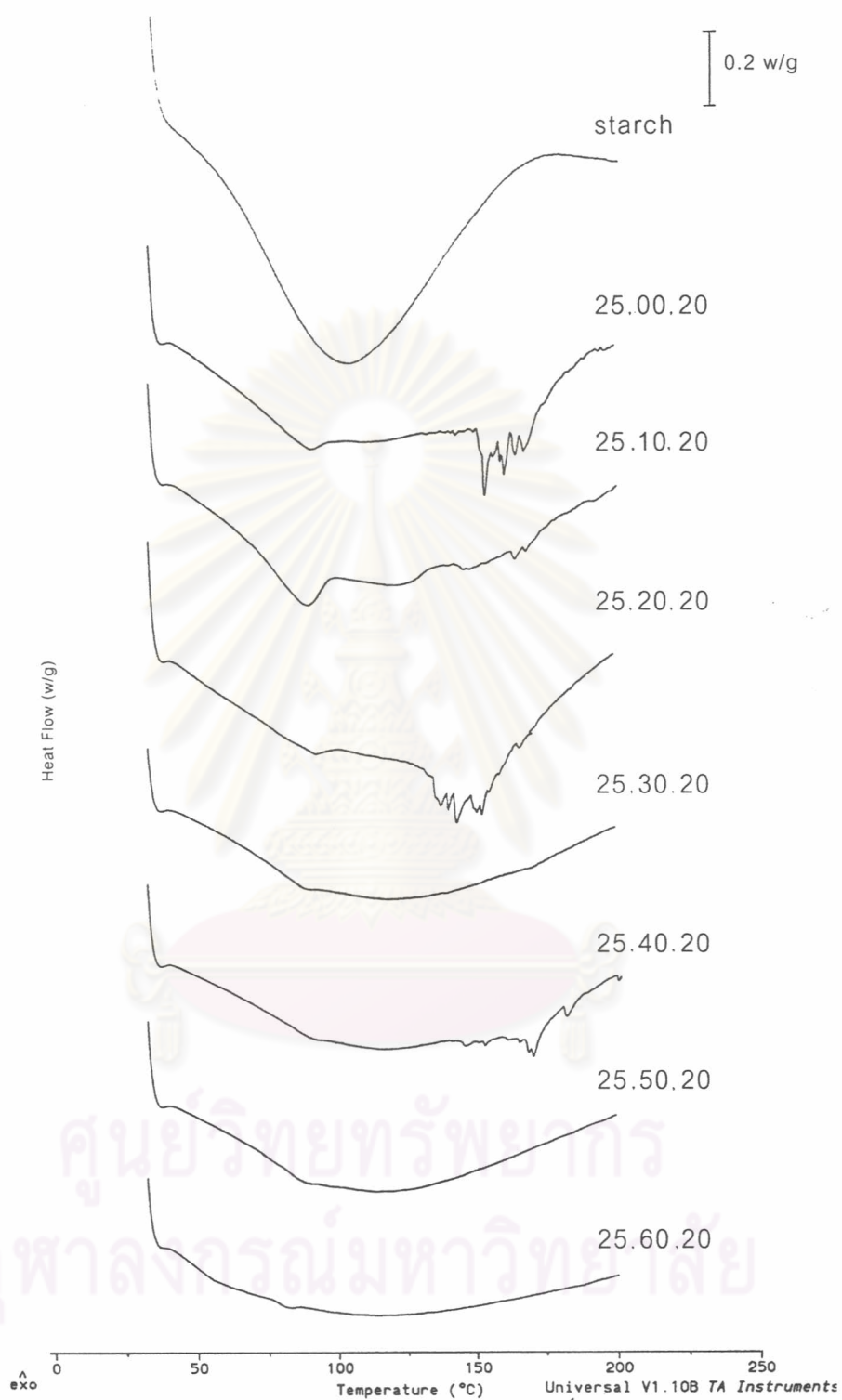


รูปที่ 4.21 DSC เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 % และมีปริมาณ  
 เกาตินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

#### 4.6.1.2 สมบัติทางความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วย DSC ของแป้งดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

เมื่อนำผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จาก แป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีการเติมกลีเซอรอล 20 phr ในรูปที่ 4.22 ไปเปรียบเทียบกับผลของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมได้จากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และไม่เติมกลีเซอรอล ในรูปที่ 4.21 จะพบว่า การเติมกลีเซอรอล ทำให้วัสดุเชิงประกอบดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนที่เห็นได้ชัดเจนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ไม่มีกลีเซอรอล เนื่องจากกลีเซอรอลทำให้โมเลกุลภายในระบบสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ กล่าวคือ เข้าไปแทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของแป้งลดลง แป้งจึงสามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายขึ้น ทั้งนี้ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการศึกษาแป้งดัดแปรด้วยเอสเทอร์ของกรดไขมัน [46] ซึ่งพบว่า เมื่อนำแป้งมาทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับแอซิดคลอไรด์ของกรดไขมันที่มีขนาดความยาวของสายโซ่โมเลกุลต่างๆกัน ซึ่งทำให้ได้เป็นแป้งเอสเทอร์นั้น ส่วนสายโซ่ยาวของกรดไขมันจะทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ภายใน (internal plasticizer) ช่วยให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน ( $T_g$ ) ของแป้งเอสเทอร์ต่ำลง ยิ่งความยาวของสายโซ่เพิ่มขึ้น อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของแป้งเอสเทอร์ยิ่งต่ำลงมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ปริมาณของกลีเซอรอลที่เติมลงในแป้งที่ดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์เพียง 20 phr นี้ คงยังไม่เพียงพอที่จะทำให้เห็นอุณหภูมิกลาสทรานซิชันของแป้งดัดแปรนี้ได้

แต่ในขณะเดียวกัน เมื่อมีการเติมเกลลิน อนุภาคเกลลินที่แทรกตัวอยู่ระหว่างโมเลกุลของแป้งดัดแปร ทำให้โมเลกุลของแป้งดัดแปรเคลื่อนที่ได้ยากขึ้น จึงทำให้สังเกตเห็นว่าเมื่อปริมาณเกลลินเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของเส้นกราฟในช่วงที่มีการดูดความร้อนของวัสดุเชิงประกอบลดลง



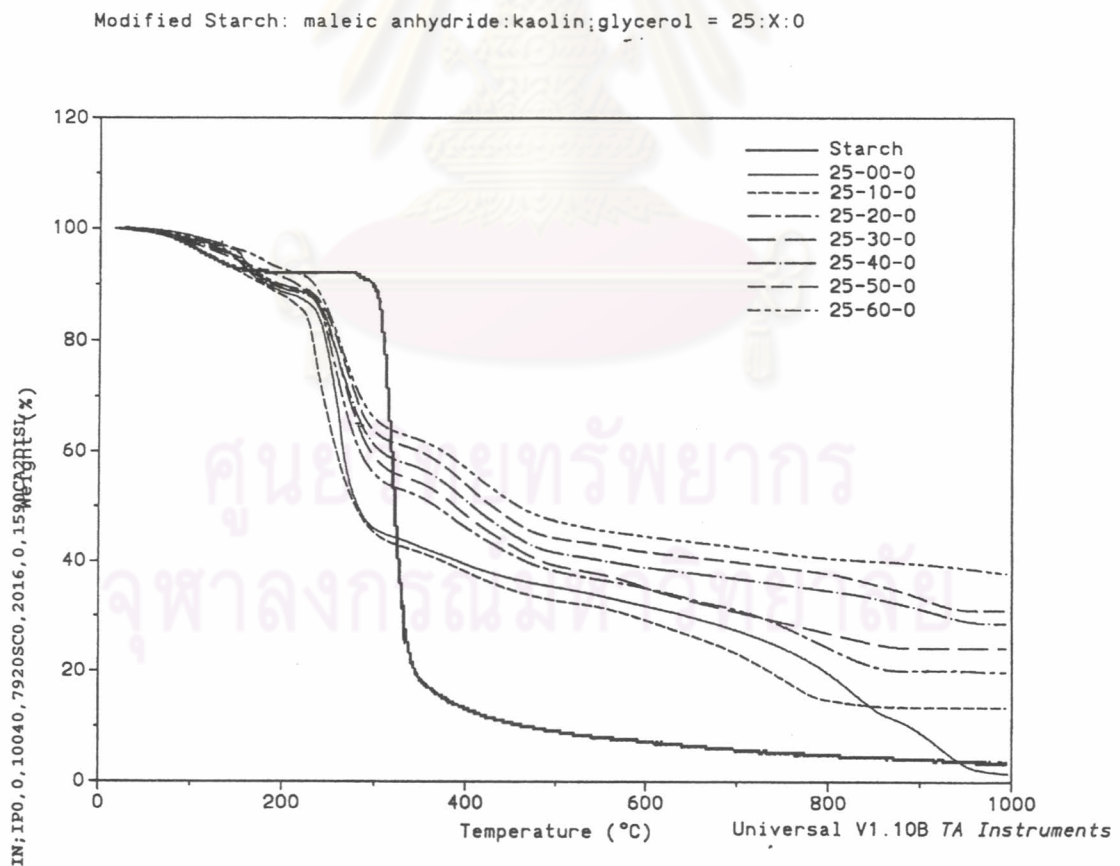
รูปที่ 4.22 DSC เทอร์โมแกรมของแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25 % และมีปริมาณ  
 เกลือต่างกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

#### 4.6.2 การวิเคราะห์ด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric Analyzer: TGA)

##### 4.6.2.1 สมบัติทางความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วย TGA ของแป้งดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

การทดลองในส่วนนี้เน้นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และกาอลิน เพื่อศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว ( $T_d$ ) และอิทธิพลของปริมาณกาอลินที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัว เมื่อไม่มีการเติมกลีเซอรอล

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว แสดงในรูปที่ 4.23 และตารางที่ 4.7



รูปที่ 4.23 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีปริมาณกาอลินต่างๆกัน เมื่อไม่เติมกลีเซอรอล

จากรูปที่ 4.23 พบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทั้งแปดดัดแปรและแปรงที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัวในช่วงแรก สันนิษฐานว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความชื้น

สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวของแปรงดัดแปรในช่วงที่สอง เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 4.7 พบว่า แปรงที่ผ่านการดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแปรง ลดลงจาก 298.5 องศาเซลเซียส เหลือ 245 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแปรงที่ไม่ผ่านการดัดแปร และการมีเกล็ดในแปรงดัดแปร ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงที่สองนี้ลดลงเล็กน้อย

ส่วนน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิในช่วงนี้ พบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดถึง 43.69% ในแปรงดัดแปรที่ไม่มีการเติมเกล็ด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำหนักรวมที่สูญเสียไปเป็นของแปรงดัดแปร และลดลงเรื่อยๆ เมื่อปริมาณเกล็ดเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% โดยใช้ปริมาณเกล็ดต่างๆกัน และไม่เติมกลีเซอรอล

วัสดุเชิงประกอบ	อุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่สอง (°C)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	อุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่สาม (°C)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ส่วนที่หลงเหลืออยู่ที่ 1000°C (%)
25,00,00	245	43.69	-	-	0.64
25,10,00	226	46.39	-	-	13.38
25,20,00	241	35.92	356	15.97	19.84
25,30,00	242	34.09	365	17.46	24.16
25,40,00	240	31.37	365	16.74	28.64
25,50,00	242	30.55	365	17.45	31.04
25,60,00	240	28.90	372	15.95	37.79

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิการสลายตัวช่วงที่สาม ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณเกล็ด พบว่า อุณหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเกล็ดเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 20 phr เป็นต้นไป ถ้าต่ำกว่านี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในช่วงนี้ และเมื่อพิจารณาจาก

อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งตัดแปรที่มีการเติม เกลือไม่น้อยกว่า 20 phr พบว่า มีค่าของอุณหภูมิการสลายตัวไม่แตกต่างกันมากนัก โดย อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งตัดแปรที่มีปริมาณเกลือเป็น 20 30 40 50 และ 60 phr เพิ่มขึ้นเป็น 41 50 50 50 และ 57 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ไม่ ได้ผ่านการตัดแปร ซึ่งเป็นไปได้ว่าอุณหภูมิที่สังเกตเห็นได้ดังกล่าว อาจเป็นของแป้งที่ไม่ได้ทำ ปฏิกริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์

เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยๆจนถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อปริมาณเกลือ มากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบลดลง ดังตารางที่ 4.7

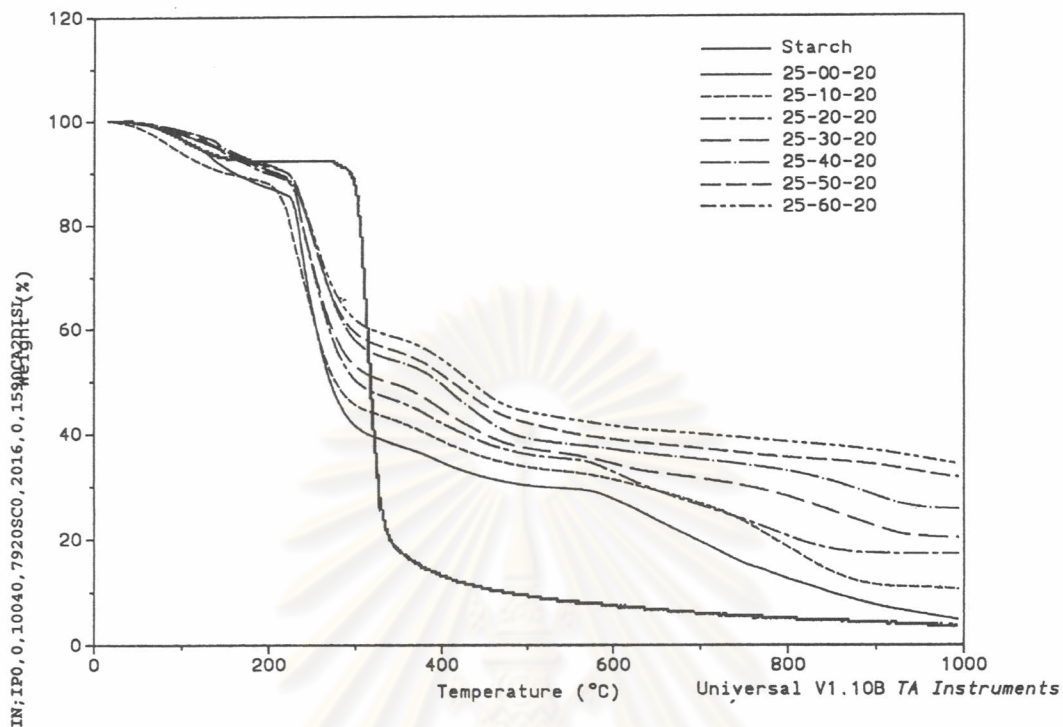
#### 4.6.2.2 สมบัติทางความร้อนเมื่อวิเคราะห์ด้วย TGA ของแป้งตัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

การทดลองในส่วนนี้เน้นการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบที่ เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และเกลือ เพื่อศึกษาอุณหภูมิ การสลายตัว ( $T_d$ ) และอิทธิพลของปริมาณเกลือที่มีต่ออุณหภูมิการสลายตัว เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

การเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบดังกล่าว ดังรูปที่ 4.24 และ ตารางที่ 4.8

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Modified Starch: maleic anhydride:kaolin:glycerol = 25:X:20



รูปที่ 4.24 TGA เทอร์โมแกรมของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย มาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีปริมาณกาอลินต่างๆกัน เมื่อเติมกลีเซอรอล 20 phr

จากรูปที่ 4.24 ยังคงพบการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชิ้นตัวอย่างทั้งแป้งดัดแปร และแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปรที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิการสลายตัว ในช่วงแรก เช่นเดียวกับชิ้นตัวอย่างที่เตรียมจากแป้งดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% ใน กรณีที่ไม่เติมกลีเซอรอล สันนิษฐานว่าเป็นการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากความชื้น

สำหรับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งดัดแปรในช่วงที่สอง เมื่อพิจารณาจาก ตารางที่ 4.8 พบว่า แป้งที่ผ่านการดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% และมีกลีเซอรอล 20 phr ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวของแป้งในช่วงนี้ลดลงเช่นเดียวกัน โดยมีอุณหภูมิลดลงจาก 298.5 องศาเซลเซียส เหลือ 228 องศาเซลเซียสเมื่อเทียบกับอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ไม่ผ่านการ ดัดแปร ซึ่งลดลงมากกว่าในกรณีที่ไม่มีกาเติมกลีเซอรอล เนื่องจากในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว นอกจากอุณหภูมิการสลายตัวของแป้งดัดแปรแล้ว ยังมีอุณหภูมิการสลายตัวของกลีเซอรอลอีกด้วย โดยกลีเซอรอลมีอุณหภูมิการสลายตัวที่ 225 องศาเซลเซียส และผลของกลีเซอรอลดังกล่าวนี้ จึง ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงนี้มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อปริมาณกาอลินเพิ่มขึ้น

ส่วนน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของอนุหภูมิในช่วงนี้ พบว่า มีการสูญเสียน้ำหนักมากที่สุดถึง 49.95% ในแป้งมันสำปะหลังที่ไม่มีการเติมเกาลิน ซึ่งมากกว่าในกรณีที่ไม่มีการเติมกลีเซอรอลเล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำหนักที่สูญเสียไปเป็นของแป้งดัดแปรและกลีเซอรอลเมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้นน้ำหนักที่สูญเสียไปจะลดลง

ตารางที่ 4.8 อนุหภูมิการสลายตัวและน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไป (%) ของวัสดุเชิงประกอบที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยมาเลอิกแอนไฮไดรด์ 25% โดยใช้ปริมาณเกาลินต่างๆกัน และมีกลีเซอรอล 20 phr

วัสดุเชิงประกอบ	อนุหภูมิการสลายตัวช่วงที่สอง (°C)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	อนุหภูมิการสลายตัวช่วงที่สาม (°C)	น้ำหนักที่สูญเสีย (%)	ส่วนที่หลงเหลืออยู่ที่ 1000°C (%)
25,00,20	228	49.95	-	-	4.90
25,10,20	214	45.62	-	-	10.62
25,20,20	228	42.06	-	-	17.31
25,30,20	227	41.88	367	13.45	20.34
25,40,20	230	37.32	383	15.20	25.81
25,50,20	228	35.07	379	14.17	31.82
25,60,20	228	33.06	384	14.91	34.32

เมื่อพิจารณาอนุหภูมิการสลายตัวช่วงที่สาม ซึ่งเกี่ยวข้องกับปริมาณเกาลิน พบว่าอนุหภูมิการสลายตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อปริมาณเกาลินเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 30 phr เป็นต้นไป ถ้าต่ำกว่านี้จะไม่สามารถสังเกตเห็นค่าการเปลี่ยนแปลงของอนุหภูมิในช่วงนี้ และเมื่อพิจารณาจากอนุหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร เมื่อเปรียบเทียบกับแป้งดัดแปรที่มีการเติมเกาลินไม่น้อยกว่า 30 phr พบว่า มีค่าของอนุหภูมิการสลายตัวไม่แตกต่างกันมากนัก โดยค่าอนุหภูมิการสลายตัวของแป้งดัดแปรที่มีปริมาณเกาลินเป็น 30 40 50 และ 60 phr เพิ่มขึ้นเป็น 52 68 64 และ 69 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เมื่อเทียบกับอนุหภูมิการสลายตัวของแป้งที่ไม่ผ่านการดัดแปร ซึ่งเป็นไปได้ว่าอนุหภูมิที่สังเกตเห็นได้ดังกล่าว อาจเป็นของแป้งที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยากับมาเลอิกแอนไฮไดรด์

เมื่อเพิ่มอนุหภูมิไปเรื่อยๆจนถึง 1000 องศาเซลเซียส พบว่า เมื่อปริมาณเกาลินมากขึ้น การสูญเสียน้ำหนักของวัสดุเชิงประกอบลดลง ดังตารางที่ 4.8