



ผลกระทบต่อลักษณะผลึกของซินดิโอแทคติกพอลิสไตรีนอันเนื่องมาจากการเติมสาร  
คู่ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และการเติมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ  
(Effects of miscibility and Low Molar Mass Liquid Crystal Blend on the  
Crystallization of Syndiotactic Polystyrene)

โดย  
ศุภกนก ทองใหญ่

โครงการวิจัยเลขที่ 71G-CHEM-2548  
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ  
ตุลาคม 2549

ผลกระทบต่อลักษณะผลึกของซินดิโอแทคติกพอลิสไตรีนอันเนื่องมาจากการเติมสาร  
คู่ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และการเติมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ  
(Effects of miscibility and Low Molar Mass Liquid Crystal Blend on the  
Crystallization of Syndiotactic Polystyrene)

โดย  
ศุภกนก ทองใหญ่

โครงการวิจัยเลขที่ 71G-CHEM-2548  
ทุนงบประมาณแผ่นดินปี 2548

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
กรุงเทพฯ  
ตุลาคม 2549

ชื่อโครงการวิจัย ผลกระทบต่อลักษณะผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนอันเนื่องมาจากการ  
เติมสารคู่ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกัน และการเติมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ

ชื่อผู้วิจัย ศุภกนก ทองใหญ่

เดือนและปีที่ทำการวิจัยเสร็จ ตุลาคม 2549

#### บทคัดย่อ

ได้ทำการสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนในห้องปฏิบัติการในสภาวะที่ปราศจากออกซิเจนและน้ำ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเมทัลโลซีน เพื่อใช้ทดสอบความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมกับพอลิเมอร์ที่สามารถเป็นเนื้อเดียวกันได้กับพอลิสไตรีนแบบอสัณฐานในรูปแบบการผสมแบบหลอมละลายและการใช้ตัวทำละลายร่วม ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ พอลิอัลฟาเมทิลสไตรีน พอลิเอทิลเมทาโครเลท พอลิเอินบิวทิลเมทาโครเลท พอลิไซโคลเฮกซิลอโครเลท พอลิซิสไอโซพรีน โดยพบค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวระหว่างพอลิเมอร์ทั้งสอง นอกจากนี้ยังเข้ากันบางส่วนได้กับพอลิไวนิลเมทิลอีเทอร์ นอกจากนี้ได้ทดลองผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำและสารหล่อลื่น (กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท) ในพอลิเมอร์ผสมดังกล่าว พบว่าสามารถทำให้อุณหภูมิหลอมตัวของผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนลดลง เนื่องจากการเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นของพอลิเมอร์อสัณฐานที่ทำให้เคลื่อนที่ออกจากผลึกได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้อุณหภูมิที่ผลึกมีค่าลดลงเล็กน้อย เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมจะแยกตัวออกจากกันได้ง่ายขึ้นซึ่งทำให้การก่อผลึกยากขึ้น วิธีผสมพอลิเมอร์ส่งผลต่อค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วโดยวิธีผสมแบบใช้ตัวทำละลายร่วมจะให้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงกว่าการผสมแบบหลอมละลายเล็กน้อย เนื่องจากสามารถผสมได้ในระดับโมเลกุล จากการศึกษาด้วยการกระเจิงแสงเอ็กซ์เรย์พบว่าปริมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมลดลงและจะลดลงมากขึ้นเมื่อผสมกับผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำหรือสารหล่อลื่น การทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์ผสมโดยเครื่องเทอร์มอลกราฟิเมทริกอนาไลซิสพบว่า พอลิเมอร์ผสมกับพอลิอัลฟาเมทิลสไตรีนและพอลิซิสไอโซพรีนมีค่าอุณหภูมิสลายตัว 5% และ 10% สูงที่สุดตามลำดับ การทดสอบโดยเครื่องดีพีเพอร์เร็นเซียลเม็คแคนิคอลเทอร์มอลอะนาไลเซอร์พบว่าที่ความถี่สูงพอลิเมอร์ผสมจะรับแรงได้ดีกว่า นอกจากนี้ค่าสตอร์เรจโมดูลัสยังมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาในการรับแรงเนื่องจากโมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ออกจากกันได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิสูงหรือมีเวลาในการรับแรงที่นานขึ้น และสามารถใช้ทฤษฎีดับบลิวแอลเอฟได้กับข้อมูลที่ทดลองมา ซึ่งจะสามารถหาค่าคงที่ของดับบลิวแอลเอฟได้อีกด้วย

Project Title Effects of miscibility and Low Molar Mass Liquid Crystal Blend on the Crystallization of Syndiotactic Polystyrene

Name of the Investigators Supakanok Thongyai

Year October 2006

#### Abstract

Laboratory successfully synthesized Syndiotactic polystyrene without oxygen and water by metallocene catalyst. The miscibilities of the blend with compatible polymer of amorphous polystyrene pair were tested by melt mixing method and solution casting method. Syndiotactic polystyrene can be miscible with Poly(alfa-methyl styrene), Poly(ethyl methacrylate), Poly(n-butyl methacrylate), Poly(cyclohexyl acrylate) and Poly(cis-isoprene) by having only single glass transition temperature in between the two polymers while it can be partially miscible with Poly(vinyl methyl ether). The addition of Low molar mass liquid crystal and lubricant (glicerol monosterate) in the blend resulted in lower the crystalline melting temperature due to more mobile molecules can separated from crystal faster and resulted in lower crystallization temperature due to harder for mobile molecules to separate and generate a crystal. The mixing method affected the glass transition temperature by slightly lower temperature when using solution casting method compared to melt mixing method due to molecular mixing in solution. With X-Ray Diffraction Spectroscopy, the percent crystallinities of the blends were lower and even lower when mix with low molar mass liquid crystal or lubricant. With Thermal Gravimetric Analysis, the blends with Poly(alfa-methyl styrene) and Poly(cis-isoprene) have the highest 5% and 10% degradation temperature respectively. With Differential Mechanical Thermal Analyzer, higher frequency was, higher mechanical properties of the blends were. Moreover, when increase temperature or time of loading, the storage modulus of the blends were lower due to faster movement of molecules at high temperature and longer time for movement of molecules. The WLF theory can be applied to the blends' data with WLF constant calculated and numbered.



## สารบัญ

	หน้า
วัตถุประสงค์โครงการ	29
บทนำ	30
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	33
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	40
1. Morphology ของพอลิเมอร์	40
2. ปฏิกิริยาการหลอมเหลวตัวของพอลิเมอร์	43
3. คุณสมบัติทางความร้อน	43
4. สารเติมแต่งในพอลิเมอร์	44
5. การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์	45
การวิเคราะห์ข้อมูล และ วิธีดำเนินการทดลอง	47
1. วิธีผสมพอลิเมอร์โดยการหลอมละลาย	47
2. วิธีผสมพอลิเมอร์โดยการละลายในตัวทำละลายเดียวกัน	47
3. การเตรียมพอลิเมอร์เพื่อตรวจวัดคุณสมบัติทางความร้อนด้วย DSC	48
4. การเตรียมตัวอย่างสำหรับ XRD	49
5. การหาค่าปริมาณการเป็นผลึก	49
6. การอ่านค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (T <sub>g</sub> ) อุณหภูมิก่อนผลึก (T <sub>c</sub> ) และอุณหภูมิหลอมผลึก (T <sub>m</sub> ) จาก DSC	51
7. การอ่านค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (T <sub>m</sub> ) และอุณหภูมิก่อนผลึก (T <sub>c</sub> )	52
8. การหาค่าปริมาณ SPS ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน	53
9. การสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน	55
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย	57
ผลการทดลองตอนที่หนึ่ง	58
1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา	58
1.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเป็นซินติโอเทคติก	58
1.3 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อมวลโมเลกุลของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน	59
1.4 ผลการทดลองโดยเครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry)	60

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
1.5 ผลการทดลองโดยเครื่อง XRD	70
1.6 การแปรผลข้อมูล DSC และ XRD	81
ผลการทดลองตอนที่สอง	86
2.1 การสังเคราะห์ซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน	86
2.2 การเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน	86
2.3 การผสมกับ PaMS	88
2.4 การผสมกับ PEMA	90
2.5 การผสมกับ PBMA	91
2.6 การผสมกับ PCHA	93
2.7 การผสมกับ PIP	95
2.8 การผสมกับ PVME	97
2.9 สรุปผลของการเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน	98
2.10 ผลของการใส่ LCC และ GMS ต่อคุณสมบัติทางความร้อน ของพอลิเมอร์ผสม	99
ผลการทดลองตอนที่สาม	119
3.1 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนโดย DSC	119
3.2 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนโดย TGA	121
3.3 คุณสมบัติทางกลโดย DMA	122
3.4 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิและเวลา	123
3.5 ผลกระทบเนื่องจากความถี่	130
3.6 การสร้างกราฟการรับแรงรวม โดยการใช้ Time-Temperature Superposition (TTS)	137
3.7 ผลกระทบอันเนื่องมาจากองค์ประกอบหลัก (sPS)	151
3.8 ค่าคงที่ของ Williams Landel and Ferry (WLF)	155
3.9 ผลกระทบอันเนื่องมาจากการผสมพอลิเมอร์	163
สรุปผลการทดลองตอนที่หนึ่ง	166
สรุปผลการทดลองตอนที่สอง	167
สรุปผลการทดลองตอนที่สาม	169

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	171
ผลงานตีพิมพ์ที่ได้จากงานวิจัย	174
บทความที่หนึ่ง	176
บทความที่สอง	184
ข้อมูลการทดลองโดยละเอียด	194
ข้อมูลตอนที่หนึ่ง	194
ข้อมูลตอนที่สอง	229
ข้อมูลตอนที่สาม	261

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
0.1 ตัวอย่างการแสดงค่าประมวลผลจาก XRD	54
0.2 ตัวอย่างการแสดงค่าประมวลผลจาก DSC	54
1.1 ตารางร้อยละผลได้และค่า catalytic activity ของการสังเคราะห์พอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิคงที่ต่างๆ (Percent Yield and catalytic activity of polystyrene produced at various polymerization temperatures)	58
1.2 ร้อยละดัชนีของความเป็นซินดิโอเทคติก (% S.I.) ของการสังเคราะห์พอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิคงที่ต่างๆ (Percent Syndiotactic index (% S.i.) of polystyrene products at various polymerization temperatures)	59
1.3 แสดงค่ามวลโมเลกุลและมวลโมเลกุลตามจำนวนของการสังเคราะห์ซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิคงที่ต่างๆ (Molecular weights and molecular weight distributions of syndiotactic polystyrene at various polymerization temperatures)	59
1.4 แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิก่อตัวของผลึก ( $T_c$ ) และค่าอุณหภูมิหลอมเหลวตัวผลึก ( $T_m$ ) ของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์ (Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of pure syndiotactic polystyrenes)	61
1.5 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PBMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PBMA = 31.85°C)	61
1.6 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PBMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PBMA = 31.85°C)	62

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
1.7 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PBMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PBMA = 31.85°C)	62
1.8 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PCHA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PCHA = 25.81°C)	63
1.9 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PCHA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PCHA = 25.81°C)	63
1.10 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PCHA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PCHA = 25.81°C)	64
1.11 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PEMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PEMA = 65.54°C)	64
1.12 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PEMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PEMA = 65.54°C)	65
1.13 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PEMA blends at various compositions ( $T_g$ of pure PEMA = 65.54°C)	65
1.14 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$ of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)	66

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
1.15 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$ of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)	66
1.16 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$ of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)	67
1.17 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$ of pure Polyisoprene = -47.02 °C)	67
1.18 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$ of pure Polyisoprene = -47.02 °C)	68
1.19 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$ of pure Polyisoprene = -47.02 °C)	68
1.20 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PVME blends at various compositions ( $T_g$ of pure PVME = -27.10 °C)	69
1.21 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PVME blends at various compositions ( $T_g$ of pure PVME = -27.10 °C)	69
1.22 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PVME blends at various compositions ( $T_g$ of pure PVME = -27.10 °C)	70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
1.23 แสดงปริมาณส่วนที่เป็นผลึกของซินดิโอดิไทคพอลิสไตรีน (% Crystallinity of syndiotactic polystyrenes)	71
1.24 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PBMA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PBMA blends at various compositions)	73
1.25 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PCHA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PCHA blends at various compositions)	75
1.26 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PEMA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PEMA blends at various compositions)	77
1.27 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions)	79
1.28 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/Polyisoprene ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/Polyisoprene blends at various compositions)	81
1.29 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PBMA blends at various compositions	82
1.30 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PCHA blends at various compositions	83
1.31 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PEMA blends at various compositions	83
1.32 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions	84
1.33 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/Polyisoprene blends at various compositions	84

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.1 Polymerization of Styrene using $Cp^*TiCl_3$ with MMAO	86
2.2 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS blends	88
2.3 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS/LCC blends	89
2.4 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS/GMS blends	89
2.5 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA blends	90
2.6 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA/LCC blends	91
2.7 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA/GMS blends	91
2.8 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA blends	92
2.9 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA/LCC blends	93
2.10 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA/GMS blends	93



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.11 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA blends	94
2.12 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA/LCC blends	95
2.13 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA/GMS blends	95
2.14 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP blends	96
2.15 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP/LCC blends	97
2.16 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP/GMS blends	97
2.17 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ) and crystallization temperature ( $T_c$ ) of SPS/PVME blends	98
2.18 Melting temperature depression of their blends	102
2.19 Percentage of SPS in binary blends from calculation	107
2.20 % Crystallinity of SPS/PaMS, SPS/PaMS/GMS and SPS/PaMS/LCC blends at various compositions	116
2.21 % Crystallinity of SPS/PEMA, SPS/PEMA/GMS and SPS/PEMA/LCC blends at various compositions	116

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
2.22 % Crystallinity of SPS/PBMA, SPS/PBMA/GMS and SPS/PBMA/LCC blends at various compositions	117
2.23 % Crystallinity of SPS/PCHA, SPS/PCHA/GMS and SPS/PCHA/LCC blends at various compositions	117
2.24 % Crystallinity of SPS/PIP, SPS/PIP/GMS and SPS/PIP/LCC blends at various compositions	118
3.1 Glass transition temperatures ( $T_g$ ), melting temperatures ( $T_m$ ) and crystallization temperatures ( $T_c$ ) of sPS1 blend system	119
3.2 Glass transition temperatures ( $T_g$ ), melting temperatures ( $T_m$ ) and crystallization temperatures ( $T_c$ ) of sPS2 blend system	120
3.3 Glass transition temperature ( $T_g$ ) of sPS polymer blend	120
3.4 Sample temperature at 5 % and 10 % weight loss	121
3.5 $C_1$ and $C_2$ for pure sPS and all blend systems	162
3.6 Average storage modulus difference of all blend systems for sPS1	165
3.7 Average storage modulus difference of all blend systems for sPS2	165
c.1 DMA data of sPS1 for temperature 60 °C	268
c.2 DMA data of sPS1 for temperature 80 °C	269
c.3 DMA data of sPS1 for temperature 90 °C	270
c.4 DMA data of sPS1 for temperature 100.25 °C	271
c.5 DMA data of sPS1 for temperature 110 °C	272
c.6 DMA data of sPS1 for temperature 120 °C	273
c.7 DMA data of sPS1 for temperature 140 °C	274
c.8 DMA data of sPS1 for temperature 160 °C	275
c.9 DMA data of sPS1 for temperature 180 °C	276
c.10 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 60 °C	277
c.11 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 65 °C	278
c.12 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 70.71 °C	279

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
c.13 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 85 °C	280
c.14 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 100 °C	281
c.15 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 120 °C	282
c.16 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 140 °C	283
c.17 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 160 °C	284
c.18 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 180 °C	285
c.19 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 60 °C	286
c.20 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 80 °C	287
c.21 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 84.22 °C	288
c.22 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 90 °C	289
c.23 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 100 °C	290
c.24 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 120 °C	291
c.25 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 140 °C	292
c.26 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 160 °C	293
c.27 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 180 °C	294
c.28 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 60 °C	295
c.29 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 70 °C	296
c.30 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 81.95 °C	297
c.31 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 90 °C	298
c.32 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 100 °C	299
c.33 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 120 °C	300
c.34 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 140 °C	301
c.35 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 160 °C	302
c.36 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 180 °C	303
c.37 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 60 °C	304
c.38 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 70 °C	305

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
c.39 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 79.22 °C	306
c.40 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 90 °C	307
c.41 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 100 °C	308
c.42 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 120 °C	309
c.43 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 140 °C	310
c.44 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 160 °C	311
c.45 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 180 °C	312
c.46 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 60 °C	313
c.47 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 70 °C	314
c.48 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 80 °C	315
c.49 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 90.24 °C	316
c.50 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 100 °C	317
c.51 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 120 °C	318
c.52 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 140 °C	319
c.53 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 160 °C	320
c.54 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 180 °C	321
c.55 DMA data of sPS2 for temperature 60 °C	322
c.56 DMA data of sPS2 for temperature 80 °C	323
c.57 DMA data of sPS2 for temperature 90 °C	324
c.58 DMA data of sPS2 for temperature 100.25 °C	325
c.59 DMA data of sPS2 for temperature 110 °C	326
c.60 DMA data of sPS2 for temperature 120 °C	327
c.61 DMA data of sPS2 for temperature 140 °C	328
c.62 DMA data of sPS2 for temperature 160 °C	329
c.63 DMA data of sPS2 for temperature 180 °C	330
c.64 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 60 °C	331

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
c.65 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 65 °C	332
c.66 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 70.71 °C	333
c.67 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 85 °C	334
c.68 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 100 °C	335
c.69 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 120 °C	336
c.70 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 140 °C	337
c.71 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 160 °C	338
c.72 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 180 °C	339
c.73 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 60 °C	340
c.74 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 80 °C	341
c.75 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 84.22 °C	342
c.76 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 90 °C	343
c.77 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 100 °C	344
c.78 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 120 °C	345
c.79 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 140 °C	346
c.80 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 160 °C	347
c.81 DMA data of sPS2 blended with PBMA for temperature 180 °C	348
c.82 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 60 °C	349
c.83 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 70 °C	350
c.84 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 81.95 °C	351
c.85 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 90 °C	352
c.86 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 100 °C	353
c.87 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 120 °C	354
c.88 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 140 °C	355
c.89 DMA data of sPS2 blended with PEEMA for temperature 160 °C	356

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
c.90 DMA data of sPS2 blended with PEMA for temperature 180 °C	357
c.91 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 60 °C	358
c.92 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 70 °C	359
c.93 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 79.22 °C	360
c.94 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 90 °C	361
c.95 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 100 °C	362
c.96 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 120 °C	363
c.97 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 140 °C	364
c.98 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 160 °C	365
c.99 DMA data of sPS2 blended with PHMA for temperature 180 °C	366
c.100 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 60 °C	367
c.101 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 70 °C	368
c.102 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 80 °C	369
c.103 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 90.24 °C	370
c.104 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 100 °C	371
c.105 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 120 °C	372
c.106 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 140 °C	373
c.107 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 160 °C	374
c.108 DMA data of sPS2 blended with PaMS for temperature 180 °C	375



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
0.1	กราฟของการคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟของความเป็นผลึก	50
0.2	แสดงค่า Tg ตามการหาค่าเชิงราบ (onset) และการหาค่าจุดกึ่งกลาง (midpoint)	51
0.3	ผลจากเครื่อง DSC	52
0.4	ตัวอย่างข้อมูลดิบของ XRD เป็นกราฟการกระเจิงแสง	53
1.1	X-ray diffractogram of syndiotactic polystyrenes	70
1.2	X-ray diffractogram of sPS1/PBMA blends at various compositions	71
1.3	X-ray diffractogram of sPS2/PBMA blends at various compositions	72
1.4	X-ray diffractogram of sPS3/PBMA blends at various compositions	72
1.5	X-ray diffractogram of sPS1/PCHA blends at various compositions	73
1.6	X-ray diffractogram of sPS2/PCHA blends at various compositions	74
1.7	X-ray diffractogram of sPS3/PCHA blends at various compositions	74
1.8	X-ray diffractogram of sPS1/PEMA blends at various compositions	75
1.9	X-ray diffractogram of sPS2/PEMA blends at various compositions	76
1.10	X-ray diffractogram of sPS3/PEMA blends at various compositions	76
1.11	X-ray diffractogram of sPS1/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions	77
1.12	X-ray diffractogram of sPS2/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions	78
1.13	X-ray diffractogram of sPS3/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions	78
1.14	X-ray diffractogram of sPS1/Polyisoprene blends at various compositions	79
1.15	X-ray diffractogram of sPS2/Polyisoprene blends at various compositions	80
1.16	X-ray diffractogram of sPS3/Polyisoprene blends at various compositions	80

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.1 Comparison of method in blending SPS/PaMS blends with Fox equation	103
2.2 Comparison of method in blending SPS/PEMA with Fox equation	103
2.3 Comparison of method in blending SPS/PBMA with Fox equation	104
2.4 Comparison of method in blending SPS/PCHA with Fox equation	104
2.5 Comparison of method in blending of SPS/PIP blends with Fox equation	105
2.6 Curve of $s^2 I(s)$ versus $s$ for polypropene	108
2.7 Nomogram of K values as a function of $k$ and $s_p$ calculated for the chemical composition $(CH_2)_n$ and $s_0 = 0.1$	109
2.8 X-ray diffraction pattern of amorphous SPS	110
2.9 The X-ray diffraction patterns for SPS/PaMS blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PaMS blends; (b) SPS/PaMS/LCC blends and (c) SPS/PaMS/GMS blends	111
2.10 The X-ray diffraction patterns for SPS/PEMA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PEMA blends; (b) SPS/PEMA/LCC blends and (c) SPS/PEMA/GMS blends	112
2.11 The X-ray diffraction patterns for SPS/PBMA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PBMA blends; (b) SPS/PBMA/LCC blends and (c) SPS/PBMA/GMS blends	113
2.12 The X-ray diffraction patterns for SPS/PCHA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PCHA blends; (b) SPS/PCHA/LCC blends and (c) SPS/PCHA/GMS blends	114
2.13 The X-ray diffraction patterns for SPS/PIP blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PIP blends; (b) SPS/PIP/LCC blends and (c) SPS/PIP/GMS blends	115
3.1 Temperature at 5% and 10% weight loss for blending system	122
3.2 $E'$ curve as time function for sPS1	124



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 E' curve as time function for sPS2	124
3.4 E' curve as time function for sPS1/PIP blend	125
3.5 E' curve as time function for sPS2/PIP blend	125
3.6 E' curve as time function for sPS1/PBMA blend	126
3.7 E' curve as time function for sPS2/PBMA blend	126
3.8 E' curve as time function for sPS1/PEMA blend	127
3.9 E' curve as time function for sPS2/PEMA blend	127
3.10 E' curve as time function for sPS1/PHMA blend	128
3.11 E' curve as time function for sPS2/PHMA blend	128
3.12 E' curve as time function for sPS1/PaMS blend	129
3.13 E' curve of time as time function for sPS2/PaMS blend	129
3.14 E' curve as frequency function for sPS1	130
3.15 E' curve as frequency function for sPS2	131
3.16 E' curve as frequency function for sPS1/PIP blend	131
3.17 E' curve as frequency function for sPS2/PIP blend	132
3.18 E' curve as frequency function for sPS1/PBMA blend	132
3.19 E' curve as frequency function for sPS2/PBMA blend	133
3.20 E' curve as frequency function for sPS1/PEMA blend	133
3.21 E' curve as frequency function for sPS2/PEMA blend	134
3.22 E' curve as frequency function for sPS1/PHMA blend	134
3.23 E' curve as frequency function for sPS2/PHMA blend	135
3.24 E' curve as frequency function for sPS1/PaMS blend	135
3.25 E' curve as frequency function for sPS2/PaMS blend	136
3.26 Master curve for sPS1 as time function with $T_r$ 100.25 °C	138
3.27 Master curve for sPS2 as time function with $T_r$ 100.25 °C	138
3.28 Master curve for sPS2 as time function with $T_r$ 100.25 °C	139
3.29 Master curve for sPS2/PIP blend as time function with $T_r$ 70.71 °C	139
3.30 Master curve for sPS1/PBMA blend as time function with $T_r$ 84.22 °C	140

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.31 Master curve for sPS2/PBMA blend as time function with $T_r$ 84.22 °C	140
3.32 Master curve for sPS1/PEMA blend as time function with $T_r$ 81.95 °C	141
3.33 Master curve for sPS2/PEMA blend as time function with $T_r$ 81.95 °C	141
3.34 Master curve for sPS1/PHMA blend as time function with $T_r$ 79.22 °C	142
3.35 Master curve for sPS2/PHMA blend as time function with $T_r$ 79.22 °C	142
3.36 Master curve for sPS1/PaMS blend as time function with $T_r$ 90.24 °C	143
3.37 Master curve for sPS2/PaMS blend as time function with $T_r$ 90.24 °C	143
3.38 Master curve for sPS1 as frequency function with $T_r$ 100.25 °C	144
3.39 Master curve for sPS2 as frequency function with $T_r$ 100.25 °C	145
3.40 Master curve for sPS1/PIP blend as frequency function with $T_r$ 70.71 °C	145
3.41 Master curve for sPS2/PIP blend as frequency function with $T_r$ 70.71 °C	146
3.42 Master curve for sPS1/PBMA blend as frequency function with $T_r$ 84.22 °C	146
3.43 Master curve for sPS2/PBMA blend as frequency function with $T_r$ 84.22 °C	147
3.44 Master curve for sPS1/PEMA blend as frequency function with $T_r$ 81.95 °C	147
3.45 Master curve for sPS2/PEMA blend as frequency function with $T_r$ 81.95 °C	148
3.46 Master curve for sPS1/PHMA blend as frequency function with $T_r$ 79.22 °C	148
3.47 Master curve for sPS2/PHMA blend as frequency function with $T_r$ 79.22 °C	149
3.48 Master curve for sPS1/PaMSblend as frequency function with $T_r$ 90.24 °C	149

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.49 Master curve for sPS2/PaMSblend as frequency function with $T_r$ 90.24°C	150
3.50 Master curve for sPS1 and sPS2	152
3.51 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PIP	152
3.52 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PBMA	153
3.53 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PEMA	153
3.54 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PHMA	154
3.55 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PaMS	154
3.56 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1	156
3.57 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2	156
3.58 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1/PIP	157
3.59 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2/PIP	157
3.60 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1/PBMA	158
3.61 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2/PBMA	158
3.62 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1/PEMA	159
3.63 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2/PEMA	159
3.64 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1/PHMA	160
3.65 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2/PHMA	160
3.66 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS1/PaMS	161
3.67 Relationship between $-1/\log a_T$ versus $1/(T-T_g)$ for sPS2/PaMS	161
3.68 $E'$ master curve for all sPS1 blend systems	163
3.69 $E'$ master curve for all sPS2 blend systems	164
A.1 DSC curve of PBMA	195
A.2 DSC curve of PCHA	195
A.3 DSC curve of PEMA	195
A.4 DSC curve of Poly( $\alpha$ -methylstyrene)	196
A.5 DSC curve of Polyisoprene	196
A.6 DSC curve of PVME	196

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
A.7 DSC curve of sPS1	197
A.8 DSC curve of sPS2	197
A.9 DSC curve of sPS3	197
A.10 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 50/50 wt%	198
A.11 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 50/50 wt%	198
A.12 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 50/50 wt%	198
A.13 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 60/40 wt%	199
A.14 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 60/40 wt%	199
A.15 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 60/40 wt%	199
A.16 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 70/30 wt%	200
A.17 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 70/30 wt%	200
A.18 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 70/30 wt%	200
A.19 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 80/20 wt%	201
A.20 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 80/20 wt%	201
A.21 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 80/20 wt%	201
A.22 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 90/10 wt%	202
A.23 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 90/10 wt%	202
A.24 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 90/10 wt%	202
A.25 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 50/50 wt%	203
A.26 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 50/50 wt%	203
A.27 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 50/50 wt%	203
A.28 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 60/40 wt%	204
A.29 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 60/40 wt%	204
A.30 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 60/40 wt%	204
A.31 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 70/30 wt%	205
A.32 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 70/30 wt%	205
A.33 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 70/30 wt%	205
A.34 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 80/20 wt%	206

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
A.35 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 80/20 wt%	206
A.36 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 80/20 wt%	206
A.37 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 90/10 wt%	207
A.38 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 90/10 wt%	207
A.39 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 90/10 wt%	207
A.40 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 50/50 wt%	208
A.41 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 50/50 wt%	208
A.42 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 50/50 wt%	208
A.43 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 60/40 wt%	209
A.44 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 60/40 wt%	209
A.45 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 60/40 wt%	209
A.46 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 70/30 wt%	210
A.47 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 70/30 wt%	210
A.48 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 70/30 wt%	210
A.49 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 80/20 wt%	211
A.50 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 80/20 wt%	211
A.51 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 80/20 wt%	211
A.52 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 90/10 wt%	212
A.53 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 90/10 wt%	212
A.54 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 90/10 wt%	212
A.55 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%	213
A.56 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%	213
A.57 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%	213
A.58 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%	214

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
A.59 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%	214
A.60 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%	214
A.61 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%	215
A.62 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 70/30 wt%	215
A.63 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 70/30 wt%	215
A.64 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%	216
A.65 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%	216
A.66 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%	216
A.67 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%	217
A.68 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%	217
A.69 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%	217
A.70 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%	218
A.71 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%	218
A.72 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%	218
A.73 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%	219
A.74 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%	219



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
A.75 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%	219
A.76 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	220
A.77 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	220
A.78 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	220
A.79 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%	221
A.80 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%	221
A.81 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%	221
A.82 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%	222
A.83 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%	222
A.84 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%	222
A.85 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 50/50 wt%	223
A.86 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 50/50 wt%	223
A.87 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 50/50 wt%	223
A.88 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 60/40 wt%	224
A.89 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 60/40 wt%	224
A.90 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 60/40 wt%	224
A.91 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	225
A.92 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	225
A.93 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%	225
A.94 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 80/20 wt%	226
A.95 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 80/20 wt%	226
A.96 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 80/20 wt%	226
A.97 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 90/10 wt%	227
A.98 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 90/10 wt%	227
A.99 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 90/10 wt%	227
A.100 The chromatogram of sPS1	228
A.101 The chromatogram of sPS2	228
A.102 The chromatogram of sPS3	228

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
B.1 DSC curve of SPS	230
B.2 DSC curve of SPS blended with LCC	230
B.3 DSC curve of SPS blended with GMS	230
B.4 DSC curve of PaMS	231
B.5 DSC curve of PaMS blended with LCC	231
B.6 DSC curve of PaMS blended with GMS	231
B.7 DSC curve of SPS20/PaMS80 blends	232
B.8 DSC curve of SPS20/PaMS80/LCC blends	232
B.9 DSC curve of SPS20/PaMS80/GMS blends	232
B.10 DSC curve of SPS40/PaMS60 blends	233
B.11 DSC curve of SPS40/PaMS60/LCC blends	233
B.12 DSC curve of SPS40/PaMS60/GMS blends	233
B.13 DSC curve of SPS60/PaMS40 blends	234
B.14 DSC curve of SPS60/PaMS40/LCC blends	234
B.15 DSC curve of SPS60/PaMS40/GMS blends	234
B.16 DSC curve of SPS80/PaMS20 blends	235
B.17 DSC curve of SPS80/PaMS20/LCC blends	235
B.18 DSC curve of SPS80/PaMS20/GMS blends	235
B.19 DSC curve of PBMA	236
B.20 DSC curve of PBMA blended with LCC	236
B.21 DSC curve of PBMA blended with GMS	236
B.22 DSC curve of SPS20/PBMA80 blends	237
B.23 DSC curve of SPS20/PBMA80/LCC blends	237
B.24 DSC curve of SPS20/PBMA80/GMS blends	237
B.25 DSC curve of SPS40/PBMA60 blends	238
B.26 DSC curve of SPS40/PBMA60/LCC blends	238
B.27 DSC curve of SPS40/PBMA60/GMS blends	238
B.28 DSC curve of SPS60/PBMA40 blends	239



## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
B.29 DSC curve of SPS60/PBMA40/LCC blends	239
B.30 DSC curve of SPS60/PBMA40/GMS blends	239
B.31 DSC curve of SPS80/PBMA20 blends	240
B.32 DSC curve of SPS80/PBMA20/LCC blends	240
B.33 DSC curve of SPS80/PBMA20/GMS blends	240
B.34 DSC curve of PEMA	241
B.35 DSC curve of PEMA blended with LCC	241
B.36 DSC curve of PEMA blended with GMS	241
B.37 DSC curve of SPS20/PEMA80 blends	242
B.38 DSC curve of SPS20/PEMA80/LCC blends	242
B.39 DSC curve of SPS20/PEMA80/GMS blends	242
B.40 DSC curve of SPS40/PEMA60 blends	243
B.41 DSC curve of SPS40/PEMA60/LCC blends	243
B.42 DSC curve of SPS40/PEMA60/GMS blends	243
B.43 DSC curve of SPS60/PEMA40 blends	244
B.44 DSC curve of SPS60/PEMA40/LCC blends	244
B.45 DSC curve of SPS60/PEMA40/GMS blends	244
B.46 DSC curve of SPS80/PEMA20 blends	245
B.47 DSC curve of SPS80/PEMA20/LCC blends	245
B.48 DSC curve of SPS80/PEMA20/GMS blends	245
B.49 DSC curve of PCHA	246
B.50 DSC curve of PCHA blended with LCC	246
B.51 DSC curve of PCHA blended with GMS	246
B.52 DSC curve of SPS20/PCHA80 blends	247
B.53 DSC curve of SPS20/PCHA80/LCC blends	247
B.54 DSC curve of SPS20/PCHA80/GMS blends	247
B.55 DSC curve of SPS40/PCHA60 blends	248
B.56 DSC curve of SPS40/PCHA60/LCC blends	248

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
B.57 DSC curve of SPS40/PCHA60/GMS blends	248
B.58 DSC curve of SPS60/PCHA40 blends	249
B.59 DSC curve of SPS60/PCHA40/LCC blends	249
B.60 DSC curve of SPS60/PCHA40/GMS blends	249
B.61 DSC curve of SPS80/PCHA20 blends	250
B.62 DSC curve of SPS80/PCHA20/LCC blends	250
B.63 DSC curve of SPS80/PCHA20/GMS blends	250
B.64 DSC curve of PIP	251
B.65 DSC curve of PIP blended with LCC	251
B.66 DSC curve of PIP blended with GMS	251
B.67 DSC curve of SPS20/PIP80 blends	252
B.68 DSC curve of SPS20/PIP80/LCC blends	252
B.69 DSC curve of SPS20/PIP80/GMS blends	252
B.70 DSC curve of SPS40/PIP60 blends	253
B.71 DSC curve of SPS40/PIP60/LCC blends	253
B.72 DSC curve of SPS40/PIP60/GMS blends	253
B.73 DSC curve of SPS60/PIP40 blends	254
B.74 DSC curve of SPS60/PIP40/LCC blends	254
B.75 DSC curve of SPS60/PIP40/GMS blends	254
B.76 DSC curve of SPS80/PIP20 blends	255
B.77 DSC curve of SPS80/PIP20/LCC blends	255
B.78 DSC curve of SPS80/PIP20/GMS blends	255
B.79 DSC curve of PVME	256
B.80 DSC curve of PVME blended with LCC	256
B.81 DSC curve of PVME blended with GMS	256
B.82 DSC curve of SPS20/PVME80 blends	257
B.83 DSC curve of SPS20/PVME80/LCC blends	257
B.84 DSC curve of SPS20/PVME80/GMS blends	257

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
B.85 DSC curve of SPS40/PVME60 blends	258
B.86 DSC curve of SPS40/PVME60/LCC blends	258
B.87 DSC curve of SPS40/PVME60/GMS blends	258
B.88 DSC curve of SPS60/PVME40 blends	259
B.89 DSC curve of SPS60/PVME40/LCC blends	259
B.90 DSC curve of SPS60/PVME40/GMS blends	259
B.91 DSC curve of SPS80/PVME20 blends	260
B.92 DSC curve of SPS80/PVME20/LCC blends	260
B.93 DSC curve of SPS80/PVME20/GMS blends	260
C.1 DSC curve of sPS1	262
C.2 DSC curve of sPS1 blended with PIP	262
C.3 DSC curve of sPS1 blended with PBMA	262
C.4 DSC curve of sPS1 blended with PEMA	263
C.5 DSC curve of sPS1 blended with PHMA	263
C.6 DSC curve of sPS1 blended with PaMS	263
C.7 DSC curve of sPS2	264
C.8 DSC curve of sPS2 blended with PIP	264
C.9 DSC curve of sPS2 blended with PBMA	264
C.10 DSC curve of sPS2 blended with PEMA	265
C.11 DSC curve of sPS2 blended with PHMA	265
C.12 DSC curve of sPS2 blended with PaMS	265
C.13 TGA curve of sPS	266
C.14 TGA curve of sPS blended with PIP	266
C.15 TGA curve of sPS blended with PBMA	266
C.16 TGA curve of sPS blended with PEMA	267
C.17 TGA curve of sPS blended with PHMA	267
C.18 TGA curve of sPS blended with PaMS	267

## วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์และการประยุกต์ใช้งานพอลิเมอร์ผสมที่มาจากซินติโอแทคติกพอลิสไตรีน
2. เพื่อประกันคุณภาพและมืองค์ความรู้ (Know how) ในการเลือกผสมพอลิสไตรีนชนิดซินติโอแทคติกเพื่อให้ได้คุณสมบัติตามที่ต้องการอีกด้วย

## บทนำ

ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนเป็นพอลิเมอร์ที่เพิ่งจะค้นพบวิธีสังเคราะห์ได้ในปี ค.ศ. 1985 โดยบริษัทไอดีเนมิซึโคซาน (Idemitsu Kosan Co.Ltd.) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาตัวใหม่ที่เพิ่งถูกค้นพบ คือ เมทัลโลซีน (Metallocene) โดยที่มีโคพอลิเมอร์ (Copolymer) เป็นเมธิลอลูมิเนียมออกไซด์ (Methyl Aluminosilane (MAO)) สมบัติพิเศษของพอลิเมอร์นี้ที่แตกต่างจากลักษณะของพอลิสไตรีนที่เตรียมมาด้วยวิธีธรรมดา (free radical polymerization) โดยที่มีความเป็นผลึกในหลายลักษณะที่อุณหภูมิการหลอมละลายผลึกสูง ทำให้มีความแข็งแรงคงทนและสามารถใช้ในที่มีอุณหภูมิสูงกว่าพอลิสไตรีนธรรมดาได้ถึงสองเท่า การสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนใช้เทคโนโลยีขั้นสูง และเพิ่งเริ่มจะมีการผลิตในเชิงอุตสาหกรรมโดยบริษัทดาวน์เคมิคัล (Dow Chemical) ในปี ค.ศ. 1988 ภายใต้ชื่อการค้า คเวสโตร (Questro) การประยุกต์ใช้งานยังอยู่ในวงจำกัดมาก เนื่องจากราคายังสูง และเครื่องมือที่ใช้ขั้นรูปยังพัฒนาไม่ทัน การใช้งานหลักเป็นทางการแพทย์เนื่องจากสามารถทำการอบฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิสูงได้ (sterilization) และใช้เป็นแผ่นเยื่อในการแยกสาร อนาคตของพอลิเมอร์ ชนิดนี้ยังมีอีกไกล การผสมพอลิเมอร์ชนิดนี้เพื่อเป็นการทำให้สามารถขึ้นรูปได้โดยใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่หรือสามารถปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามเกณฑ์และการลดต้นทุนด้านเนื้อพลาสติก จึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจศึกษาเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากจะสามารถเพิ่มมูลค่าเพิ่มได้อีกมาก

ในปัจจุบันนี้ทางศูนย์วิจัยทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยาและวิศวกรรมปฏิกิริยาได้สามารถสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนได้เอง และสามารถแยกและทำให้เกิดซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ และจากการตรวจสอบแนวโน้มของการวิจัยพบว่า ยังมีการพัฒนารูปแบบของการสังเคราะห์อยู่เรื่อย ๆ<sup>1-2</sup> ทั้งการผลิตซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์หรือการทำโคพอลิเมอร์ที่ผสม<sup>3-7</sup> กับพอลิโอเลฟินส์และสารประกอบซิลิกา การศึกษาด้านการเกิดผลึกโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อให้เกิดสมบัติและความเข้าใจในกระบวนการเกิดผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน<sup>8-17</sup> ก็ยังมีผู้ดำเนินการต่อ แต่การศึกษาการเข้ากันได้ของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์อื่น ๆ ยังมีผู้ดำเนินการศึกษาน้อยมาก แม้ในปี 2002 ได้มีการผสมระหว่างซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนกับพอลิสไตรีนธรรมดาเท่านั้น<sup>18</sup>

ในทางอุตสาหกรรมแล้ว ช่วงอุณหภูมิใช้งานของซินติโอเทคติก พอลิสไตรีนจะสูงกว่าพอลิคาร์บอนเนตและสามารถมีส่วนแบ่งตลาดจากไนลอน (พอลิเอไมด์) และพอลิเมอร์ในทางวิศวกรรมอื่น ๆ โดยปัจจัยในการค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ทำให้สามารถเปิดตลาดทางอุตสาหกรรมได้อีกมาก ซึ่งนอกจากจะมีราคาถูกกว่าพอลิเมอร์วิศวกรรมอื่น ๆ เนื่องจากสามารถผลิตได้ในเชิงอุตสาหกรรม เช่นเดียวกับการผลิตพอลิโอเลฟินส์ที่สามารถใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจำพวกเดียวกันแล้ว

ยังมีสมบัติที่ดีเช่นเดียวกับพอลิเมอร์ลินที่อุณหภูมิการใช้งานอยู่ในช่วงอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temp.) และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (Crystalline melting point) อีกด้วย

แม้ว่าโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศยังไม่สามารถผลิตพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้ แต่ผลได้จากการวิจัยนี้ยังเป็นแนวทางให้ธุรกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SME) นำพลาสติกชนิดนี้จากต่างประเทศเพื่อผสมและขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าเพิ่มของเม็ดพลาสติกโดยใช้เครื่องจักรและการออกแบบแม่แบบที่สามารถทำได้ในเมืองไทยอีกทางหนึ่ง

การผสมพอลิเมอร์แบบอัลลอยด์หรือแบบเข้ากันได้ เป็นการประยุกต์ใช้ที่ทำให้ต้นทุนต่ำลง นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติให้เข้ากับผลิตภัณฑ์หลายอย่างอีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิในการขึ้นรูปต่ำลงทำให้เครื่องมือที่มีอยู่สามารถขึ้นรูปพอลิเมอร์ชนิดนี้ได้ และในทางกลับกันถ้าต้องการใช้งานพอลิเมอร์ชนิดนี้ที่อุณหภูมิสูง ยังสามารถศึกษาการเติมสารผลึกเหลวโมเลกุลต่ำเพื่อลดความหนืดในขณะหลอมเหลวโดยไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิใช้งานด้วย ซึ่งจะสามารถปรับอุณหภูมิในการหลอมเหลวให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิหลอมเหลวของผลึกอีกด้วย

แต่เพื่อความแม่นยำในการผสมเพื่อใช้งาน จำเป็นต้องศึกษาแผนภูมิเฟสและลักษณะทางโครงสร้างโมเลกุล (Morphology) และผลกระทบที่มีต่อผลึกอันเนื่องมาจากการเติมแต่งเพื่อประกันคุณภาพของผลิตภัณฑ์และศึกษาผลดีทางลักษณะที่ดีกว่าสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสอง (Synergistic) อีกทางหนึ่งด้วย

การผลิตพอลิเมอร์ชนิดใหม่เพื่อให้มีคุณลักษณะตามที่ต้องการนั้นเป็นการลงทุนที่สูงมาก (ซึ่งรวมถึงชนิดซินดิโอเทคติกโพลิสไตรีนด้วย) การผสมพอลิเมอร์กับพอลิเมอร์บริสุทธิ์จึงเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งเพื่อที่จะได้สมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปจากพอลิเมอร์ บริสุทธิ์ และนอกจากนี้อาจเกิดผลทางสมบัติที่ดีขึ้นกว่าการไม่ผสมหรืออย่างน้อยจะเป็นการลดต้นทุนการผลิตพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ ให้มีราคาถูกลงและเหมาะสมกับการนำไปใช้งานได้ ในปัจจุบันห้องวิจัยเคมีมีเครื่องมือทดสอบที่จะทำให้ทราบถึงลักษณะของผลึกที่เกิดขึ้นต่อการเติมแต่งพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

การผสมพอลิเมอร์ต่อพอลิเมอร์โดยมากจะพบว่าเกิดสมบัติเฉลี่ยระหว่างทั้งสองพอลิเมอร์ แต่อาจมีสมบัติรวมที่ดีขึ้น (Synergistic) ซึ่งจะดีกว่าสมบัติของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิด แต่อาจเกิดสมบัติที่เลวลง (Non-Synergistic) ได้ดังสมบัติบางชนิด การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์แบ่งได้หลัก ๆ เป็นสามแบบคือ การเข้ากันได้โดยตลอด (miscible) การเข้ากันได้เพียงบางส่วน (partially miscible) และการแยกเฟสหรือไม่สามารถเข้ากันได้ (immiscible) พอลิเมอร์ที่เข้ากันได้จะมีสมบัติพิเศษคือค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วจะอยู่ระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้วของทั้งสองพอลิเมอร์และมีเพียงค่าเดียว ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของน้ำหนักของการผสมพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติที่สม่ำเสมอ และเมื่อหลอมละลายก็จะคงความใสไว้ พอลิเมอร์ที่เข้ากันได้เพียงบางส่วนอาจเกิดการแยกเฟสที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะทำให้แข็งขึ้น แต่ความต่อเนื่องของเนื้อพอลิเมอร์แตกต่างกันออกไป



พอลิเมอร์ที่เข้าข่ายการผสมลักษณะนี้สามารถตรวจวัดการผสมได้โดยใช้เครื่องวัดการกระเจิงแสงมุมแคบ (small Angle light scattering) หรือ Differential Scanning Calorimeter ซึ่งจะแสดงการแยกเฟสที่ใช้พลังงานกระตุ้น (Bimodal) และการแยกเฟสโดยอัตโนมัติ (spindle decomposition) ซึ่งจะแสดงถึงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลออกจากกันในขณะที่แยกเฟส การทราบแผนภูมิเฟสจะทำให้สามารถกำหนดช่วงอุณหภูมิใช้งานได้ ซึ่งโดยมากจะอยู่ในช่วงที่ไม่เกิดการแยกเฟส

พอลิเมอร์ที่สามารถผสมเข้ากันได้กับพอลิสไตรีนมีการศึกษามาก และเป็นโอกาสดีอย่างยิ่งที่จะทำการผสมพอลิเมอร์ดังกล่าวกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนเพื่อคุณลักษณะและสมบัติหลังการผสมของพอลิเมอร์ดังกล่าว นอกจากนี้ลักษณะการเกิดผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนอาจเกิดผลกระทบจากการผสมพอลิเมอร์ที่สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ซึ่งนอกเหนือจากสมบัติที่เปลี่ยนไปเพราะการผสมแล้ว ยังเป็นการศึกษาผลึกพอลิเมอร์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติเนื่องจากการผสมได้อีกด้วย พอลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันได้เป็นเนื้อเดียวกับพอลิสไตรีนได้แก่พอลิไวนิลเมทิลอีเทอร์ (Polyvinylmethylether (PVME)) และชนิดอื่นๆอีกมาก

การผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำที่มีช่วงการจัดเรียงตัวในแกนเดียว (Nematic) ตกอยู่ในช่วง Nematic หลอมเหลวของผลึกจะสามารถลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวลงได้ ซึ่งจะส่งผลทำให้กระบวนการขึ้นรูปสามารถทำได้ง่ายขึ้น ชนิดของผลึกเหลวที่ให้อุณหภูมิในช่วงดังกล่าวอาทิเช่นซีบีซีห้าสาม (CBC53) หรือซีบีซีสามสาม (CBC33) ซึ่งผลิตโดยบริษัทเมอร์ค (Merck) การลดลงของความหนืดของพอลิเมอร์อสัญฐาน (Amorphous) ได้ค้นพบแล้วว่าไม่ส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ แต่เมื่อผสมกับพอลิเมอร์ที่เป็นผลึกแล้วอาจทำให้สมบัติของผลึกของพอลิเมอร์เปลี่ยนไป ซึ่งอาจส่งผลต่อสมบัติอื่น ๆ ได้ ในที่นี้จึงเป็นโอกาสอันดีที่จะศึกษาถึงผลกระทบต่อผลึกควบคู่ไปกับการตรวจวัดลักษณะการเข้ากันได้อีกด้วย

## ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงการ

พอลิเมอร์ผสมของพอลิเมอร์ที่หลอมเหลวได้ และพอลิเมอร์ผลึกเหลวได้ถูกศึกษาโดยนักวิจัยหลายท่าน แต่โดยมากเป็นการผสมพอลิเมอร์ผลึกเหลวมวลโมเลกุลสูงกับพอลิเมอร์อื่น การศึกษาที่เกี่ยวข้องกับสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ หรือการผสมที่มุ่งหวังให้พอลิเมอร์ที่หลอมเหลวได้มีความเหนียวในขณะหลอมเหลวลดลงมีผู้ศึกษาอยู่น้อยมาก ผลงานที่ผ่านมาพอจะสรุปได้ดังนี้

A.Buckley, A.B.Conciatori และ G.W.Calundann [19] ได้ศึกษาการผสมสารผลึกเหลวและพอลิไอเลฟินส์หรือพอลิเอสเทอร์ โดยที่สารผลึกเหลวมีมวลโมเลกุลประมาณ 1,000 g/mole โดยที่ใช้ความเข้มข้นของผลึกเหลวประมาณ 0.5-5% โดยมวล และพบว่าสามารถลดความเหนียวขณะหลอมเหลวของโพลิไอเลฟินส์หรือพอลิเอสเทอร์ได้ถึง 25-30% โดยทำการทดลองโดยใช้รีโอมิเตอร์แบบท่อรีด (Capillary Rheometer)

A.Siegmann, A.Dagan และ S.Kenig [20] ได้เตรียมพอลิเมอร์ผสมของ สารผลึกเหลวที่ประกอบด้วยสารประกอบวงแหวนของโคพอลิเอสเทอร์ที่มีองค์ประกอบของ 6-hydroxy-2-naphthanoic acid และ p-hydroxybenzoic acid กับพอลิเมอร์อสัณฐานของพอลิเอไมด์ โดยวิธีการหลอมเหลวผสม สมบัติด้านการไหลในขณะหลอมเหลว (Rheology) ได้เปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก และพบว่าความเหนียวขณะหลอมเหลวของพอลิเอไมด์ได้ลดลง 20-25 เท่าเมื่อผสมสารผลึกเหลวลงไปเพียง 5% โดยน้ำหนักเท่านั้น นอกจากนี้สมบัติเชิงกลด้านแรงดึงของพอลิเมอร์ผสมได้เปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ การแยกเฟสขึ้นอยู่กับปริมาณของสารผลึกเหลวที่เติมลงไปและเฟสที่เกิดขึ้นมีลักษณะต่างออกไปเมื่อความเข้มข้นของสารผลึกเหลวเปลี่ยนไป

Y.C.Lin, H.W.Lee และ H.H.Winter [21] ได้ศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติด้านการไหลในขณะหลอมเหลวของโคพอลิเอสเทอร์แบบบล็อกที่มีมวลโมเลกุลเฉลี่ย 11,500 g/mole และพอลิเอธิลีนเทอราฟทาเลท (PET) และพบว่าการใส่สารผลึกเหลวแม้เพียง 2% โดยน้ำหนักจะสามารถลดความเหนียวของพอลิเมอร์ผสมลงได้ถึง 60% และค้นพบว่าสามารถลดความเหนียวได้ดีถ้ามวลโมเลกุลของ PET มีขนาดใหญ่ขึ้น และการลดความเหนียวนี้จะมากขึ้นถ้าผสมสารผลึกเหลวมากขึ้นแต่ไม่เกิน 50% โดยมวลของสารผสมผลึกเหลว และการใส่สารผสมผลึกเหลวมีผลต่อสมบัติด้านการไหลของ PET

อัญญา ชื่นชาวกิจ [22] ได้ศึกษาผลของการเติมสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ (มีมวลโมเลกุลประมาณ 400 g/mole) กับพอลิคาร์บอนเนต (PC) หลายขนาดมวลโมเลกุล โดยใช้วิธีผสมแบบหลอมเหลวที่ความเข้มข้น 0.25, 0.5, และ 1% โดยน้ำหนักของสารผลึกเหลว ตรวจวัดความ



หนืดขณะหลอมเหลวโดยใช้รีโอมิเตอร์แบบท่อรีด (Capillary Rheometer) ตรวจวัดอุณหภูมิคล้าย แก้ว (Tg) โดยใช้ดีเอสซี (Differential Scanning Calorimeter) พบว่าการใส่สารผลึกเหลวเพียง 1% โดยน้ำหนักสามารถลดความหนืดของ PC ลงได้กว่า 50% ในขณะที่ Tg เปลี่ยนไปเพียง 3-5% เท่านั้น

สุรพันธ์ ไปวอนุสรณ์ [23] ได้ศึกษาผลของการเติมพอลิเมอร์ผลึกเหลวหลายชนิดที่มีมวลโมเลกุลประมาณ 400 g/mole กับพอลิเมอร์หลักหลายชนิดได้แก่ พอลิคาร์บอเนต, พอลิเอธิลีน, พอลิโพรพิลีน, พอลิอะซิโตล, และพอลิเอไมด์ โดยการหลอมเหลวด้วยความร้อน และตรวจสอบสมบัติโดยใช้รีโอมิเตอร์แบบเพลทคู่ (Twin plate Rheometer), DSC และ เครื่องดึงทดสอบสมบัติเชิงกล (Tensile Testing Machine) เทียบกับพอลิเมอร์บริสุทธิ์ โดยใช้อัตราส่วนผสมพอลิเมอร์ผลึกเหลว 0.1, 0.2, และ 0.4% โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่มีสารผลึกเหลวเป็นองค์ประกอบจะมีความหนืดในขณะหลอมเหลวลดลงตั้งแต่ 20% ขึ้นไปสำหรับพอลิเอธิลีน และ ตั้งแต่ 50% ถึงมากกว่า 80% สำหรับพอลิเมอร์ชนิดอื่นๆ ในขณะที่สมบัติทางกลและทางความร้อนแทบไม่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม

นพวรรณ ไม้ทอง [24] ศึกษาถึงผลกระทบของวิธีการผสมต่อการลดลงของความหนืดของ PC สองชนิดที่ความเข้มข้น 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, และ 1% โดยมวลของสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ พบว่าการผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำจะสามารถลดความหนืดขณะหลอมเหลวลงได้ โดยที่อัตราส่วนการเติมที่ 0.2% โดยน้ำหนักจะให้ผลที่คุ้มค่าที่สุด และการผสมด้วยความร้อนของเครื่องมือต่างชนิดกันจะให้การลดลงของความหนืดของ PC ที่ไม่เท่ากัน โดยการใช้เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยวจะให้ความหนืดที่ลดลงต่ำที่สุด

สุภลักษณ์ คุณประเสริฐ [25] ศึกษาถึงผลกระทบของการลดลงของความหนืดเมื่อเครื่องมือที่ใช้ในการผสมเปลี่ยนไป และผลกระทบที่มีต่อสมบัติทางแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ได้ เมื่อผสมสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ 0.2% โดยมวลลงใน PC สองชนิด พบว่าการใช้เครื่องหลอมเหลวผสมภายใน (internal mixer), เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ และ เครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว จะให้ผลของการลดลงของแรงบิดของเครื่องดังกล่าวมากขึ้นตามลำดับ โดยที่สมบัติด้านการต้านทานแรงดึงของพอลิเมอร์ที่ได้เปลี่ยนไปไม่เกิน 10%

ศิริรัตน์ วัชรวิชานันท์ [26] ศึกษาถึงผลกระทบของการใส่สารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำที่มีต่อสมบัติการแยกเฟสแบบ Spinodal ของพอลิเมอร์ผสมระหว่างสไตรีนอะคริไลไนไตรโคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย 25% โดยน้ำหนักของอะคริไลไนไตร และพอลิเมทิลเมทาคริเลท (ที่อัตราส่วนผสม 20/80% โดยน้ำหนัก) และสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำที่เติมเพิ่มที่อัตราส่วนผสม 0.2, 0.4, และ 1% โดยน้ำหนัก พบว่าการเติมสารผลึกเหลวจะช่วยเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่ของพอลิเมอร์ทั้ง

สองเพิ่มขึ้นในช่วงของการแยกเฟส และพบว่าการเพิ่มสัมประสิทธิ์การแพร่จะเพิ่มมากที่สุดในช่วง 0.2% โดยน้ำหนักของสารผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ

สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน (Syndiotactic Polystyrene) ในรอบปีที่ผ่านมา สามารถแจกแจงใจความสำคัญได้ดังนี้

M.Sivakumar et.al. [27] ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับสมบัติการเป็นเยื่อแผ่น (Membrane) ของเดลต้าเอสพีเอส (delta-sPS) ที่ปรับปรุงโดยการใช้การสกัดด้วยตัวทำละลายกลายเป็นชั้นๆ และตรวจสอบความดูดซับของ Xe พบว่าเป็นการดูดกลืนแบบสองโหมด (Dual mode) คือประกอบทั้ง เฮนรี (Henry) และลิ่งแมร์ (Langmuir mode sorption) ที่ 25°C และการดูดกลืนมีปริมาณมากเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นอสัณฐานเอสพีเอส (amorphous sPS membrane) สภาพการจัดเรียงตัวและปริมาตรของโมเลกุลสามารถตรวจสอบได้ด้วยการทำ  $^{129}\text{Xe}$  NMR

Y.Qian et.al. [28] ได้ศึกษาถึง Catalysis ตัวใหม่ที่ใช้ในการสังเคราะห์ sPS โดยเลือกจาก Half sandwich Titanium complex ( $\text{Cp}^*\text{TiCl}_2(\text{OR}^*)$ ) โดยที่  $\text{Cp}^*$  คือ  $\text{Cp}$ ,  $\text{CH}_3\text{CH}(\text{CH}_3)\text{Cp}$ ,  $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}_2\text{Cp}$ ,  $\text{CH}_3\text{OCH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{Cp}$  และ  $\text{R}^*$  คือ menthyl, fenchyl ได้ถูกสังเคราะห์ขึ้นและใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ sPS โดยใช้ MAO เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยามีผลต่อค่าความว่องไวในปฏิกิริยาที่ได้ โดยสามารถทำค่าความว่องไวสูงสุดได้ถึง  $7.37 \times 10^7$  g sPS/(mol Ti mol S h) โดยใช้ Al/Ti เท่ากับ 2000 ผลงานนี้ยังได้ศึกษาถึงการทำให้ปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ และเปลี่ยนแปลงปริมาณ Al/Ti อีกด้วย

S.C.Wu et.al. [29] ได้ศึกษาถึงลักษณะผลึกและการเกิดผลึกแบบ alpha และ beta ของ sPS โดยใช้ FTIR และยืนยันผลการคำนวณหาลักษณะผลึกโดยใช้ WAXD การวัดตัวอย่างที่มาจากกระบวนการให้ความร้อนที่มีทั้งการละลาย และการเกิดผลึกแบบเย็น (Cold-crystallization) ที่ความยาวคลื่นระหว่าง  $870\text{-}820\text{ cm}^{-1}$  ที่อุณหภูมิ  $264^\circ\text{C}$  โดยศึกษาแบบปริมาณวิเคราะห์โดยการเทียบกราฟการดูดกลืนแสงของลักษณะส่วนของโมเลกุลย่อยที่ประกอบเป็นการดูดกลืนแสงรวม การให้ความร้อนแบบหลอมละลายจะให้ผลึกแบบเบต้า (beta) ทั้งสิ้น และการเกิดผลึกแบบเย็นจะให้ผลึกแบบอัลฟา (alpha) และเบต้า (beta) ไปพร้อมๆ กันโดยที่ผลึกแบบเบต้า (beta) จะเกิดจากการเปลี่ยนรูปจากผลึกแบบอัลฟา (alpha) ที่เป็นเฟสเริ่มต้นของการให้ความร้อนในลักษณะนี้ โดยที่ค่าพลังงานการเกิดผลึกแบบอัลฟา (alpha) จะต่ำกว่าแบบเบต้า (beta) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลอง และสามารถสรุปได้ว่า การเกิดผลึกแบบเบต้า (beta) เป็นกระบวนการที่เกิดได้ดีกว่าในทางเทอร์โมไดนามิกส์ ในขณะที่การเกิดผลึกแบบอัลฟา (alpha) เป็นกระบวนการที่เกิดได้ดีกว่าในทางจลนศาสตร์

X.Sun et.al. [30] ได้ศึกษาถึงการให้ Silyl-substituted cyclopentadienyl titanium complexes  $[CpSi(CH_3)_2X]TiCl_3$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ sPS โดยที่ X คือ Cl, Me, และ PhoMe โดยที่มีความว่องไวน้อยลงตามลำดับ ความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดคือที่  $2.42 \cdot 10^7$  g sPS/ (mole Ti mol S h) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม MAO ที่มีอัตราส่วน Al/Ti เท่ากับ 2000 ในการศึกษาได้เปลี่ยนอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาและ อัตราส่วนของ Al/Ti อีกด้วย

C.Wang et.al. [31] ได้ศึกษาผลึกแบบ alpha ของ sPS โดยทำการตรวจวัดความเสถียรของผลึกและลักษณะของชั้นผลึก (lamellar) ที่เตรียมการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ กัน โดยใช้ SAXS และ TEM พบว่ามีการหายไปของจุดยอดในการตรวจวัด SAXS ที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากความแตกต่างของการกระจายตัวของอิเล็กตรอนระหว่างชั้นผลึก (lamellar) และ พอลิเมอร์ อัดแน่น จึงได้ทำการตรวจวัดที่  $180^\circ C$  เพื่อที่จะได้ข้อมูลที่ดีขึ้น การวิเคราะห์ใช้สมการของกิบส์-ทอมสัน (Gibbs-Thomson) โดยสามารถตรวจวัดได้ว่า อัตราส่วนระหว่าง พลังงานในการโค้งงอ (fold surface free energy) ต่อพลังงานในการหลอมเหลวผลึกของผลึกอัลฟา (alpha) มีค่าน้อยกว่าผลึกแบบเบต้า (beta) มาก

S.K.Noh et.al. [32] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา Doubly bridged dinuclear titanocenes (DBDM) ที่ใช้ในการสังเคราะห์ sPS และพบว่า DBDM ที่มีหมู่เชื่อมคือ 2,2-diethyl-1,3-dipropanoxy (DEP) ไม่เพียงแต่ให้ความว่องไวของปฏิกิริยาสูงกว่าเท่านั้น ยังให้ความสม่ำเสมอทางโครงสร้างซินดิโอเทคติก (Syndiotactic) ที่ดีกว่า DBDM ที่มีหมู่เชื่อมคือ 1,1,4,4-tetramethyl-1,4-dibutanoxy (TMB) นอกจากนี้ยังค้นพบว่าความว่องไวของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา, เพิ่มปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม และ เพิ่มความเข้มข้นของโมโนเมอร์ ตัวแปรสำคัญที่ควบคุมความสม่ำเสมอของโครงสร้างคือความเข้มข้นของสไตรีนในการทำปฏิกิริยา สิ่งที่สำคัญที่ค้นพบคือการที่หมู่เชื่อมที่สองของ dialkoxy ที่ต่อระหว่างใจกลางของ titanium น่าที่จะมีผลอย่างยิ่งต่อความว่องไวของปฏิกิริยาและโครงสร้างของ sPS มากกว่าหมู่เชื่อมพอลิเมธิลีน (polymethylene) ระหว่างสองกลุ่มของ Cp

Y.Y.Lyu et.al. [33] ได้นำชุดตัวเร่งปฏิกิริยาครึ่งเมทัลโลซีน (Half-metallocene) ของ ทาเนียม (Titanium) ที่มี siloxy ligands และ Bimetallic titanocene complex มาใช้ในการสังเคราะห์ sPS โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม MAO และเปรียบเทียบกับตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมที่ใช้อยู่

D.Larobina et.al. [34] ได้ศึกษาการดูดซึ่มและการซึมทะลุของก๊าซชนิดต่างๆ ต่อผลึกชนิด delta ของ sPS ที่มีเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกต่างๆกัน รวมถึงการตรวจวัด isosteric heat of sorption ของผลึก ก๊าซที่ศึกษารวมถึง คาร์บอนไดออกไซด์, ไนโตรเจน และออกซิเจน

K.Beckerle et.al. [35] ได้ศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา post-metallocene ที่ใช้ในการสังเคราะห์ isotactic และ syndiotactic Polystyrene โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม MAO หรือ  $B(C_6F_5)_3/Al^iBu_3$  ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ  $[MX_2(OC_6H_2^iBu_2-4,6)_2(S(CH_2)_2S)]$  โดยที่ M คือ Ti, Zr, Hf และ X คือ Cl, O'Pr,  $CH_2Ph$  พบว่าสามารถสังเคราะห์ sPS ได้ที่อุณหภูมิต่ำ ความว่องไวของปฏิกิริยาและความสม่ำเสมอของโครงสร้างเป็นตัวแปรตามของ ligand ที่ตัวเร่งปฏิกิริยา

C.Capacchione et.al. [36] ได้ศึกษาถึงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่ใช่ metallocene หรือ isospecific group 4 metal bis(phenolate) ในการสังเคราะห์ sPS โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม MAO โดยตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในรูปของ  $[MX_2(OC_6H_2^iBu_2-4,6)_2(S(CH_2)_2S)]$  โดยที่ M คือ Ti, Zr, Hf และ X คือ Cl,  $CH_2Ph$  โดยมี ligand ที่มาจาก 1,4-dithiabutenediyl-linked bis(phenol)s ซึ่งส่งผลต่อความว่องไวของปฏิกิริยาและความสม่ำเสมอของโครงสร้างเป็นอย่างยิ่ง การใช้ ligand ของ 1,5-dithiapentanediy-linked bis(phenolato) จะสามารถผลิต sPS ได้ที่ความว่องไวของปฏิกิริยาต่ำ

A.K.Ghosh, E.M.Woo [37] ได้ศึกษาถึงลักษณะผลึกของ sPS ที่แทรก (intercalated) อยู่ในเนื้อนาโนเคลร์ โดยการทำให้ปฏิกิริยาในที่เคลร์โดยใช้ 1,1,2,2-tetrachloroethane (TCE) เป็นตัวทำละลาย เครื่องมือที่ใช้คือ XRD และ DSC เพื่อดูโครงสร้างของ Montmorillonite ใน sPS ที่เป็นผลึกและหลอมละลายที่เปลี่ยนแปลงตัวแปรอุณหภูมิที่เกิดผลึก sPS จะเกิดผลึกชนิด alpha และ beta ซึ่งมีผลจากชนิดของเคลร์และอุณหภูมิ การเกิดขึ้นของผลึกชนิด alpha จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอุณหภูมิ  $250^\circ C$  โดยที่มี organo-clay อยู่ Pristine clay (Na-MMT) จะเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกชนิด beta ตลอดช่วงอุณหภูมิในการศึกษานี้ การใส่เคลร์แบบ intercalation ใน sPS จะทำให้เกิดผลึกแบบ alpha ที่มีการจัดเรียงตัวแคบกว่าผลึกแบบ beta และจะทำให้เกิด Spherulites ที่มีลักษณะต่างๆกันตามปริมาณของผลึกที่เกิดขึ้น

J.Schellenberg [38] ได้ศึกษาถึงการนำตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ multinuclear half-titanocene มาใช้ในการสังเคราะห์ sPS โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมคือ MAO และ  $tBuAl$  ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ให้อยู่ในรูปของ  $[(\eta^5-C_5Me_5)Ti]_4(\mu-O)_6$  และ  $[(\eta^5-C_{13}H_{17})Ti]_4(\mu-O)_6$  โดยการทำให้ปฏิกิริยาขององค์ประกอบย่อยกับน้ำและตรวจสอบโครงสร้างที่ได้กับ X-ray โครงสร้างของตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองจะเป็น tetrameric โดยที่มีอะตอมของออกซิเจนหกตัวเป็นตัวเชื่อมระหว่าง Ti ทั้งสี่ตัว จะอยู่ในโครงสร้างของ adamantane โดยมีหมู่ Cp ยังคงเชื่อมต่อกับหมู่ Ti ทั้งสี่ตัว ตัวเร่งปฏิกิริยา  $[(\eta^5-C_{13}H_{17})Ti]_4(\mu-O)_6$  จะมีความว่องไวกว่าและจะมีความว่องไวเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงอัตราส่วน  $MAO/[(\eta^5-C_{13}H_{17})Ti]_4(\mu-O)_6$  mole เท่ากับ 600  $tBuAl$  จะเพิ่มความไวในการต่อสายโซ่จนถึงจุดสูงสุดที่อัตราส่วน  $TIBA/[(\eta^5-C_{13}H_{17})Ti]_4(\mu-O)_6$  เท่ากับ 30-100 ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมทั้ง



สองจะมีผลต่อมวลโมเลกุลของพอลิเมอร์และการกระจายตัวของโมเลกุลโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับการจัดเรียงตัวของโมโนเมอร์ ความว่องไวในการทำปฏิกิริยาของ ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ multinuclear สามารถสูงได้ถึง 30-50% ของความว่องไวขององค์ประกอบย่อยบนโมลที่เท่ากัน และยังให้ความว่องไวที่สูงแม้ว่าจะเก็บไว้ในสภาพที่มีออกซิเจน แต่จุดว่องไวต่อปฏิกิริยาจะไม่ใช่ว่าจะเฉพาะ เช่นเดียวกับองค์ประกอบย่อยตั้งนั้นเปอร์เซ็นต์ Syndiotactic จะต่ำกว่าการทำปฏิกิริยาของตัวเร่งปฏิกิริยาแบบตัวว่องไวเดี่ยวแต่จะไม่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักโมเลกุลโดยรวม

Y.Uda et.al. [39] ศึกษาการแลกเปลี่ยนโมเลกุลและการเคลื่อนที่ออกของโมเลกุลขนาดเล็กจากผลึกชนิด delta sPS โดยอาศัยเครื่อง ATR-FTIR เพื่อติดตามการดูดกลืนแสงทั้งของโมเลกุลตัวทำละลายและพอลิเมอร์ การเปลี่ยนโมเลกุลจะสังเกตได้จากการกระทบของไอ Toluene และ Chloroform ของผลึก delta sPS การเคลื่อนที่ออกของโมเลกุลจะมีได้สองแบบคือการเคลื่อนที่ออกอย่างรวดเร็วจากส่วนที่เป็นอสัณฐาน และการเคลื่อนที่ที่ช้ากว่าจากส่วนที่เป็นผลึก และมีการตรวจวัดสัมประสิทธิ์ของการถ่ายเทโมเลกุลที่เคลื่อนที่ออก และการดูดกลืนแสงบ่งบอกถึงสภาพการเปลี่ยนไปของผลึกในขณะที่มีการถ่ายเทมวลออก

C.I.Park et.al. [40] ศึกษาถึงการผสมระดับนาโนของ sPS กับเคลร์โดยชั้นตอนที่ประกอบด้วยการผสม Poly(styrene-co-vinylloxazolin) (OPS) โดยการละลาย OPS ลงในนาโนเคลร์ตามด้วยการผสมกับ sPS ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อโครงสร้างระดับโมเลกุลของสารประกอบอาทิเช่น จุดหนุมิกการผสม และชนิดของ organoclay จะถูกศึกษาโดยการใช้ X-ray และ Rheology ซึ่งโดยมากมักขึ้นอยู่กับการใช้สารปรุงแต่งอินทรีย์ของเคลร์ การศึกษาครั้งนี้ใช้การให้ความร้อนแบบธรรมดากับสารประกอบนาโนที่ได้ซึ่งจะให้ผล exfoliated ถ้าใช้ bilayer arrangement และจะให้ผล intercalated ถ้าใช้ paraffinic monolayer arrangement การให้ความร้อนจะสามารถทำให้เปลี่ยนโครงสร้าง intercalated ไปเป็น exfoliated ซึ่งแสดงถึงแรงยึดเหนี่ยวที่มีของ OPS และพื้นผิวของเคลร์ ซึ่งตรวจพบได้จากลักษณะแบนราบของโมดูลัสในสมบัติ Rheology ซึ่งถ้าให้ความร้อน OPS และเคลร์จะเคลื่อนที่เข้าหากันและทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของโมเลกุลซึ่งทำให้การจัดเรียงตัวของเคลร์เลื่อนตัวและทำให้เกิดโครงสร้างแบบ exfoliation

M.Giordano et.al. [41] ได้ประดิษฐ์ optoelectronic sensor ที่สามารถวัดสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กได้ในสารละลายโดยใช้ sPS ที่มีสมบัติผลึกระดับนาโนที่สามารถดูดซับสารอินทรีย์ประเภทคลอรินและอโรมาติกได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเคลือบไว้บนปลายของสายนำแสงใยแก้ว และตรวจวัดการหักเหแสงในขณะที่ถูกจุ่มอยู่ในน้ำ เพื่อวัดความเข้มข้นสาร chloroform และ toluene ที่มีปริมาณเจือปนอยู่ในระดับล้านส่วน (ppm) การทำงานของเครื่องวัดความหักเหแสงนี้เทียบได้กับเครื่องมือตรวจวัดที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน (classical resonant quartz-crystal microbalance sensor, QCM) ที่ใช้พอลิเมอร์ชนิดเดียวกันเป็นส่วนประกอบ

C.Wang et.al. [42] ศึกษาความเข้ากันได้ของ sPS และ aPS ในส่วนของการกระเจิงแสงและการเติบโตของผลึก โดยใช้ DPLS (depolarized light scattering), กล้องจุลทรรศน์แสงโพลาไรซ์ และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน มวลโมเลกุลของ aPS ที่ใช้มีสองขนาด คือ 100,000 (aPS(H)) และ 4300 (aPS(M)) การผสม aPS จะลดอัตราการเกิดผลึกและความเร็วในการเกิดผลึกโดยรวม ซึ่งการใส่ aPS(M) จะให้ผลที่ชัดเจนกว่าคือสามารถลดอุณหภูมิการเกิดผลึก การเกิดผลึกแบบผกผันโดยตรงสามารถตรวจพบได้ในช่วงอุณหภูมิ 240-269°C ของการผสม aPS(H) และจะให้โครงสร้างแบบเส้นใยซ้อนไปมาซึ่งสามารถตรวจพบโดย SEM แต่ในขณะที่การผสม aPS(M) ในปริมาณมากจะได้รับการเกิดผลึกแบบไม่แปรผันโดยตรงที่ low supercooling และให้โครงสร้างแบบ interspherulitic เมื่อใช้ทฤษฎีของ Lauritzen-Hoffman พลังงานพื้นผิวในการขาดตัวของ sPS ที่คำนวณจาก DPLS ( $15.1 \text{ erg/cm}^2$ ) และ POM ( $12.6 \text{ erg/cm}^2$ ) จะให้ผลที่สอดคล้องกัน ส่วนพลังงานผลึกในแนวราบของการเติม aPS จะไม่ขึ้นกับมวลโมเลกุล aPS ที่ใช้คือคงที่อยู่ที่ประมาณ  $9.9 \text{ erg/cm}^2$  ซึ่งแสดงถึงการไม่มีพันธะพิเศษระหว่างโมเลกุล aPS และ sPS และนอกเหนือจากนั้นเสมือนกับว่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการเคลื่อนที่ของโมเลกุล sPS จากส่วนที่เป็นออสถฐานที่เข้ากันได้จะเพิ่มขึ้นในระบบของ aPS(M) เป็นไปได้ที่จะเกิดขึ้นเนื่องจากต้องการพลังงานในการแยก aPS และ sPS

C.Wang et.al. [43] ได้ศึกษาถึงการเข้ากันได้ของ sPS และ aPS ในแง่ของการจัดเรียงตัวของชั้นผลึกและการแยกตัวออกจากกันเมื่อมีความเข้มข้นต่ำๆ มวลโมเลกุล sPS อยู่ที่ 200,000 และมวลโมเลกุล aPS อยู่ที่ 100,000 โดยใช้ SAXS (Small angle X-ray scattering) และ TEM (Transmission electron microscopy) การศึกษานี้ได้ผสมพอลิเมอร์ทั้งสองที่อัตราส่วนต่างๆ และทำการอบที่อุณหภูมิ 250°C เพื่อให้เกิดผลึกที่อุณหภูมินี้ เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันการหักเหแสง X-ray ที่อุณหภูมิต้องจึงเป็นไปได้ยากจึงได้ดำเนินการทดลองที่ 150°C เพิ่มขึ้นเพื่อให้วัดขนาด lamellar ได้แม่นยำยิ่งขึ้น การวิเคราะห์ข้อมูลใช้สมการของ Debye-Bueche และได้ทำการลบการกระเจิงแสงที่ไม่เกี่ยวข้องออกเพื่อวิเคราะห์การหักเหแสงจาก lamellar แต่เพียงอย่างเดียว ค่าคงที่ต่างๆคำนวณมาจากการหักเหแสงในมิติเดียวและผลที่ได้สอดคล้องกับ TEM ซึ่งแสดงให้เห็นถึงกลุ่มของ aPS ที่กระจายอยู่ทั่วผลึกของ sPS ทำให้เกิดโครงร่างเส้นใยที่แยกออกจากกัน

## ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 1. Morphology ของพอลิเมอร์

โดยปกติแล้วพอลิเมอร์มี Morphology สองแบบคือ ผลึก (Crystalline) และอสัณฐาน (Amorphous) โดยโครงสร้างแบบอสัณฐาน คือโครงสร้างที่ปราศจากการจัดเรียงตัวหรืออยู่ในสภาพที่ไร้รูปแบบในระดับโมเลกุล และโครงสร้างผลึกของพอลิเมอร์ คือโครงสร้างที่มีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่สม่ำเสมอ โดยปกติแล้วพอลิเมอร์ไม่สามารถมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลทั้งหมดได้ หรือคือไม่มีสภาพที่เป็นผลึกถึง 100% ได้ โดยมากแล้วพอลิเมอร์จะมี สภาพอสัณฐาน หรือสภาพกึ่งผลึก (semi-crystalline) เท่านั้น

#### 1.1 โครงสร้างอสัณฐาน

พอลิเมอร์บางชนิดไม่มีผลึกหรือการจัดเรียงตัวใดๆเลย และจะมีสภาพไร้รูปแบบตั้งแต่การหลอมตัวถึงการแข็งตัว และมีสภาพเหมือนแก้ว (glass) การไร้การจัดเรียงตัวจะมีสภาพเหมือนเส้นไหม คือการจัดกระจายไม่มีการเรียงตัวในลักษณะใดๆ ลักษณะการแข็งตัวและหลอมละลายจะแตกต่างกันที่การสั่นไหวของโมเลกุล คือในขณะที่แข็งตัวโมเลกุลจะมีเพียงการสั่นไหว (vibration) ในช่วงสั้นๆเท่านั้น ในขณะที่เมื่อเข้าสู่การหลอมเหลวโมเลกุลจะมีการเคลื่อนที่หรือสามารถไหล และหมุนตัวประกอบด้วย การไหลของโมเลกุลจะสามารถเปรียบได้กับการเคลื่อนไหวของหนูนอน หรือคือสามารถไหลในท่อที่เสมือนหนูนอนโมเลกุลไปในทิศทางต่างๆ เพียงแต่โมเลกุลของพอลิเมอร์จะมีความยาวมากกว่าหนูนอนมาก และมีอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อโมเลกุลสูงมาก เมื่อพอลิเมอร์มีความอิสระในการหมุนตัวมากขึ้นจะอยู่ในสภาพที่เปลี่ยนแปลงรูปร่างโดยรวมของก้อนพอลิเมอร์ได้ในลักษณะที่เหมือนก้อนดินน้ำมันนุ่มๆ และถ้ามีอุณหภูมิสูงขึ้นโมเลกุลจะมีอิสระในการเคลื่อนที่ไหลเลื่อนออกจากกันได้ และเริ่มมีสภาพเป็นของเหลว แต่ในที่อุณหภูมิต่ำหรือมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Glass transition temperature,  $T_g$ ) พอลิเมอร์จะมีสภาพแข็งและเปราะเหมือนกับแก้ว ซึ่งสมบัติข้อนี้เป็นจุดบกพร่องที่สำคัญของพอลิสไตรีน ที่มีอุณหภูมิลายแก้วสูงถึงประมาณ  $100^{\circ}\text{C}$  จึงทำให้มีสภาพเปราะที่อุณหภูมิต่ำ Syndiotactic polystyrene จะมีโครงสร้างผลึกเสริมขึ้นมาทำให้แข็งแรงขึ้นมาก แต่อย่างไรก็ตามจะมีความเปราะที่น้อยกว่า Atactic Polystyrene ที่อุณหภูมิต่ำก็ตาม

#### 1.2 อุณหภูมิลายแก้ว

สมบัติที่สำคัญประการหนึ่งของพอลิเมอร์แบบอสัณฐานคือปรากฏการณ์การเปลี่ยนจากของแข็งเป็นของเหลว เริ่มจากที่อุณหภูมิต่ำ ถ้าพอลิเมอร์อสัณฐานถูกทำให้ร้อนขึ้น โมเลกุลจะมีพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามจะจำกัดอยู่ในช่วงการสั่นไหวที่สั้นและพอลิเมอร์จะมีสภาพ



คล้ายแก้ว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีกถึงอุณหภูมิลคล้ายแก้ว พอลิเมอร์จะสูญเสียความแข็งเปราะ และมีสภาพที่คล้ายกับยางมากขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อให้ความร้อนต่อไปพอลิเมอร์จะสูญเสียความยืดหยุ่น คล้ายยางและมีสภาพหลวมและไหลเหมือนของเหลว อุณหภูมิลคล้ายแก้วคืออุณหภูมิที่พอลิเมอร์ เริ่มอ่อนตัวเนื่องจากการสั่นไหวของโมเลกุลในช่วงที่กว้าง แม้แต่ พอลิเมอร์ที่เป็นกิ่งผลึกก็จะมี อุณหภูมิลคล้ายแก้วเช่นเดียวกัน

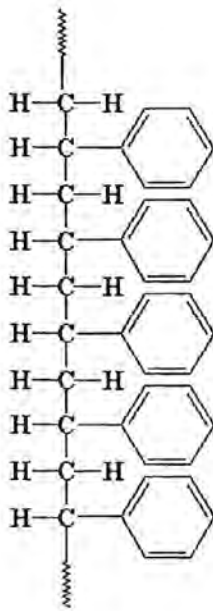
อุณหภูมิลคล้ายแก้วนี้เป็นสมบัติพื้นฐานของพอลิเมอร์ในการใช้งานและในการขึ้นรูป อุณหภูมิลคล้ายแก้วจะเกิดขึ้นควบคู่กับการสั่นไหวของโมเลกุลในช่วงกว้างและมีความอิสระในการ หมุนตัวของส่วน ต่าง ๆ ของโมเลกุลที่ยาวได้ ประมาณกันว่า 20-50 อะตอมที่ต่อเนื่องกันจะ เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนไหวที่อุณหภูมิลคล้ายแก้ว และเมื่อการเคลื่อนไหวของโมเลกุลช่วงยาวนี้ เกิดขึ้น ระยะห่างระหว่างโมเลกุลก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ปริมาตรจำเพาะเปลี่ยนแปลงไป การ ตรวจวัดอุณหภูมิลคล้ายแก้ววิธีหนึ่งที่นิยมกันคือ การตรวจวัดปริมาตรจำเพาะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น ไปเรื่อย ๆ (dilatometry) มีสมบัติอีกหลายอย่างที่เปลี่ยนแปลงไปที่อุณหภูมิลคล้ายแก้ว ยกตัวอย่าง เช่น การเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อน (Enthalpy) การแข็งตัวเชิงกล ดัชนีการหักเหแสง และ การนำความร้อนก็จะมีเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด

### 1.3 ผลึกพอลิเมอร์

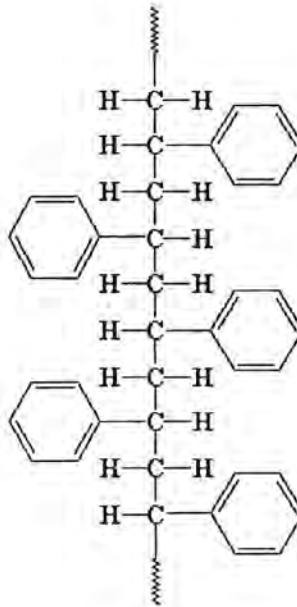
พอลิเมอร์ที่มีความเป็นผลึกในสภาวะปกติจะไม่เกิดผลึกทั้งหมดเนื่องจากลักษณะ โมเลกุลที่ยาวและมีการเกี่ยวพันกันของโมเลกุล อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก (crystalline melting temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ผลึกจำนวนมากที่สุดได้กลายสภาพกลายเป็นของเหลว โดยปกติ แล้วอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกจะสูงกว่าอุณหภูมิลคล้ายแก้วเสมอ ดังนั้นพอลิเมอร์หนึ่ง ๆ จะมีสมบัติ ที่แข็งเปราะเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิลคล้ายแก้ว และหยุ่นเหนียวขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิต่ำกว่า อุณหภูมิหลอมเหลวผลึก เมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก พอลิเมอร์จะมีลักษณะเป็น ของไหลคล้ายน้ำ ยกตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีนซึ่งมีอุณหภูมิลคล้ายแก้วอยู่ที่  $-80^{\circ}\text{C}$  และมีอุณหภูมิ หลอมเหลวผลึกที่ประมาณ  $140^{\circ}\text{C}$  จะมีสภาพยืดหยุ่นคล้ายยางที่อุณหภูมิต่ำ ตัวแปรที่มีผลต่อ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกได้แก่พันธะระหว่างโมเลกุล อาทิเช่น ความมีขั้ว (polarity) พันธะ ไฮโดรเจน และความสามารถในการขดตัว

การสร้างผลึกในพอลิเมอร์ขึ้นอยู่กับความสม่ำเสมอของโครงสร้างโมเลกุลเป็นอย่างยิ่ง ความสม่ำเสมอของโครงสร้างโมเลกุล (tacticity) จะช่วยอำนวยความสะดวก การขาดความ สม่ำเสมอของโครงสร้างโมเลกุลจะทำให้เกิดสภาพพอสัณฐาน จากรูปพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัว ของกิ่งอยู่ด้านเดียวกันของโมเลกุลโดยสม่ำเสมอ จะเรียกพอลิเมอร์ชนิดนั้นว่ามีโครงสร้างแบบ isotactic พอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของกิ่งสลับไปมาระหว่างสองด้านของโมเลกุล จะเรียกพอลิ เมอร์ชนิดนั้นว่ามีโครงสร้างแบบ syndiotactic เช่นเดียวกับ พอลิสไตรีนที่เป็นจุดมุ่งหมายของการ

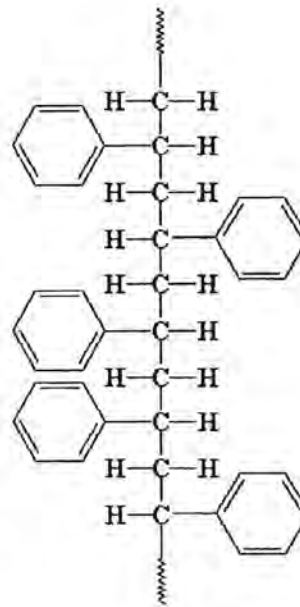
วิจัยนี้ ส่วนพอลิเมอร์ที่มีการจัดเรียงตัวของกิ่งอย่างไม่สม่ำเสมอจะเรียก พอลิเมอร์ชนิดนี้ว่ามีโครงสร้างแบบ atactic



Isotactic



Syndiotactic



Atactic

โครงสร้างแบบ isotactic และ syndiotactic จะสามารถเกิดผลึกได้เพราะความสม่ำเสมอของโครงสร้างโมเลกุล แต่อย่างไรก็ตามการจัดเรียงตัวของหมู่ย่อยและอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกจะแตกต่างกันออกไป โดยปกติแล้วพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ atactic จะเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน ยกเว้นหมู่ที่ห้อยข้างเป็นโมเลกุลมีขั้วซึ่งสามารถเกิดการจัดเรียงตัวเป็นผลึกได้

ความไม่สม่ำเสมอของโครงสร้างซึ่งแท้จริงแล้วเป็นการยากที่พอลิเมอร์จะมีโครงสร้างเป็น isotactic หรือ syndiotactic โดยสม่ำเสมอได้ การไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างนี้จะลดอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกลง และถ้ามีความผิดปกติของการจัดเรียงตัวมาก ๆ จะลดความเป็นผลึกลงอีกด้วย พอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ isotactic และ atactic จะมีเปอร์เซ็นต์การเป็นผลึกต่ำลงเนื่องจากส่วนที่เป็น isotactic เท่านั้นที่จะเกิดผลึกได้ นอกจากนี้ยิ่งโมเลกุลยังมีความยาวและการเกี่ยวพันกันระหว่างโมเลกุลมากขึ้น จะทำให้ พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกไม่ถึง 100%

## 2. ปฏิกิริยาการหลอมเหลวตัวของพอลิเมอร์

ปฏิกิริยาการหลอมเหลวตัวของพอลิเมอร์สามารถตรวจพบได้ด้วยเครื่องมือหลายชนิด เช่น DSC เป็นต้น การหลอมเหลวตัวทำให้พอลิเมอร์มีสภาพเหมือนกันและกลายเป็นของไหลเหมือนน้ำ ในตอนแรกเมื่อพอลิเมอร์มีอุณหภูมิสูงขึ้น พอลิเมอร์จะไม่หลอมเหลวไหลในทันทีเหมือนกับน้ำ เนื่องจากพอลิเมอร์มีความหนืดสูง และถ้าพอลิเมอร์มีพันธะ covalent ระหว่างกิ่งของโมเลกุล (cross linked) พอลิเมอร์อาจจะไม่หลอมเหลวคล้ายน้ำได้เลย พอลิเมอร์อสัณฐานจะนิ่มตัวลงที่อุณหภูมิคล้ายแก้ว แต่ก็ยังไม่ใช่จุดหลอมเหลวของพอลิเมอร์ การหลอมเหลวตัวจะเกิดในช่วงกว้าง โดยมากมักเกิดสภาพคล้ายยางก่อนที่จะหลอมละลายคล้ายของเหลวหนืด พอลิเมอร์กิ่งผลึกจะคงสภาพแข็งตัวที่ยืดหยุ่นได้ที่อุณหภูมิที่อยู่ระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้ว และอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก โดยมากแล้วพอลิเมอร์กิ่งผลึกจะมีความขุ่นในช่วงอุณหภูมินี้ เนื่องจากความแตกต่างของดัชนีการหักเหแสงของพอลิเมอร์ส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก และเมื่อพอลิเมอร์หลอมละลายที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก พอลิเมอร์จะกลับเป็นของเหลวใส

พอลิเมอร์กิ่งผลึกจะมีจุดหลอมเหลวที่อยู่ในช่วงแคบมากกว่าพอลิเมอร์อสัณฐาน โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและความแข็งแรงอย่างเห็นได้ชัด และเนื่องจากขนาดของผลึกที่มีขนาดเล็กมาก ดังนั้น พอลิเมอร์จะไม่หลอมละลายในทันทีเหมือนกับน้ำ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกจะเป็นอุณหภูมิที่ผลึกจำนวนมากที่สุดหลอมละลาย

## 3. สมบัติทางความร้อน

สำหรับพอลิเมอร์ที่มีสมบัติของผลึกเหลว จะเกิดการเปลี่ยนแปลงจากของแข็งคล้ายยางไปเป็นของเหลวที่มีการจัดเรียงตัว (isotropic) หลังจากอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึก และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิต่อไปการจัดเรียงตัวจะสลายตัว และเกิดสภาวะอสัณฐานที่อุณหภูมิสลายโครงสร้าง (clearing temperature) พอลิเมอร์จะไม่มีการจัดเรียงตัว (anisotropic) และจะกลับเป็นของเหลวใสเช่นเดียวกับ พอลิเมอร์กิ่งผลึกทั่วไป ปัจจัยที่กำหนดโครงสร้างของพอลิเมอร์นอกจากอุณหภูมิแล้วยังขึ้นกับโครงสร้างของโมเลกุลอีกด้วย

โครงสร้างและพันธะระหว่างโมเลกุลจะมีผลต่ออุณหภูมิคล้ายแก้วและอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกเป็นอย่างมาก การที่พอลิเมอร์มีกลุ่มของ amine หรืออะโรมาติกส์ในโครงสร้างจะทำให้มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวและอุณหภูมิคล้ายแก้วสูงขึ้น ในบางกลุ่มโครงสร้างอาจจะทำให้เกิดลักษณะพอลิเมอร์ผลึกเหลวขึ้นได้ อุณหภูมิหลอมเหลวผลึกของพอลิเมอร์อาจประกอบด้วยหลายอุณหภูมิที่เกิดจากการสลายตัวของผลึกแต่ละชนิด และเป็นไปได้ที่ผลึกชนิดหนึ่งจะสลายตัวเกิดเป็นผลึกอีกชนิดหนึ่งที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้นไปก็ได้

พอลิเมอร์บางชนิดที่มีความไม่สม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุลบางส่วนที่สามารถเกิดผลึกได้ อาจเกิดการคงตัวของโครงสร้าง โดยการลดความร้อนลงอย่างรวดเร็วจนต่ำกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว พอลิเมอร์ดังกล่าวจะมีลักษณะความใสหรือความขุ่นใกล้เคียงกับโครงสร้างผลึกที่อุณหภูมิสูงก่อน การลดความร้อน (sub cool) โดยมากแล้วพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จะมีวงแหวนเบนซีนในโซ่กิ่ง ยกตัวอย่างเช่น PET หรือสารผลึกเหลวอื่นๆ สารที่ได้ดังกล่าวนี้จะสามารถเกิดผลึกได้อีกครั้งเมื่อให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว การเกิดผลึกจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ

#### 4. สารเติมแต่งในพอลิเมอร์

เพื่อให้สมบัติเหมาะกับการใช้งาน พอลิเมอร์บริสุทธิ์มักจะผสมสารเติมแต่งเพื่อปรับสมบัติ หรือป้องกันการสลายตัวของพอลิเมอร์เมื่อได้รับความร้อนในขณะขึ้นรูป สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ แบ่งใหญ่ ๆ ได้เป็น 3 แบบ แบบที่หนึ่งคือสารที่จำเป็นต่อการขึ้นรูป แบบที่สองคือสารเติมแต่งที่ช่วยเพิ่มสมบัติ และแบบที่สามคือสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปเพื่อแก้ความบกพร่องของสารเติมแต่งสองชนิดแรก สมบัติที่เป็นโซ่ยาวของพอลิเมอร์จะช่วยให้สารเติมแต่งสามารถมีบทบาทในการนำไปใช้งานของพอลิเมอร์ได้

พอลิเมอร์บางชนิด เช่น พอลิไวนิลคลอไรด์หรือพอลิอะซิเตดอล จำเป็นที่จะต้องใส่สารเติมแต่ง เพื่อป้องกันการไหม้ในขณะหลอมเหลว แม้แต่ในที่อุณหภูมิห้องพอลิเมอร์บางชนิดเช่นพอลิพรอไพลีนยังสามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยออกซิเจนหรือแสงยูวี พอลิเมอร์บางชนิดจะมีแรงตึงผิวไม่เหมาะสมที่จะปกคลุมสารเติมแต่งชนิดไฟเบอร์ เช่น เส้นใยแก้ว เป็นต้น จึงจำเป็นต้องใส่สารเติมแต่งที่ปรับความตึงผิว (wetting agents) เพื่อให้ได้พอลิเมอร์คอมโพสิตที่มีสมบัติติดตามต้องการ โดยมากแล้วสารเติมแต่งชนิดนี้จะถูกเคลือบอยู่บนเส้นใยแก้วโดยผู้ผลิตเส้นใยแก้วอยู่แล้ว ซึ่งเป็นตัวอย่างของสารเติมแต่งชนิดที่สาม และเส้นใยแก้วเป็นสารเติมแต่งชนิดที่หนึ่งซึ่งช่วยเสริมแรงของพอลิเมอร์

สี กลิ่น ความมันเงา และสมบัติอื่นสามารถเพิ่มได้โดยใส่สารเติมแต่งประเภทที่สอง สารเติมแต่งประเภทที่ทำให้พอลิเมอร์ทนทานต่อแรงกระแทก อาทิเช่น การเติมยางลงในเนื้อ พอลิเมอร์ จัดเป็นสารเติมแต่งประเภทที่หนึ่ง สารเติมแต่งที่ทำให้พอลิเมอร์ทนไฟหรือไม่ถูกติดไฟอย่างรวดเร็วจัดเป็นสารเติมแต่งประเภทที่สอง

สารเติมแต่งประเภทที่สามจะแก้จุดบกพร่องของสารเติมแต่งสองชนิดแรก อาทิเช่น Plasticizers จำเป็นสำหรับการขึ้นรูป PVC ชนิดยืดหยุ่นได้ หรืออาจเติมสารหล่อลื่นทดแทน plasticizers ก็ได้ ในพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติม plasticizers สารเติมแต่งบางอย่างจะเป็นอาหารของแบคทีเรียและรา สารเติมแต่งประเภทที่สามจึงมีบทบาทเข้ามาแก้ไขในจุดนี้ สารเติมแต่งประเภท

แรงแจกความหนืดในการถูกกระทำในขณะที่จะช่วยเพิ่ม modulus สารประเภทยางจะถูกเติมลงในพอลิเมอร์ที่ใส่สารเติมแต่งประเภทแร่เหล่านี้

สารเติมแต่งประเภทสารหล่อลื่น (lubricant) จะช่วยให้พอลิเมอร์สามารถหมุนสายโซ่ภายใต้แรงดึงได้ เนื่องจากจะไปเพิ่มช่องว่างในเนื้อพอลิเมอร์

Plasticizers เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยสนับสนุนการเคลื่อนไหวของโซ่และส่วนของพอลิเมอร์ชนิดอสัณฐาน โดยมากจะใช้ในปริมาณมาก และจะมีผลต่อสมบัติการโค้งงอและการยืดตัว ซึ่งจะช่วยในการขึ้นรูปของพอลิเมอร์

ความแตกต่างอย่างชัดเจนของการใช้งาน plasticizers และสารหล่อลื่น คือปริมาณที่ใส่ลงไปในเนื้อพอลิเมอร์ กลไกการทำงานของ plasticizers คือการแทนที่พันธะระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ อาทิเช่น dipolar หรือ hydrogen bond ระหว่างสายโซ่ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้น และกลไกอีกประการคือ การเพิ่มเนื้อที่ว่างระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้มีปริมาตรอิสระเพิ่มมากขึ้น ซึ่งช่วยการเคลื่อนไหวของพอลิเมอร์เช่นเดียวกัน plasticizers โดยปกติแล้วจะประกอบด้วยตัวทำละลายที่ระเหยได้ยาก

ส่วนสารหล่อลื่นคือสารที่มีขั้วในโมเลกุลที่สมดุล ซึ่งจะประพัตติตัวคล้ายกับ surfactant จะเคลื่อนที่ในระหว่างสายโซ่ของพอลิเมอร์ได้อย่างดี ซึ่งทำให้เกิดการหมุนตัวของสายโซ่ภายในที่หลาย ๆ จุดของพอลิเมอร์ ดังนั้น จึงสามารถใช้ได้ในปริมาณที่น้อยกว่า plasticizers โดยมากแล้วสารหล่อลื่นมักใช้ในชิ้นงานที่ต้องรับแรงดึง เนื่องจากแรงดึงจะไปเพิ่มความเปราะของ พอลิเมอร์

## 5. การเข้ากันได้ของพอลิเมอร์

โดยปกติแล้วพอลิเมอร์จะผสมกันได้ที่มีอุณหภูมิสูงเช่นเดียวกับสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ แต่เนื่องจากพอลิเมอร์อาจจะมีพันธะพิเศษระหว่างโมเลกุล ทำให้พอลิเมอร์สองชนิดสามารถผสมกันได้ที่อุณหภูมิต่ำโดยมีความเป็นเนื้อเดียวกัน (miscibility) และสามารถแยกเป็นสองเฟสได้ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากความไม่สมดุลระหว่าง entropy และ enthalpy ลักษณะการเข้ากันได้ของพอลิเมอร์นอกจากจะมีพันธะพิเศษระหว่างกันแล้ว ถ้าพอลิเมอร์ที่มีโมโนเมอร์หลายชนิดที่มีแรงผลักรันอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน การเติมพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งไปอาจจะทำให้ระบบรวมเกิดความสมดุลย์และเกิดการเข้ากันได้ในอีกลักษณะหนึ่ง นอกจากนี้ยังมีสภาวะการเข้ากันได้ทั้งหมดสามแบบ แบบที่หนึ่งคือการเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน (miscible) แบบที่สองคือการเข้ากันไม่ได้ (immiscible) และแบบที่สามคือการเข้ากันได้บางส่วน (partially miscible)

สภาวะการเข้ากันได้จะทำให้สมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ผสมเปลี่ยนแปลงไป สมบัติที่เห็นได้ชัดที่สุดคือความทึบแสง ถ้าเฟสที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าดัชนีการหักเหแสงที่แตกต่างกันพอลิเมอร์ผสมจะเกิดการทึบแสง แต่อย่างไรก็ดีพอลิเมอร์บางชนิดจะทึบแสงโดยธรรมชาติ ทั้งนี้อาจเนื่องจากดัชนี



การหักเหแสงของผลึกและของอสัณฐานไม่เท่ากัน การที่พอลิเมอร์ผสมมีความใสจะสรุปได้สองกรณีคือดัชนีการหักเหแสงของพอลิเมอร์ทั้งสองเท่ากัน หรือพอลิเมอร์ทั้งสองสามารถผสมกันในระดับโมเลกุลได้ แม้แต่พอลิเมอร์ที่มีความใสหากเข้ากันไม่ได้แล้วเมื่อผสมกันก็จะเกิดความขุ่น อาทิเช่น พอลิสไตรีน และพอลิเมทิลเมทาอะครีเลต

สมบัติที่ตรวจสอบง่ายอีกประการหนึ่งก็คือ สมบัติทางความร้อน หากพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดเข้ากันได้ในระดับโมเลกุล ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมจะรวมกันเหลือเพียงค่าเดียว ซึ่งสิ่งนี้เป็นจริงแม้แต่กระทั่งพอลิเมอร์ที่มีโมโนเมอร์ต่างชนิดกันผสมกันอยู่โดยอิสระ (random copolymer) ก็จะมีอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียว ถ้าพอลิเมอร์เข้ากันได้เพียงบางส่วนจะมีอุณหภูมิคล้ายแก้วสองค่าที่ตกอยู่ระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้วของ พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสอง ซึ่งแสดงถึงเฟสที่สมดุลกันสองเฟส ซึ่งแต่ละเฟสประกอบด้วยพอลิเมอร์จำนวนมากต่างชนิดกันและมีพอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งละลายอยู่ในปริมาณที่น้อยกว่า และถ้าพอลิเมอร์เข้ากันไม่ได้ จะตรวจพบอุณหภูมิคล้ายแก้วไม่ได้เปลี่ยนแปลงไปจาก

พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสอง เช่นเดียวกับบล็อกโคโพลิเมอร์ (block copolymer) จะแสดงอุณหภูมิคล้ายแก้วของโมโนเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดที่มาผสมกัน

ยังมีวิธีตรวจสอบการเข้ากันได้อีกหลายวิธี อาทิเช่น อาจใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราดหรือแบบส่องทะลุเฟสที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ แต่อย่างไรก็ดีการดูความขุ่นของพอลิเมอร์และสมบัติทางความร้อน จะสามารถบอกได้อย่างมั่นใจว่าพอลิเมอร์สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้หรือไม่

## การวิเคราะห์ข้อมูล และ วิธีดำเนินการทดลอง

### 1. วิธีผสมพอลิเมอร์โดยการหลอมละลาย

การผสมพอลิเมอร์โดยการหลอมละลายเป็นวิธีที่ง่ายที่สุด มักนิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม หลักการคือการหลอมพอลิเมอร์ให้เหลวและกวนผสมกันในขณะที่ยังร้อน วิธีนี้มีขั้นตอนที่ง่ายที่สุด สารที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากไม่จำเป็นต้องเพิ่มสารอื่นใดเป็นพิเศษ แต่ข้อเสียคืออาจไม่เกิดการผสมในระดับโมเลกุล และอาจเกิดการแยกเฟสทั้งที่สามารถตรวจพบได้และในระดับไมครอน การผสมจะทำได้ยากเมื่อสารทั้งสองมีความหนืดในขณะหลอมเหลวที่ต่างกันมาก ขั้นตอนการผสมมีดังนี้

- 1.1 หลอมละลายพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายสูงก่อน ในที่นี้ใช้อุณหภูมิ  $300^{\circ}\text{C}$
- 1.2 ค่อยๆผสมพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าทีละน้อย
- 1.3 กวนผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
- 1.4 ใช้วิธีพับทบและกดให้บางสลับไปมา
- 1.5 ทำซ้ำจนพอลิเมอร์ที่มีอุณหภูมิหลอมละลายต่ำกว่าหมดตามจำนวนที่ขังไว้
- 1.6 ลดอุณหภูมิลงเหลือ  $200^{\circ}\text{C}$  และคงอุณหภูมไว้ประมาณ 10 นาที เพื่อให้ซินดิโอแทคตพอลิสไตรีนมีอุณหภูมิคงที่ในการเกิดผลึก (isothermal crystallization)
- 1.7 ลดอุณหภูมิลงจนพอลิเมอร์แข็งตัวทั้งหมดที่อุณหภูมิต้อง

### 2. วิธีผสมพอลิเมอร์โดยการละลายในตัวทำละลายเดียวกัน

วิธีนี้มักใช้ในห้องปฏิบัติการวิจัยเมื่อมีสารจำนวนน้อยและสามารถหาตัวทำละลายร่วมกันได้ หลักการคือการละลายพอลิเมอร์ในตัวทำละลายเดียวกัน และทิ้งให้ตัวทำละลายระเหยออกจนหมดเหลือพอลิเมอร์ที่ผสมกันในระดับโมเลกุล วิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้หลายขั้นตอน แต่จะให้ผลการผสมที่ดี แต่อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อเสียคือ จะมีผลกระทบของตัวทำละลายต่อพอลิเมอร์ผสม ทั้งเนื่องจากการระเหยออกไม่หมดและการเข้ากันได้จะขึ้นกับตัวทำละลายร่วมด้วย คือพอลิเมอร์จะผสมได้ดีในตัวทำละลายหนึ่งและอาจผสมเข้ากันไม่ได้ในตัวทำละลายอีกชนิดหนึ่ง นอกจากนี้ยังพบว่าอุณหภูมิการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมแตกต่างจากวิธีหลอมเหลวผสมทั้งที่ระเหยตัวทำละลายออกจนหมดแล้ว ขั้นตอนต่างๆมีดังนี้

- 2.1 ละลายพอลิเมอร์ที่มีจำนวนน้อยก่อน เนื่องจากสารละลายจะหนืดขึ้นเมื่อมีพอลิเมอร์ผสมอยู่ในปริมาณมากและจะทำให้การกวนผสมลำบากขึ้นหรือในบางกรณีไม่สามารถทำได้เลย วิธีแก้ไขคือการลดความหนืดโดยการเติมตัวทำละลายเพิ่ม แต่จะประสบกับปัญหาการระเหยตัวทำละลายที่มีปริมาณมากแทน



2.2 ค่อยๆเติมพอลิเมอร์อีกชนิดลงไป กวนตัวทำละลายจนพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดละลาย เป็นเนื้อเดียวกัน ทั้งนี้จะสามารถสังเกตได้คือสารละลายจะใสเสมอกันทั้งหมด ถ้ามีการแยกเฟส หรือสารละลายขุ่นจำเป็นต้องเปลี่ยนตัวทำละลายร่วม

2.3 นำสารละลายใสหยดลงบนแผ่นกระจกจนเต็มแผ่น

2.4 ทิ้งให้สารละลายแห้งที่อุณหภูมิห้อง

2.5 นำแผ่นกระจกที่มีพอลิเมอร์แห้งติดค้าง เข้าในเตาอบสูญญากาศ ตั้งอุณหภูมิไว้ ประมาณ 50 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

2.6 นำพอลิเมอร์ผสมบนแผ่นกระจกไปหลอมละลายที่อุณหภูมิ 300 เซลเซียส ใน ขั้นตอนนี้จะสังเกตได้ว่าตัวทำละลายถูกระเหยออกจนหมดหรือเหลืออยู่ โดยสังเกตฟองอากาศใน เนื้อพอลิเมอร์ ถ้าตรวจพบฟองอากาศจะต้องนำกลับไปอบในเตาอบสูญญากาศอีกจนกว่าจะแห้ง

2.7 ลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วมาที่ 200 องศาเซลเซียส และทิ้งให้พอลิเมอร์ผสมเกิด ผลึกที่อุณหภูมิคงที่ (Isothermal Crystallization)

2.8 ลดอุณหภูมิลงจนถึงอุณหภูมิห้องเพื่อให้พอลิเมอร์ผสมแข็งตัวทั้งหมด

2.9 พอลิเมอร์ผสมที่ได้จะมีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆเกาะอยู่บนผิวกระจก

### 3. การเตรียมพอลิเมอร์เพื่อตรวจวัดสมบัติทางความร้อนด้วย DSC

3.1 นำพอลิเมอร์ผสมมาตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ยิ่งเป็นแผ่นแบนบางหรือเป็นผงจะเหมาะสม ที่สุด เนื่องจากจะสามารถรับความร้อนจากฐานเตาของ DSC ได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง ซึ่งจะทำให้ การวัดค่าทาง สมบัติทางความร้อนมีความแม่นยำสูง

3.2 ใส่พอลิเมอร์ลงในเบ้ารองรับอุณหภูมินิยม

3.3 ปิดฝาอุณหภูมินิยม และใช้เครื่องฉีกฝาปิดฝาจนแน่น

3.4 นำตัวอย่างที่ได้ไปใส่ในเบ้า DSC คู่กับตัวอย่างเปล่าพร้อมกับปิดฝา

3.5 ทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ความเร็ว 20 องศาเซลเซียส/นาที จากอุณหภูมิ -60 องศา เซลเซียสถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส บันทึกค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเมื่อเทียบกับ ตัวอย่างเปล่า และเรียกข้อมูลที่ได้ว่าเป็นการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่ง

3.6 ลดอุณหภูมิลงด้วยความเร็ว 20 องศาเซลเซียส/นาที จาก 300 ถึง -60 องศา เซลเซียส บันทึกค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเมื่อเทียบกับตัวอย่างเปล่า

3.7 ทำการเพิ่มอุณหภูมิที่ความเร็ว 20 องศาเซลเซียส/นาที จากอุณหภูมิ -60 องศา เซลเซียสถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส บันทึกค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงของตัวอย่างเมื่อเทียบกับ ตัวอย่างเปล่า และเรียกข้อมูลที่ได้ว่าเป็นการให้ความร้อนครั้งที่สอง

3.8 วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

#### 4. การเตรียมตัวอย่างสำหรับ XRD

การกระเจิงแสงสะท้อนจาก XRD สามารถบอกถึงโครงสร้างที่เรียงตัวเป็นระเบียบของผลึกในเนื้อพอลิเมอร์ได้และถ้าคมชัดพอจะสามารถบอกถึงชนิดของผลึกในเนื้อพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากแสง X-Ray จะสะท้อนเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

4.1 เตรียมฟิล์มบางๆของสาร โดยการใช้วิธีขึ้นรูปด้วยสารละลาย หรือนำตัวอย่างจากการขึ้นรูปด้วยการหลอมผสมมากตบให้เป็นฟิล์มแล้วนำไปหลอมและคงอุณหภูมิที่ 200 องศาเซลเซียสก่อนนำมาใช้

4.2 นำฟิล์มที่ได้ไปติดกับแท่นตัวอย่างของ XRD โดยให้จุดตกกระทบของลำแสงอยู่ในส่วนที่เป็นฟิล์ม

4.3 ทำการวัดค่าความเข้มของแสงที่มุมตกกระทบต่างๆ โดยตั้งค่า XRD เอาไว้ดังนี้ 30 kV, 30 mA โดยใช้การวัดค่าที่มุมต่างๆกันทุก 0.04 องศาวินาที และใช้มุมในระหว่าง 10-40 องศา

#### 5. การหาค่าปริมาณการเป็นผลึก

โดยปกติแล้วจะสามารถหาความเป็นผลึกได้จากทั้ง DSC และ XRD โดยที่การหาค่าจาก XRD จะให้ผลที่แม่นยำกว่า เนื่องจากการวัดค่าพลังงานการหลอมละลายใน DSC มีค่าแปรเปลี่ยนอย่างมาก เมื่อเลือกค่าตั้งต้นและค่าสุดท้ายที่ใช้ในการหาพื้นที่ใต้กราฟของการหลอมเหลวผลึก ในขณะที่ XRD ใช้การวัดความแตกต่างในการกระเจิงแสงซึ่งมีความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่ามาก ในที่นี้จึงจะขอล่าวแต่การหาค่าความเป็นผลึกของ XRD เท่านั้น

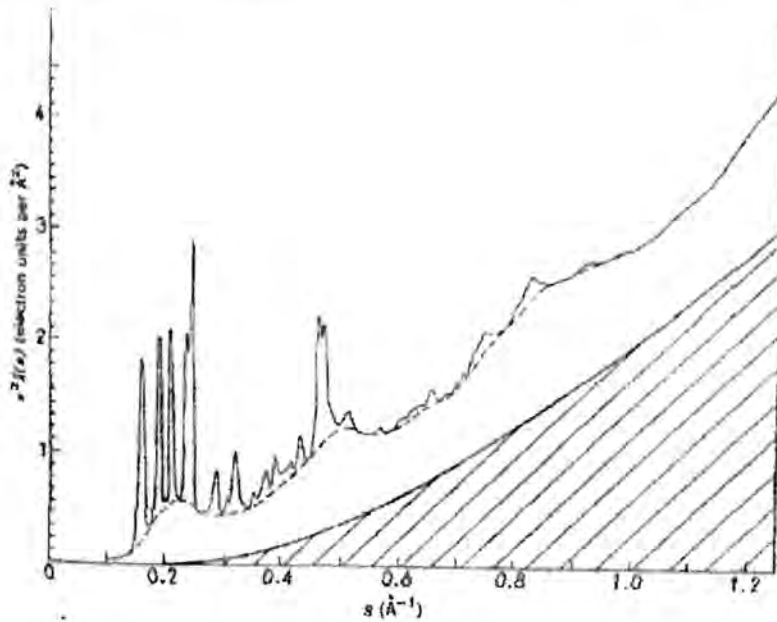
การหาค่าปริมาณการเป็นผลึกใช้วิธีของ Ruland โดยปรับปรุงให้เหมาะสมกับองศาที่ใช้ในการวัด โดยประมาณให้ความเข้มแสงที่ปรับปรุงโดยดัชนีองศาเป็นค่าสมบูรณ์ และค่าการกระเจิงแสง เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกมีค่าเปลี่ยนแปลงในช่วงที่ทำการวัดมีปริมาณไม่แตกต่างจากผลึกสมบูรณ์ ( $K=1$ ) จึงไม่ส่งผลต่อค่าของผลึกที่ได้ ค่าดัชนีองศา ( $s$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ (1)

$$s = \frac{2 \sin(\theta)}{\lambda} \quad (1)$$

และสามารถหาความเป็นผลึกได้จากพื้นที่ใต้กราฟรูปที่ 1 ระหว่าง  $s^2_1$  โดยที่  $I$  เป็นความเข้มของแสงรังสีเอ็กซ์ โดยเป็นอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้กราฟของ  $s^2_1$  ซึ่งก็คือ  $I_c$  คือความเข้มแสงที่กระเจิงโดยผลึก อัตราความเป็นผลึกสามารถคำนวณได้โดยสมการ (2)

$$x_c = \frac{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I_c ds}{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I ds} \times K \quad (2)$$

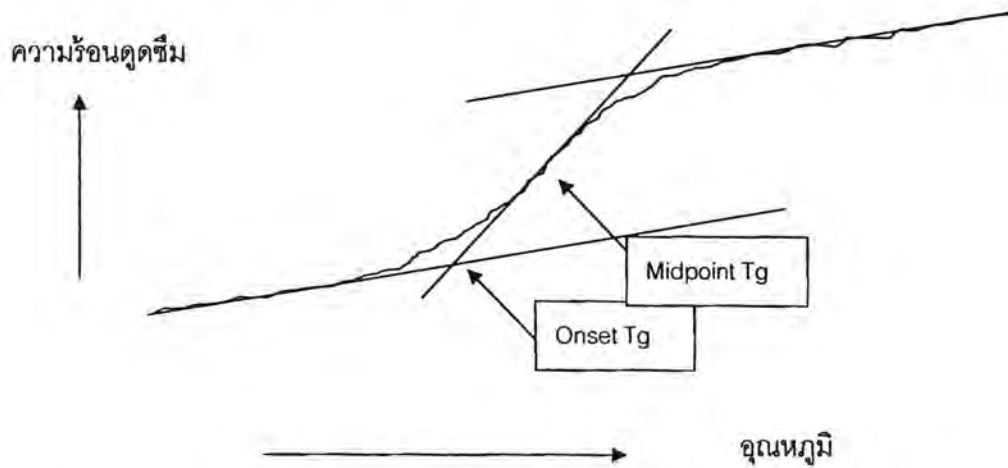
โดยที่สมมุติให้ค่า  $K$  มีค่าเป็นหนึ่งดังที่ได้กล่าวมา ค่าพื้นที่ใต้กราฟของความเป็นผลึกสามารถหาได้มาจาก พื้นที่ใต้กราฟรวมลบด้วยพื้นที่ใต้กราฟของส่วนที่เป็นอสัณฐานที่สามารถหาได้จาก  $I_0$  ซึ่งทำการวัดค่าการกระเจิงแสงของสารเดียวกันกับผลึก แต่อยู่ในสภาพอสัณฐานที่องค์เดียวกันกับการวัดค่าการกระเจิงแสงของผลึก นอกจากนี้ยังสมมุติให้ค่า  $s^2$  มีค่าน้อยมากจนไม่ต้องหักลบจากพื้นที่ใต้กราฟดังกล่าวในช่วงองค์การกระเจิงแสงที่พิจารณา



รูปที่ 0.1 กราฟของการคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟของความเป็นผลึก

6. การอ่านค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว( $T_g$ ) อุณหภูมิก่อนผลึก ( $T_c$ ) และอุณหภูมิหลอมผลึก ( $T_m$ ) จาก DSC

โดยปกติแล้วมีวิธีอ่านค่า  $T_g$  อยู่สองวิธี คือการหาค่าเชิงราบ (onset) และการหาค่าจุดกึ่งกลาง (midpoint) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้จะให้ค่าที่แตกต่างกันดังรูปที่ 2



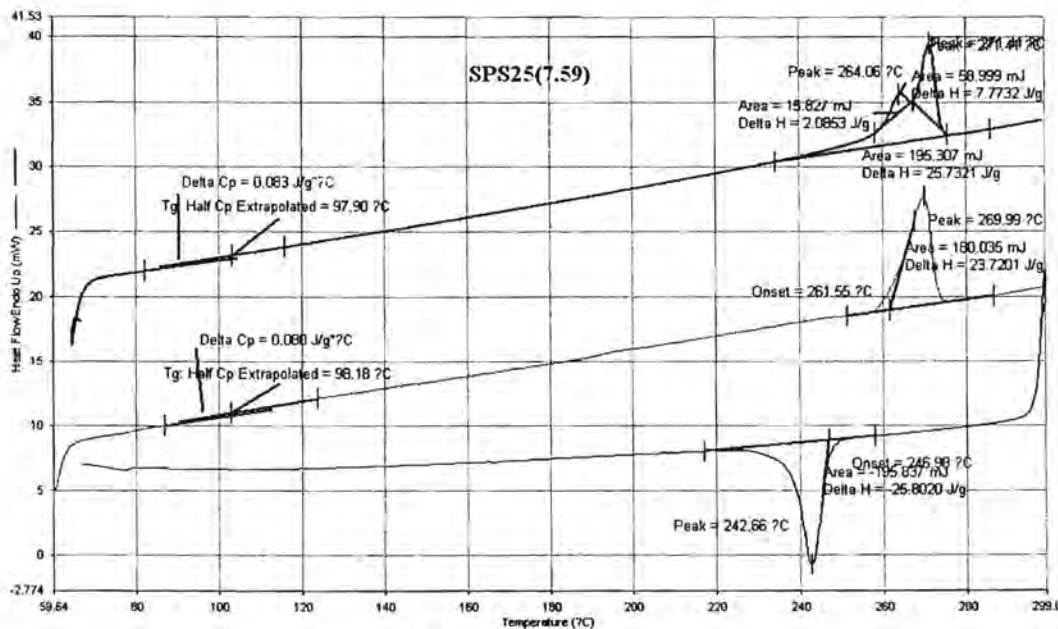
รูปที่ 0.2 แสดงค่า  $T_g$  ตามการหาค่าเชิงราบ (onset) และการหาค่าจุดกึ่งกลาง (midpoint)

## 7. การอ่านค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (Tm) และอุณหภูมิก่อผลึก (Tc)

โดยปกติแล้วการอ่านค่าอุณหภูมิหลอมผลึก (Tm) และอุณหภูมิก่อผลึก (Tc) มีอยู่ด้วยกันสองวิธีเช่นเดียวกัน คือการอ่านค่าเชิงราบ (onset) และการอ่านค่าสูงสุด (peak) โดยวิธีเชิงราบมีวิธีการอ่านค่าเช่นเดียวกับ Tg แต่เนื่องจากการหลอมผลึกจะให้ค่าที่เป็นค่าสูงสุด จึงใช้ค่าที่ไม่เหมือนกับ Tg แต่จะใช้ค่ายอดสุดของจุดสูงสุดแทน

การอ่านค่าโดยใช้ค่าเชิงราบจะให้ประโยชน์ในการดูอุณหภูมิก่อนหลอมเหลวของผลึกซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับค่าอุณหภูมิสูงสุดที่จะสามารถใช้งานพอลิเมอร์ได้ ส่วนการอ่านค่าสูงสุดจะแสดงถึงการที่ผลึกส่วนใหญ่หลอมละลาย ซึ่งเป็นค่าโดยเฉพาะของผลึกชนิดนั้น และการที่มีผลึกหลายชนิดหลอมละลายอาจทำให้เกิดค่าสูงสุดมากกว่าหนึ่งได้ ซึ่งการอ่านค่าเชิงราบไม่สามารถแสดงตำแหน่งที่ซ้อนกันอยู่ของค่าสูงสุดได้ ในกรณีนี้การอ่านค่าสูงสุดจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมกว่า

ตัวอย่างการอ่านค่าอุณหภูมิจาก DSC



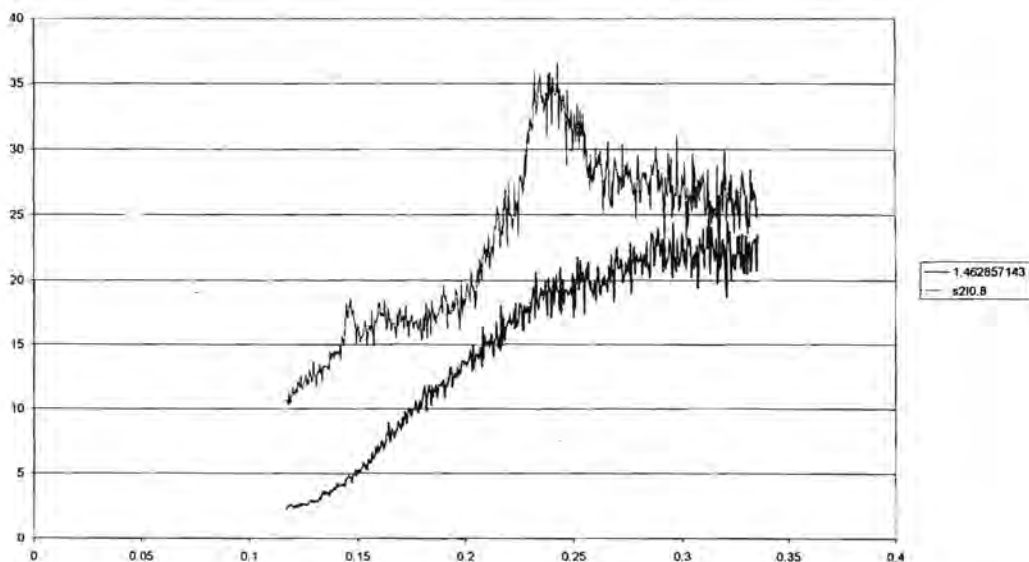
รูปที่ 0.3 ผลจากเครื่อง DSC

## 8. การหาค่าปริมาณ SPS ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน

เนื่องจากพอลิเมอร์ชนิดกึ่งผลึก (Semicrystalline) จะมีทั้งส่วนที่เป็นอสัณฐานและส่วนที่เป็นผลึก ซึ่งจะสามารถหาเปอร์เซ็นต์ของผลึกได้โดยการใช้ XRD ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว และส่วนที่นอกเหนือจากเปอร์เซ็นต์ของผลึกจึงเป็นส่วนที่เป็นอสัณฐาน การผสมพอลิเมอร์ที่เป็นอสัณฐานเป็นการเพิ่มเนื้ออสัณฐานเท่านั้นแต่อาจส่งผลกระทบต่อผลึกโดยจะทำให้เปอร์เซ็นต์การเป็นผลึกมีค่าน้อยลง

จากค่าเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกจะสามารถหาปริมาณเปอร์เซ็นต์อสัณฐานทั้งหมดได้ และจากปริมาณการเติมสารเติมแต่งชนิดอสัณฐานจะทำให้สามารถคำนวณปริมาณ SPS ที่ปนอยู่ในอสัณฐานได้ แต่อย่างไรก็ตามอาจเกิดความคลาดเคลื่อนที่ทำให้เปอร์เซ็นต์การเป็นผลึกมีค่าสูงกว่าเปอร์เซ็นต์ SPS ที่อยู่ในพอลิเมอร์ผสมได้ซึ่งไม่เป็นความจริง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการสูญเสียพอลิเมอร์อสัณฐานที่เติมลงใน SPS ในขั้นตอนการกวนผสม ซึ่งพอลิเมอร์ดังกล่าวจะมีอุณหภูมิในการหลอมเหลวต่ำกว่า SPS มากทำให้ละลายติดกับแผ่นกวน หรือเกิดการเสื่อมสภาพในขณะที่ผสมได้ ทั้งนี้จากการทดลองเท่าที่พบจะปรากฏเหตุการณ์นี้ขึ้นเมื่อปริมาณ SPS ลดลงเหลือ 20%w เท่านั้น

ตัวอย่างข้อมูลดิบของ XRD ตามรูปที่ 4 แสดงกราฟการกระเจิงแสงของตัวอย่างที่มีผลึก (เส้นบน) และ การกระเจิงแสงของตัวอย่างเดียวกันที่เป็นโครงสร้างอสัณฐาน (เส้นล่าง) แกน X แสดงดัชนีองศา ( $s$ ) แกน Y แสดงค่าของ  $s^2 I$  โดยที่พื้นที่ใต้กราฟระหว่างเส้นทั้งสองแสดงถึงปริมาณส่วนที่เป็นผลึก และพื้นที่ใต้กราฟบนแสดงถึงการกระเจิงแสงทั้งหมด



รูปที่ 0.4 ตัวอย่างข้อมูลดิบของ XRD เป็นกราฟการกระเจิงแสง

ตารางที่ 0.1 ตัวอย่างการแสดงค่าประมวลผลจาก XRD

%sPS total	%Crystal	%sPS amorphous in blend	%sPS in amorphous
50	0.27	22.98	0.31
60	0.26	34.12	0.46
70	0.31	38.97	0.57
80	0.35	45.22	0.69
90	0.39	50.95	0.84
100	0.42	57.79	1.00

ในคอลัมน์แรกแสดงถึงปริมาณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ SPS ในพอลิเมอร์ผสม ซึ่งมี ส่วนผสมพอลิเมอร์อสัณฐานอื่นรวมอยู่ด้วย ในคอลัมน์ที่สองเป็นอัตราส่วนของผลึกในเนื้อพอลิเมอร์ผสมทั้งหมดที่สามารถหาได้จาก XRD ในคอลัมน์ที่สามเป็นปริมาณโดยน้ำหนักของ SPS ที่ไม่ได้ก่อตัวเป็นผลึก และในคอลัมน์สุดท้ายแสดงปริมาณ SPS ในส่วนที่เป็นอสัณฐานเมื่อคิดรวมกับพอลิเมอร์ชนิดที่สองซึ่งก็ไม่ได้ก่อตัวเป็นผลึก ทั้งนี้เพื่อประโยชน์ในการทำนายค่า  $T_g$  ของส่วนที่เป็นอสัณฐาน

ตารางที่ 0.2 ตัวอย่างการแสดงค่าประมวลผลจาก DSC

sPS1 (weight fraction)	$T_g1$ (°C)	$T_g2$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_m2.1$ (°C)	$T_m2.2$ (°C)
0.5	63.61	64.14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	69.52	72.02	223.84	261.90	261.49	n.d.
0.7	72.99	74.26	226.74	262.70	262.33	n.d.
0.8	76.18	77.42	230.97	261.89	261.92	n.d.
0.9	78.65	81.09	239.64	268.52	262.73	n.d.
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21



Tg1 คือค่า Tg ที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งแรก โดยจะแสดงถึงสภาพการก่อผลึกที่อุณหภูมิคงที่โดยผลสืบเนื่องมาจากการทิ้งให้เกิดผลึกจากการหลอมละลายที่อุณหภูมิ 200°C และ Tm1 คือจุดยอดสุดของการหลอมละลายผลึกที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งที่หนึ่งเช่นกัน ค่า Tc คือค่าอุณหภูมิการก่อผลึกที่ตรวจวัดจากการเย็นตัวลงที่อัตรา 20°C ต่อนาที และ Tg2, Tm2 แสดงค่าที่ได้จากการให้ความร้อนครั้งที่สอง โดยผลึกจะมีประวัติการก่อผลึกที่อัตรา 20°C ต่อนาที เหมือนกันในทุกค่า

## 9. การสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน

### 9.1 การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

Cp\*TiCl<sub>3</sub> น้ำหนัก 0.014 กรัม ละลายใน 35 ml ของโทลูอีน ภายใต้บรรยากาศอากาศอน (Ar) ใน Glove Box โดยทำการกวนผสมจนกระทั่งละลายโดยสมบูรณ์ และจะให้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมกับ MMAO (Modified-Methylaluminoxane) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมในการสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน

### 9.2 การเตรียมสไตรีนโมโนเมอร์

จะทำการสกัดสไตรีนโมโนเมอร์ด้วยสารละลาย NaOH 5%w/w ในน้ำกลั่น และนำไปกลั่นภายใต้โซเดียมที่ 50°C ภายใต้สภาวะสูญญากาศ ก่อนการนำไปสังเคราะห์

### 9.3 การสังเคราะห์พอลิสไตรีน

การสังเคราะห์พอลิสไตรีนทำในขวดแก้วทรงกลมขนาด 250 ml ที่มีแท่งกวนแม่เหล็กที่อุณหภูมิที่กำหนดภายใต้บรรยากาศอากาศอน โดยทำการผสม 46 ml ของโทลูอีน, 32 ml ของสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยา, 13.6 ml ของ MMAO และ 28.4 ml ของสไตรีนโมโนเมอร์ที่กลั่นแล้ว สารผสมจะทำปฏิกิริยาจนกระทั่งครบตามกำหนดเวลาและจะหยุดปฏิกิริยาโดยการเติมสารละลายเมธานอลที่มีกรด HCl ผสมอยู่ 10% พอลิสไตรีนที่ได้จะตกตะกอนออกจากสารละลายจะถูกกรองและล้างตะกอนด้วยเมธานอลและทำการชั่งน้ำหนัก

### 9.4 การหาปริมาณซินติโอเทคติก

พอลิสไตรีนที่ไม่ใช่การต่อสายโซ่ที่เป็นซินติโอเทคติกจะสามารถละลายในตัวทำละลาย MEK (เมทิล เอธิล คีโตน) พอลิเมอร์ที่ได้จากการสังเคราะห์จะถูกล้างโดยการละลายในสารละลายควบแน่นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง น้ำหนักพอลิสไตรีนที่เหลืออยู่จากการสกัดด้วยน้ำหนักเริ่มต้นและคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์จะเป็นค่าดัชนีซินติโอเทคติกของพอลิเมอร์ที่ได้มาจากการสังเคราะห์สภาวะในการทำปฏิกิริยาจะสามารถสรุปได้ดังนี้

[Cp*TiCl <sub>3</sub> ]	=	3.68×10 <sup>-4</sup> M
[MMAO]	=	1.83 M
[Styrene]	=	2.06 M
Al <sub>MMAO</sub> /Ti mole ratio	=	563
Toluene	=	46 ml
Polymerization Time (t <sub>p</sub> )	=	6 h, 1 h and 6 min
Polymerization Temperature (T <sub>p</sub> )	=	0, 10 and 20°C

#### 9.5 การทำเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟี (Gel Permeation Chromatography)

การทำเจลเพอร์มิเอชันโครมาโตกราฟีดำเนินการโดย บริษัทไทยปิโตรเคมีคอล อินดัสตรีโดยใช้เครื่อง PL-GPC 220 โดยการใช้อโร-ไดคลอโรเบนซีนเป็นตัวทำละลายโดยการผ่านไปในคอลัมน์ PL-SP 260 ที่อุณหภูมิ 150°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง โดยใช้พอลิสไตรีนอสังฐานเป็นตัวเทียบ จากการเทียบเวลาที่ใช้ในการผ่านคอลัมน์จะทำให้ทราบมวลโมเลกุลเฉลี่ยโดยน้ำหนักและโดยจำนวน (M<sub>w</sub>, M<sub>n</sub>) และค่าการกระจายตัวของมวลโมเลกุล ของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ (M<sub>w</sub>/M<sub>n</sub>)

## เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. ชุดสังเคราะห์ Syndiotactic Polystyrene (sPS): ใช้เครื่องมือของศูนย์เชี่ยวชาญทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- 1.1 Schelenk Line
- 1.2 Schelenk Tube
- 1.3 Glove Box
- 1.4 Vacuum Pump
- 1.5 Inert Gas Supply
- 1.6 Glass Reactor, Syringe and Needle
- 1.7 Magnetic Stirrer and Hot plate
- 1.8 Soxhlet Extractor

2. ชุดวิเคราะห์พอลิเมอร์

- 2.1 Digital hot plate Stirrer
- 2.2 Small angle light scattering (SALS): เครื่องมือประกอบในประเทศ  
ห้องปฏิบัติการวิจัยพอลิเมอร์,  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2.3 Differential Scanning Calorimeter (DSC): Perkin-Elmer DSC7,  
ศูนย์เครื่องมือ, มหาวิทยาลัยมหิดล
- 2.4 Scanning Electron Microscope (SEM): JSM-5410LV  
ศูนย์เครื่องมือ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2.5 Wide Angle X-Ray Diffraction (WAXD):  
Philips Expert PW3710 BASED HT10  
สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 2.6 เครื่องมือของของศูนย์เชี่ยวชาญทางด้านตัวเร่งปฏิกิริยา ภาควิชาวิศวกรรมเคมี,  
คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
  - 2.6.1 DSC, Perkin-Elmer, Diamond DSC
  - 2.6.2 DMA, Dynamic Mechanical Analysis, Perkin-Elmer
  - 2.6.3 WAXD

## ผลการทดลอง ตอนที่หนึ่ง

### 1.1 ผลกระทบของอุณหภูมิต่อความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา

การสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนทำในสภาวะอุณหภูมิต่างๆ เพื่อที่จะได้มวลโมเลกุลที่มีขนาดต่างกัน การสังเคราะห์จะทำให้อุณหภูมิที่แตกต่างกันสามค่าคือ 0, 10 และ 20°C การทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ นั้นจะทำให้ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าแตกต่างกันออกไปดังจะสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ตารางร้อยละผลได้และค่า catalytic activity ของการสังเคราะห์พอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิต่างๆ (Percent Yield and catalytic activity of polystyrene produced at various polymerization temperatures)<sup>a</sup>

Polymerization Temperature (°C)	Yield (%)	Catalytic Activity (g PS / mmol Ti-hr)
0 <sup>b</sup>	11.47	11.13
10 <sup>c</sup>	13.95	79.48
20 <sup>d</sup>	15.22	885.42

<sup>a</sup> Polymerization conditions :  $[Cp^*TiCl_3] = 3.68 \times 10^{-4}$  M,  $[MMAO] = 1.83$  M,  $[Styrene] = 2.06$ ,  $Al/Ti = 563$

<sup>b, c, d</sup> Polymerization time = 6 h, 1 h and 6 min, respectively.

โดยจะเห็นได้ว่าความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเช่นเดียวกับการเพิ่มร้อยละผลได้ (Yield) ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่มีการศึกษามาก่อนหน้า

### 1.2 ผลของอุณหภูมิต่อความเป็นซินติโอเทคติก

โดยการวัดเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่คงเหลือจากการสกัดด้วยตัวทำละลายเดือด (Soxhlet Extraction) โดยใช้ MEK เป็นตัวทำละลายในเวลา 12 ชั่วโมงจะทำให้สามารถประมาณดัชนีความเป็นซินติโอเทคติกได้ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 ร้อยละดัชนีของความเป็นซินดิโอเทคติก (% S.I.) ของการสังเคราะห์พอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิคงที่ต่างๆ (Percent Syndiotactic index (% S.I.) of polystyrene products at various polymerization temperatures)<sup>a</sup>

Polymerization Temperature (°C)	Weight of Polystyrene Product		% Syndiotactic Index (% S.I.)
	Before Extracted (g)	After Extracted (g)	
0 <sup>b</sup>	2.9506	2.7589	93.50
10 <sup>c</sup>	3.5132	3.3148	94.35
20 <sup>d</sup>	3.9164	3.7209	95.01

<sup>a</sup> Polymerization conditions : [Cp\*TiCl<sub>3</sub>] = 3.68×10<sup>-4</sup> M, [MMAO] = 1.83 M, [Styrene] = 2.06, Al/Ti = 563

<sup>b,c,d</sup> Polymerization time = 6 h, 1 h and 6 min, respectively.

ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณดัชนีซินดิโอเทคติกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยตามอุณหภูมิที่ใช้ในการดำเนินปฏิกิริยา โดยจะมีค่าอยู่ที่ประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์

### 1.3 ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อมวลโมเลกุลของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน ดังจะสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 1.3 แสดงค่ามวลโมเลกุลและมวลโมเลกุลตามจำนวนของการสังเคราะห์ซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนในสภาวะอุณหภูมิคงที่ต่างๆ (Molecular weights and molecular weight distributions of syndiotactic polystyrene at various polymerization temperatures)<sup>a</sup>

Polymerization Temperature (°C)	M <sub>n</sub>	M <sub>w</sub>	M <sub>w</sub> /M <sub>n</sub>
0 <sup>b</sup> (sPS3)	372,900	1,083,300	2.9
10 <sup>c</sup> (sPS1)	636,400	1,663,000	2.6
20 <sup>d</sup> (sPS2)	379,300	1,040,500	2.8

<sup>a</sup> Polymerization conditions : [Cp\*TiCl<sub>3</sub>] = 3.68×10<sup>-4</sup> M, [MMAO] = 1.83 M, [Styrene] = 2.06, Al/Ti = 563

<sup>b,c,d</sup> Polymerization time = 6 h, 1 h and 6 min, respectively.

ผลของอุณหภูมิของปฏิกิริยาต่อมวลโมเลกุลของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนจะแตกต่างกัน ออกไปขึ้นอยู่กับทั้งอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ในที่นี้จะเรียกซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนที่ได้จากอุณหภูมิต่างๆเรียงลำดับตามปริมาณมวลโมเลกุลตามจำนวน (Mn) ว่า sPS1, sPS2, และ sPS3 ตามลำดับดังจะสามารถแสดงไว้ดังตารางข้างต้น

#### 1.4 ผลการทดลองโดยเครื่อง DSC (Differential Scanning Calorimetry)

ดังที่ได้กล่าวในช่วงการวิเคราะห์ข้อมูลและวิธีดำเนินการทดลอง จากการทดลองตรวจวัดด้วย DSC จะสามารถทำให้ทราบอุณหภูมิคล้ายแก้ว,  $T_g$  (Glass Transition Temperature) อุณหภูมิหลอมเหลวตัวของผลึก,  $T_m$  (Crystalline Melting Point Temperature) และอุณหภูมิก่อนตัวของผลึก,  $T_c$  (Crystallization Temperature) ของพอลิเมอร์ก่อนการผสมและหลังจากการผสม โดยจะสังเกตความเข้ากันได้ในทางความร้อนโดยที่ ถ้าค่าอุณหภูมิ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมจะมีอยู่เพียงค่าเดียวและมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  ของ พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองจะแสดงถึงความเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน (Miscibility) และถ้าอุณหภูมิ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมมีสองค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิ  $T_g$  ของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองจะแสดงถึงการเข้ากันได้เพียงบางส่วน (Partial Miscibility) และถ้าค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมมีสองค่าและไม่เปลี่ยนไปจากอุณหภูมิ  $T_g$  ของ พอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสองจะถือได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งสองไม่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ (Immiscible) แต่อย่างไรก็ดีการคาดเดาการเข้ากันได้จากอุณหภูมิลคล้ายแก้ว ยังมีอุปสรรคจากการที่การเปลี่ยนแปลงที่สามารถตรวจวัดได้สามารถสังเกตได้โดยยาก ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะของซินติของพอลิเมอร์ที่มาผสมและความเข้มข้นของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ในพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าต่ำ การยืนยันความเป็นเนื้อเดียวกันจึงควรสอดคล้องกันไม่แต่เฉพาะการตรวจวัดโดย DSC เท่านั้นแต่ควรใช้เครื่องมือชนิดอื่นๆเพื่อยืนยันการเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์อีกด้วย

ในการทดลองนี้จะทำการตรวจวัดโดย DSC ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง  $50 - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$  โดยใช้ อัตราการให้ความร้อน  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที ตัวอย่างจะถูกทำให้หลอมเหลวที่  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  และนำไปพักเพื่อให้เกิดผลึกที่  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  ก่อนการนำเข้าเครื่อง DSC เพื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิและตรวจวัดเป็นครั้งที่หนึ่ง หลังจากตรวจวัดและอุณหภูมิขึ้นสูงถึง  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  DSC จะลดอุณหภูมิลดด้วยอัตรา  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ต่อนาทีพร้อมทำการตรวจวัดอุณหภูมิก่อนผลึกในที่มีอัตราการเย็นตัวลงคงที่ จนอุณหภูมิลดลงเหลือ  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  แล้วจึงทำการให้ความร้อนและตรวจวัดครั้งที่สองด้วยอัตราการให้ความร้อนเช่นเดียวกันกับการตรวจวัดครั้งที่หนึ่ง ระหว่างการให้ความร้อนค่าอุณหภูมิลคล้ายแก้วและอุณหภูมิลหลอมละลายผลึกจะถูกบันทึก ตารางสรุปของอุณหภูมิลที่เป็นจุดเปลี่ยนทั้งสามจะสามารถแสดงได้โดย ตารางที่ 6 เริ่มจากการตรวจวัดซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์ทั้งสามตัวดังนี้



ตารางที่ 1.4 แสดงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) อุณหภูมิก่อตัวของผลึก ( $T_c$ ) และค่าอุณหภูมิหลอมเหลวตัวของผลึก ( $T_m$ ) ของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์ (Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of pure syndiotactic polystyrenes)

Sample	$T_{g1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{g2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
sPS1	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21
sPS2	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57
sPS3	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางจะเห็นได้ว่าค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) และอุณหภูมิหลอมละลายของผลึก  $T_m$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มขนาดมวลโมเลกุล (มวลโมเลกุล sPS1>sPS2>sPS3) แต่อย่างไรก็ตามการที่อุณหภูมิทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกันอาจมองได้ว่าอิทธิพลเนื่องจากมวลโมเลกุลต่อ  $T_g$ ,  $T_m$  ของพอลิเมอร์มวลโมเลกุลใหญ่ระดับแสนจะมีน้อยกว่าในพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลต่ำกว่านี้

จากการศึกษาสมบัติของอัลลูฐานพอลิสไตรีนซึ่งจะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PBMA, PCHA, PEMA, Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene), Polyisoprene และ PVME จึงเกิดแนวคิดที่จะผสมพอลิเมอร์ดังกล่าวกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน เพื่อเปิดช่องทางการใช้พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวที่มีโอกาสเป็นเนื้อเดียวกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนเพื่อการใช้งานทางอุตสาหกรรมอีกด้วย

ตารางที่ 1.5 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PBMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PBMA =  $31.85^{\circ}\text{C}$ )

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{g2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.5	67.83	64.80	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	68.27	n.d.	210.10	254.43	249.58	n.d.
0.7	68.94	n.d.	213.69	255.21	250.34	n.d.
0.8	69.37	n.d.	214.77	255.58	251.07	n.d.
0.9	70.83	n.d.	234.25	265.30	262.90	n.d.
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21



ตารางที่ 1.6 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PBMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PBMA = 31.85°C)

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	66.67	63.41	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	67.60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.7	67.73	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.8	68.19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.9	69.29	n.d.	233.28	263.26	262.61	n.d.
1.0	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

ตารางที่ 1.7 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PBMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PBMA = 31.85°C)

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	64.56	61.72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	65.75	n.d.	197.51	238.31	236.71	n.d.
0.7	66.12	n.d.	206.30	247.48	244.82	n.d.
0.8	66.98	n.d.	201.71	247.74	241.16	n.d.
0.9	67.64	n.d.	214.85	251.61	248.70	n.d.
1.0	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 7-9 จะเห็นได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่มีความเข้มข้นเปลี่ยนไป จะยังคงมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียว ซึ่งจะทำให้สามารถทำนายได้ว่าพอลิเมอร์ PBMA สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวได้กับ ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสาม นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิคล้ายแก้วมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนมีค่าสูงขึ้น จะตรงกับทฤษฎีของ Flory-Fox ที่อธิบายการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิคล้ายแก้วเมื่อปริมาณอัตราส่วนของสารที่มีอุณหภูมิคล้ายแก้วที่สูงกว่าได้อีกด้วย

ตารางที่ 1.8 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PCHA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PCHA = 25.81°C)

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	63.61	64.14	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	69.52	72.02	223.84	261.90	261.49	n.d.
0.7	72.99	74.26	226.74	262.70	262.33	n.d.
0.8	76.18	77.42	230.97	261.89	261.92	n.d.
0.9	78.65	81.09	239.64	268.52	262.73	n.d.
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21

ตารางที่ 1.9 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PCHA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PCHA = 25.81°C)

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	59.05	60.89	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	60.64	63.08	223.94	263.88	263.48	n.d.
0.7	61.31	64.05	215.61	255.59	253.08	n.d.
0.8	62.12	65.15	215.39	262.69	249.87	n.d.
0.9	66.50	68.72	234.32	261.10	255.27	n.d.
1.0	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

ตารางที่ 1.10 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PCHA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PCHA = 25.81°C)

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°)
0.5	53.68	56.69	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	55.18	58.80	223.87	261.09	261.5	n.d.
0.7	56.91	61.00	220.10	257.73	258.14	n.d.
0.8	58.57	61.96	216.89	258.70	255.76	n.d.
0.9	61.40	62.37	220.64	253.94	253.52	n.d.
1.0	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 10-12 จะสามารถคาดเดาได้ว่า PCHA จะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวได้กับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสาม โดยมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวและเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1.11 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PEMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PEMA = 65.54°C)

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	73.12	73.90	216.60	255.05	256.48	n.d.
0.6	74.96	n.d.	203.94	228.19	245.44	n.d.
0.7	75.83	n.d.	203.23	247.16	243.70	n.d.
0.8	76.01	n.d.	207.10	246.83	246.52	n.d.
0.9	78.76	n.d.	225.79	260.77	258.13	n.d.
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21

ตารางที่ 1.12 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PEMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PEMA = 65.54 °C)

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	67.94	69.63	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	68.65	n.d.	195.46	228.12	235.55	n.d.
0.7	69.79	n.d.	199.36	245.38	240.51	n.d.
0.8	70.53	n.d.	213.94	249.86	247.81	n.d.
0.9	71.76	n.d.	212.97	252.02	247.86	n.d.
1.0	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

ตารางที่ 1.13 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PEMA blends at various compositions ( $T_g$  of pure PEMA = 65.54 °C)

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	66.70	66.96	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	67.87	n.d.	204.01	250.44	246.31	n.d.
0.7	68.81	n.d.	199.66	240.62	238.66	n.d.
0.8	69.60	n.d.	216.81	255.53	251.02	n.d.
0.9	70.32	n.d.	199.21	245.61	236.55	n.d.
1.0	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 13-15 จะสามารถคาดเดาได้ว่า PEMA จะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวได้กับ ซินดีโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสาม โดยมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวและเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซินดีโอเทคติกพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1.14 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$  of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	84.27	85.37	223.79	258.38	243.36	257.24
0.6	89.06	92.48	229.79	262.58	251.75	263.67
0.7	92.59	94.89	233.43	263.02	256.81	266.63
0.8	93.56	95.79	236.68	267.01	260.75	268.82
0.9	95.35	96.11	238.13	268.81	263.25	270.26
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21

ตารางที่ 1.15 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$  of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	83.79	84.97	217.73	250.90	237.80	252.40
0.6	87.27	91.05	226.49	261.72	249.88	261.46
0.7	88.63	92.39	235.75	266.43	258.06	267.54
0.8	90.51	93.31	237.86	267.13	259.81	268.57
0.9	92.86	94.92	240.86	268.43	262.87	269.90
1.0	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

ตารางที่ 1.16 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions ( $T_g$  of pure Poly( $\alpha$ -methylstyrene) = 87.33 °C)

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	77.26	79.17	207.31	241.54	229.59	246.80
0.6	80.01	83.75	221.43	253.57	240.74	255.84
0.7	85.08	86.55	215.80	252.60	235.14	250.93
0.8	89.46	92.23	224.18	257.68	241.30	256.39
0.9	91.31	93.67	225.53	256.56	242.24	257.67
1.0	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 15-18 จะสามารถคาดเดาได้ว่า Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene) จะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวได้กับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสาม โดยมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวและเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1.17 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$  of pure Polyisoprene = -47.02°C)

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	70.17	63.51	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
0.6	74.66	71.15	217.20	259.04	261.54	n.d.
0.7	76.85	73.10	221.37	263.16	264.87	n.d.
0.8	77.90	80.45	220.94	260.68	259.44	n.d.
0.9	78.83	82.23	225.12	258.83	257.51	n.d.
1.0	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21



ตารางที่ 1.18 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$  of pure Polyisoprene =  $-47.02^{\circ}\text{C}$ )

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{g2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.5	45.12	49.73	217.76	250.60	253.22	n.d.
0.6	58.83	63.28	217.16	259.82	263.96	n.d.
0.7	60.03	64.57	221.72	261.45	265.23	n.d.
0.8	70.14	71.12	223.84	262.27	262.67	n.d.
0.9	73.43	73.64	236.72	265.45	265.90	n.d.
1.0	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

ตารางที่ 1.19 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/Polyisoprene blends at various compositions ( $T_g$  of pure Polyisoprene =  $-47.02^{\circ}\text{C}$ )

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{g2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_c$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.1}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{m2.2}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.5	44.18	45.75	220.94	255.86	257.91	n.d.
0.6	48.16	52.16	215.97	259.04	261.51	n.d.
0.7	56.82	53.38	218.90	261.53	262.38	n.d.
0.8	61.22	57.67	225.99	263.60	264.00	n.d.
0.9	69.28	73.99	225.95	256.89	256.91	n.d.
1.0	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 19-21 จะสามารถคาดเดาได้ว่า Polyisoprene จะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียว  
ได้กับซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสาม โดยมีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวและเพิ่มขึ้นตาม  
อัตราส่วนของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนที่เพิ่มขึ้น

ตารางที่ 1.20 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS1/PVME blends at various compositions ( $T_g$  of pure PVME = -27.10 °C)

sPS1 (weight fraction)	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_m2.1$ (°C)	$T_m2.2$ (°C)
0.5	-24.19	46.13	-20.10	218.15	265.00	267.19	n.d.
0.6	-23.73	47.84	-18.47	227.16	266.26	267.81	n.d.
0.7	-22.31	50.29	-17.82	223.49	262.08	264.66	n.d.
0.8	56.91	56.91	57.02	234.85	265.16	265.69	n.d.
0.9	57.14	57.14	57.51	237.13	268.19	268.17	n.d.
1.0	97.28	97.28	97.41	243.25	268.88	263.53	271.21

ตารางที่ 1.21 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS2/PVME blends at various compositions ( $T_g$  of pure PVME = -27.10 °C)

sPS2 (weight fraction)	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m1$ (°C)	$T_m2.1$ (°C)	$T_m2.2$ (°C)
0.5	-22.80	50.37	-17.13	215.86	262.69	267.12	n.d.
0.6	-22.10	53.49	-16.11	219.36	264.67	266.70	n.d.
0.7	-21.72	55.32	-15.97	223.96	263.58	266.71	n.d.
0.8	57.76	57.76	57.98	221.90	259.44	261.53	n.d.
0.9	58.22	58.22	58.90	236.32	269.70	269.73	n.d.
1.0	94.00	94.00	95.34	242.57	268.73	263.55	270.57

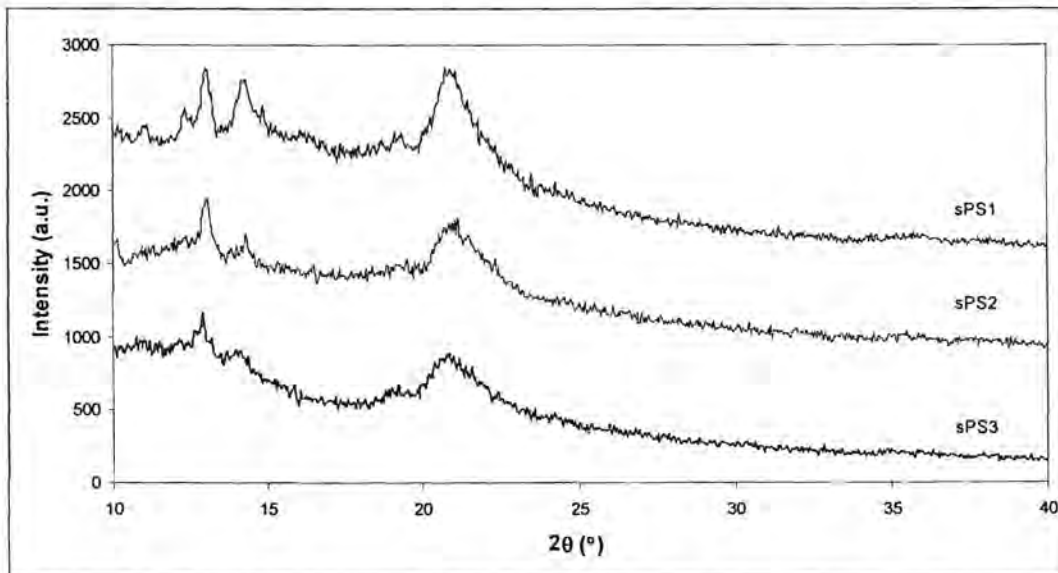
ตารางที่ 1.22 Glass transition temperature ( $T_g$ ), crystalline temperature ( $T_c$ ) and crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of sPS3/PVME blends at various compositions ( $T_g$  of pure PVME =  $-27.10$  °C)

sPS3 (weight fraction)	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)
0.5	-22.23	52.19	-15.79	228.63	265.13	265.64	n.d.
0.6	-21.53	56.60	-14.90	219.83	263.59	266.17	n.d.
0.7	-21.01	57.43	-14.26	221.36	262.53	265.12	n.d.
0.8	58.86	58.86	59.54	220.81	262.00	263.36	n.d.
0.9	59.37	59.37	60.15	228.63	265.13	265.64	n.d.
1.0	93.48	93.48	94.19	240.78	268.69	263.14	270.17

จากตารางที่ 22-24 จะสามารถสรุปได้ว่า การที่พอลิเมอร์ผสมของ PVME มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วสองค่าที่อยู่ระหว่าง  $T_g$  ของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนและ PVME แสดงถึงการเข้ากันได้เพียงบางส่วน (Partial miscibility) และเกิดการแยกเฟสขึ้นในสภาพที่ทำการวัดโดย DSC

### 1.5 ผลการทดลองโดยเครื่อง XRD

กราฟการกระเจิงแสงเอ็กซ์เรย์และปริมาณส่วนที่เป็นผลึกที่คำนวณจากวิธีของ Ruland สามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5 และตารางที่ 25



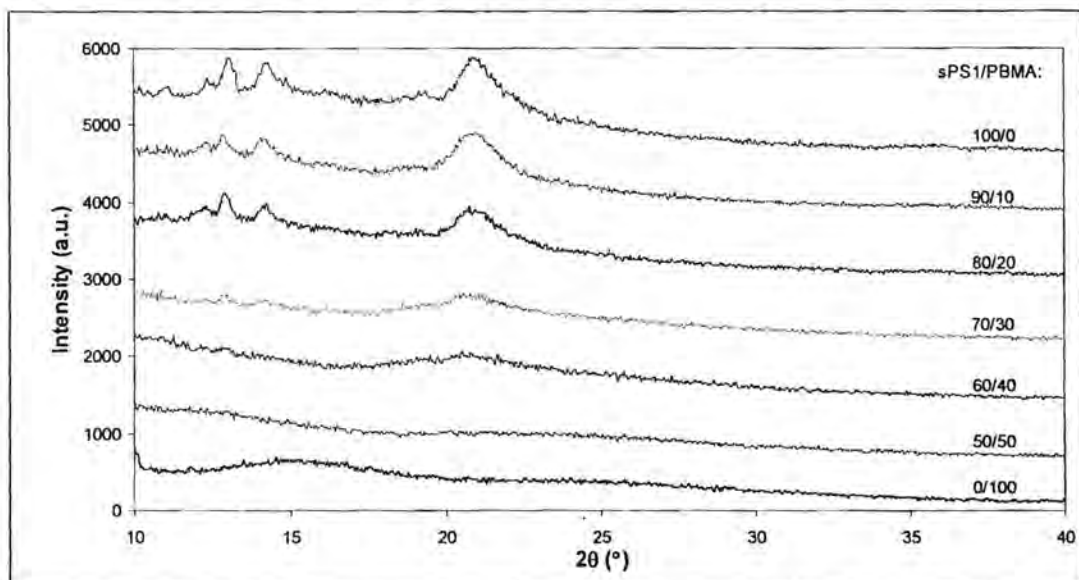
รูปที่ 1.1 X-ray diffractogram of syndiotactic polystyrenes

ตารางที่ 1.23 แสดงปริมาณส่วนที่เป็นผลึกของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน (% Crystallinity of syndiotactic polystyrenes)

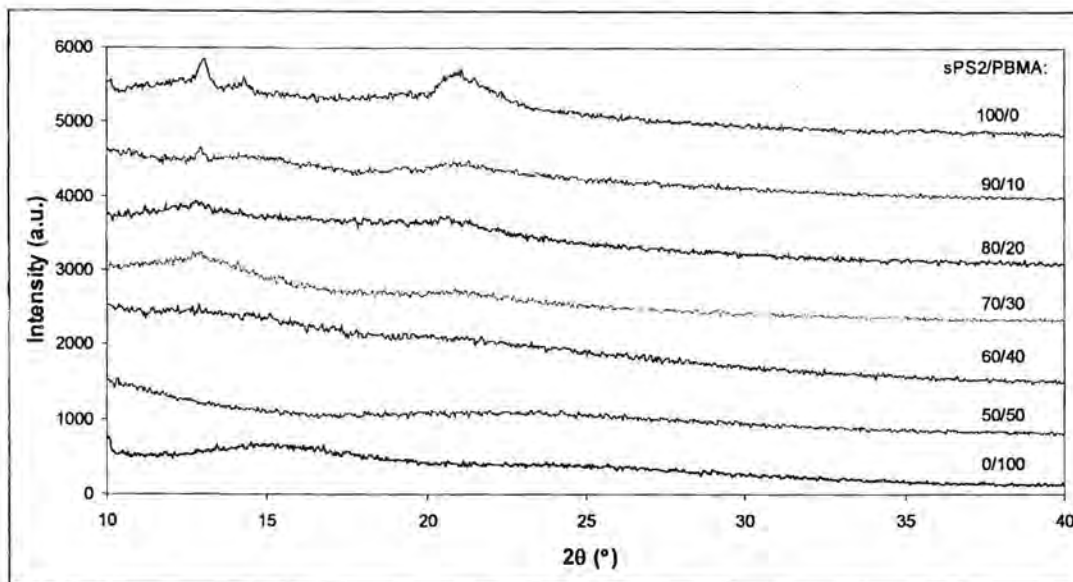
Sample	% Crystallinity
sPS1	52.38
sPS2	36.72
sPS3	42.21

จากการคำนวณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก แสดงว่า sPS1 มีปริมาณผลึกมากที่สุด กราฟการกระเจิงแสงของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนทั้งสามสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 5

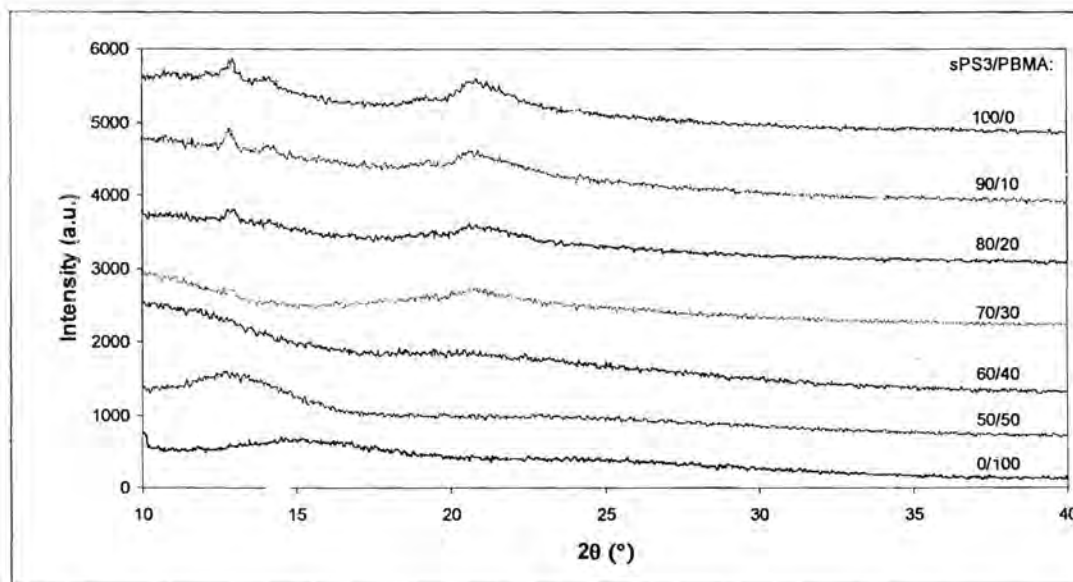
การกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ผสม PBMA



รูปที่ 1.2 X-ray diffractogram of sPS1/PBMA blends at various compositions



รูปที่ 1.3 X-ray diffractogram of sPS2/PBMA blends at various compositions

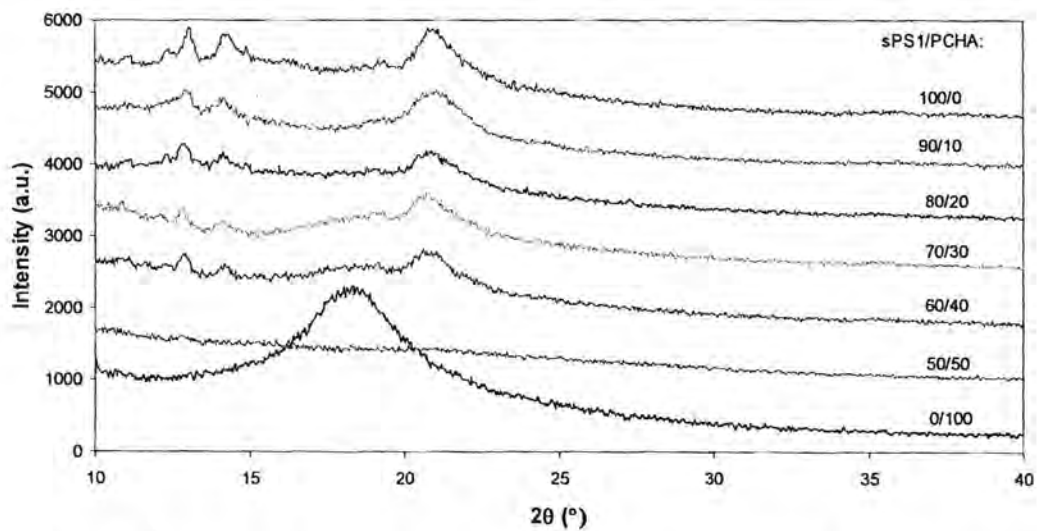


รูปที่ 1.4 X-ray diffractogram of sPS3/PBMA blends at various compositions

ตารางที่ 1.24 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PBMA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PBMA blends at various compositions)

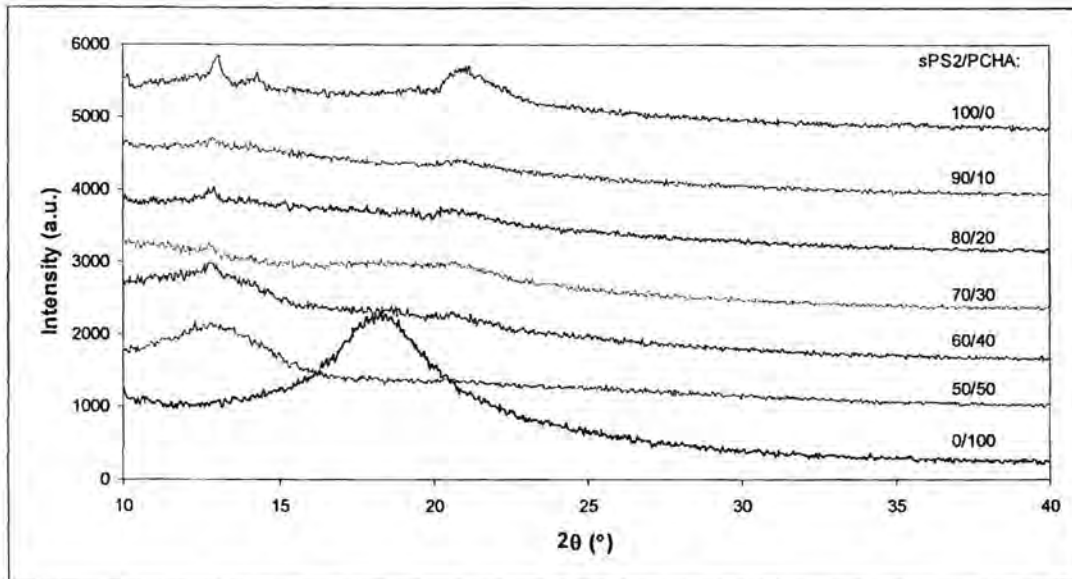
sPS (weight fraction)	% Crystallinity		
	sPS1/PBMA	sPS2/PBMA	sPS3/PBMA
0.5	24.29	32.96	27.02
0.6	24.85	27.31	25.88
0.7	27.08	35.63	31.03
0.8	44.21	34.59	34.78
0.9	44.22	28.05	39.05
1.0	52.38	36.72	42.21

กราฟการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ผสม PCHA

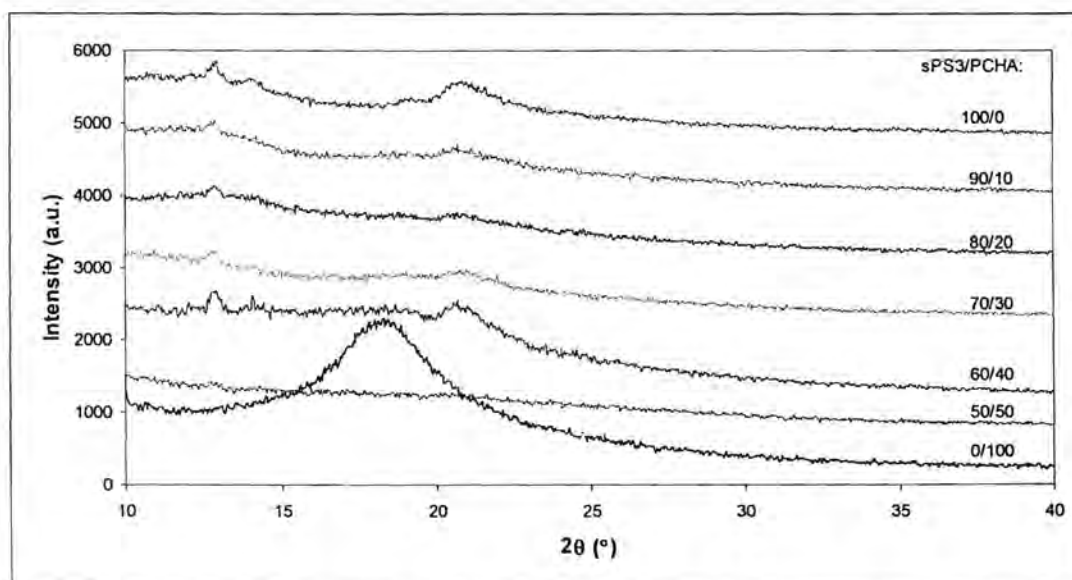


รูปที่ 1.5 X-ray diffractogram of sPS1/PCHA blends at various compositions





รูปที่ 1.6 X-ray diffractogram of sPS2/PCHA blends at various compositions

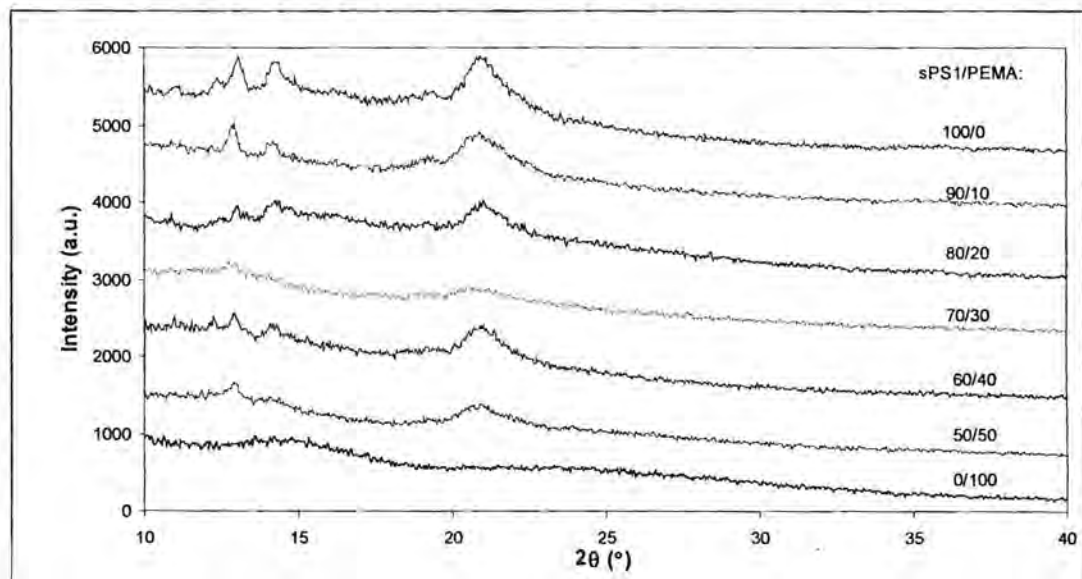


รูปที่ 1.7 X-ray diffractogram of sPS3/PCHA blends at various compositions

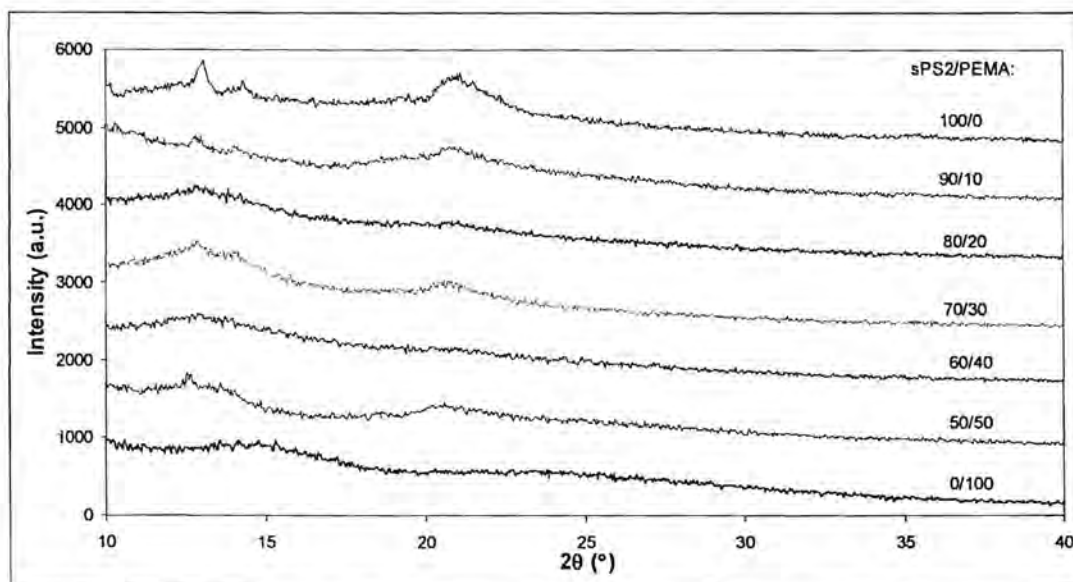
ตารางที่ 1.25 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PCHA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PCHA blends at various compositions)

sPS (weight fraction)	% Crystallinity		
	sPS1/PCHA	sPS2/PCHA	sPS3/PCHA
0.5	42.21	35.01	41.93
0.6	35.87	34.94	36.36
0.7	40.77	35.16	40.36
0.8	37.52	34.59	40.42
0.9	38.88	34.80	36.30
1.0	52.38	36.72	42.21

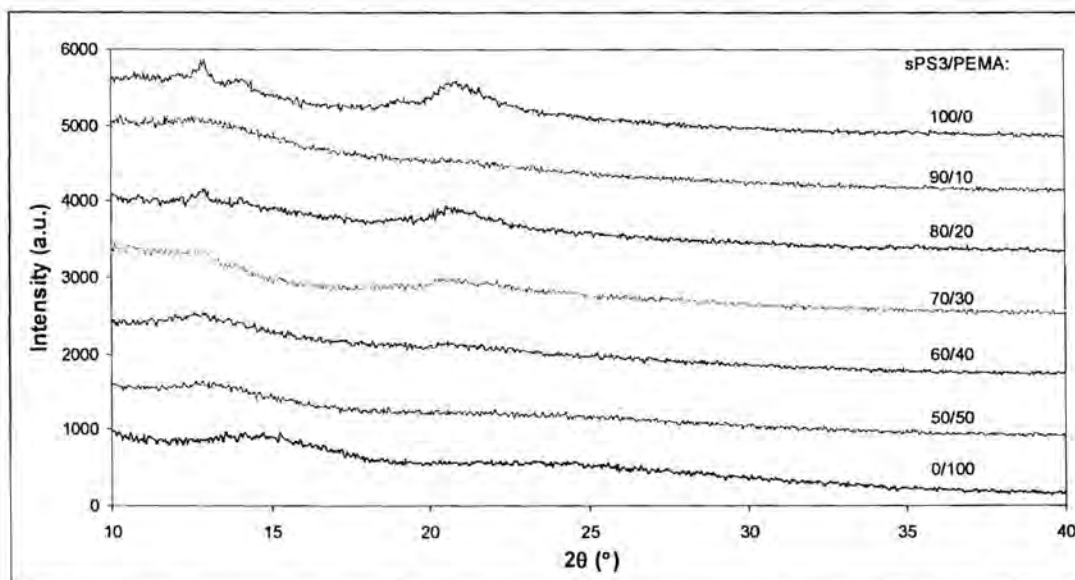
กราฟการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ผสม PEMA



รูปที่ 1.8 X-ray diffractogram of sPS1/PEMA blends at various compositions



รูปที่ 1.9 X-ray diffractogram of sPS2/PEMA blends at various compositions

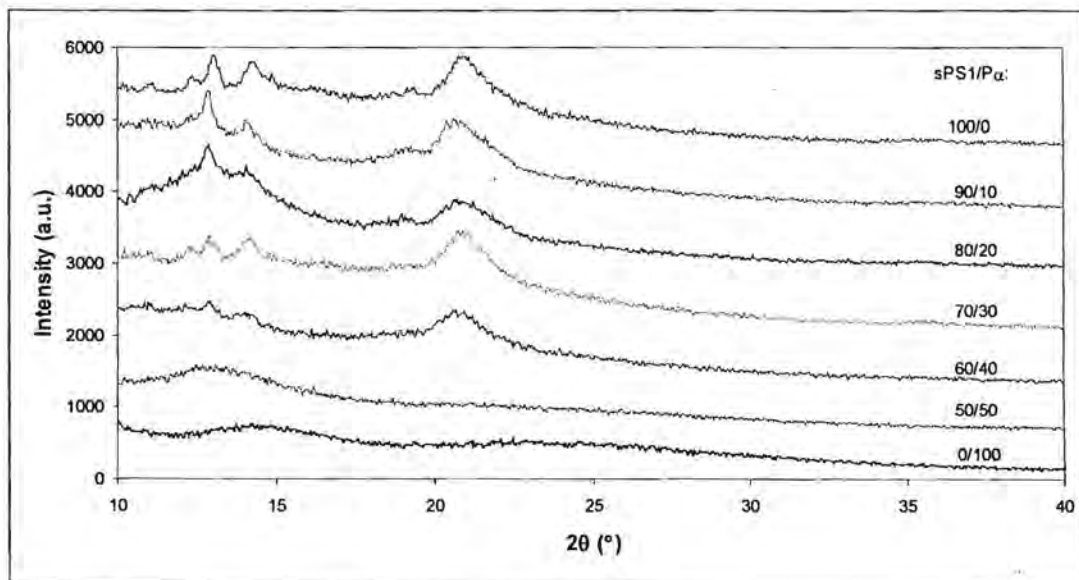


รูปที่ 1.10 X-ray diffractogram of sPS3/PEMA blends at various compositions

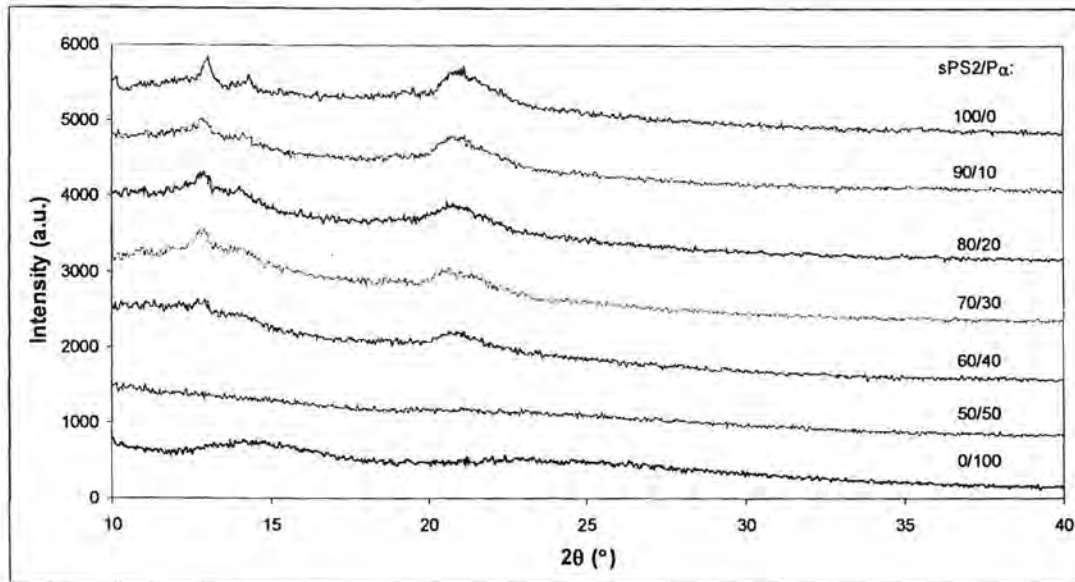
ตารางที่ 1.26 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/PEMA ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/PEMA blends at various compositions)

sPS (weight fraction)	% Crystallinity		
	sPS1/PEMA	sPS2/PEMA	sPS3/PEMA
0.5	27.79	29.20	32.72
0.6	32.19	31.55	33.53
0.7	33.58	32.40	32.68
0.8	31.78	34.01	33.01
0.9	42.51	34.87	37.17
1.0	52.38	36.72	42.21

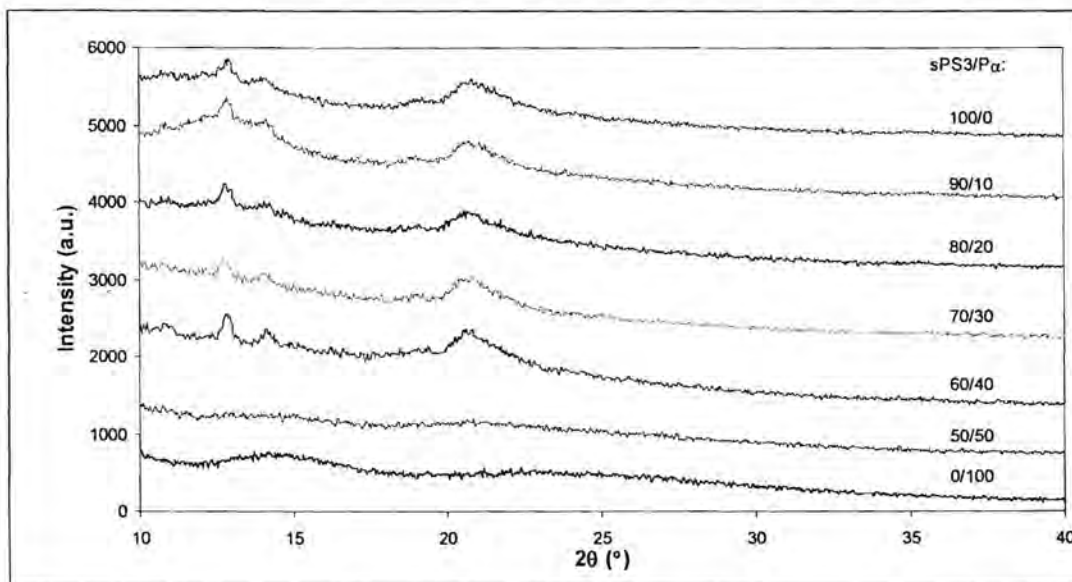
กราฟการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ผสม Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene)



รูปที่ 1.11 X-ray diffractogram of sPS1/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions



รูปที่ 1.12 X-ray diffractogram of sPS2/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions

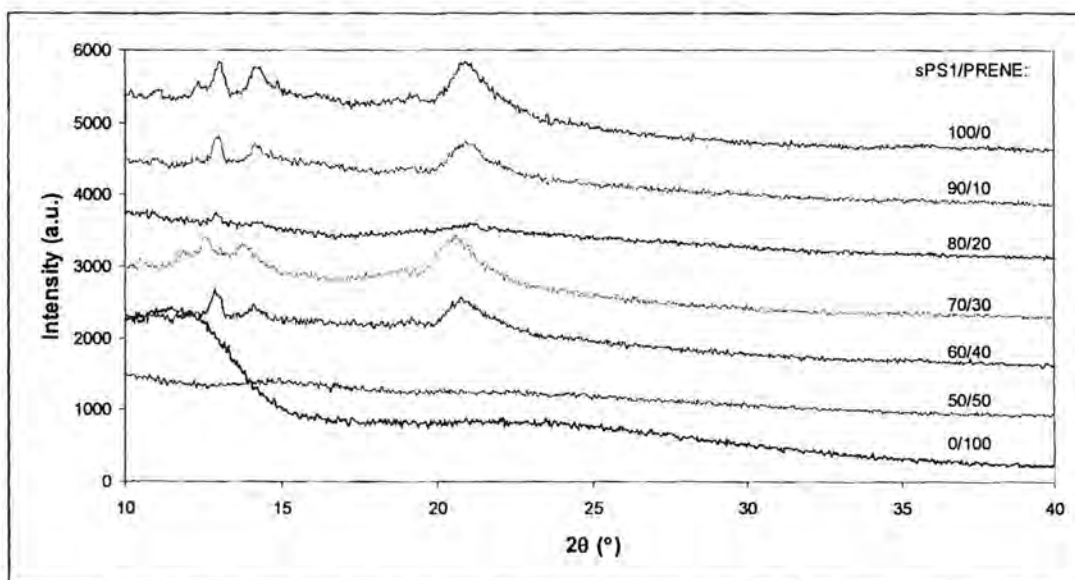


รูปที่ 1.13 X-ray diffractogram of sPS3/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions

ตารางที่ 1.27 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) ที่องค์ประกอบต่างๆ  
 (% Crystallinity of sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions)

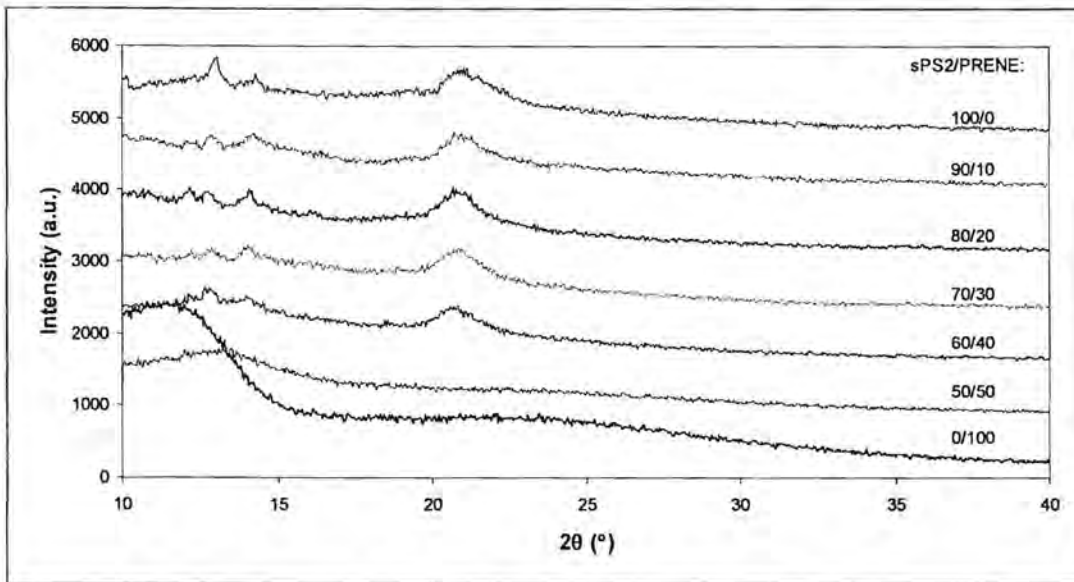
sPS (weight fraction)	% Crystallinity		
	sPS1/P $\alpha$	sPS2/P $\alpha$	sPS3/P $\alpha$
0.5	34.54	24.78	21.01
0.6	41.83	34.10	40.16
0.7	43.91	35.80	39.55
0.8	49.00	36.29	39.71
0.9	49.69	36.44	39.33
1.0	52.38	36.72	42.21

กราฟการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ผสม Polyisoprene

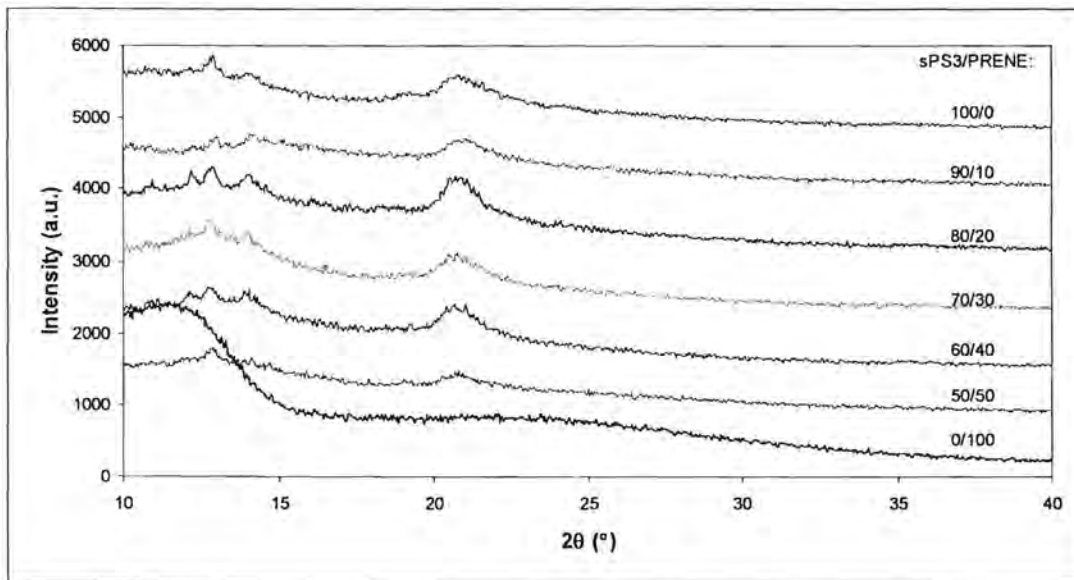


รูปที่ 1.14 X-ray diffractogram of sPS1/Polyisoprene blends at various compositions





รูปที่ 1.15 X-ray diffractogram of sPS2/Polyisoprene blends at various compositions



รูปที่ 1.16 X-ray diffractogram of sPS3/Polyisoprene blends at various compositions

ตารางที่ 1.28 ค่าปริมาณความเป็นผลึกของ sPS/Polyisoprene ที่องค์ประกอบต่างๆ (% Crystallinity of sPS/Polyisoprene blends at various compositions)

sPS (weight fraction)	% Crystallinity		
	sPS1/Prene	sPS2/Prene	sPS3/Prene
0.5	46.75	28.82	34.60
0.6	42.34	32.64	34.94
0.7	34.19	34.64	35.01
0.8	30.92	35.94	35.11
0.9	33.94	29.48	33.25
1.0	52.38	36.72	42.21

## 1.6 การแปรผลข้อมูล DSC และ XRD

### 1.6.1 ความสอดคล้องกันในด้านเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของผล DSC และ XRD

เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนจะมีค่าลดลงเป็นลำดับเมื่อเติมพอลิเมอร์ผสมในอัตราที่มากขึ้นซึ่งสอดคล้องกับผลการลดลงของอุณหภูมิหลอมผลึกในการวัดครั้งแรก,  $T_m1$  โดยจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ผสมให้มากขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากพอลิเมอร์ผสมมีส่วนที่เป็นอสัณฐานมากขึ้นจากการเพิ่มพอลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันได้ลงไป การวัดครั้งแรกของ DSC แสดงปริมาณและคุณภาพของผลึกที่สมดุลที่อุณหภูมิ  $200^{\circ}\text{C}$  แต่การวัดครั้งที่สองแสดงปริมาณและคุณภาพของผลึกที่มาจากการลดอุณหภูมิด้วยอัตราคงที่ ซึ่งจะให้ค่าที่อาจไม่เหมือนการวัดในครั้งแรก

นอกจากนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ผสมจะเข้ากันได้ในส่วนที่เป็นอสัณฐาน การเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่มาผสมกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน จะเป็นการเพิ่มปริมาณส่วนที่เป็นอสัณฐานโดยตรงซึ่งจะส่งผลถึงการลดลงของค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม และการที่ต้องแบ่งปริมาณซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนลงเหลือจางในส่วนที่เป็นอสัณฐาน จะทำให้ปริมาณความเป็นผลึกโดยรวมของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนมีปริมาณลดลง ความสอดคล้องกันนี้จะสามารถเห็นได้จากการลดลงของอุณหภูมิคล้ายแก้วเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่มาผสม และการลดลงของความเป็นผลึกเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาผสมอีกด้วย

### 1.6.2 ความสอดคล้องกันของอุณหภูมิลคล้ายแก้วและความเป็นผลึกของส่วนอสัณฐาน

จากสมการการทำนายค่าอุณหภูมิลคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมของ Flory-Fox ดังจะสามารถแสดงได้โดยสมการ (1.1)

$$\text{Flory-Fox equation : } 1/T_g = w_1/T_{g1} + w_2/T_{g2} \quad (1.1)$$

ซึ่งส่วนกลับของอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม จะเป็นสัดส่วนกับอุณหภูมิคล้ายแก้วขององค์ประกอบของพอลิเมอร์ผสมที่ถ่วงน้ำหนักตามปริมาณอัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบทั้งสอง ( $w_1, w_2$ ) ทั้งนี้เมื่อทราบค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม ( $T_g$ ) และของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสอง ( $T_{g1}, T_{g2}$ ) และค่าอัตราส่วนน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่มาผสม ( $w_2$ ) ก็จะสามารถประมาณคร่าวๆได้ถึงปริมาณอัตราส่วนของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนที่เป็นองค์ประกอบในส่วนที่เป็นอสัญฐาน ( $w_1$ ) ได้โดยคร่าวๆ ซึ่งจากปริมาณพอลิสไตรีนที่เป็นอสัญฐาน จะสามารถประมาณเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนได้ซึ่งเมื่อนำมาเทียบกับค่าที่วัดได้จาก XRD จะสามารถเปรียบเทียบความเป็นผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนได้ ดังจะสามารถแสดงได้ดังตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1.29 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PBMA blends at various compositions

sPS (weight fraction)	sPS1/PBMA		sPS2/PBMA		sPS3/PBMA	
	XRD	Fox	XRD	Fox	XRD	Fox
0.5	0.3396	0.5974	0.2542	0.6053	0.3149	0.5762
0.6	0.4677	0.6039	0.4497	0.6198	0.4603	0.5951
0.7	0.5886	0.6138	0.5340	0.6218	0.5650	0.6009
0.8	0.6415	0.6202	0.6942	0.6289	0.6933	0.6144
0.9	0.8207	0.6416	0.8610	0.6459	0.8359	0.6248
1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

ตารางที่ 1.30 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PCHA blends at various compositions

sPS (weight fraction)	sPS1/PCHA		sPS2/PCHA		sPS3/PCHA	
	XRD	Fox	XRD	Fox	XRD	Fox
0.5	0.1348	0.5841	0.2306	0.5414	0.1389	0.4651
0.6	0.3763	0.6630	0.3852	0.5643	0.3715	0.4876
0.7	0.4935	0.7081	0.5373	0.5740	0.4970	0.5133
0.8	0.6799	0.7487	0.6942	0.5855	0.6643	0.5377
0.9	0.8364	0.7797	0.8466	0.6471	0.8430	0.5788
1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

ตารางที่ 1.31 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/PEMA blends at various compositions

sPS (weight fraction)	sPS1/PEMA		sPS2/PEMA		sPS3/PEMA	
	XRD	Fox	XRD	Fox	XRD	Fox
0.5	0.3076	0.2555	0.2938	0.0908	0.2568	0.0448
0.6	0.4101	0.3158	0.4156	0.1174	0.3982	0.0897
0.7	0.5483	0.3441	0.5562	0.1599	0.5544	0.1255
0.8	0.7068	0.3500	0.6969	0.1873	0.7014	0.1554
0.9	0.8260	0.4384	0.8465	0.2326	0.8408	0.1826
1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

ตารางที่ 1.32 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at various compositions

sPS (weight fraction)	sPS1/P $\alpha$		sPS2/P $\alpha$		sPS3/P $\alpha$	
	XRD	Fox	XRD	Fox	XRD	Fox
0.5	0.2362	-0.3187	0.3353	-0.5459	0.3670	-1.7132
0.6	0.3123	0.1778	0.3930	-0.0092	0.3316	-1.2356
0.7	0.4652	0.5354	0.5327	0.1978	0.5037	-0.3744
0.8	0.6079	0.6325	0.6861	0.4813	0.6683	0.3502
0.9	0.8012	0.8103	0.8427	0.8317	0.8352	0.6510
1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

ตารางที่ 1.33 Weight fraction of sPS in amorphous from XRD and Flory-Fox equation of sPS/Polyisoprene blends at various compositions

sPS (weight fraction)	sPS1/Prene		sPS2/Prene		sPS3/Prene	
	XRD	Fox	XRD	Fox	XRD	Fox
0.5	0.0611	0.8543	0.2976	0.7093	0.2354	0.7048
0.6	0.3063	0.8800	0.4062	0.7995	0.3852	0.7320
0.7	0.5441	0.8923	0.5410	0.8070	0.5384	0.7889
0.8	0.7105	0.8982	0.6878	0.8685	0.6918	0.8167
0.9	0.8486	0.9033	0.8582	0.8877	0.8502	0.8657
1.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกันในทิศทางของปริมาณซินติโอเทคติกพอลิไอสไตรีนที่เป็นองค์ประกอบของอสังฐานซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมอร์ที่มาผสมมีปริมาณโดยน้ำหนักมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามสมการของ Fox เป็นเพียงสมการที่แสดงแนวโน้มของทิศทางของอุณหภูมิคล้ายแก้วเท่านั้น ค่าที่คำนวณได้จึงมีค่าผิดไปจากค่าที่วัดได้จาก XRD ซึ่งจะมีความแม่นยำกว่า

นอกจากนี้ในการคำนวณปริมาณความเป็นผลึกจาก Fox จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าไม่สามารถประมาณความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมของ Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene) ได้ทั้งนี้เนื่องจากสมการของ Fox ไม่สามารถประมาณความเสริมแรง (Synergistic) ของพอลิเมอร์ผสมที่

มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วที่เบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ยโดยน้ำหนักของสารบริสุทธิ์ได้ ซึ่งอาจให้ค่าการประมาณที่เป็นลบได้ดังแสดง และทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่ Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene) มีอุณหภูมิคล้ายแก้วใกล้เคียงกับซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนอีกส่วนหนึ่งด้วย

### 1.6.3 ลักษณะความเป็นผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน

โดยปรกติแล้วผลึกของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนสามารถอยู่ในรูปแบบต่างๆได้ ซึ่งขึ้นกับการจัดเรียงตัวของโมเลกุล ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะสามารถตรวจหาลักษณะของผลึกได้จากการทำ XRD ดังเช่น ผลึกชนิด  $\alpha$  จะมีการกระเจิงแสงที่  $2\theta$  เท่ากับ 11.6 และ 12.2 องศา ซึ่งจากข้อมูลที่ได้ จะแสดงให้เห็นว่าผลึกส่วนใหญ่ที่ตรวจพบไม่ใช่ผลึกชนิด  $\alpha$  เนื่องจากการกระเจิงแสงที่มุมดังกล่าวมีค่าน้อยมาก



## ผลการทดลอง ตอนที่สอง

### 2.1 การสังเคราะห์ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน

ในที่นี้จะให้ตัวเร่งปฏิกิริยา เพนตะเมทิลไซโคลเพนตะไดอินิลไทเทเนียมทรอคโลไรด์ (Penta methyl cyclopentadienyl titanium trichloride ( $Cp^*TiCl_3$ )) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมคือ เมทิลอลูมิเนียมออกเซนที่ผ่านการดัดแปลง (modified-methylaluminoxane (MMAO)) สภาวะในการสังเคราะห์สามารถสรุปได้ดังตารางที่

ตารางที่ 2.1 Polymerization of Styrene using  $Cp^*TiCl_3$  with MMAO<sup>a</sup>

% Yield <sup>b</sup>	72.67 wt %
Catalytic Activity	5,084.67 g PS/mmole Ti·hr
% Syndiotactic Index	93.38 %
$M_w^c$	1,943,500 g/mole
$M_n^c$	592,300 g/mole
Molecular weight distribution (MWD) <sup>c</sup>	3.3
$T_g^d$	97.90 °C
$T_m^d$	271.41 °C

<sup>a</sup>Conditions:  $[Cp^*TiCl_3] = 3.68 \times 10^{-4}$  M,  $[MMAO] = 1.83$  M,  $[Styrene] = 2.06$ , Al/Ti = 563, 25 °C

<sup>b</sup>Calculated from (weight of synthesized polymer/weight of monomer) × 100

<sup>c</sup>Obtained from GPC and MWD was calculated from  $M_w/M_n$

<sup>d</sup>Obtained from DSC

### 2.2 การเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีน

การเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนสามารถตรวจวัดได้ โดยใช้การพิจารณาอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ในการทดลองนี้ซินติโอเทคติกพอลิสไตรีนผสมจะทำการผสมแบบหลอมเหลว (ซึ่งในการทดลองตอนที่แล้วใช้การผสมโดยใช้ตัวทำละลายร่วม) และมีการผสมผลึกเหลวมวลโมเลกุลต่ำ (LCC) หรือสารหล่อลื่น (Lubricant) ซึ่งในที่นี้จะใช้ กลีเซอรอลโมโนสเตียเรท (GMS) ในปริมาณที่เท่ากับ LCC เพื่อเป็นการเปรียบเทียบอีกด้วย

ในการทดลองนี้จะใช้พอลิเมอร์ทั้งหมดหกชนิดเพื่อนำมาผสมกับซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน (sPS) ดังจะสามารถสรุปได้ดังนี้

- ระบบที่ 1: SPS และ poly( $\alpha$ -methyl styrene), (PaMS)
- ระบบที่ 2: SPS และ poly (ethyl methacrylate), (PEMA)
- ระบบที่ 3: SPS และ poly(*n*-butyl methacrylate), (PBMA)
- ระบบที่ 4: SPS และ poly(cyclohexyl acrylate), (PCHA)
- ระบบที่ 5: SPS และ poly(*cis*-isoprene), (PIP)
- ระบบที่ 6: SPS และ poly(vinyl methyl ether), (PVME)

ในขั้นนี้การทดลองจะใช้ Differential Scanning Calorimeter (DSC) เพื่อตรวจวัดอุณหภูมิคล้ายแก้ว (Tg) , อุณหภูมิหลอมละลายผลึก (Tm), และอุณหภูมิก่อตัวของผลึก (Tc) ซึ่งจะตรวจวัดในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 50°C ถึง 300°C ด้วยอัตราความเร็ว 20°C/min โดยจะทำการตรวจวัดในช่วงเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่สองครั้ง คือทำการตรวจวัดในช่วงเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ครั้งแรก และทำการตรวจวัดในช่วงลดอุณหภูมิ จากนั้นจะทำการตรวจวัดในช่วงเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ครั้งที่สอง นอกจากนี้ก่อนการตรวจวัดโดย DSC ตัวอย่างจะถูกทำให้หลอมละลายอีกครั้งที่อุณหภูมิ 300°C แล้วนำมาพักอบไว้ที่อุณหภูมิ 200°C เป็นเวลา 10 นาที ทั้งนี้เพื่อที่จะลบความทรงจำของพอลิเมอร์โดยการหลอมละลาย และทำให้เกิดการก่อตัวของผลึกที่อุณหภูมิคงที่ (200°C) เพื่อทำการตรวจวัดอุณหภูมิต่างๆ จากพอลิเมอร์ที่มีประวัติการให้ความร้อนที่เป็นไปในทางเดียวกัน

จากภาพโดยรวมจะเห็นได้ว่าค่า Tg ของการให้ความร้อนต่อพอลิเมอร์ผสมในครั้งที่หนึ่งจะมีสองค่าซึ่งแสดงถึงการแยกเฟสของพอลิเมอร์ผสมสองชนิด ทั้งนี้ก็เนื่องจากการผสมโดยวิธีหลอมละลายยังไม่สามารถผสมพอลิเมอร์ทั้งสอง (sPS และพอลิเมอร์อีกชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้ว) ให้เป็นเนื้อเดียวกันได้โดยสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ดีเมื่อพอลิเมอร์ผสมผ่านการหลอมละลายภายใน DSC แล้ว จากการตรวจวัดครั้งที่สองจะพบว่าค่า Tg ของพอลิเมอร์ผสมจะมีเพียงค่าเดียว ทั้งนี้ก็เนื่องจากการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ทั้งสอง ทำให้ค่า Tg ที่ตรวจวัดได้มีปรากฏเพียงค่าเดียว การผสมโดยการให้ความร้อนหลอมละลายอาจไม่เหมาะสมกับการผสมพอลิเมอร์จำนวนน้อยๆ แต่อย่างไรก็ดีวิธีนี้เป็นวิธีที่ใช้ในการผสมพอลิเมอร์ในอุตสาหกรรม การทดสอบจึงส่งผลต่อการผลิตในทางอุตสาหกรรมโดยตรง

### 2.3 การผสมกับ PaMS

การวัดโดย DSC สามารถแสดงได้ดังในตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการวัดระหว่างการเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก ( $T_g1$ ) จะสามารถตรวจพบสอง  $T_g$  ดังแสดงได้โดย ( $T_{g1.1}$ ,  $T_{g1.2}$ ) แต่อย่างไรก็ดีในการตรวจวัดโดยการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง จะสามารถตรวจสอบได้ค่า  $T_g2$  เพียงค่าเดียวจากที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีในการผสมจะมีผลต่อลักษณะของโพลีเมอร์ที่ได้ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของ sPS ยังจะทำให้ค่า  $T_g2$  เปลี่ยนแปลงไปโดยจะเพิ่มจาก  $T_g$  ของ PaMS บริสุทธิ์ จนกระทั่งมีค่าสูงถึง  $T_g$  ของ sPS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ค่าความร้อนในการหลอมละลายผลึก ( $\Delta H_m$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม แสดงถึงการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีปริมาณ PaMS เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.2 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	98.18	97.90	269.99	271.41	264.06	242.66	25.73
80	78.29	96.54	94.03	266.06	266.34	n.a.	237.91	22.54
60	77.68	92.29	87.90	263.13	263.87	n.a.	233.35	20.33
40	76.32	92.45	86.95	260.85	261.05	n.a.	232.46	11.74
20	76.98	98.53	85.61	259.26	260.59	n.a.	230.78	10.90
0	87.33	n.a.	87.33	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ผลการตรวจวัดพอลิเมอร์ผสมที่เติม LCC และ GMS สามารถแสดงได้ดังตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่ม LCC หรือ GMS ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_g$ ,  $T_m$  ได้โดยเด่นชัด แนวโน้มโดยรวมจะเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมดั้งที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ LCC หรือ GMS มีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถกวนผสมได้ดีในที่มีสารตัวอย่งน้อย

ตารางที่ 2.3 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS/LCC blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a	97.84	97.73	269.13	270.57	262.51	239.06	23.91
80	78.39	94.83	93.59	266.85	267.12	n.a	239.47	21.62
60	78.12	93.59	88.48	264.95	265.63	n.a	235.92	20.10
40	77.79	95.09	87.74	263.65	263.61	n.a	235.38	19.14
20	77.94	96.74	84.81	263.45	263.54	n.a	234.11	15.68
0	89.81	n.a	89.81	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a

n.a. = not available

ตารางที่ 2.4 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PaMS/GMS blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a	99.66	99.25	270.62	271.01	263.30	240.64	24.60
80	79.44	94.82	93.26	267.82	268.57	n.a	236.41	22.94
60	78.36	92.12	88.25	265.25	265.60	n.a	232.46	20.57
40	79.53	94.89	87.36	263.18	262.90	n.a	229.66	16.54
20	77.69	95.69	86.04	260.76	261.87	n.a	225.71	11.49
0	89.89	n.a	89.89	n.a	n.a	n.a	n.a	n.a

n.a. = not available

## 2.4 การผสมกับ PEMA

การผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PEMA สามารถแสดงได้ดังตาราง โดยจะสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS และ การมี  $T_g$  เพียงค่าเดียว การเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก ( $T_{g1}$ ) จะสามารถตรวจพบสอง  $T_g$  ดังแสดงได้โดย ( $T_{g1.1}$ ,  $T_{g1.2}$ ) แต่อย่างไรก็ตามในการตรวจวัดโดยการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง จะสามารถตรวจสอบได้ค่า  $T_{g2}$  เพียงค่าเดียว จากที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีในการผสมจะมีผลต่อลักษณะของโพลีเมอร์ที่ได้ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของ sPS ยังจะทำให้ค่า  $T_{g2}$  เปลี่ยนแปลงไปโดยจะเพิ่มจาก  $T_g$  ของ PEMA บริสุทธิ์ จนกระทั่งมีค่าสูงถึง  $T_g$  ของ sPS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ค่าความร้อนในการหลอมละลายผลึก ( $\Delta H_m$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม แสดงถึงการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีปริมาณ PEMA เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.5 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	98.18	97.90	269.99	271.41	264.06	242.66	25.72
80	75.63	95.95	95.43	269.70	270.06	n.a.	239.44	23.64
60	91.29	91.29	91.17	269.54	269.22	n.a.	238.12	23.92
40	86.38	86.38	88.71	269.26	269.41	n.a.	238.19	20.51
20	62.24	92.12	80.70	267.66	267.61	n.a.	234.07	15.77
0	65.54	n.a.	65.54	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ผลการตรวจวัดพอลิเมอร์ผสมที่เติม LCC และ GMS สามารถแสดงได้ดังตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่ม LCC หรือ GMS ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_g$ ,  $T_m$  ได้โดยเด่นชัด แนวโน้มโดยรวมจะเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ LCC หรือ GMS มีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถทวนผสมได้อย่างดีในที่มีสารตัวอย่างน้อย

ตารางที่ 2.6 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA/LCC blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	98.26	97.88	269.13	270.57	262.51	239.06	23.91
80	69.39	95.32	95.18	268.55	268.58	n.a.	234.00	22.14
60	67.40	90.16	90.29	265.74	266.52	n.a.	232.40	19.38
40	66.78	66.78	87.42	266.76	267.15	n.a.	230.42	16.40
20	62.76	62.76	79.94	263.95	265.75	n.a.	223.43	7.60
0	52.94	n.a.	62.72	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ตารางที่ 2.7 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PEMA/GMS blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	99.66	99.25	270.62	271.01	263.30	240.64	24.60
80	95.51	95.51	95.72	269.29	270.03	n.a.	239.29	22.28
60	67.55	95.28	90.06	266.87	268.02	n.a.	236.19	18.27
40	67.27	92.43	86.15	268.42	268.02	n.a.	233.15	17.91
20	60.07	86.94	80.57	266.15	266.92	n.a.	223.89	12.05
0	61.38	n.a.	58.82	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

## 2.5 การผสมกับ PBMA

การผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PBMA สามารถแสดงได้ดังตาราง โดยจะสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS และ การมี  $T_g$  เพียงค่าเดียว การเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก ( $T_{g1}$ ) จะสามารถตรวจพบสอง  $T_g$  ดังแสดงได้โดย ( $T_{g1.1}$ ,  $T_{g1.2}$ ) แต่อย่างไรก็ดีในการตรวจวัดโดยการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง จะสามารถตรวจสอบได้ค่า  $T_{g2}$  เพียงค่าเดียว จากที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีในการผสมจะมีผลต่อลักษณะของโพลิเมอร์ที่ได้ นอกจากนี้การเพิ่ม



อัตราส่วนของ sPS ยังจะทำให้ค่า  $T_{g2}$  เปลี่ยนแปลงไปโดยจะเพิ่มจาก  $T_g$  ของ PBMA บริสุทธิ์ จนกระทั่งมีค่าสูงถึง  $T_g$  ของ sPS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ค่าความร้อนในการหลอมละลายผลึก ( $\Delta H_m$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม แสดงถึงการลดความเป็นผลึกของ พอลิเมอร์ผสมเมื่อมีปริมาณ PBMA เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.8 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	98.18	97.90	269.99	271.41	264.06	242.66	25.72
80	79.21	96.13	94.81	269.48	270.24	n.a.	240.53	25.57
60	66.92	95.71	93.33	269.43	270.55	n.a.	238.37	23.19
40	77.14	96.80	89.36	268.13	268.89	n.a.	238.48	22.42
20	68.89	94.13	84.32	267.41	266.99	n.a.	234.39	21.14
0	31.85	n.a.	31.85	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ผลการตรวจวัดพอลิเมอร์ผสมที่เติม LCC และ GMS สามารถแสดงได้ดังตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่ม LCC หรือ GMS ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_g$ ,  $T_m$  ได้โดยเด่นชัด แนวโน้มโดยรวมจะเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ LCC หรือ GMS มีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถกวนผสมได้อย่างดีในที่มีสารตัวอย่างน้อย

ตารางที่ 2.9 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA/LCC blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	97.84	97.73	269.13	270.57	262.51	239.06	23.91
80	74.88	97.66	94.02	268.07	268.48	n.a.	238.07	24.20
60	70.74	93.89	91.69	267.22	267.34	n.a.	235.79	22.52
40	75.45	95.15	90.79	267.41	268.23	n.a.	235.65	21.83
20	72.51	93.99	85.30	266.98	267.40	n.a.	234.39	21.68
0	29.85	n.a.	29.85	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ตารางที่ 2.10 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PBMA/GMS blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	99.66	99.25	270.62	271.01	263.30	240.64	24.60
80	74.85	95.93	93.98	267.29	267.70	n.a.	237.58	20.77
60	72.36	97.89	91.84	268.13	268.14	n.a.	236.75	20.93
40	69.73	91.32	89.51	266.94	266.97	n.a.	235.57	20.02
20	69.72	92.54	84.90	266.60	267.00	n.a.	234.82	19.85
0	29.88	n.a.	29.88	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

## 2.6 การผสมกับ PCHA

การผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PCHA สามารถแสดงได้ดังตาราง โดยจะสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS และ การมี  $T_g$  เพียงค่าเดียว การเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก ( $T_{g1}$ ) จะสามารถตรวจพบสอง  $T_g$  ดังแสดงได้โดย ( $T_{g1.1}$ ,  $T_{g1.2}$ ) แต่อย่างไรก็ดีในการตรวจวัดโดยการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง จะสามารถตรวจสอบได้ค่า  $T_{g2}$  เพียงค่า

เดียว จากที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีในการผสมจะมีผลต่อลักษณะของโพลีเมอร์ที่ได้ นอกจากนี้การเพิ่มอัตราส่วนของ sPS ยังจะทำให้ค่า  $T_{g2}$  เปลี่ยนแปลงไปโดยจะเพิ่มจาก  $T_g$  ของ PCHA บริสุทธิ์ จนกระทั่งมีค่าสูงถึง  $T_g$  ของ sPS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ค่าความร้อนในการหลอมละลายผลึก ( $\Delta H_m$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม แสดงถึงการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีปริมาณ PCHA เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.11 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	98.18	97.90	269.99	271.41	264.06	242.66	25.72
80	66.84	94.02	90.21	268.24	268.23	n.a.	234.80	18.53
60	51.86	95.33	87.80	268.63	268.22	n.a.	233.51	15.05
40	44.61	85.88	78.40	268.46	268.04	n.a.	229.28	14.20
20	53.5	91.92	57.86	266.98	266.51	n.a.	225.16	12.05
0	25.49	n.a.	25.49	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ผลการตรวจวัดพอลิเมอร์ผสมที่เติม LCC และ GMS สามารถแสดงได้ดังตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเพิ่ม LCC หรือ GMS ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_g$ ,  $T_m$  ได้โดยเด่นชัด แนวโน้มโดยรวมจะเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ LCC หรือ GMS มีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถกวนผสมได้อย่างดีในที่ที่มีสารตัวอย่างน้อย

ตารางที่ 2.12 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA/LCC blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	97.84	97.73	269.13	270.57	262.51	239.06	23.91
80	64.76	92.49	87.09	264.14	265.38	n.a.	229.86	18.74
60	53.75	90.62	86.20	264.90	264.89	n.a.	229.77	15.52
40	49.22	98.84	80.61	266.58	265.76	n.a.	227.27	10.18
20	53.72	89.82	56.23	264.45	264.09	n.a.	225.54	6.46
0	26.46	n.a.	26.46	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ตารางที่ 2.13 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PCHA/GMS blends

%SPS	$T_{g1.1}$ (°C)	$T_{g1.2}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	n.a.	99.66	99.25	270.62	271.01	263.30	240.64	24.60
80	51.19	94.19	90.26	269.08	268.03	n.a.	233.13	17.54
60	49.27	93.44	88.77	268.62	267.37	n.a.	228.48	16.02
40	47.08	90.07	80.75	266.50	266.08	n.a.	225.14	11.60
20	50.49	90.44	58.57	266.93	267.05	n.a.	225.13	6.16
0	25.29	n.a.	25.29	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

## 2.7 การผสมกับ PIP

การผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PIP สามารถแสดงได้ดังตาราง โดยจะสามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของ  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS และ การมี  $T_g$  เพียงค่าเดียว การเพิ่มอุณหภูมิครั้งแรก ( $T_{g1}$ ) จะสามารถตรวจพบสอง  $T_g$  ดังแสดงได้โดย ( $T_{g1.1}$ ,  $T_{g1.2}$ ) แต่อย่างไรก็ดีในการตรวจวัดโดยการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง จะสามารถตรวจพบได้ค่า  $T_{g2}$  เพียงค่าเดียว จากที่ได้กล่าวมาแล้ว วิธีในการผสมจะมีผลต่อลักษณะของโพลิเมอร์ที่ได้ นอกจากนี้การเพิ่ม

อัตราส่วนของ sPS ยังจะทำให้ค่า  $T_g2$  เปลี่ยนแปลงไปโดยจะเพิ่มจาก  $T_g$  ของ PIP บริสุทธิ์ จนกระทั่งมีค่าสูงถึง  $T_g$  ของ sPS บริสุทธิ์ นอกจากนี้ ค่าความร้อนในการหลอมละลายผลึก ( $\Delta H_m$ ) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม แสดงถึงการลดความเป็นผลึกของพอลิเมอร์ผสมเมื่อมีปริมาณ PIP เพิ่มขึ้นอีกด้วย

ตารางที่ 2.14 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP blends

%SPS	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	98.18	97.90	269.99	271.41	264.06	242.66	25.72
80	64.12	86.61	267.85	268.86	n.a.	228.46	18.04
60	58.14	80.16	266.55	267.48	n.a.	223.09	15.22
40	44.25	65.96	264.57	266.69	n.a.	220.18	15.02
20	42.40	56.38	264.00	265.46	n.a.	219.75	14.06
0	-32.93	-32.93	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ผลการตรวจวัดพอลิเมอร์ผสมที่เติม LCC และ GMS สามารถแสดงได้ดังตาราง ซึ่งจะเห็นได้ว่า การเพิ่ม LCC หรือ GMS ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลง  $T_g$ ,  $T_m$  ได้โดยเด่นชัด แนวโน้มโดยรวมจะเหมือนกับพอลิเมอร์ผสมดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้อาจเนื่องจากปริมาณ LCC หรือ GMS มีปริมาณน้อยมากและไม่สามารถกวนผสมได้อย่างดีในที่ที่มีสารตัวอย่างน้อย

ตารางที่ 2.15 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP/LCC blends

%SPS	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	98.26	97.88	269.13	270.57	262.51	239.06	23.91
80	64.90	87.12	265.94	266.39	n.a.	225.56	17.58
60	59.40	81.98	265.45	266.88	n.a.	221.20	15.74
40	44.42	69.77	263.04	265.42	n.a.	215.38	10.72
20	38.38	56.88	262.12	264.58	n.a.	213.50	9.68
0	-33.84	-33.87	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

ตารางที่ 2.16 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ), crystallization temperature ( $T_c$ ) and melting enthalpy of SPS/PIP/GMS blends

%SPS	$T_{g1}$ (°C)	$T_{g2}$ (°C)	$T_{m1}$ (°C)	$T_{m2.1}$ (°C)	$T_{m2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$\Delta H_m$ (J/g)
100	99.66	99.25	270.62	271.01	263.30	240.64	24.60
80	61.64	90.07	265.89	266.87	n.a.	221.65	18.38
60	58.03	82.75	264.47	265.91	n.a.	221.68	15.59
40	49.9	66.50	264.93	265.42	n.a.	218.74	15.01
20	35.03	53.00	262.07	264.48	n.a.	217.33	5.31
0	-30.74	-30.74	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

## 2.8 การผสมกับ PVME

จากข้อมูลการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการไม่เป็นเนื้อเดียวกันเมื่อผสม sPS กับ PVME ทั้งนี้อาจสังเกตได้จากการที่มี  $T_g$  ถึงสองค่าในการตรวจวัดในครั้งที่สอง และการที่ sPS มี  $T_m$  ที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ถึงแม้ว่าค่า  $T_c$  จะเปลี่ยนแปลงไปบ้างเมื่อเพิ่มปริมาณ PVME นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลง  $T_g$  เมื่อปริมาณ PVME เปลี่ยนไปมีค่าการเปลี่ยนแปลงที่น้อย โดยเกือบจะไม่เปลี่ยนแปลงไปจากค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งในด้านของ sPS หรือ PVME



การเข้ากันไม่ได้นี้อาจเนื่องมาจากการที่พอลิเมอร์ผสมดูดซับความชื้นอันจะเร่งให้เกิดการเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์ทั้งสอง โดยปรกติแล้ว PVME จะเป็นพอลิเมอร์ที่ดูดซับความชื้นและมักจะก่อให้เกิดการเข้ากันไม่ได้ของพอลิเมอร์ผสม ค่าที่ตรวจวัดได้ดังแสดงในตาราง

ตารางที่ 2.17 Glass transition temperature ( $T_g$ ), melting temperature ( $T_m$ ) and crystallization temperature ( $T_c$ ) of SPS/PVME blends

%SPS	$T_{g2.1}$ (°C)	$T_{g2.2}$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_m$ (°C)
100	n.a.	97.90	242.66	271.41
80	-15.70	97.23	237.38	269.26
60	-14.52	97.74	233.77	269.83
40	-19.33	91.83	234.83	268.76
20	-17.43	96.76	227.05	270.30
0	-26.68	n.a.	n.a.	n.a.

n.a. = not available

## 2.9 สรุปผลของการเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน

จากผลการตรวจวัดจาก DSC จะเห็นได้ว่า sPS จะสามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ PaMS, PEMA, PBMA, PCHA, PIP และจะเกิดการแยกเฟสในกรณีของการผสมกับ PVME ทั้งนี้ อาจสังเกตได้จากการที่พอลิเมอร์ผสมมี  $T_g$  เพียงค่าเดียวในการตรวจวัดในครั้งที่สอง ซึ่งการผสมกับ PVME จะแสดงค่า  $T_g$  ถึงสองค่าในการตรวจวัดครั้งที่สอง ในขณะที่พอลิเมอร์ผสมอื่นๆ แสดงการเข้ากันได้โดยมี  $T_g$  เพียงค่าเดียว นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงของ  $T_g$  เมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ยังแสดงให้เห็นถึงการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยการเปลี่ยนแปลงนี้จะทำให้  $T_g$  มีค่าสูงขึ้นและเข้าใกล้  $T_g$  ของ sPS (100°C) เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ sPS ในพอลิเมอร์ผสมอีกด้วย

## 2.10 ผลของการใส่ LCC และ GMS ต่อสมบัติทางความร้อนของพอลิเมอร์ผสม

### 2.10.1 ผลกระทบต่ออุณหภูมิคล้ายแก้ว (Tg)

การเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการผสม LCC หรือ GMS ต่อการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมนั้นจะสังเกตเห็นได้ถ้าพอลิเมอร์สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว การผสม LCC หรือ GMS จะไม่ก่อให้เกิดการแยกเฟส โดยทุกตัวอย่างที่พบการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้จะไม่พบการแยกเฟสหรืออีกนัยหนึ่งการมีสอง Tg ในการตรวจวัดครั้งที่สองเมื่อผสม LCC หรือ GMS และในทางกลับกันเมื่อพิจารณาการผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันของ PVME การผสม LCC หรือ GMS ก็ไม่สามารถทำให้เกิดการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ จากผลการทดลองที่ผ่านมาการผสม LCC หรือ GMS แม้เพียง 1% ก็จะทำให้เกิดการลดความหนืดหลอมละลายในพอลิเมอร์ผสมได้ แต่การเพิ่มหนึ่งเปอร์เซ็นต์ของ LCC หรือ GMS ในการทดลองนี้ ยังไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมได้อย่างชัดเจนนัก

### 2.10.2 ผลกระทบต่ออุณหภูมิก่อตัวของผลึก (Tc)

อุณหภูมิก่อตัวของผลึกจะลดลงเมื่อลดปริมาณของ sPS ในพอลิเมอร์ผสม การใส่ LCC หรือ GMS ไม่ทำให้การลดลงนี้เปลี่ยนแปลงไปซึ่งก็สอดคล้องกับทฤษฎีของพอลิเมอร์ผสม แต่เมื่อนำการเปลี่ยนแปลงนี้ไปเทียบกับระหว่างการลดลงของ Tc เมื่อไม่ได้ผสม LCC หรือ GMS จะมีความแตกต่างของอุณหภูมิที่ลดลงที่เปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกัน ซึ่งโดยสรุปแล้วการใส่ LCC หรือ GMS จะลดอุณหภูมิการก่อตัวของผลึกลงได้มากกว่าการไม่ผสม LCC หรือ GMS โดยแต่ละชนิดของพอลิเมอร์ผสมจะมีความแตกต่างนี้ไม่เท่ากันอันจะสามารถสรุปได้ดังนี้

สำหรับระบบของ PaMS การเพิ่มปริมาณ PaMS จะทำให้อุณหภูมิก่อตัวของผลึกมีค่าลดลง ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกับเมื่อใส่ LCC หรือ GMS แต่อย่างไรก็ดีเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการก่อตัวของผลึกที่ลดลงแล้วนี้ จะพบได้ว่าการใส่ LCC จะทำให้อัตราการลดลงนี้ลดลงไปน้อยที่สุด หรืออีกนัยหนึ่งการใส่ LCC จะเพิ่มอุณหภูมิก่อตัวของผลึกเมื่อเปรียบเทียบกับพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสมประมาณ 3°C การเพิ่มขึ้นนี้เป็นลักษณะเฉพาะของ PaMS เท่านั้น ส่วนการใส่ GMS จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงมากกว่าในพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม GMS อยู่ประมาณ 3°C ซึ่งจะสอดคล้องกับการผสม GMS ในระบบพอลิเมอร์อื่นๆ ซึ่งการลดลงนี้เป็นไปในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ PaMS ในพอลิเมอร์ผสม

สำหรับระบบของ PEMA การเพิ่มขึ้นของปริมาณ PEMA ในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงตามลำดับ และการเพิ่ม LCC จะทำให้การลดลงนี้ลดลงมากยิ่งขึ้น โดยเมื่อผสม LCC อุณหภูมิก่อตัวของผลึกจะลดลงมากกว่าเมื่อไม่ผสม LCC ที่อัตราส่วนการผสม PEMA ต่างๆมีค่าลดลงไปมากขึ้น ถึง 4-10°C และการเพิ่ม GMS จะสามารถลดอุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมากกว่าการเพิ่ม PEMA ธรรมดาถึง 2-10°C ซึ่งจะสามารถสรุปได้

ว่าการเพิ่มสารเติมแต่ง LCC หรือ GMS จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีการลดลงเพิ่มจากปกติอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน (โดยปกติแล้ว การวัดอุณหภูมิโดยการใช้ DSC จะทำให้ค่าอุณหภูมิที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไปได้ในช่วง  $\pm 5^{\circ}\text{C}$ )

สำหรับระบบของ PBMA เมื่อเพิ่มปริมาณของ PBMA จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงตามลำดับ และการเพิ่มของ LCC และ GMS จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงเพิ่มขึ้นอีกประมาณ  $3^{\circ}\text{C}$  โดยลำดับ การลดลงนี้แม้จะไม่มากแต่เป็นการลดลงโดยตลอดซึ่งทำให้เชื่อได้ว่าการลดลงที่เพิ่มขึ้นจากปกตินี้มีนัยสำคัญ

สำหรับระบบของ PCHA เมื่อเพิ่มปริมาณของ PCHA จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงตามลำดับ และการเพิ่มของ LCC และ GMS จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงมากกว่าการลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณ PCHA ลงถึงโดยประมาณ  $2-5^{\circ}\text{C}$  ซึ่งมีนัยสำคัญพอที่จะเชื่อได้ว่าการใส่สารโมเลกุลเล็กเหล่านี้จะทำให้  $T_c$  มีค่าลดลงมากกว่าการลดลงโดยปกติ

สำหรับระบบของ PIP ในทำนองเดียวกันเมื่อเพิ่มปริมาณของ PIP จะทำให้  $T_c$  ลดลงตามลำดับ การเพิ่มสาร LCC หรือ GMS จะทำให้  $T_c$  มีค่าลดลงโดยสม่ำเสมอประมาณ  $2-7^{\circ}\text{C}$  ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มสารเติมแต่งนี้จะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลง

จากผลการทดลองดังที่ได้กล่าวมานี้จะเห็นได้ว่าการเพิ่มปริมาณของส่วนที่เป็นอสัญฐาน (พอลิเมอร์อีกชนิดหนึ่งนอกจาก sPS) จะทำให้ค่าอุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงโดยลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการกีดขวางการจัดเรียงตัวของ sPS ซึ่งต้องแพร่เข้าหากันเพื่อจัดเรียงตัวในโครงผลึก การเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์อสัญฐานนี้จะทำให้การกีดขวางการจัดเรียงตัวมีค่าเพิ่มขึ้นโดยลำดับ ทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าน้อยกว่า sPS บริสุทธิ์

การเพิ่มปริมาณ LCC หรือ GMS ในพอลิเมอร์ผสมจะเป็นการลดความหนืดเมื่อหลอมละลาย (Melt Viscosity) ของระบบ อันจะทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ไหลและแพร่กันได้ง่ายยิ่งขึ้น จากการทดลองจะพบว่าเมื่อใส่ LCC หรือ GMS ในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงมากกว่าการก่อตัวของระบบเมื่อไม่ได้ใส่สารเติมแต่ง ทั้งนี้โดยปกติแล้วพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้จะมีแนวโน้มที่จะคงสภาพการผสมเพราะการผสมจะทำให้ Gibbs Free Energy มีค่าต่ำที่สุด การลดความหนืดของการหลอมละลายจะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้แยกออกจากกันได้ยากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงเพราะโมเลกุลของ sPS จะต้องแพร่ออกจากสารผสมไปจัดเรียงตัวเป็นผลึก อันจะทำให้ด้านต่อการผสมตัวในสภาพอสัญฐานของพอลิเมอร์หลอมละลาย อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกในระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะมีค่าลดลงไปอีกเพิ่มเติมจากการกีดขวางกันของโมเลกุล

### 2.10.3 ผลกระทบต่ออุณหภูมิหลอมละลายผลึก (Tm)

การหลอมละลายของสารโดยทั่วไปที่ไม่มีการปนของสารที่เติมลงไปในโครงสร้างของของแข็งสามารถสรุปได้ดังสมการ

$$\ln x_B = \frac{\Delta H}{RT} \left( \frac{1}{T_m^*} - \frac{1}{T_{md}} \right) \quad (2.1)$$

โดยที่

$x_B$  = อัตราส่วนโมลของสารที่เกิดการแข็งตัว (sPS)

$T_m^*$  = อุณหภูมิหลอมละลายผลึกของสาร B (sPS) ที่บริสุทธิ์

$T_{md}$  = อุณหภูมิหลอมละลายผลึกเมื่อมีสารปนเปื้อน

จากสมการนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อมีสารปนเปื้อน อุณหภูมิ หลอมเหลวของสารที่เป็นของแข็งจะมีค่าลดลงทั้งนี้เนื่องจากการเกิดสารผสมในสภาพที่เป็นของเหลวจะมีค่า Gibbs' Free Energy ที่ต่ำลงและการเกิดความสมดุลนี้จะเกิดได้ที่อุณหภูมิที่ต่ำลง

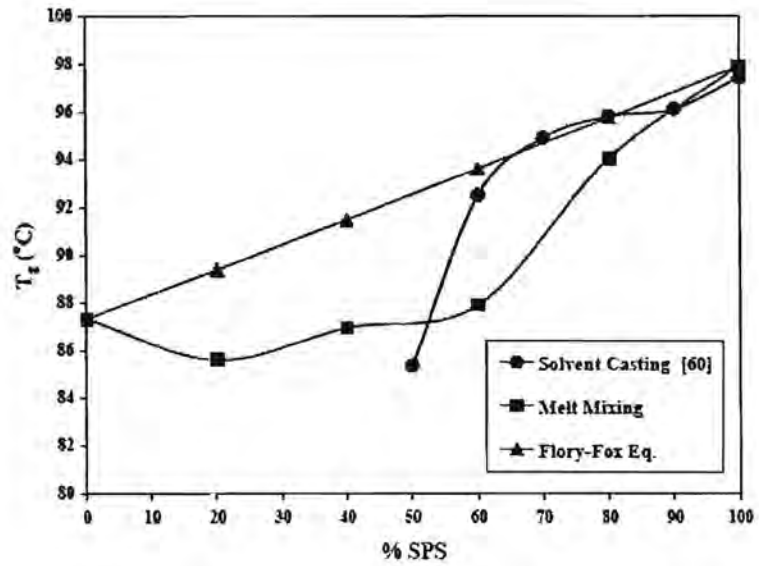
สำหรับสารที่มีการจัดเรียงตัวเมื่อแข็งตัวดังเช่นพอลิเมอร์ สมการนี้จะไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ได้อย่างเด่นชัด แต่อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ผสมจะมีแนวโน้มที่จะลดอุณหภูมิหลอมละลายผลึกลงเมื่อมีพอลิเมอร์ผสมอีกชนิดผสมอยู่ และดังที่ได้กล่าวมาการลดลงนี้ไม่สามารถประมาณได้โดยใช้สมการทั่วไป จากข้อมูลที่มีการเติมพอลิเมอร์อีกชนิดในปริมาณที่สูงถึง 80% ยังทำให้ค่าอุณหภูมิหลอมละลายผลึกลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น (1-2°C) การเติมสาร LCC หรือ GMS ในปริมาณที่ต่ำ (1%) ไม่ควรที่จะลดอุณหภูมิหลอมละลายของผลึกลงได้อย่างมากเลย แต่จากผลการทดลองสารเติมแต่งโมเลกุลต่ำเหล่านี้จะสามารถลดอุณหภูมิหลอมละลายผลึกลงได้เพิ่มเติมจากการลดลงเนื่องจากการทำระบบให้เป็นพอลิเมอร์ผสมอีกถึง 1-2 °C โดยถ้าปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาผสมกับ sPS มีค่ามากขึ้น การลดลงของอุณหภูมิหลอมละลายผลึกโดย LCC หรือ GMS จะมีค่าที่ชัดเจนมากขึ้น การหลอมละลายที่เกิดเร็วขึ้นนี้จะสามารถพิจารณาได้จากการลดความหนืดหลอมละลายของพอลิเมอร์ผสม โมเลกุลของ sPS จะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นในสภาวะที่เป็นอสัญฐานที่หลอมละลายซึ่งจะสามารถลด Gibbs' Free Energy ของระบบลงได้อีกอย่างรวดเร็วขึ้น จึงเป็นที่สังเกตได้ว่าการใส่สารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ระบบมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกที่ต่ำลง อุณหภูมิหลอมละลายผลึกของ sPS ในระบบต่างๆเมื่อไม่เติมและเติมสารเติมแต่งจะสามารถสรุปได้ดังตาราง

ตารางที่ 2.18 Melting temperature depression of their blends

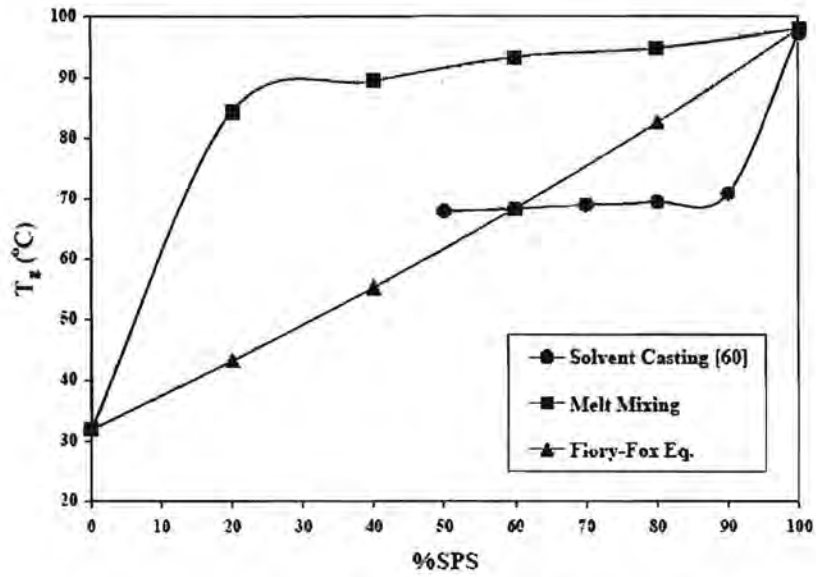
Samples	Melting Temperature Depression ( $^{\circ}\text{C}$ )				
	100/0	80/20	60/40	40/60	20/80
SPS/PaMS	271.41	271.14	271.05	270.70	270.53
SPS/PaMS/LCC	270.57	270.27	270.19	270.12	269.95
SPS/PaMS/GMS	271.01	270.72	270.64	270.49	270.16
SPS/PEMA	271.41	271.29	271.24	270.17	271.02
SPS/PEMA/LCC	270.57	270.33	270.27	270.17	269.58
SPS/PEMA/GMS	271.01	270.76	270.68	270.64	270.38
SPS/PBMA	271.41	271.35	271.29	271.25	271.18
SPS/PBMA/LCC	270.57	270.57	270.57	270.57	270.57
SPS/PBMA/GMS	271.01	270.75	270.73	270.69	270.64
SPS/PCHA	271.41	271.31	271.22	271.14	270.99
SPS/PCHA/LCC	270.57	270.29	270.20	269.95	269.45
SPS/PCHA/GMS	271.01	270.70	270.65	270.46	269.82
SPS/PIP	271.41	271.38	271.33	271.28	271.20
SPS/PIP/LCC	270.57	270.27	270.21	270.00	269.84
SPS/PIP/GMS	271.01	270.72	270.64	270.59	269.66

#### 2.10.4 ผลกระทบจากวิธีเตรียมสารต่อการเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม

ในผลการทดลองนี้ใช้การเตรียมตัวอย่างโดยวิธีหลอมละลายซึ่งต่างจากการทดลองในตอนแรกที่ใช้วิธีเตรียมตัวอย่างโดยการผสมในตัวทำละลายเดียวกัน การผสมโดยใช้ตัวทำละลายเดียวกันอาจเกิดผลกระทบจากตัวทำละลาย ทำให้ค่าทางความร้อนที่วัดได้มีค่าเปลี่ยนไป ถึงแม้จะระเหยตัวทำละลายออกไปหมดแล้วก็ตาม การผสมโดยวิธีหลอมละลายหากไม่สามารถกวนผสมสารทั้งสองได้โดยทั่วถึงแล้วอาจทำให้การวัดค่าทางความร้อนแสดงเฟสทั้งสองที่ผสมกันอย่างไม่ดีได้ ในการทดลองนี้ได้ใช้ข้อมูลจากการทดลองตอนที่แล้วเพื่อเปรียบเทียบกัน และผลการทดลองจะสามารถสรุปได้เป็นกราฟดังนี้

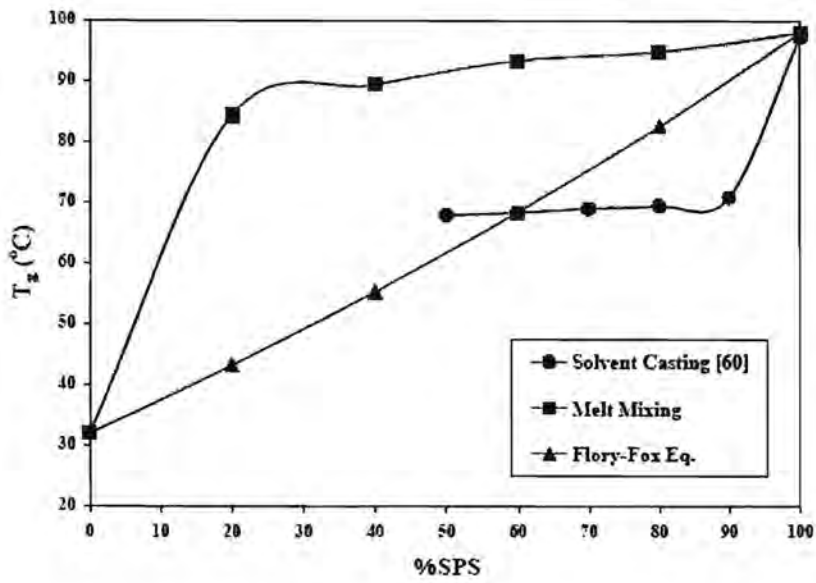


รูปที่ 2.1 Comparison of method in blending SPS/PaMS blends with Fox equation



รูปที่ 2.2 Comparison of method in blending SPS/PEMA with Fox equation



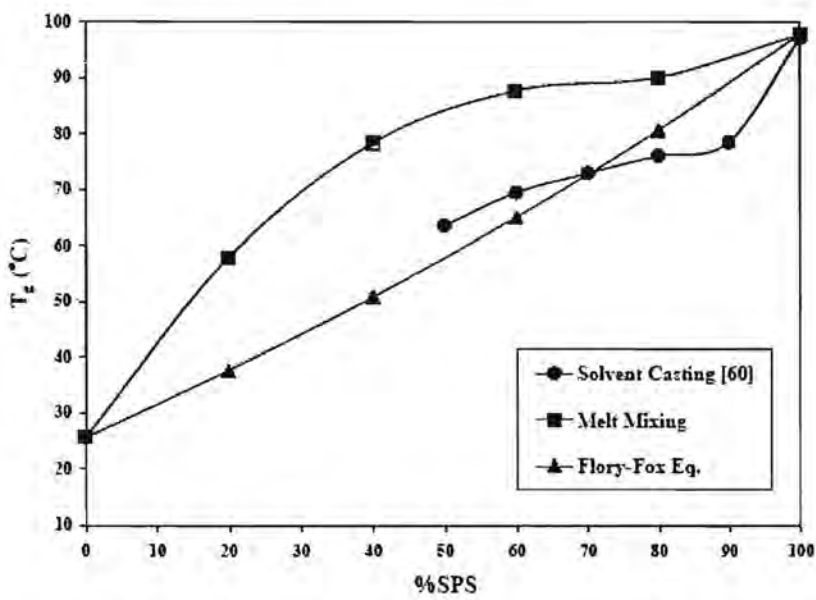


รูปที่

2.3

Comparison of r

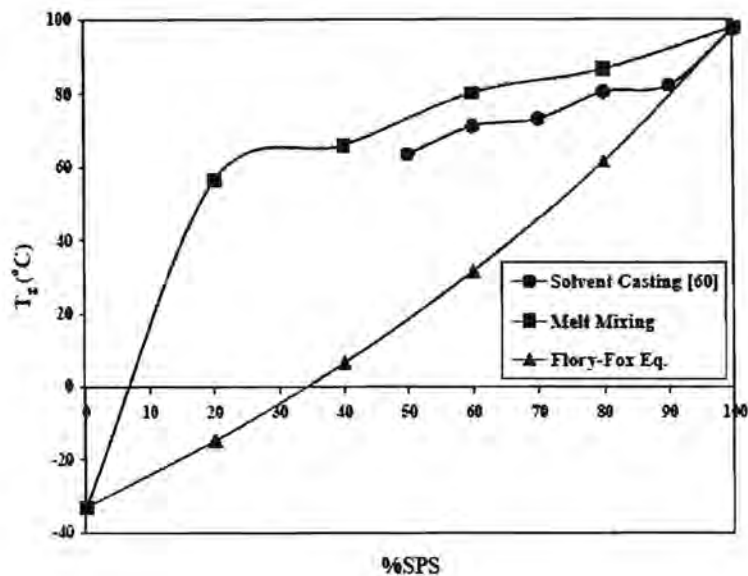
Comparison of method in blending SPS/PBMA with Fox equation



รูป

ที่ 2.4

Comparison of method in blending SPS/PCHA with Fox equation



รูปที่ 2.5 Comparison of method in blending of SPS/PIP blends with Fox equation

จากผลการทดลองในขั้นนี้ ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกเตรียมโดยวิธีหลอมละลาย ในการตรวจวัดอุณหภูมิคล้ายแก้วในการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งแรก จะพบว่าระบบจะมีสอง Tg และในการตรวจวัดการเพิ่มอุณหภูมิในครั้งที่สอง จะพบว่าระบบจะมีเพียง Tg เดียว ซึ่งแสดงให้เห็นถึงจุดอ่อนของการผสมแบบหลอมละลาย โดยที่ตัวอย่างในขั้นต้นจะเกิดการแยกเฟส ทั้งนี้เนื่องจากความลำบากในการกวนผสมพอลิเมอร์จำนวนที่น้อยให้ได้สารเนื้อเดียวในทันที ส่วนในการวัดการเพิ่มอุณหภูมิครั้งที่สอง พอลิเมอร์จะถูกทำให้หลอมละลายใน DSC ซึ่งพอลิเมอร์ที่สามารถเข้ากันเป็นเนื้อเดียวจะเกิดการผสมกันโดยอัตโนมัติ ทำให้มีค่าอุณหภูมิคล้ายแก้วเพียงค่าเดียว ซึ่งเป็นลักษณะของพอลิเมอร์ที่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้ ทั้งนี้จะยืนยันผลการทดลองในตอนแรก ที่พบว่าพอลิเมอร์ผสมระบบต่างๆจะสามารถผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ แม้ว่าจะใช้วิธีการผสมพอลิเมอร์โดยวิธีที่ไม่เหมือนกันก็ตาม

นอกจากนี้ความแตกต่างของวิธีการผสมจะส่งผลถึงสภาพการเกิดผลึก ซึ่งจากผลการทดลองในตอนแรก ค่าเปอร์เซ็นต์การเป็นผลึกที่ตรวจวัดโดย XRD จะมีค่าสูงกว่าค่าเปอร์เซ็นต์การเป็นผลึกของการผสมในตอนที่สอง ทั้งนี้อาจเนื่องจากการจัดเรียงตัวเป็นผลึกของ sPS จะทำได้ง่ายกว่าในการผสมแบบตัวทำละลายเดียวกันและจะมีการกระจายตัวที่ดีกว่า ซึ่งเป็นเหตุให้มีความเป็นผลึกในตัวอย่างสูงกว่าวิธีหลอมละลาย ถึงแม้จะถูกหลอมละลายครั้งหนึ่งและทิ้งให้เกิดผลึกที่อุณหภูมิ 200°C เหมือนกันในทั้งสองวิธีผสมก็ตาม ความแตกต่างนี้จะทำให้พอลิเมอร์ผสมมีปริมาณ sPS ที่อยู่ในเฟสอสัณฐานที่ไม่เท่ากัน การที่มีค่าความเป็นผลึกสูงจะทำให้มีปริมาณ sPS

ในส่วนที่เป็นอสังขฐานมีปริมาณน้อยกว่า การที่มีค่าความเป็นผลึกต่ำเมื่อปริมาณโดยน้ำหนักของ sPS ในระบบมีค่าเท่ากัน ความแตกต่างนี้จะส่งผลถึงค่าอุณหภูมิ T<sub>g</sub> ซึ่งสะท้อนค่าส่วนที่เป็นอสังขฐานของระบบการที่มีปริมาณ sPS ในระบบมากจะทำให้ค่า T<sub>g</sub> มีค่าสูงกว่า ระบบที่มีปริมาณ sPS ในส่วนที่เป็นอสังขฐานน้อยกว่า ผลกระทบนี้จะสามารถตรวจพบได้ในการตรวจวัดค่า T<sub>g</sub> ในการให้ความร้อนในครั้งที่สอง จึงสามารถสรุปได้ว่าการผสม แบบหลอมละลายจะมีค่า T<sub>g</sub> ที่สูงกว่าค่า T<sub>g</sub> ของการผสมโดยใช้ตัวทำละลายเดียวกัน ที่ปริมาณอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ sPS ที่มีค่าเท่ากัน

แต่ทั้งนี้ในระบบของ PaMS การผสมจะทำให้ค่า T<sub>g</sub> มีค่าต่ำกว่าค่าเฉลี่ยของ T<sub>g</sub> ของทั้งสองพอลิเมอร์บริสุทธิ์ ซึ่งก็ยังคงคล้องกับการสรุปข้างต้นดังกล่าว โดยในระบบนี้ถ้ามีปริมาณ sPS ในส่วนที่เป็นอสังขฐานมากจะทำให้ค่า T<sub>g</sub> ของระบบมีค่าต่ำลงมากกว่าการที่มี sPS ในส่วนที่เป็นอสังขฐานน้อย (ซึ่งกลับกับระบบอื่น ๆ ที่มีการเพิ่มของ T<sub>g</sub> ถ้ามี sPS ในปริมาณที่มากขึ้น) การผสมโดยวิธีละลายในตัวทำละลายเดียวกันจึงมีค่า T<sub>g</sub> ที่สูงกว่าการผสมโดยวิธีหลอมละลายที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ sPS ทั้งหมดในระบบที่มีค่าเท่ากัน

ข้อด้อยของวิธีการผสมแบบหลอมละลายไม่ได้เป็นอุปสรรคในการผสมพอลิเมอร์ในทางอุตสาหกรรม ทั้งนี้เนื่องจากต้นทุนที่ต่ำกว่าและไม่มีปัญหาในการกำจัดตัวทำละลายซึ่งมีราคาแพง และไม่ต้องมีระบบที่นำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ การผสมในปริมาณที่มากจะลดจุดอ่อนในเรื่องความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสมได้เป็นอย่างดี จึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่าในทางอุตสาหกรรม

จากค่า T<sub>g</sub> ของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ในระบบทั้งสององค์ประกอบจะสามารถคำนวณค่า T<sub>g</sub> ของระบบพอลิเมอร์ผสมได้จากการใช้สมการที่เชื่อมกันระหว่างอุณหภูมิคล้ายแก้วของสารบริสุทธิ์ และอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม สมการพื้นฐานที่เป็นที่รู้จักดีคือสมการของ Flory-Fox ดังจะสามารถแสดงได้ดังนี้

$$\frac{1}{T_g} = \frac{W_1}{T_{g1}} + \frac{(1-W_1)}{T_{g2}} \quad (2.2)$$

โดยที่

- T<sub>g</sub> = อุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม (ได้จากการตรวจวัด)
- 1, 2 = SPS และ พอลิเมอร์อสังขฐานอีกองค์ประกอบ
- W<sub>i</sub> = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของพอลิเมอร์ i

จากสมการของ Flory-Fox ดังกล่าว ถ้าทราบอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสอง (T<sub>g1</sub>, T<sub>g2</sub>) และอุณหภูมิคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสม (T<sub>g</sub>) จะสามารถคำนวณค่าอัตราส่วน

โดยน้ำหนักในทางทฤษฎี ( $W_1$ ) ได้เป็นการต่อมาซึ่งเป็นค่าอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ sPS ในส่วนที่เป็นอสังฐานตามทฤษฎีได้โดยประมาณ ค่าที่คำนวณได้ในระบบต่างๆ จะสามารถสรุปเป็นตารางได้ดังนี้

ตารางที่ 2.19 Percentage of SPS in binary blends from calculation

% SPS (real)	% SPS from calculation ( $W_1 \times 100$ )				
	SPS/PaMS	SPS/PEMA	SPS/PBMA	SPS/PCHA	SPS/PIP
100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
80	64.06	92.99	96.12	91.27	94.24
60	5.54	80.67	94.24	88.46	90.78
40	-3.70	73.42	89.12	77.12	82.71

จะเห็นได้ว่าค่าที่ประมาณจาก Fox Equation จะมีค่าคลาดเคลื่อนจากอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่แท้จริงเป็นอย่างมาก โดยจะมีการคาดเดาอัตราส่วนโดยน้ำหนัก sPS ของส่วนที่เป็นอสังฐานมีค่าสูงกว่ามาก ซึ่งจะเป็นไปได้ในกรณีเดียวคือมีการแยกเฟสขององค์ประกอบที่เป็นอสังฐาน อย่างไรก็ตามสมการ Fox เป็นสมการที่สามารถมีความคลาดเคลื่อนได้มาก ทั้งนี้เนื่องจากการประมาณเชิงค่าเฉลี่ย และความไม่สามารถประมาณระบบที่เกิด Synergistic หรือ non-Synergistic มากๆได้

#### 2.10.5 ผลของสารเติมแต่งต่อปริมาณการเป็นผลึก

การคำนวณหาปริมาณการเป็นผลึกใช้วิธีของ Ruland โดยการตรวจวัดการกระเจิงแสง X-Ray ที่เกิดขึ้นที่มุมสะท้อนต่างๆ โดยการใช้ XRD การคำนวณจะใช้ผลต่างของการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์ที่มีผลึกลบด้วยการกระเจิงแสงของพอลิเมอร์เดียวกัน ในสภาวะที่เป็นอสังฐานการกระเจิงแสงจะประกอบด้วย ส่วนที่เป็นการกระเจิงแสงโดยผลึกและส่วนการกระเจิงแสงจากส่วนที่เป็นอสังฐานไปพร้อมกัน วิธีของ Ruland ใช้การคำนวณตัวแปรที่เป็นฟังก์ชันกับมุมการกระเจิงแสงดังนี้

$$s = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \quad (2.3)$$

ซึ่งค่า  $\lambda$  เป็นความยาวคลื่นของ X-Ray และ  $\theta$  คือมุมสะท้อนของลำแสงตกกระทบ  
ซึ่งค่าปริมาณการเป็นผลึก ( $x_c$ ) จะสามารถคำนวณได้จาก

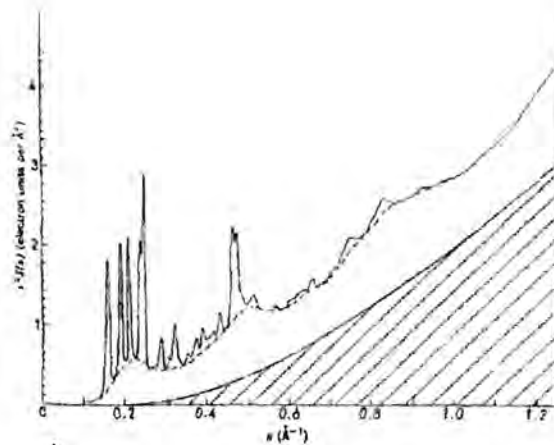
$$x_c = \frac{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I_c ds}{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I ds} (K(s_0, s_p, D, \bar{f}^2)) = const. \quad (2.4)$$

$I(s)$  = ความเข้มข้นของการกระเจิงแสงใดๆที่ตำแหน่ง  $s$

$I_c(s)$  = ความเข้มข้นของการกระเจิงแสงโดยผลึกที่ตำแหน่ง  $s$

$(K(s_0, s_p, D, \bar{f}^2))$  = ค่าการกระเจิงแสงของฉากหลังอันเนื่องมาจากการสั่นไหวโดย  
ความร้อนของโมเลกุลและความบกพร่องของโครงสร้างผลึก ซึ่ง  
จะสามารถประมาณได้โดยการอ่านค่าตัวเลขจากตารางและ  
สมมุติให้มีค่าคงที่ในระบบหนึ่งๆ

ตัวอย่างการกระเจิงแสงของ พอลิโพรไพลีนจะสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 Curve of  $s^2 I(s)$  versus  $s$  for polypropylene

โดยที่เส้นประจะแสดงการกระเจิงแสงของส่วนที่เป็นอสัณฐาน ส่วนการกระเจิงแสงของ  
ผลึกจะสามารถแสดงได้ โดยแท่งระหว่างเส้นประกับแท่งการกระเจิงแสงที่เป็นส่วนยอดที่เพิ่มเติม

ขึ้นไปในกราฟ ส่วนที่เป็นพื้นผิวที่แรงคือค่า  $s^2$  เมื่อ  $l$  มีค่าเป็น 1 ซึ่งต้องหักทิ้งในการคำนวณปริมาณผลึกโดย XRD

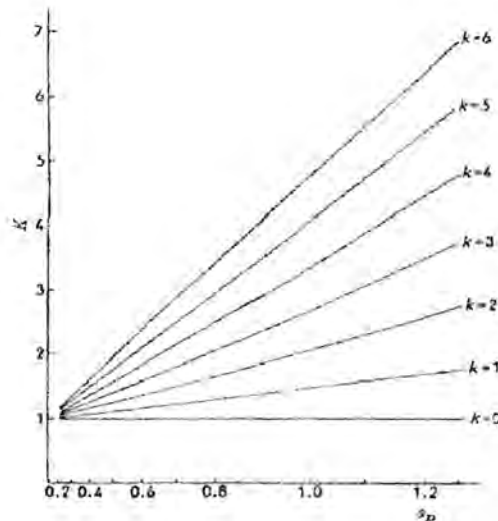
การคำนวณหาค่า  $K$  นี้สามารถแสดงเป็นสมการ 2.5 ดังนี้

$$K = \frac{\int_{s_0}^{s_p} s^2 \bar{f}^2 ds}{\int_{s_0}^{s_p} s^2 \bar{f}^2 D ds} \quad (2.5)$$

ซึ่งค่า  $f$  คือฟังก์ชันขององค์ประกอบทางเคมี และ

ค่า  $D$  คือค่าความไม่สมบูรณ์ของผลึก  $D = \exp(-ks^2)$ .

โดยมากแล้วค่า  $K$  จะอ่านได้จากกราฟโดยเป็นฟังก์ชันของค่า  $s$  ของพอลิเมอร์ และจะปรับค่า  $k$  ใน  $D$  เพื่อให้ค่า  $x_c$  แปรผันเชิงเส้นตรงต่อค่า  $s$  ค่าเชิงตัวเลขของ  $K$  จะสามารถแสดงได้โดยกราฟ

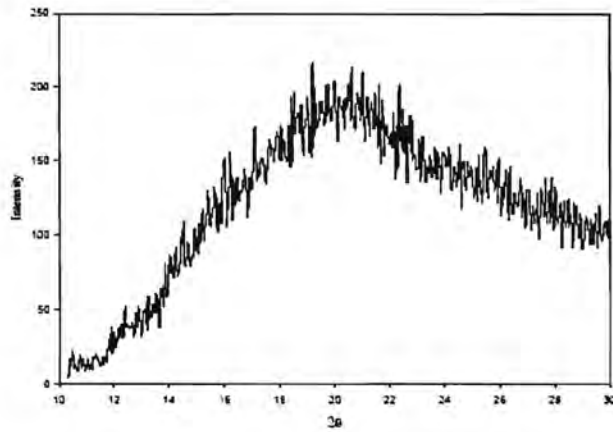


รูปที่ 2.7 Nomogram of  $K$  values as a function of  $k$  and  $s_p$  calculated for the chemical composition  $(CH_2)_n$  and  $s_0 = 0.1$

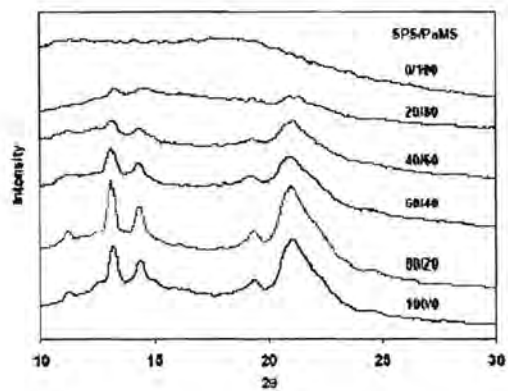
ซึ่งในการทดลองนี้ค่า  $s$  จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1-0.3 ซึ่งจากกราฟข้างต้นจะสามารถอ่านค่า  $K$  ที่ไม่ว่าค่า  $k$  จะเป็นเท่าใดได้ค่า  $K$  เท่ากับ 1-1.2 ในที่นี้จึงจะประมาณค่า  $K$  ให้เท่ากับ 1 ในทุกๆ มุม สมการที่ซับซ้อนดังกล่าวจะลดรูปลงเหลือเพียงค่าอัตราส่วนกำลังสองของ  $s^2$  เท่านั้น



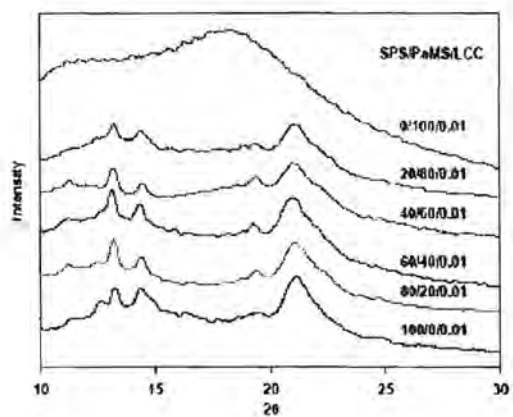
ค่าการกระเจิงแสงของส่วนที่เป็นอสัณฐานจะสามารถคำนวณได้จากกราฟรูปที่ 2.7



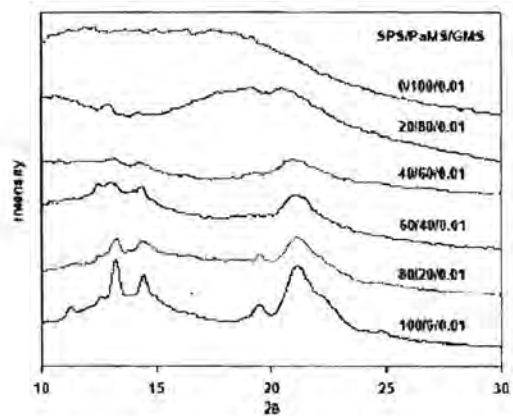
รูปที่ 2.8 X-ray diffraction pattern of amorphous SPS



(a)

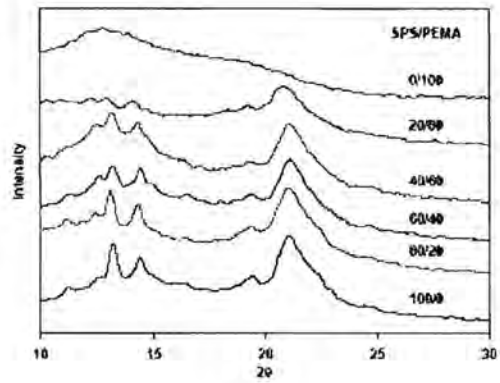


(b)

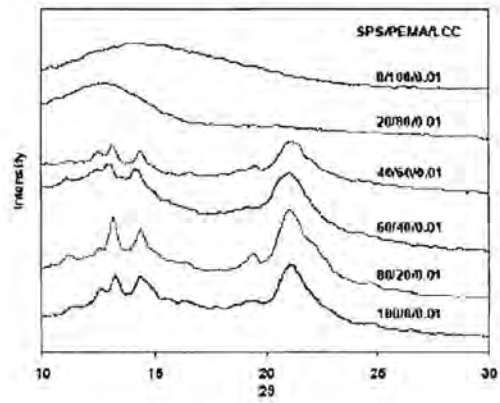


(c)

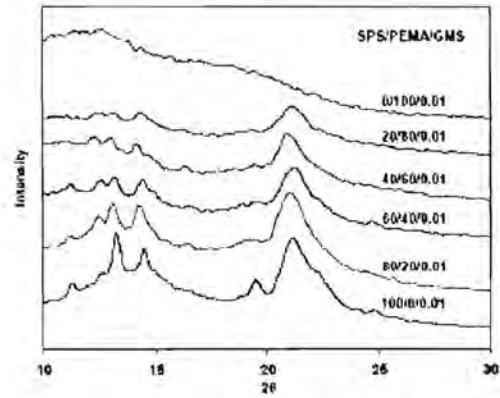
รูปที่ 2.9 The X-ray diffraction patterns for SPS/PaMS blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PaMS blends; (b) SPS/PaMS/LCC blends and (c) SPS/PaMS/GMS blends



(a)

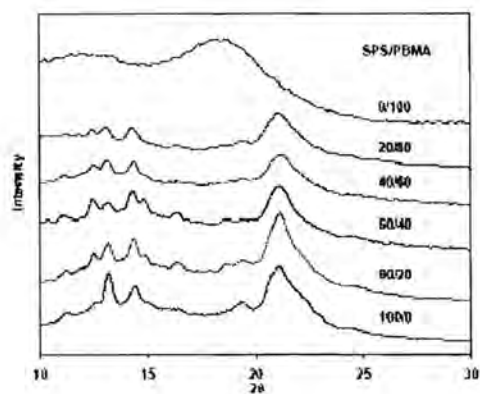


(b)

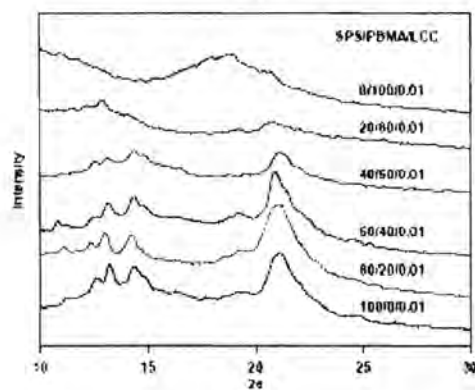


(c)

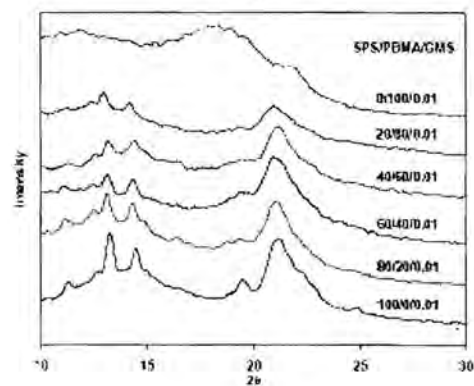
รูปที่ 2.10 The X-ray diffraction patterns for SPS/PEMA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PEMA blends; (b) SPS/PEMA/LCC blends and (c) SPS/PEMA/GMS blends



(a)

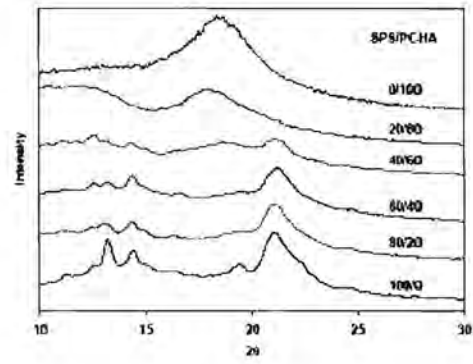


(b)

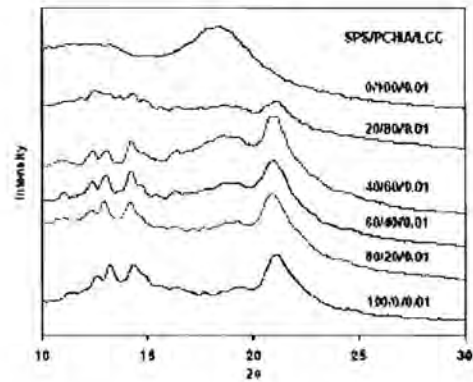


(c)

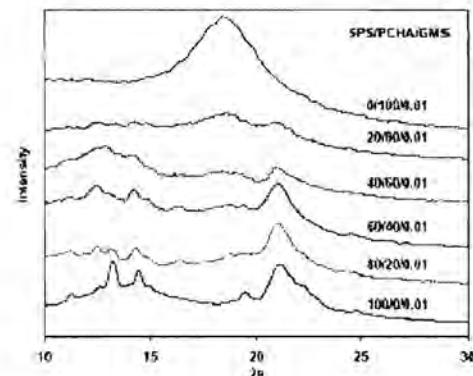
รูปที่ 2.11 The X-ray diffraction patterns for SPS/PBMA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PBMA blends; (b) SPS/PBMA/LCC blends and (c) SPS/PBMA/GMS blends



(a)

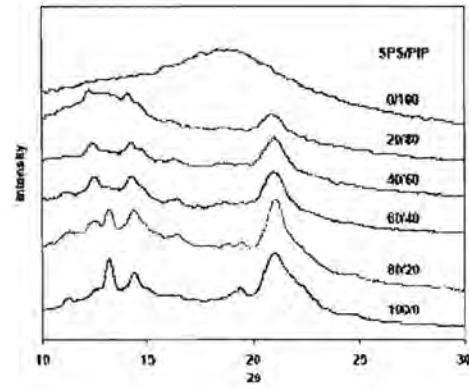


(b)

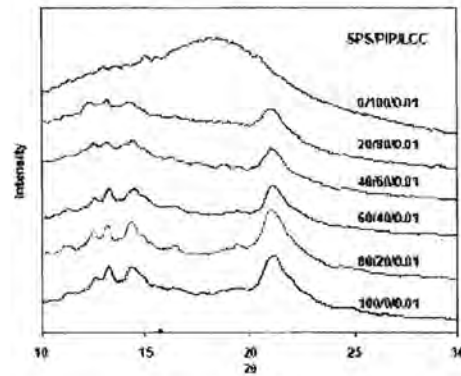


(c)

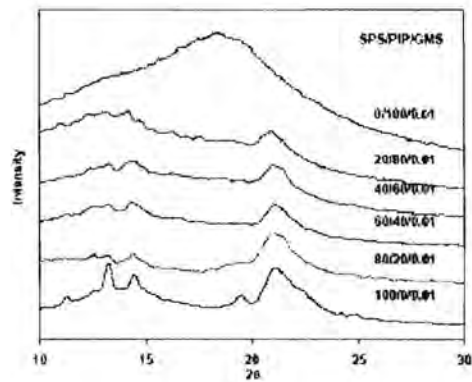
รูปที่ 2.12 The X-ray diffraction patterns for SPS/PCHA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PCHA blends; (b) SPS/PCHA/LCC blends and (c) SPS/PCHA/GMS blends



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 2.13 The X-ray diffraction patterns for SPS/PIP blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PIP blends; (b) SPS/PIP/LCC blends and (c) SPS/PIP/GMS blends



ค่าปริมาณผลึก  $x_c$  จะสามารถคำนวณได้จากกราฟข้างต้นและสามารถแสดงได้ในตารางดังต่อไปนี้โดยแยกเป็นระบบขององค์ประกอบพื้นฐาน โดยวิธีที่แสดงไว้ข้างต้น

ตารางที่ 2.20 % Crystallinity of SPS/PaMS, SPS/PaMS/GMS and SPS/PaMS/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PaMS	SPS/PaMS/GMS	SPS/PaMS/LCC
40	19.37	38.54	20.00
60	23.93	27.27	23.49
80	38.42	27.23	28.98
100	57.26	49.59	51.63

จากข้อมูลอาจสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวยังสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาผลจาก DSC โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS พอลิเมอร์ผสมจะใช้พลังงานเพื่อหลอมละลายผลึกต่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อผสม LCC หรือ GMS จะทำให้ปริมาณผลึกลดลง 1-6% จากพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม

ตารางที่ 2.21 % Crystallinity of SPS/PEMA, SPS/PEMA/GMS and SPS/PEMA/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PEMA	SPS/PEMA/GMS	SPS/PEMA/LCC
40	27.00	29.33	31.58
60	37.25	35.38	41.07
80	41.43	44.75	44.41
100	57.26	49.59	51.63

จากข้อมูลอาจสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวยังสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาผลจาก DSC โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS พอลิเมอร์ผสมจะใช้พลังงานเพื่อหลอมละลายผลึกต่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อผสม LCC หรือ GMS จะทำให้ปริมาณผลึกลดลง 1-6% จากพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม

ตารางที่ 2.22 % Crystallinity of SPS/PBMA, SPS/PBMA/GMS and SPS/PBMA/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PBMA	SPS/PBMA/GMS	SPS/PBMA/LCC
40	39.57	36.95	34.79
60	36.65	34.12	30.58
80	37.79	38.12	41.94
100	57.26	49.59	51.63

จากข้อมูลอาจสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวยังสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาผลจาก DSC โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS พอลิเมอร์ผสมจะใช้พลังงานเพื่อหลอมละลายผลึกต่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อผสม LCC หรือ GMS จะทำให้ปริมาณผลึกลดลง 1-6% จากพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม

ตารางที่ 2.23 % Crystallinity of SPS/PCHA, SPS/PCHA/GMS and SPS/PCHA/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PCHA	SPS/PCHA/GMS	SPS/PCHA/LCC
40	34.80	37.00	28.93
60	46.77	36.50	28.38
80	43.68	40.34	29.49
100	57.26	49.59	51.63

จากข้อมูลอาจสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวยังสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาผลจาก DSC โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS พอลิเมอร์ผสมจะใช้พลังงานเพื่อหลอมละลายผลึกต่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อผสม LCC หรือ GMS จะทำให้ปริมาณผลึกลดลง 1-6% จากพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม

ตารางที่ 2.24 % Crystallinity of SPS/PIP, SPS/PIP/GMS and SPS/PIP/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PIP	SPS/PIP/GMS	SPS/PIP/LCC
40	23.37	21.58	24.45
60	27.76	29.70	31.13
80	32.62	43.00	31.34
100	57.26	49.59	51.63

จากข้อมูลอาจสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสม จะทำให้ปริมาณการเกิดผลึกมีค่าเพิ่มขึ้น แนวโน้มดังกล่าวยังสามารถเห็นได้เมื่อพิจารณาผลจาก DSC โดยเมื่อเพิ่มปริมาณ sPS พอลิเมอร์ผสมจะใช้พลังงานเพื่อหลอมละลายผลึกต่อน้ำหนักพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามลำดับ และเมื่อผสม LCC หรือ GMS จะทำให้ปริมาณผลึกลดลง 1-6% จากพอลิเมอร์ที่ไม่ได้ผสม

จากข้อมูลที่ได้แสดง การลดปริมาณ sPS ในระบบจะทำให้ปริมาณผลึกมีค่าน้อยลงตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ LCC หรือ GMS จะส่งผลให้ปริมาณการเป็นผลึกของ sPS มีค่าลดลง ทั้งนี้อาจพิจารณาได้จากการมีส่วนที่เป็นอสัณฐานที่มากขึ้นในกรณีของการเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์อสัณฐานที่เข้าผสมกับ sPS หรือการมีส่วนที่เป็นอสัณฐานที่เสถียรยิ่งขึ้นในกรณีของ LCC หรือ GMS การใส่สารเติมแต่งดังกล่าวอาจเป็นเหตุให้พอลิเมอร์ผสมที่ได้มีอัตราส่วนที่เป็นอสัณฐานมีค่าเพิ่มขึ้น

## ผลการทดลองตอนที่สาม

ในการทดลองครั้งนี้ ใช้พอลิเมอร์ sPS ในห้องตลาดเพื่อทดสอบสมบัติทางกล โดย Dynamics Mechanical Analysis (DMA) เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ พอลิเมอร์ที่ใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ sPS1 และ sPS2 ซึ่งมีมวลโมเลกุลแตกต่างกัน โดยที่ sPS1 มีมวลโมเลกุล  $3.17 \times 10^5$  และ sPS2 มีมวลโมเลกุล  $1.30 \times 10^5$  จะทำการผสมกับพอลิเมอร์ 5 ชนิด คือ Poly (alpha methylstyrene), (PaMS); Poly (n-butyl methacrylate), (PBMA); Poly (cis-isoprene), (PIP); Poly (ethyl methacrylate), (PEMA); Poly (cyclohexyl methacrylate), (PHMA) โดยวิธีหลอมละลายผสมกันแต่จะมีปริมาณตัวอย่างมากกว่าการทดลองในส่วนที่สอง ซึ่งจะให้ชิ้นงานขนาดใหญ่เพื่อทดสอบสมบัติทางกล ทำให้การผสมโดยการหลอมละลายให้ผลการผสมที่ดีกว่าในการทดลองตอนที่สองอย่างเห็นได้อย่างชัดเจน

### 3.1 ค่าสมบัติทางความร้อนโดย DSC

พอลิเมอร์ผสมที่ใช้ sPS1 และ sPS2 เมื่อนำมาผสมกับพอลิเมอร์อื่นฐานทั้งห้าชนิดดังกล่าว เมื่อตรวจวัดสมบัติทางความร้อนโดย DSC แล้วจะสามารถแสดงผลการตรวจวัดได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 Glass transition temperatures ( $T_g$ ), melting temperatures ( $T_m$ ) and crystallization temperatures ( $T_c$ ) of sPS1 blend system

System <sup>a</sup>	Heat up 1		Cool down	Heat up 2	
	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
sPS1	100.42	267.00	213.34	100.36	268.15
sPS1/PIP	88.58	268.74	220.26	74.88	268.75
sPS1/PBMA	85.85	268.81	220.59	88.03	265.59
sPS1/PEMA	75.13	268.33	214.88	83.50	263.52
sPS1/PHMA	70.75	265.45	222.06	75.54	263.26
sPS1/PaMS	88.74	266.84	221.12	93.33	265.37

<sup>a</sup>Conditions: Temperature 300 °C, MW of sPS  $31.7 \times 10^4$  and composition sPS : another polymer =80/20 (wt/wt) by melt mixing method

ตารางที่ 3.2 Glass transition temperatures ( $T_g$ ), melting temperatures ( $T_m$ ) and crystallization temperatures ( $T_c$ ) of sPS2 blend system

System <sup>a</sup>	Heat up 1		Cool down	Heat up 2	
	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)	$T_c$ (°C)	$T_g$ (°C)	$T_m$ (°C)
sPS2	97.47	267.52	234.70	100.25	265.73
sPS2/PIP	56.85	263.02	215.15	70.71	263.50
sPS2/PBMA	64.39	260.18	213.86	84.22	260.54
sPS2/PEMA	92.86	260.02	217.34	81.95	261.63
sPS2/PHMA	98.70	260.77	212.08	79.22	257.71
sPS2/PaMS	86.96	263.71	219.03	90.24	265.47

<sup>a</sup>Conditions: Temperature 300 °C, MW of sPS  $13.0 \times 10^4$  and composition sPS : another polymer =80/20 (wt/wt) by melt mixing method

ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับข้อสรุปเดิมที่แสดงว่าพอลิเมอร์ทั้งห้าชนิดนี้สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ sPS ถึงแม้ว่าจะใช้ sPS ที่มีสมบัติมวลโมเลกุลที่แตกต่างกันออกไป และเมื่อนำค่าที่วัดได้นี้ไปเทียบกับการทดลองในตอนที่สองจะสามารถแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 Glass transition temperature ( $T_g$ ) of sPS polymer blend

Blending system <sup>a</sup>	$T_g$ of Previous work(°C)		$T_g$ of This work(°C)	
	Heat 1	Heat 2	Heat 1	Heat 2
sPS2/PIP	86.61	64.12	56.85	70.71
sPS2/PBMA	94.81	79.21	64.39	84.22
sPS2/PEMA	95.43	75.63	92.86	81.95
sPS2/PHMA	99.45	99.61	98.70	79.22
sPS2/PaMS	94.03	96.54	86.96	90.24

<sup>a</sup>Conditions: Temperature 300 °C, MW of sPS  $13.0 \times 10^4$  for this work, MW of sPS  $1.9 \times 10^6$  for previous work and composition sPS : another polymer =80/20 (wt/wt) by melt mixing method

จากการเทียบกันจะแสดงถึงความเป็นเนื้อเดียวกันของพอลิเมอร์ผสม และการที่ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ )เปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน จึงสามารถสรุปได้ว่าพอลิเมอร์ทั้งห้า

สามารถลดค่า Tg ของ sPS ได้ ทั้งนี้จะเป็นการเพิ่มอุณหภูมิที่ใช้งานได้อย่างยั่งยืน (ระหว่างค่า Tg และ Tm) อันจะทำให้สามารถใช้งาน sPS ได้ที่ช่วงกว้างขึ้นไป แต่อย่างไรก็ตามค่า Tg ที่วัดได้มีค่าไม่เท่ากัน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการใช้ sPS ที่มีมวลโมเลกุลต่างกันออกไป รวมถึงการใช้สารเติมแต่งในพอลิเมอร์ sPS2, sPS1 ซึ่งในการทดลองตอนที่ 1 และ 2 ใช้พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์เองจึงไม่มีการเติมสารเติมแต่ง ในการทดลองตอนนี้เนื่องจากจะพยายามหาการประยุกต์ใช้ในทางอุตสาหกรรมโดยตรง จึงใช้ sPS ที่ได้มาจากทางห้องตลาดถึงแม้ว่าจะสามารถสังเคราะห์ได้เองก็ตาม

### 3.2 ค่าสมบัติทางความร้อนโดย TGA

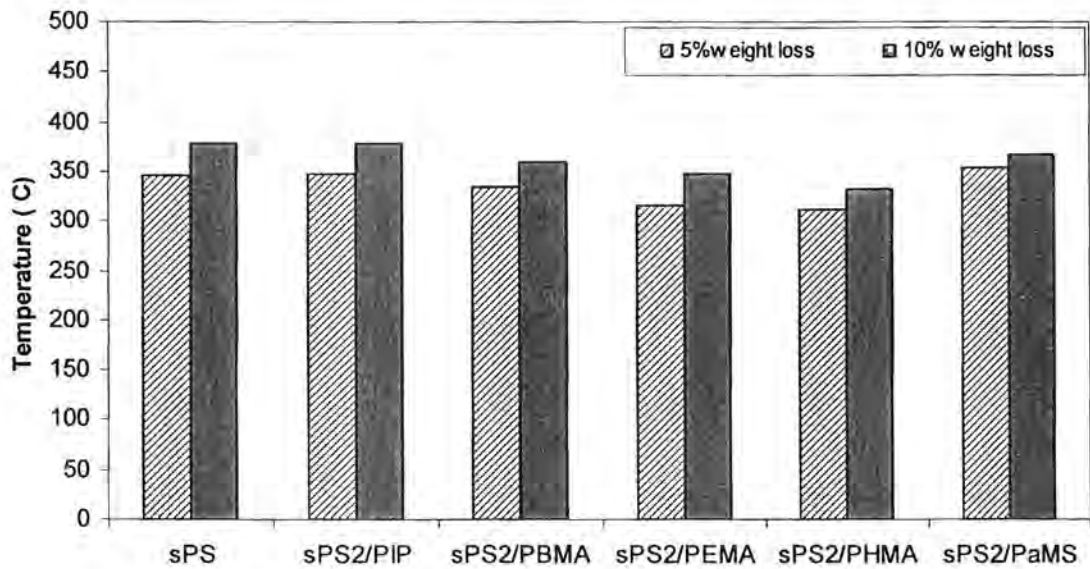
จากการวัดการทนต่อความร้อนของ sPS2 และพอลิเมอร์ผสมโดยเครื่อง Thermal Gravimetric Analysis (TGA) ที่วัดน้ำหนักของตัวอย่างที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 20°C ต่อนาทีโดยตรวจวัดระหว่างอุณหภูมิ 50-400°C ภายใต้บรรยากาศ N<sub>2</sub> ที่อัตราการไหล 100 ml/min การทนต่อความร้อนจะวัดได้จากอุณหภูมิเมื่อน้ำหนักของพอลิเมอร์หายไป 5% และ 10% ตามลำดับ ทั้งนี้การที่มีอุณหภูมิตั้งกล่าวสูงจะเป็นการแสดงว่าพอลิเมอร์ดังกล่าวสามารถจะทนต่อความร้อนได้ดีกว่า เมื่อนำตัวอย่างระบบของ sPS2 มาตรวจสอบด้วยเครื่องดังกล่าวจะสามารถสรุปเป็นข้อมูลได้ดังนี้

ตารางที่ 3.4 Sample temperature at 5 % and 10 % weight loss<sup>a</sup>

Blending system	Temperature at 5% weight loss (°C)	Temperature at 10% weight loss (°C)
sPS2	345.94	377.48
sPS2/PIP	347.26	377.67
sPS2/PBMA	335.13	359.81
sPS2/PEMA	316.38	348.50
sPS2/PHMA	311.72	333.18
sPS2/PaMS	353.19	366.99

<sup>a</sup>Obtained from TGA





รูปที่ 3.1 Temperature at 5% and 10% weight loss for blending system

จากตารางและกราฟดังกล่าวจะสามารถสรุปได้ว่า การทนต่อความร้อนของ sPS เมื่อผสมพอลิเมอร์อีกชนิดลงไป จะทำให้การทนต่อความร้อนของ sPS เปลี่ยนไป โดยจะมีแนวโน้มที่ลดลงแต่ไม่มากนัก อุณหภูมิน้ำหนักลด 5% และ 10% ของพอลิเมอร์ผสม PIP มีค่าสูงที่สุด และต่ำที่สุดเป็นของพอลิเมอร์ผสม PHMA การประยุกต์ใช้งานที่อุณหภูมิสูงจำเป็นต้องทดสอบความทนต่อความร้อนเนื่องจากเมื่อพอลิเมอร์เกิดการสลายตัวจะสูญเสียน้ำหนักและทำให้สมบัติทางกลมีค่าที่ด้อยลง

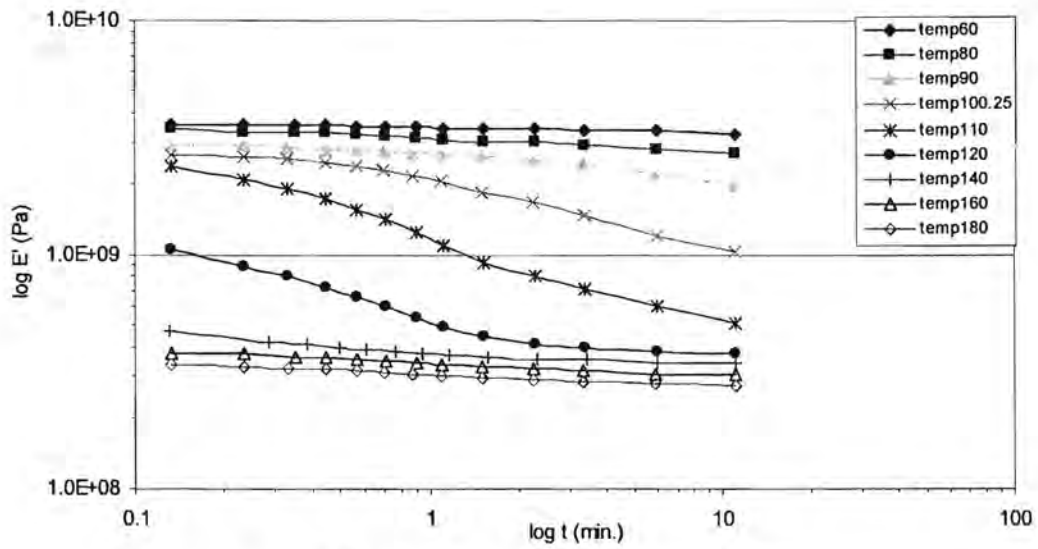
### 3.3 สมบัติทางกลโดย DMA

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ผสมและพอลิเมอร์บริสุทธิ์ (sPS1, sPS2) โดยการใช้ Dynamic Mechanical Analysis (DMA) ซึ่งจะทดสอบในช่วงอุณหภูมิต่างๆ โดยจะวัดสมบัติ  $E'$ ,  $E''$ ,  $\tan \delta$  ซึ่งเป็นค่าโมดูลัสที่อุณหภูมิต่างๆเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา  $5^\circ/\text{min}$  ค่าโมดูลัส  $E'$  จะแสดงถึงความสามารถในการรับแรงในทำนองเดียวกับค่า tensile modulus ส่วนค่า  $E''$  จะวัดพลังงานที่เปลี่ยนไปเป็นความร้อนอันเนื่องมาจากการรับแรง (Loss Modulus) และค่า  $\tan \delta$  แสดงค่า  $E''/E'$  ซึ่งจะมีค่าสูงเมื่อสามารถรับแรงได้ดี นอกจากนี้ยังสามารถบอกถึงค่า  $T_g$  ได้โดยการสังเกตจุดยอดของ  $\tan \delta$  ได้อีกด้วย

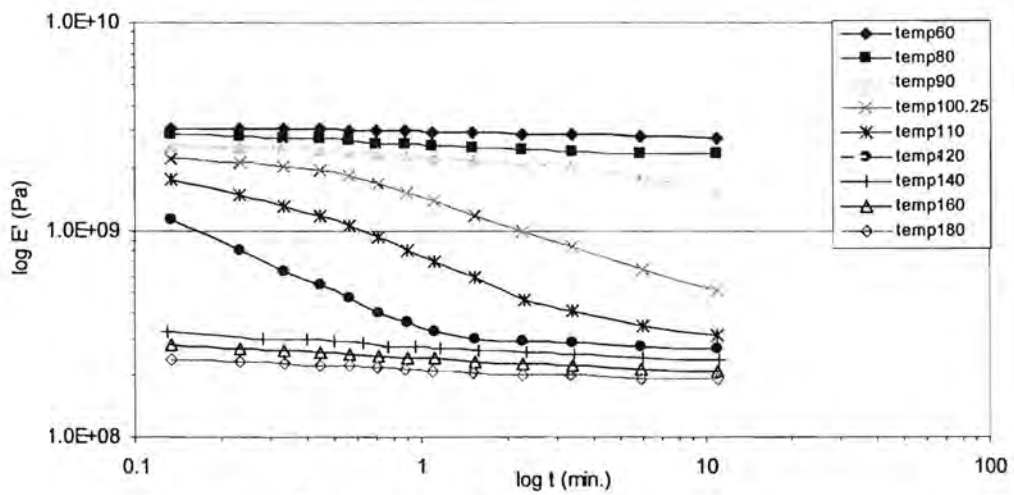
### 3.4 ผลกระทบเนื่องจากอุณหภูมิและเวลา

เครื่อง DMA จะทำการวัดค่า  $E'$  ที่ความถี่ต่างๆ ตลอดช่วงอุณหภูมิที่กำหนด โดยจะวัดค่า  $E'$  ตามช่วงความถี่เรียงลำดับไป เช่น วัดที่ความถี่ 0.1, 1, 10 Hz เรียงไปที่ละความถี่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ด้วยอัตราคงที่โดยตลอด จากค่า  $E'$  ที่แต่ละความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆก็จะสามารถคำนวณหาค่าเวลาที่รับแรงหรืออีกนัยหนึ่งส่วนกลับของความถี่ที่อุณหภูมิต่างๆ เมื่อนำค่า  $E'$  และเวลาที่อุณหภูมิต่างๆมาแสดงเป็นกราฟ โดยลากเส้นเชื่อมต่อที่อุณหภูมิเดียวกัน จะได้กราฟดังแสดงดังต่อไปนี้

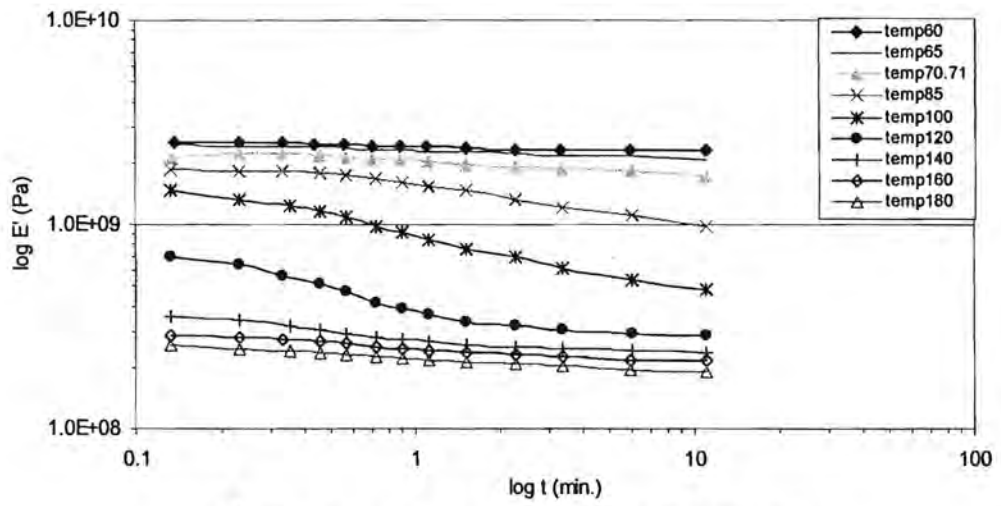
ที่เวลารับแรงสูงๆ หรือความถี่ต่ำๆ พอลิเมอร์จะมีเวลาจัดเรียงตัวเพื่อการรับแรงที่มากกว่า จึงทำให้ค่า  $E'$  มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มเวลาที่อุณหภูมิต่ำๆ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อุณหภูมิ  $T_g$  การเพิ่มเวลาในการรับแรงหรือการลดความถี่ จะทำให้ค่า  $E'$  ลดลงเป็นอย่างมากที่เวลาเพิ่มขึ้นและความถี่ลดลง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  จะไม่สามารถขยับได้อย่างอิสระทำให้พลังงานที่รับได้มีค่าสูง แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า  $T_g$  พอลิเมอร์โมเลกุลจะสามารถเคลื่อนที่ได้โดยง่ายและอิสระมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการคืนพลังงานมีค่าลดลงนั่นคือ  $E'$  จะมีค่าลดลงที่อุณหภูมิที่สูงขึ้นเมื่อเทียบเวลาเดียวกันจะสังเกตเห็นได้ว่าค่า  $E'$  จะมีค่าลดลงตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากความสามารถในการรับแรงจะลดลงเมื่อโมเลกุลใช้พลังงานที่น้อยลงในการรับแรง หรือพลังงานที่ป้อนให้ในช่วงเวลาที่กำหนดจะสามารถเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลได้ง่ายกว่าเมื่อระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้น ค่า  $E'$  ที่เวลาและอุณหภูมิต่างๆจะสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



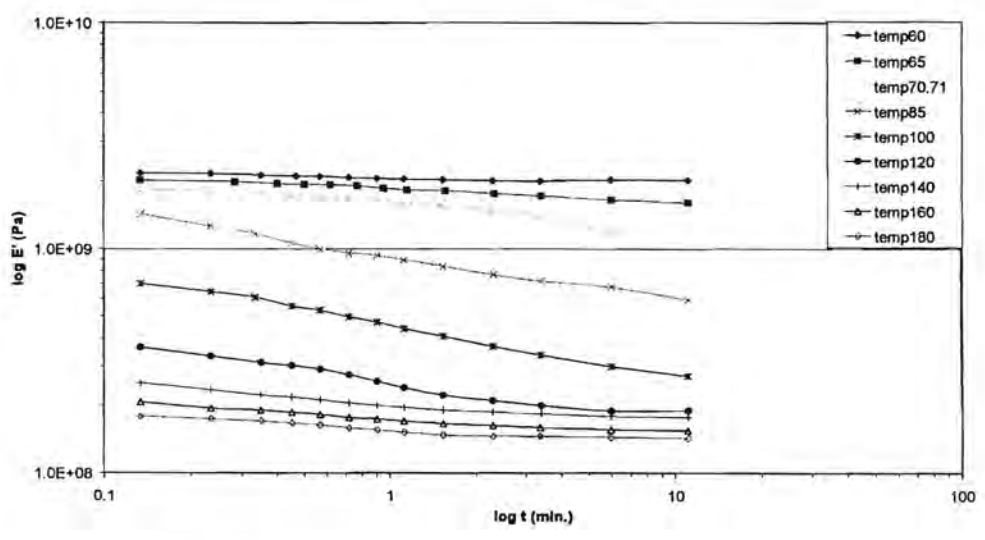
รูปที่ 3.2  $E'$  curve as time function for sPS1



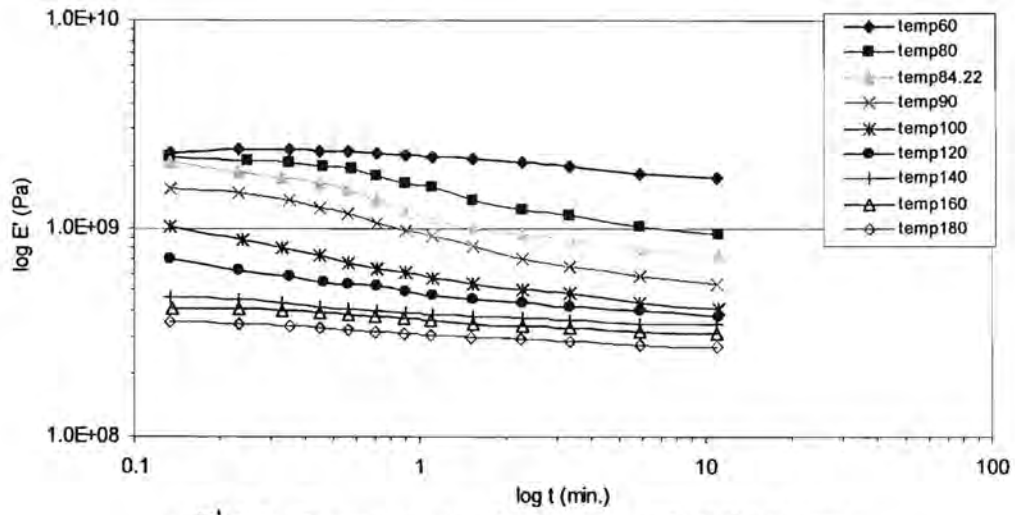
รูปที่ 3.3  $E'$  curve as time function for sPS2



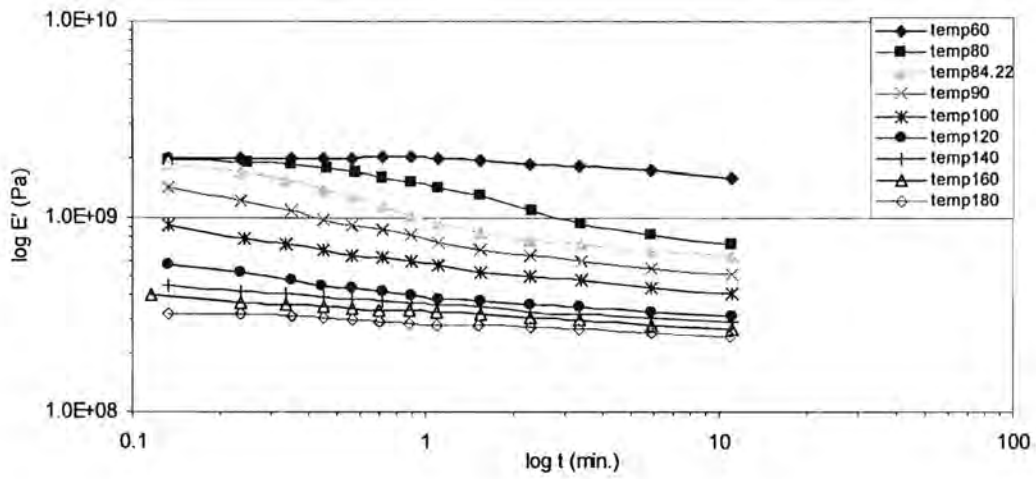
รูปที่ 3.4  $E'$  curve as time function for sPS1/PIP blend



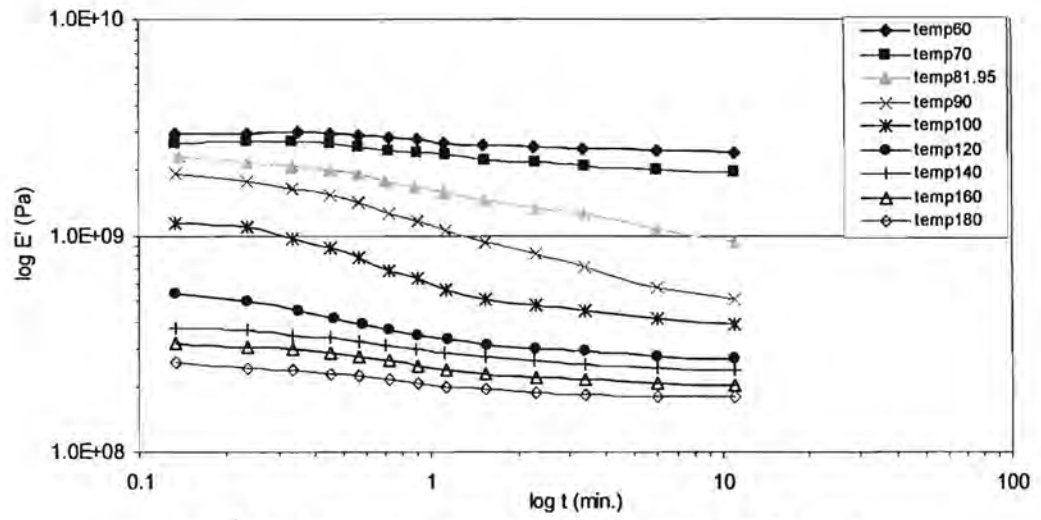
รูปที่ 3.5  $E'$  curve as time function for sPS2/PIP blend



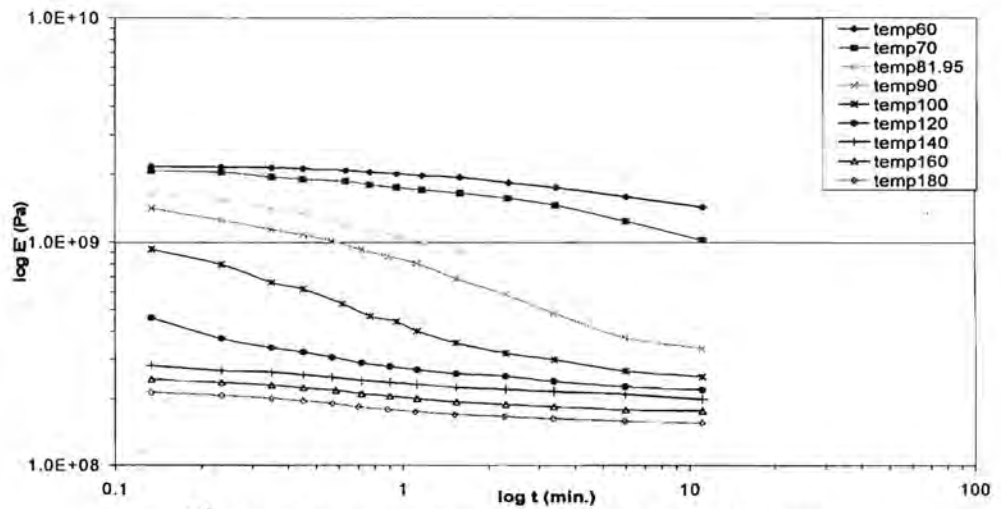
รูปที่ 3.6 E' curve as time function for sPS1/PBMA blend



รูปที่ 3.7 E' curve as time function for sPS2/PBMA blend

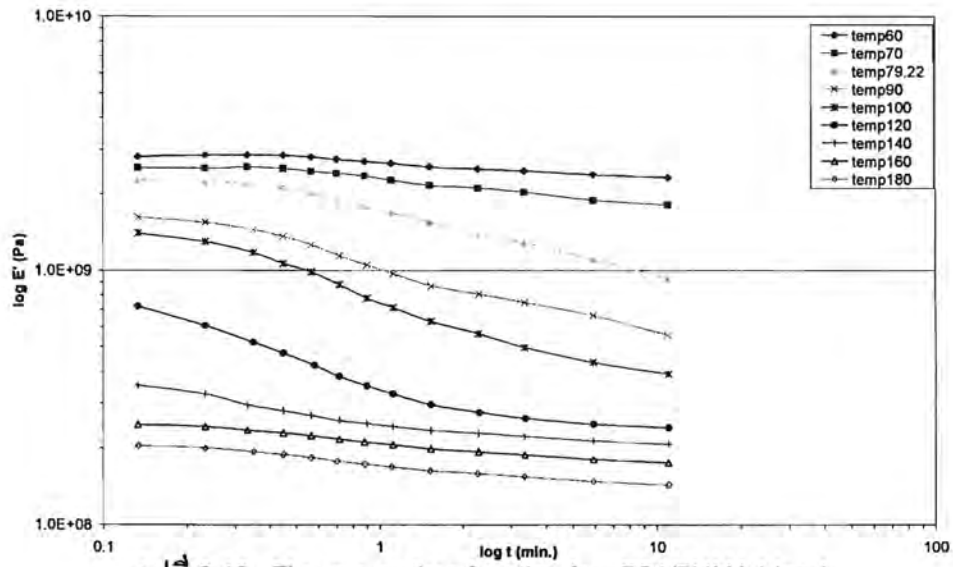


รูปที่ 3.8  $E'$  curve as time function for sPS1/PEMA blend

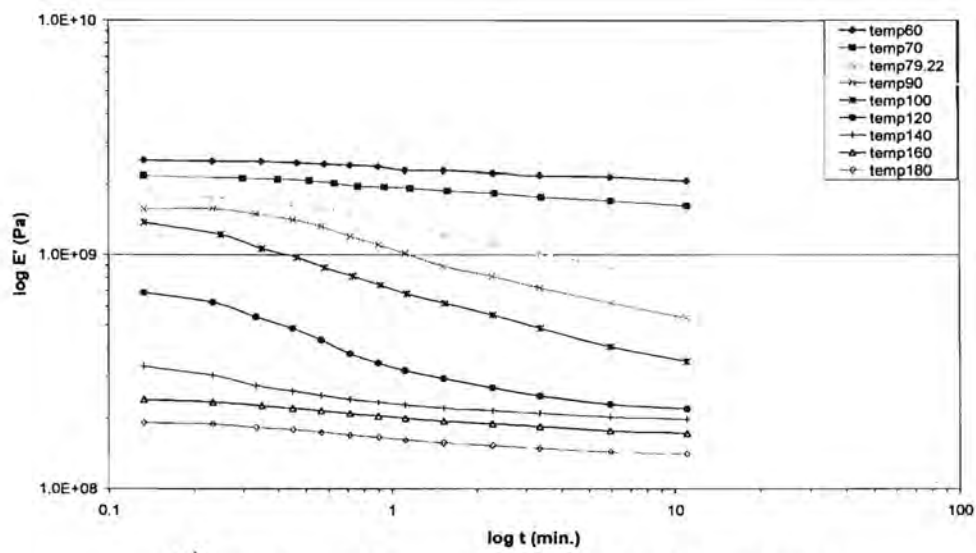


รูปที่ 3.9  $E'$  curve as time function for sPS2/PEMA blend

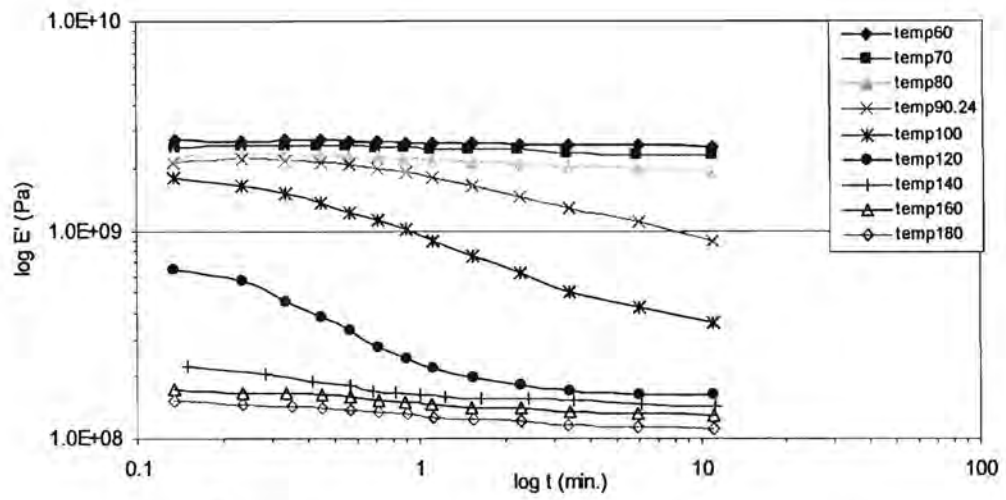




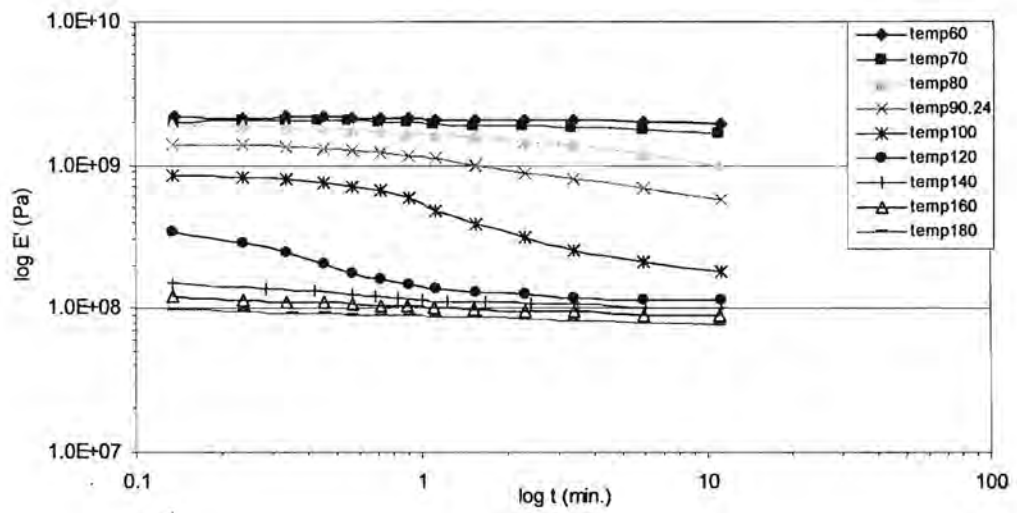
รูปที่ 3.10  $E'$  curve as time function for sPS1/PHMA blend



รูปที่ 3.11  $E'$  curve as time function for sPS2/PHMA blend



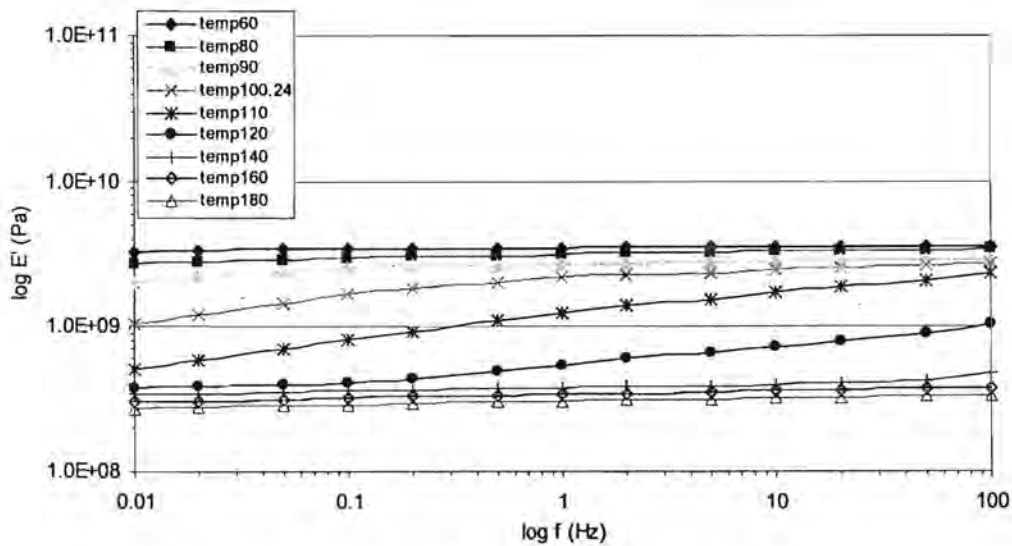
รูปที่ 3.12  $E'$  curve as time function for sPS1/PaMS blend



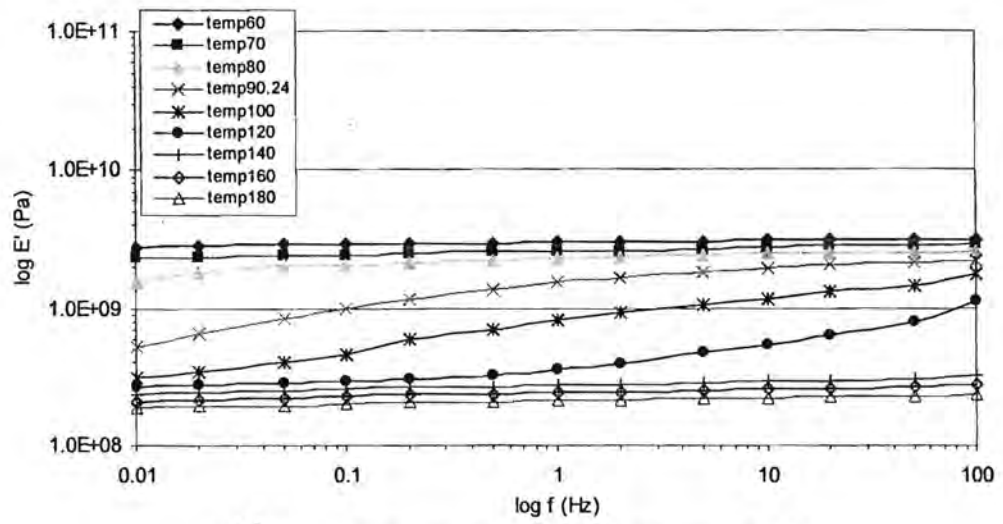
รูปที่ 3.13  $E'$  curve of time as time function for sPS2/PaMS blend

### 3.5 ผลกระทบเนื่องจากความถี่

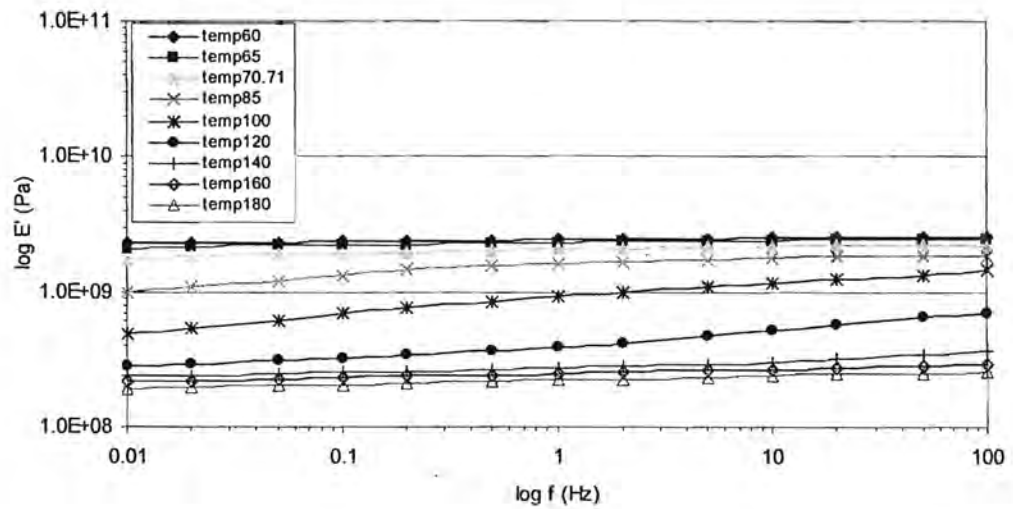
ความถี่ของการให้แรงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.01 ถึง 10 Hz ( $s^{-1}$ ) และเมื่อทดสอบค่า  $E'$  จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความถี่สูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความถี่สูงแรงที่ป้อนลงบนชิ้นงานในช่วงเวลาหนึ่งๆจะมีช่วงเวลาคืนตัวต่ำหรือแรงที่ป้อนให้ชิ้นงานจะมีช่วงที่ให้แรงที่สั้นกว่า ทำให้สามารถเก็บพลังงานกลับคืนได้สูงกว่าในช่วงที่มีความถี่ต่ำเนื่องจากความถี่เป็นส่วนกลับของเวลา การตอบสนองต่อความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะเป็นการตอบสนองต่อเวลาที่ลดลง  $E'$  จึงมีการตอบสนองในทิศที่กลับกับการตอบสนองของเวลา อันจะสามารถสรุปได้ในกรณีเดียวกับเวลา ที่อุณหภูมิค่า  $E'$  จะมีค่าสูงและเมื่อลดความถี่ค่า  $E'$  จะมีค่าลดลง เมื่อการเพิ่มอุณหภูมิอยู่ในช่วง  $T_g$  ค่า  $E'$  จะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วโดยเมื่อลดความถี่ค่า  $E'$  จะมีค่าลดลงอย่างยิ่ง และที่เหนืออุณหภูมิ  $T_g$  โมเลกุลพอลิเมอร์จะเคลื่อนที่ได้เป็นอิสระมากขึ้น ทำให้ความสามารถในการคืนแรงมีค่าต่ำลง อันจะทำให้ค่า  $E'$  มีค่าลดลง



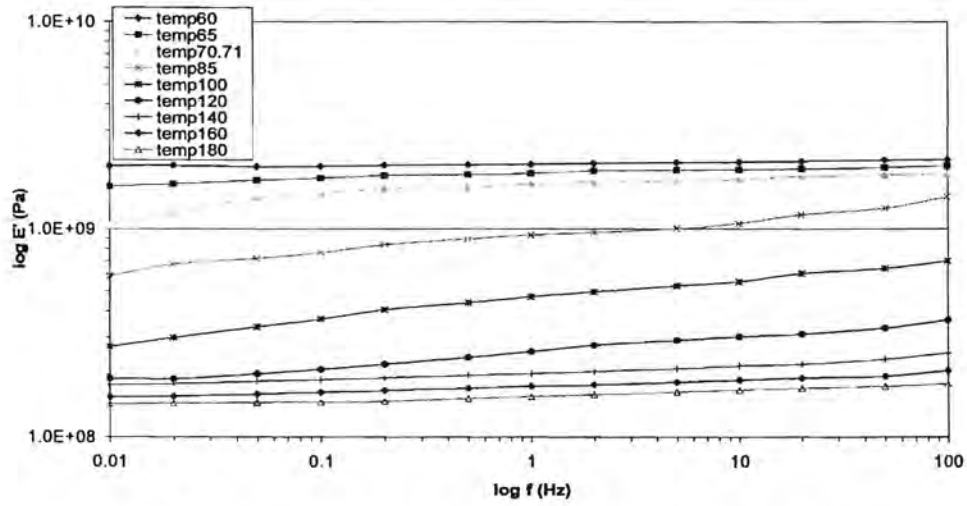
รูปที่ 3.14  $E'$  curve as frequency function for SPS1



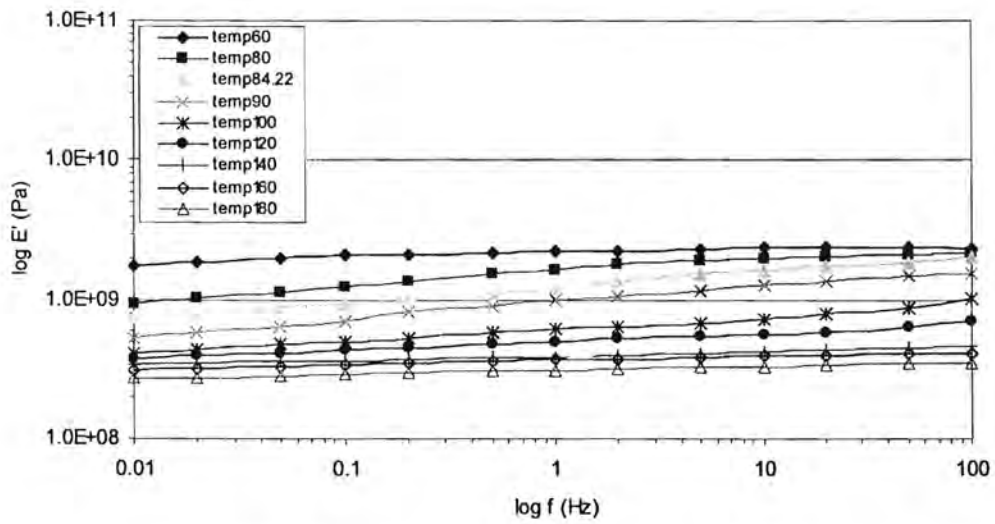
รูปที่ 3.15  $E'$  curve as frequency function for sPS2



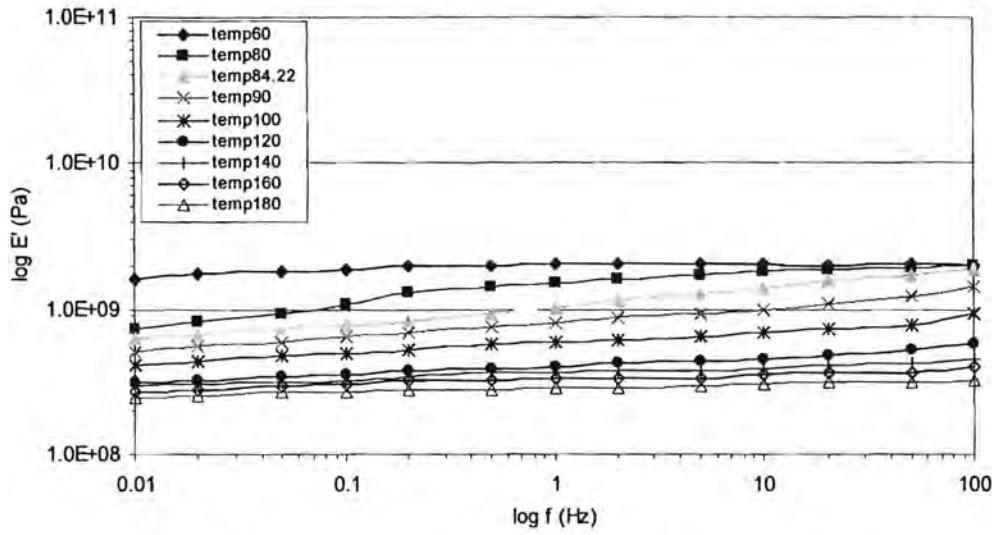
รูปที่ 3.16  $E'$  curve as frequency function for sPS1/PIP blend



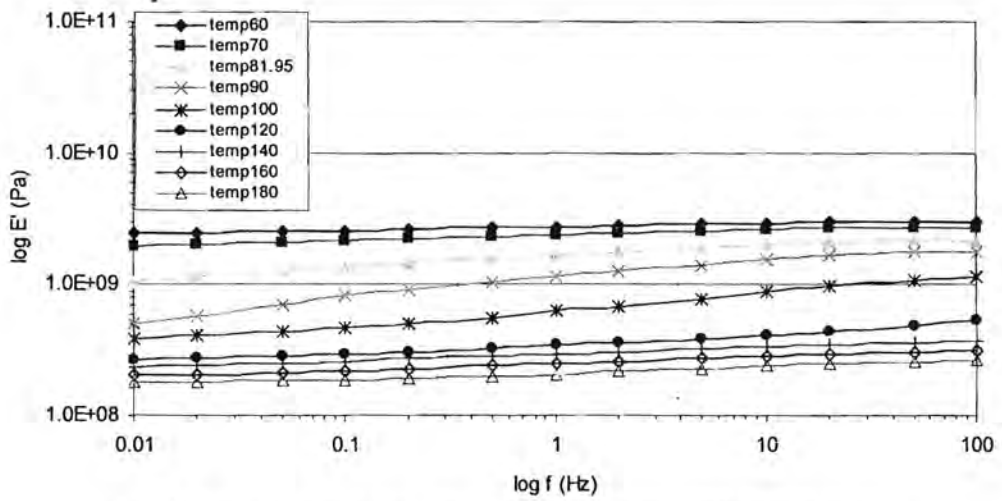
รูปที่ 3.17 E' curve as frequency function for sPS2/PIP blend



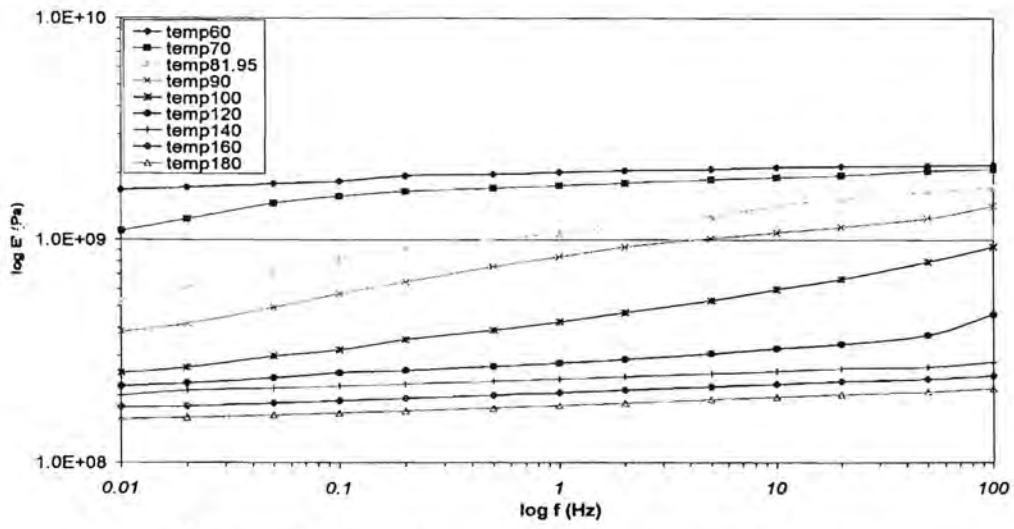
รูปที่ 3.18 E' curve as frequency function for sPS1/PBMA blend



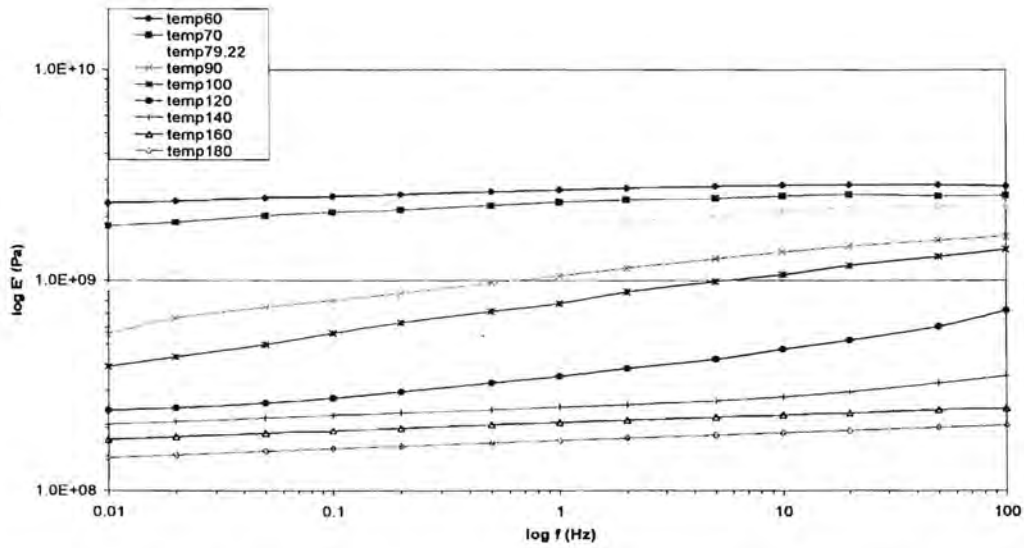
รูปที่ 3.19  $E'$  curve as frequency function for sPS2/PBMA blend



รูปที่ 3.20  $E'$  curve as frequency function for sPS1/PEMA blend

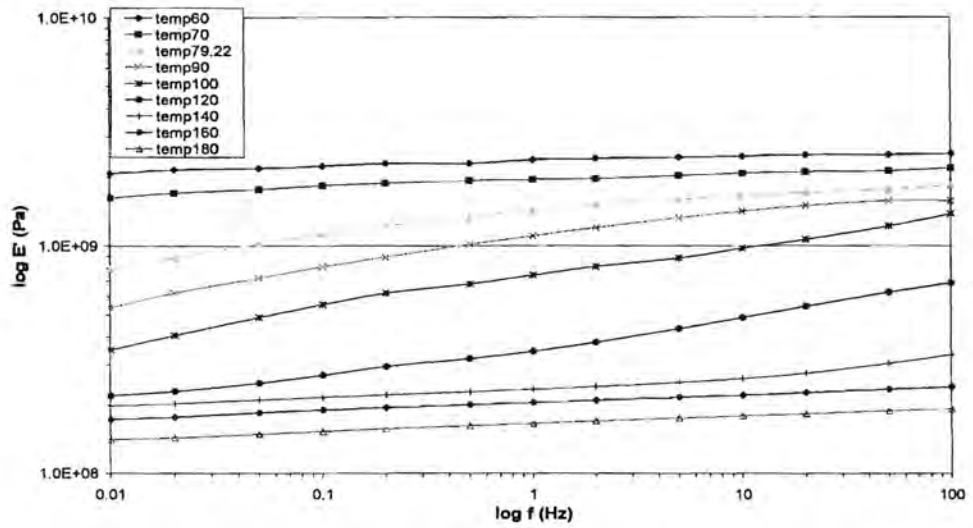


รูปที่ 3.21  $E'$  curve as frequency function for sPS2/PEMA blend

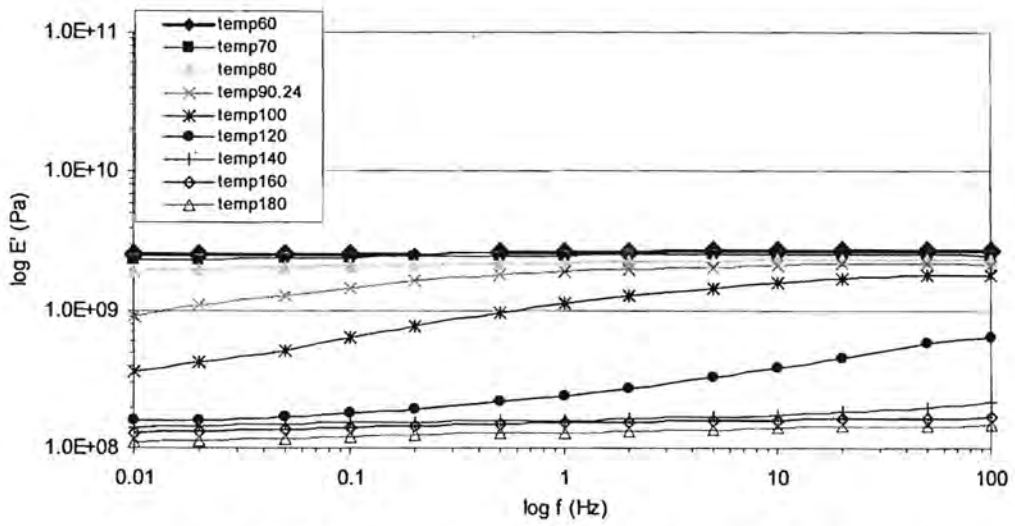


รูปที่ 3.22  $E'$  curve as frequency function for sPS1/PHMA blend

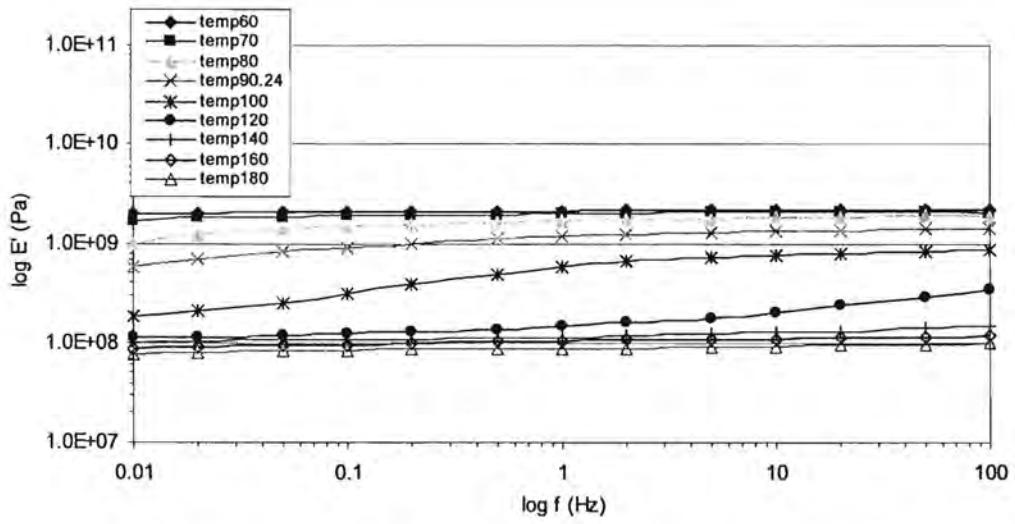




รูปที่ 3.23 E' curve as frequency function for sPS2/PHMA blend



รูปที่ 3.24 E' curve as frequency function for sPS1/PaMS blend

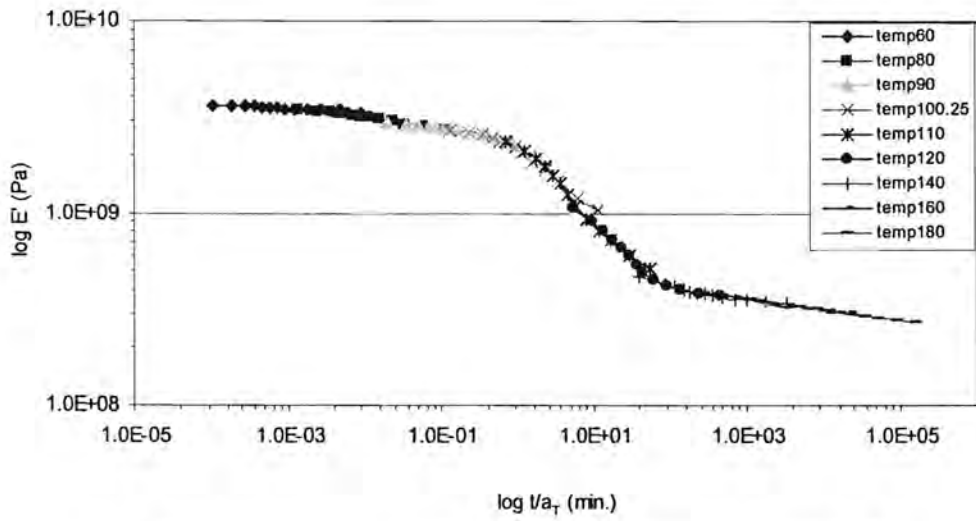


รูปที่ 3.25  $E'$  curve as frequency function for sPS2/PaMS blend

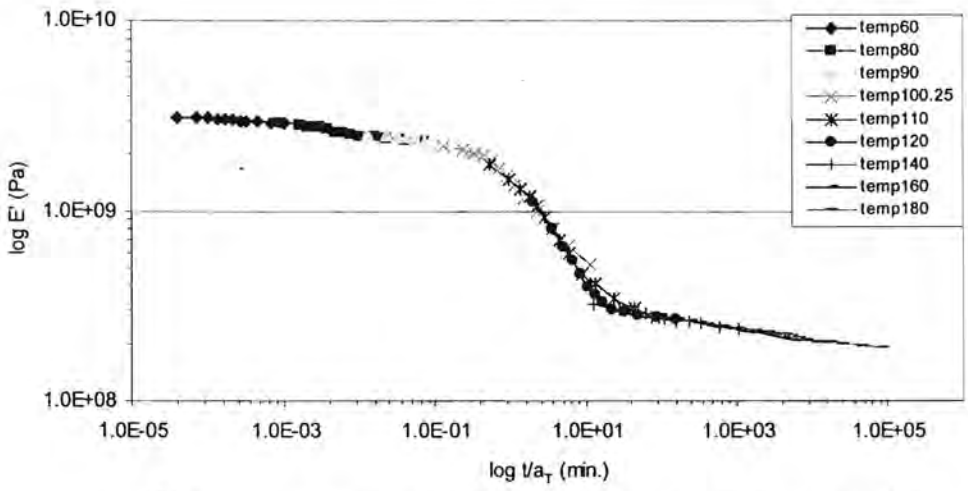
### 3.6 การสร้างกราฟการรับแรงรวมโดยการใช้ Time-Temperature Superposition (TTS)

ในขั้นนี้กราฟรอยยอดที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $E'$  และเวลาโดยที่จะสร้างกราฟจากการเปลี่ยนค่าในแกนเวลาให้เลื่อนไปด้านข้างโดยการหารค่าในแกน  $X$  ด้วยค่า  $a_T$  ซึ่งเป็นค่าคงที่หรือคือการเลื่อนกราฟไปด้านข้างจนซ้อนทับกันกับกราฟที่ยึดถือเป็นหลักที่ค่า  $T_g$  ทั้งนี้เนื่องจากค่า  $T_g$  เป็นค่ามาตรฐานที่มีการเปลี่ยนแปลงของ  $E'$  มากที่สุดและโดยมากจะยึดถือเป็นอุณหภูมิที่บ่งบอกการใช้งานของพอลิเมอร์ พอลิเมอร์ที่มีการใช้งานในช่วงหยุ่นเหนียวจะใช้งานในช่วงที่สูงกว่าค่า  $T_g$  และพอลิเมอร์ที่ใช้งานในช่วงแข็งเกร็งจะใช้งานในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่าค่า  $T_g$  และโดยปกติแล้วหากพอลิเมอร์ไม่มีผลึก จะใช้งานในช่วงที่เป็นการแข็งเกร็งและพอลิเมอร์ที่มีผลึกจะใช้งานในช่วงหยุ่นเหนียว ทั้งนี้เนื่องจากจะให้ค่าความทนทานที่ดีที่สุดตามลักษณะของพอลิเมอร์ ส่วน sPS การใช้งานจะมองความหยุ่นเหนียวเป็นหลักเนื่องจากเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถเกิดผลึกได้ แต่การใช้งานพอลิโอสไตรีนชนิดอสัญฐานจะใช้งานในช่วงที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$

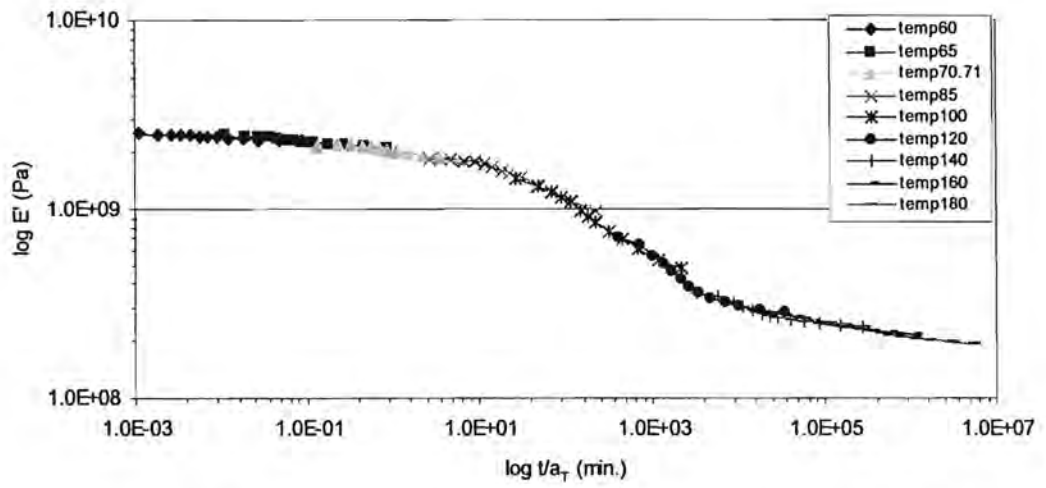
การเลื่อนกราฟไปด้านข้างทั้งสองด้านนี้เป็นการประมาณการใช้งานที่เวลาต่างไปจาก 1 วินาทีที่ถือเอาค่า  $T_g$  และกราฟของ  $E'$  เป็นหลัก โดยธรรมชาติแล้วกราฟ  $E'$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  จะมีค่า  $E'$  ที่ต่ำกว่าค่า  $E'$  ที่อุณหภูมิ  $T_g$  และกราฟดังกล่าวเมื่อใช้ Time-Temperature superposition แล้วจะเลื่อนไปทางด้านขวา และเมื่อบางส่วนของกราฟซ้อนทับกันเป็นเนื้อเดียวแล้วส่วนที่ยื่นออกไปทางด้านขวาจะแสดงถึงการใช้งานรับแรงที่มีเวลาในการรับแรงที่นานขึ้น และในทำนองเดียวกันกับกราฟ  $E'$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่า  $T_g$  จะมีค่า  $E'$  สูงกว่าค่า  $E'$  ของอุณหภูมิมาตรฐาน ทำให้สามารถเลื่อนกราฟไปซ้อนทับกับกราฟหลักที่  $T_g$  โดยการเลื่อนไปทางซ้าย เมื่อบางส่วนของกราฟซ้อนทับกัน ส่วนที่ยื่นออกไปทางด้านซ้ายจะแสดงถึงการใช้งานรับแรงที่เวลาน้อยๆ หรือคือการรับแรงกระแทก เมื่อซ้อนทับและเลื่อนกราฟไปด้านข้างแล้วจะสามารถเขียนเป็นกราฟรับแรงหลักได้ดังสามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้



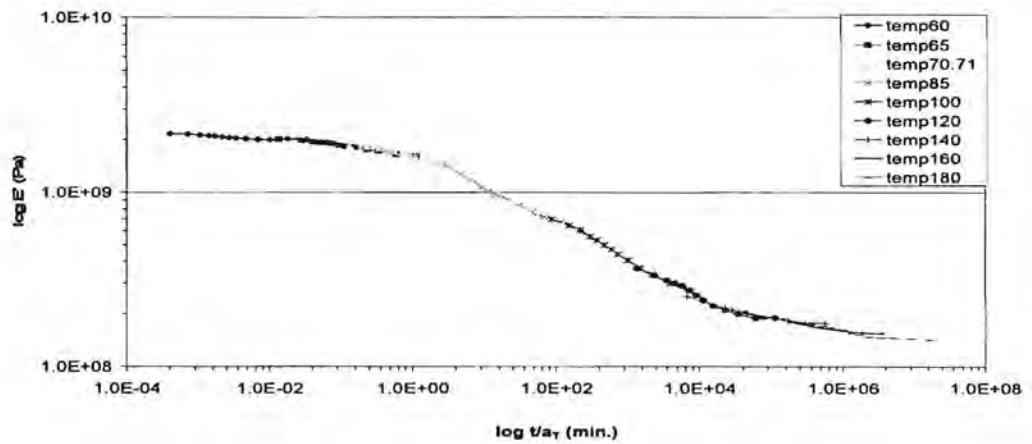
รูปที่ 3.26 Master curve for sPS1 as time function with  $T_r$  100.25 °C



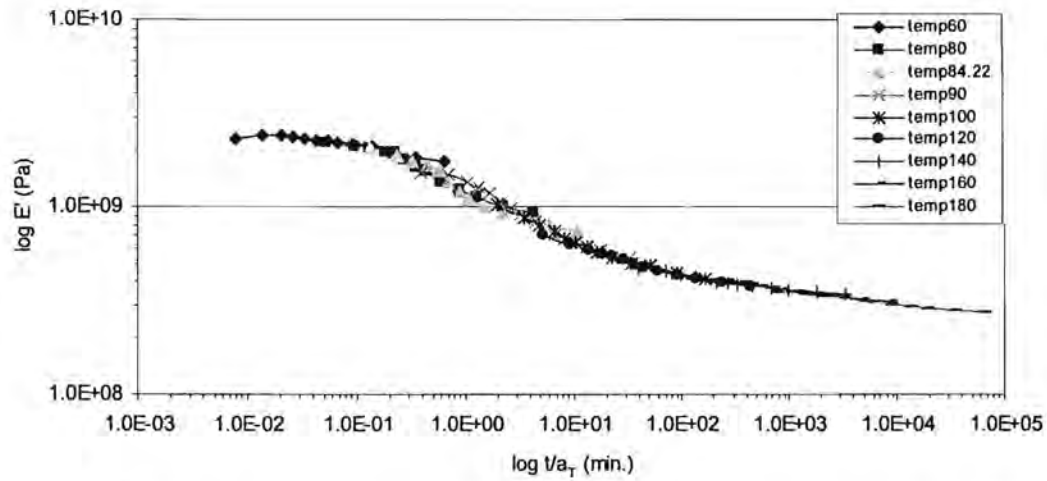
รูปที่ 3.27 Master curve for sPS2 as time function with  $T_r$  100.25 °C



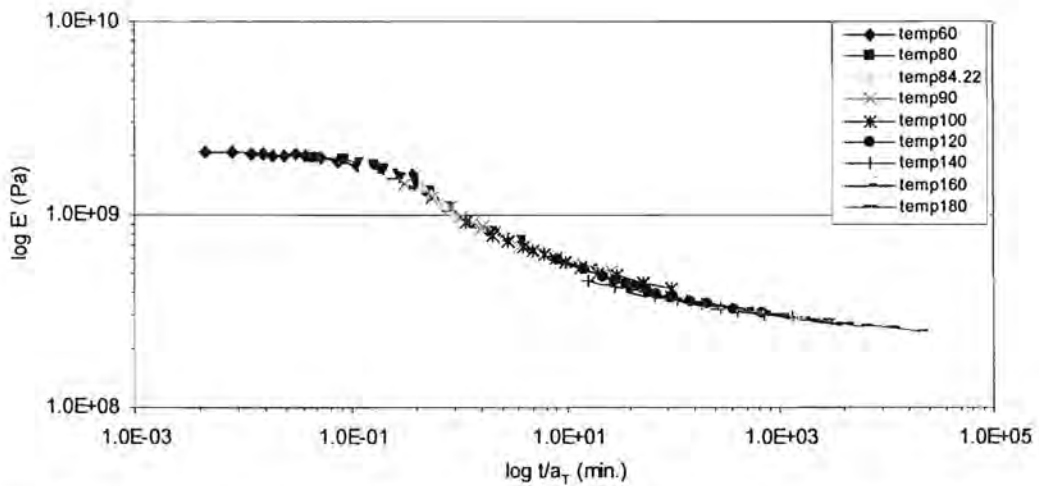
รูปที่ 3.28 Master curve for sPS2 as time function with  $T_r$  100.25 °C



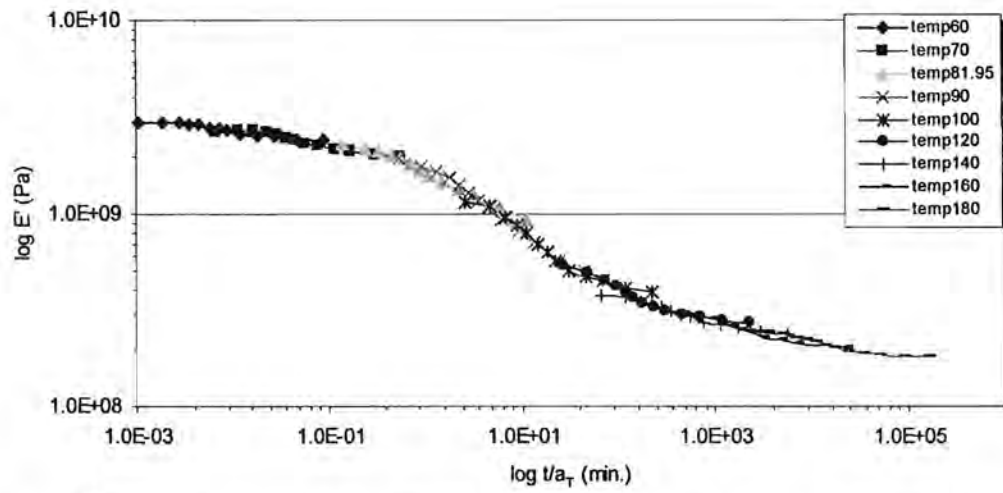
รูปที่ 3.29 Master curve for sPS2/PIP blend as time function with  $T_r$  70.71 °C



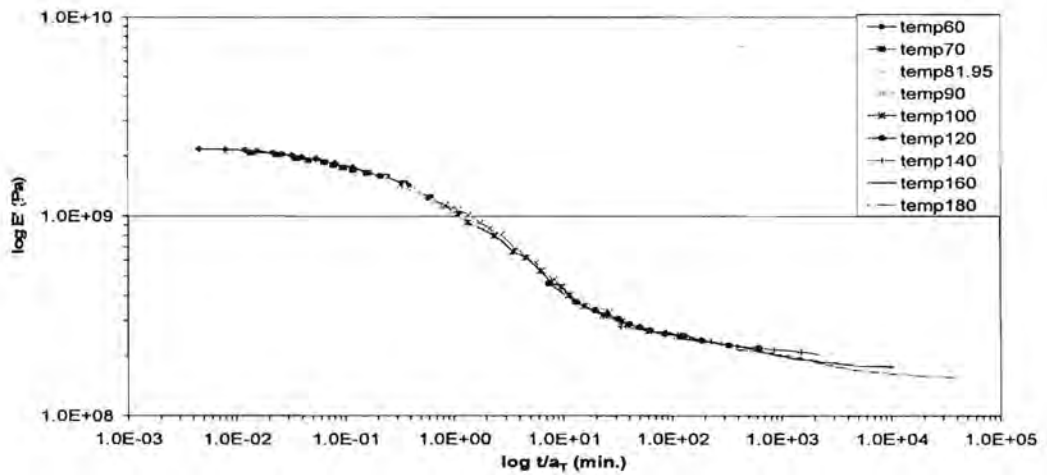
รูปที่ 3.30 Master curve for sPS1/PBMA blend as time function with  $T_r$  84.22 °C



รูปที่ 3.31 Master curve for sPS2/PBMA blend as time function with  $T_r$  84.22 °C

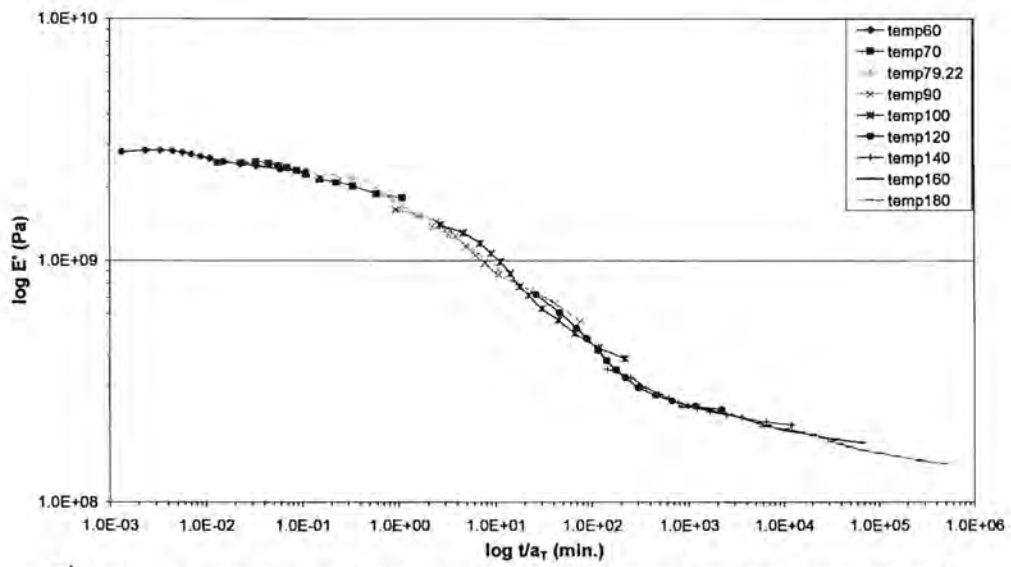


รูปที่ 3.32 Master curve for sPS1/PEMA blend as time function with  $T_r$ , 81.95 °C

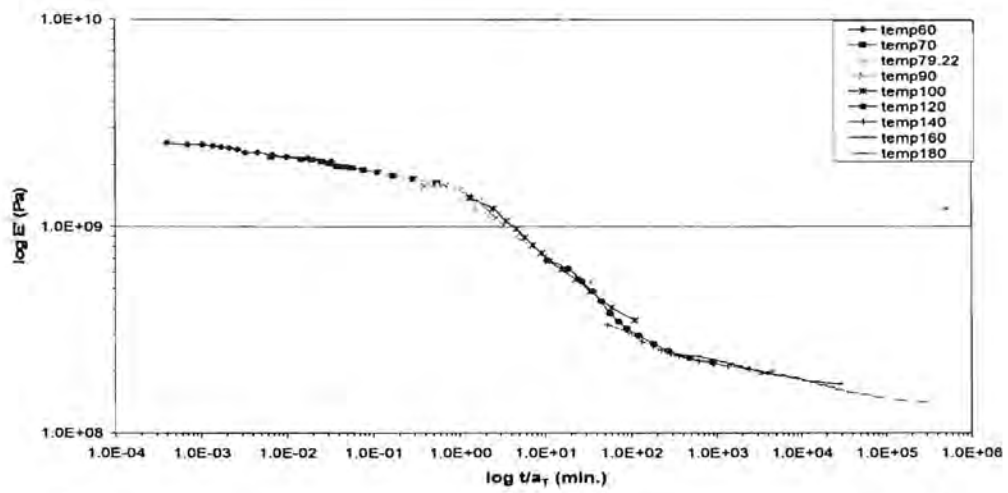


รูปที่ 3.33 Master curve for sPS2/PEMA blend as time function with  $T_r$ , 81.95 °C

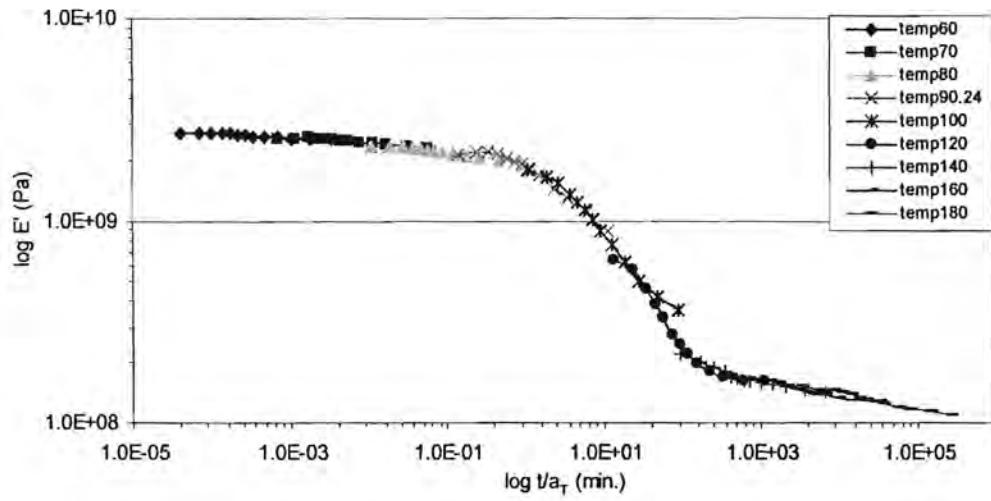




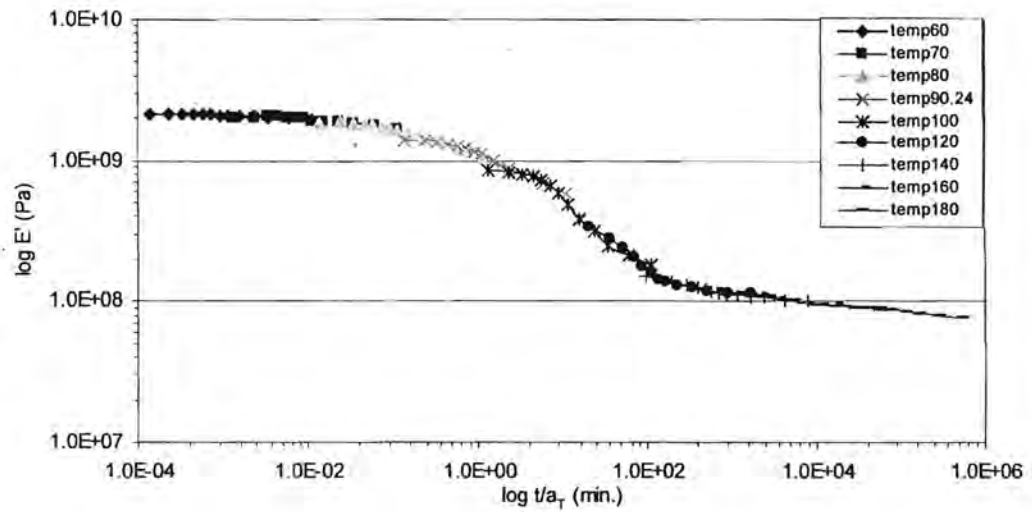
รูปที่ 3.34 Master curve for sPS1/PHMA blend as time function with  $T_r$  79.22 °C



รูปที่ 3.35 Master curve for sPS2/PHMA blend as time function with  $T_r$  79.22 °C

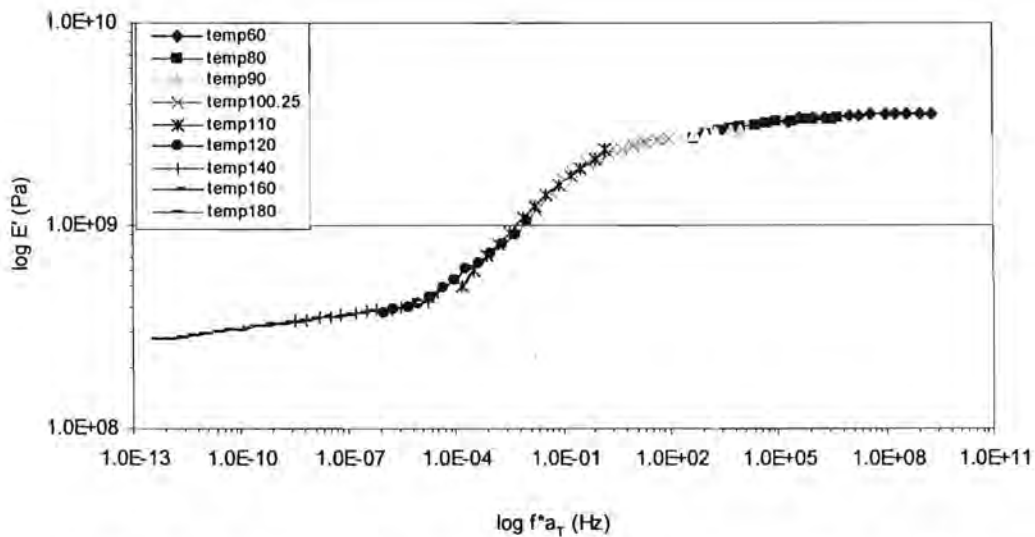


รูปที่ 3.36 Master curve for sPS1/PaMS blend as time function with  $T_r$  90.24 °C

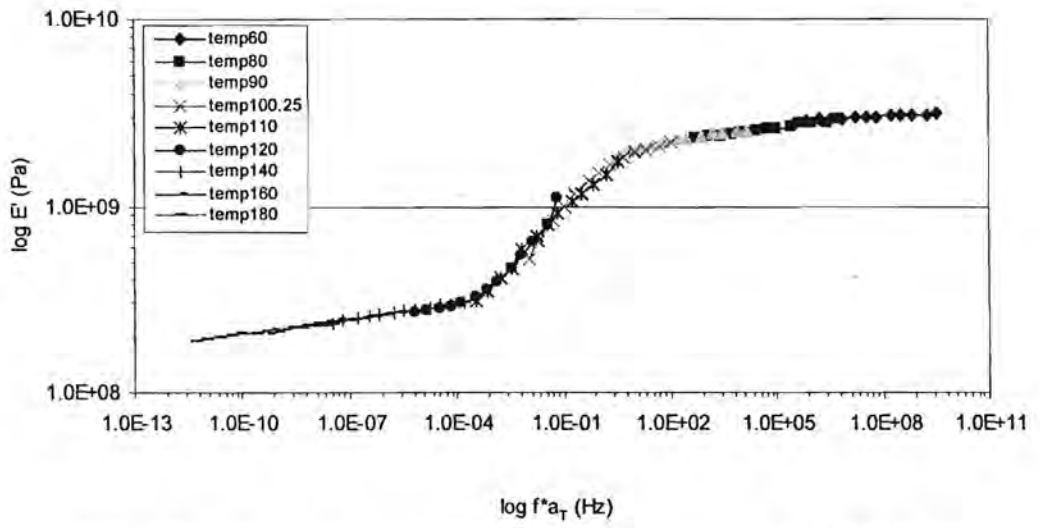


รูปที่ 3.37 Master curve for sPS2/PaMS blend as time function with  $T_r$  90.24 °C

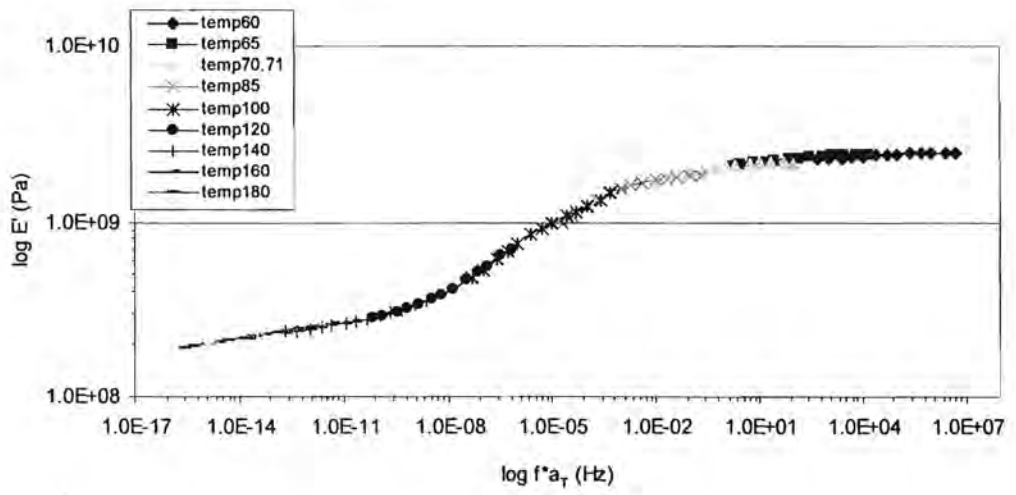
การที่สามารถเลื่อนกราฟ  $E'$  ที่อุณหภูมิต่างๆไปด้านข้างได้นี้จะทำให้สามารถประมาณการรับแรงที่มีจังหวะต่างออกไปที่อุณหภูมิอ้างอิง (ซึ่งในที่นี้คืออุณหภูมิ  $T_g$ ) ได้ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างยิ่งในการคำนวณการรับแรงที่มีเงื่อนไขการรับแรงที่สภาวะต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะสามารถสร้างกราฟรับแรงหลักนี้ได้ที่อุณหภูมิที่ออกแบบให้รับแรงโดยจะเลื่อนกราฟออกไปทั้งซ้ายและขวา โดยเทียบจากอุณหภูมิอ้างอิงและจะสามารถประมาณค่า  $E'$  ที่เงื่อนไขของการรับแรงต่างๆที่อุณหภูมินั้นๆได้ทันที ซึ่งอุณหภูมิที่ถือเป็นมาตรฐานจะมีค่ากลางเป็น 1 จินาที หรือนั่นคือการเปลี่ยนแปลงแกนนอนโดยแกนตั้งไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอ้างอิงไปที่อุณหภูมิอื่นๆ และกราฟการรับแรงหลัก ( $E'$ ) จะมีรูปร่างเหมือนเดิม นอกจากนี้ยังสามารถเขียนกราฟการรับแรงหลักให้เป็นตัวแปรของความถี่นอกเหนือจากอุณหภูมิได้อีกด้วยดังต่อไปนี้



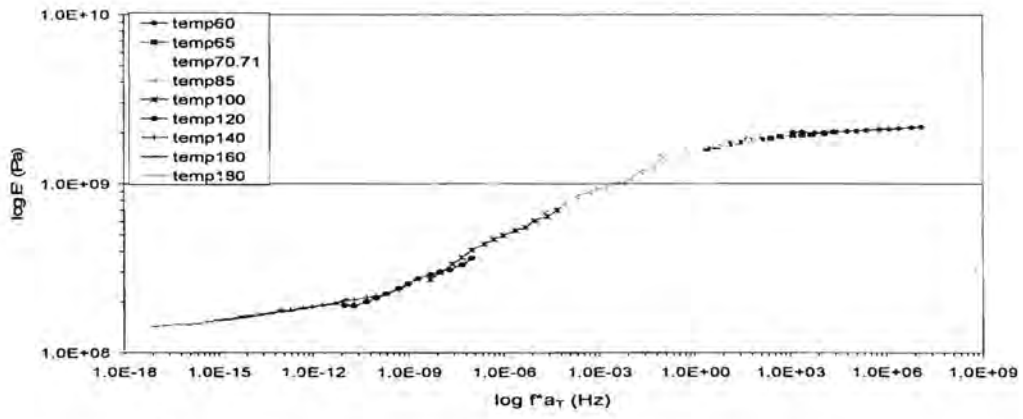
รูปที่ 3.38 Master curve for sPS1 as frequency function with  $T, 100.25^{\circ}\text{C}$



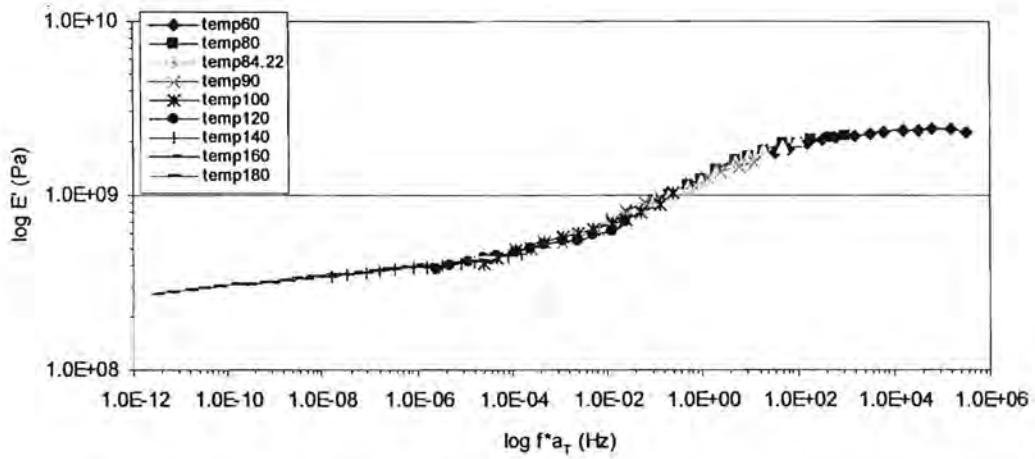
รูปที่ 3.39 Master curve for sPS2 as frequency function with  $T_r$  100.25 °C



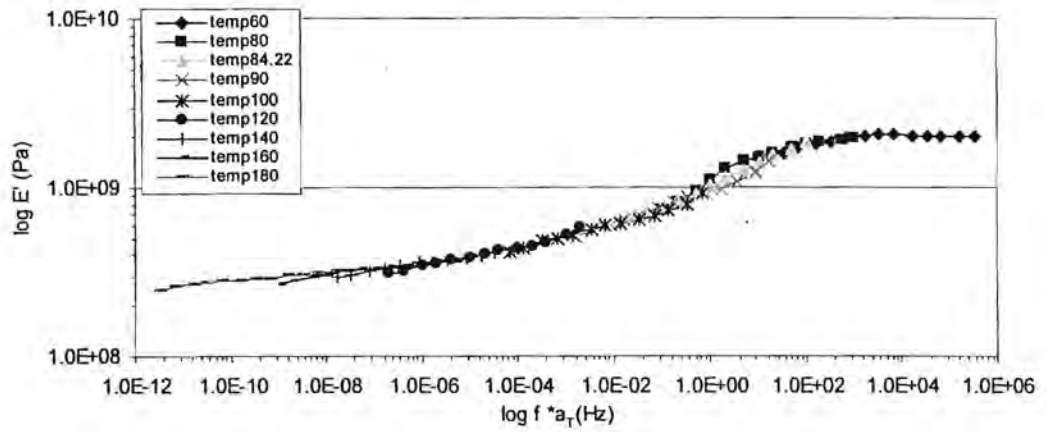
รูปที่ 3.40 Master curve for sPS1/PIP blend as frequency function with  $T_r$  70.71 °C



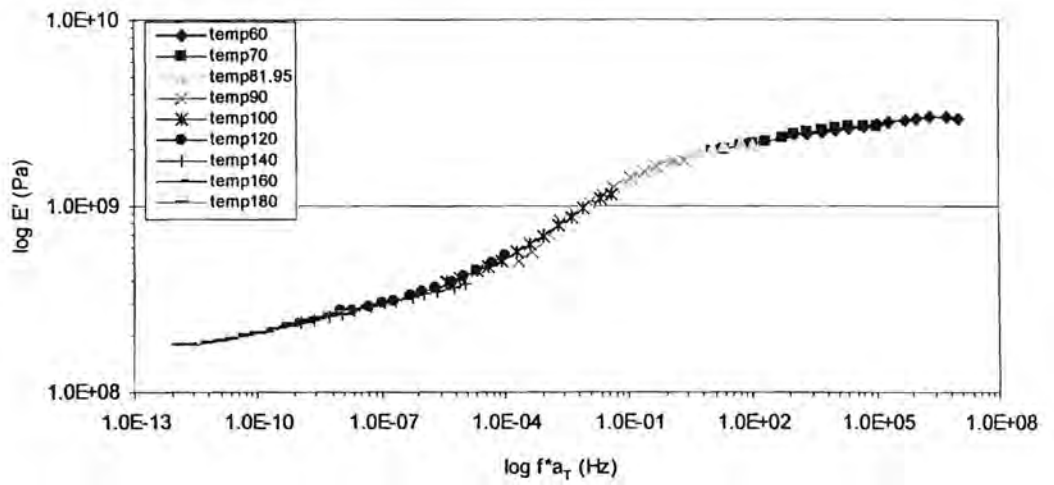
รูปที่ 3.41 Master curve for sPS2/PIP blend as frequency function  
with  $T_g$  70.71 °C



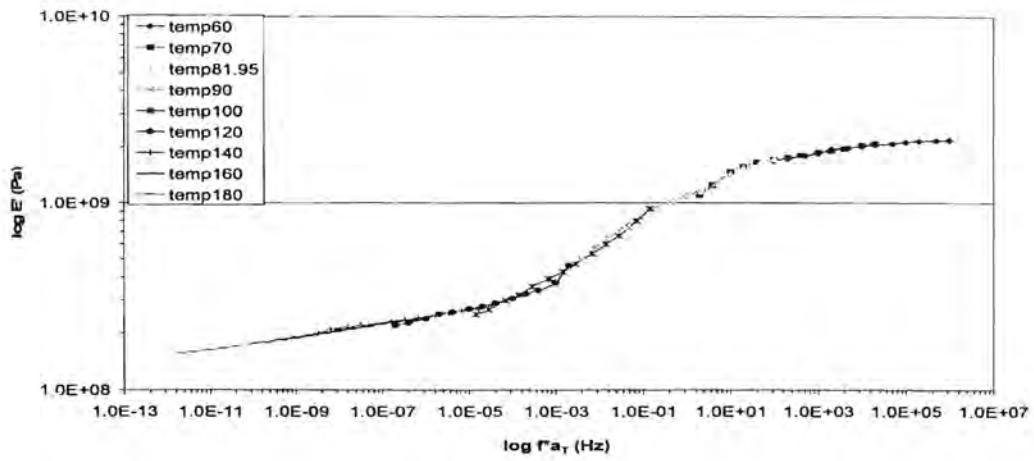
รูปที่ 3.42 Master curve for sPS1/PBMA blend as frequency function  
with  $T_g$  84.22 °C



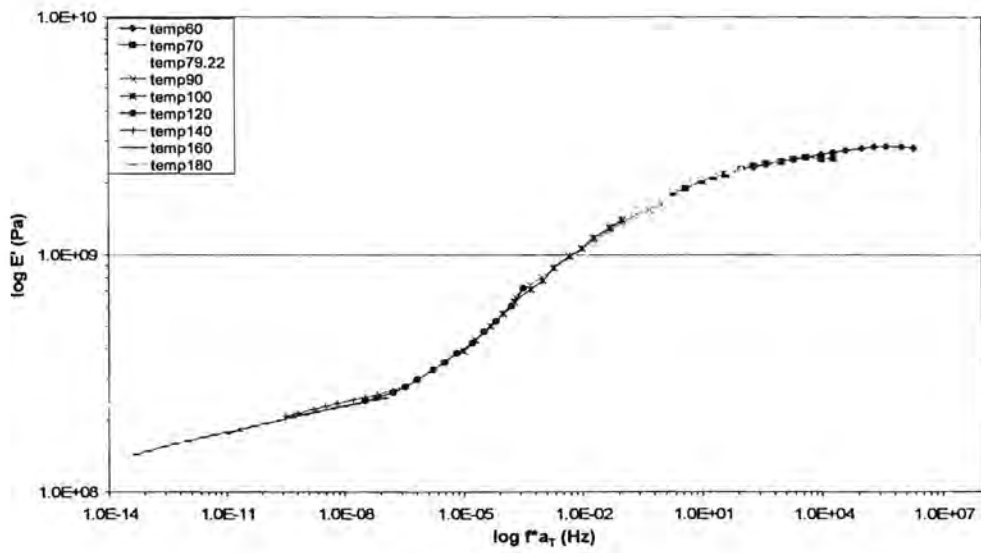
รูปที่ 3.43 Master curve for sPS2/PBMA blend as frequency function  
with  $T_r$  84.22 °C



รูปที่ 3.44 Master curve for sPS1/PEMA blend as frequency function  
with  $T_r$  81.95 °C

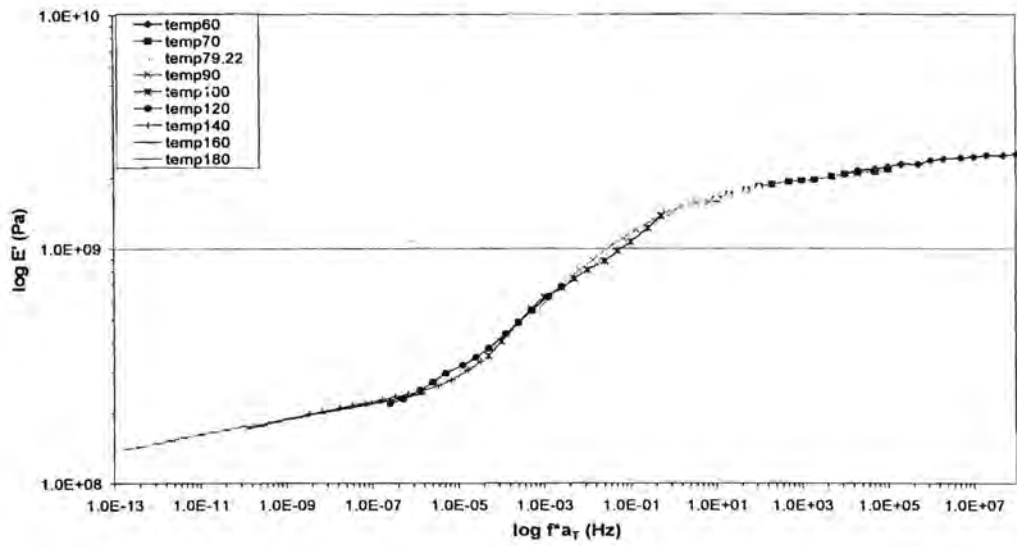


รูปที่ 3.45 Master curve for sPS2/PEMA blend as frequency function  
with  $T_g$  81.95°C

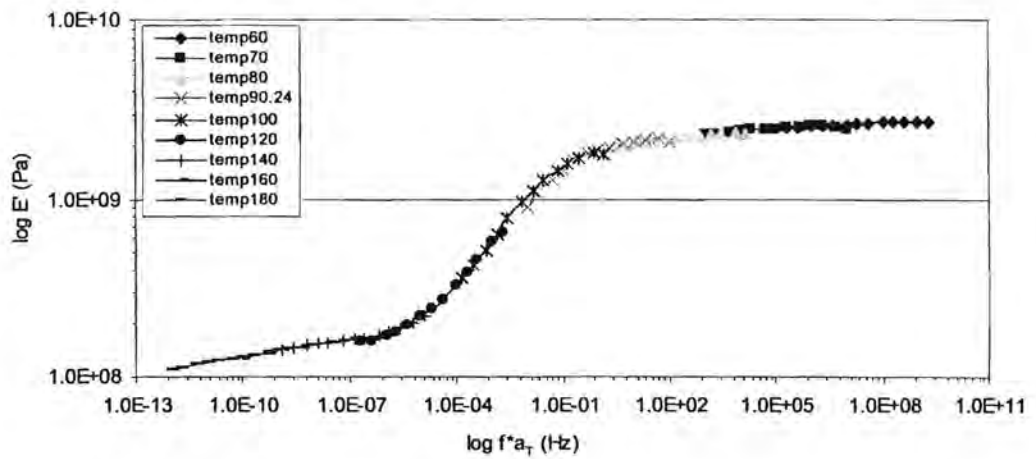


รูปที่ 3.46 Master curve for sPS1/PHMA blend as frequency function  
with  $T_g$  79.22°C

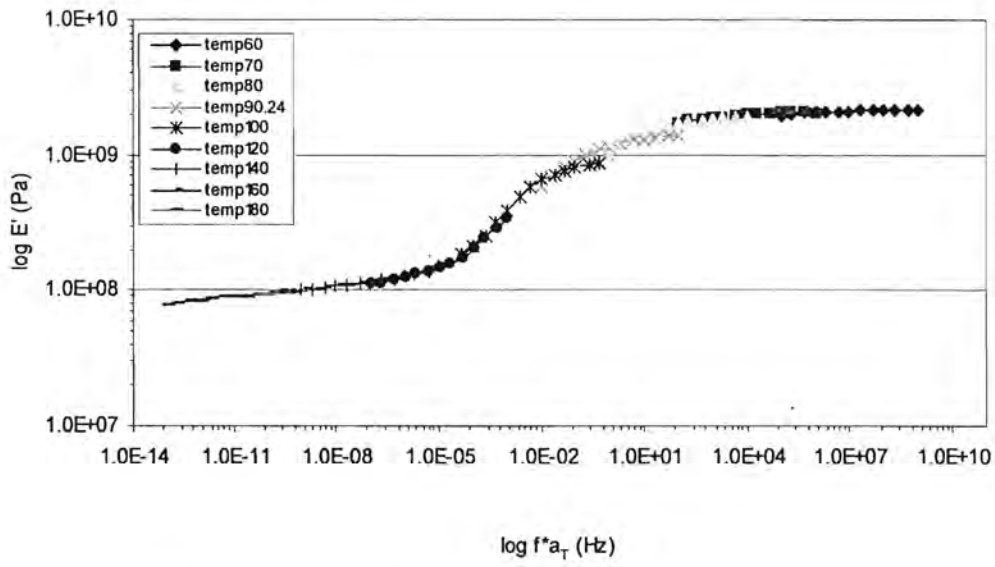




รูปที่ 3.47 Master curve for sPS2/PHMA blend as frequency function  
with  $T_r$  79.22°C



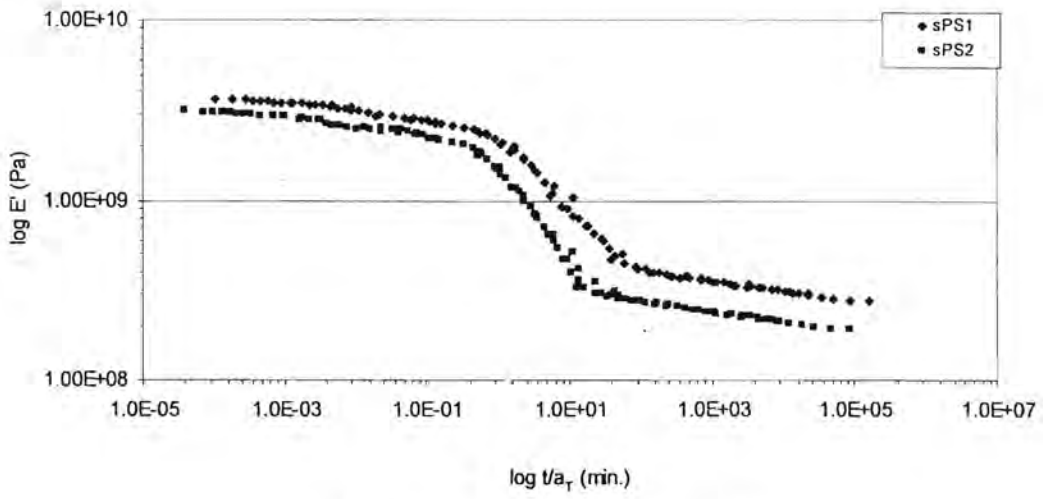
รูปที่ 3.48 Master curve for sPS1/PaMSblend as frequency function  
with  $T_r$  90.24°C



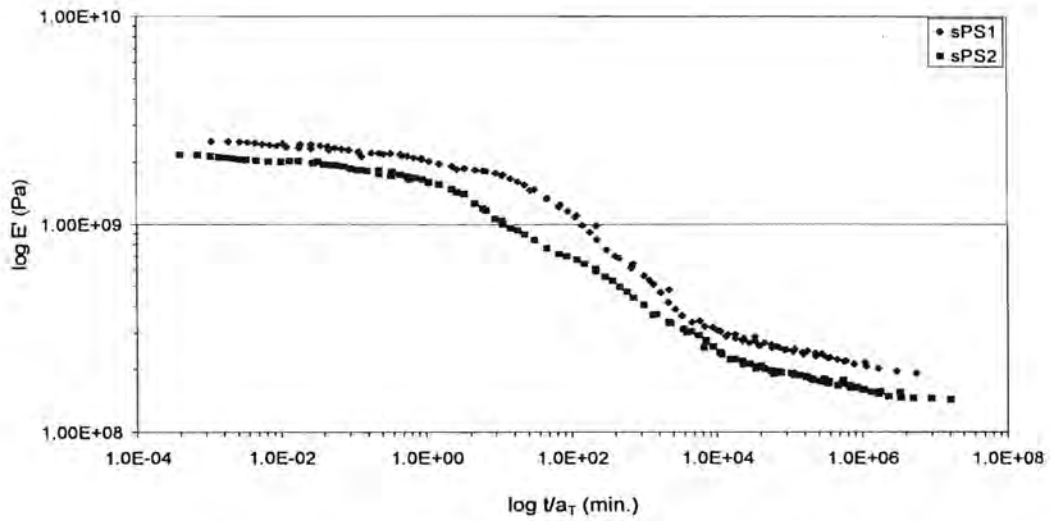
รูปที่ 3.49 Master curve for sPS2/PaMSblend as frequency function  
with  $T_r$  90.24°C

### 3.7 ผลกระทบอันเนื่องมาจากองค์ประกอบหลัก (sPS)

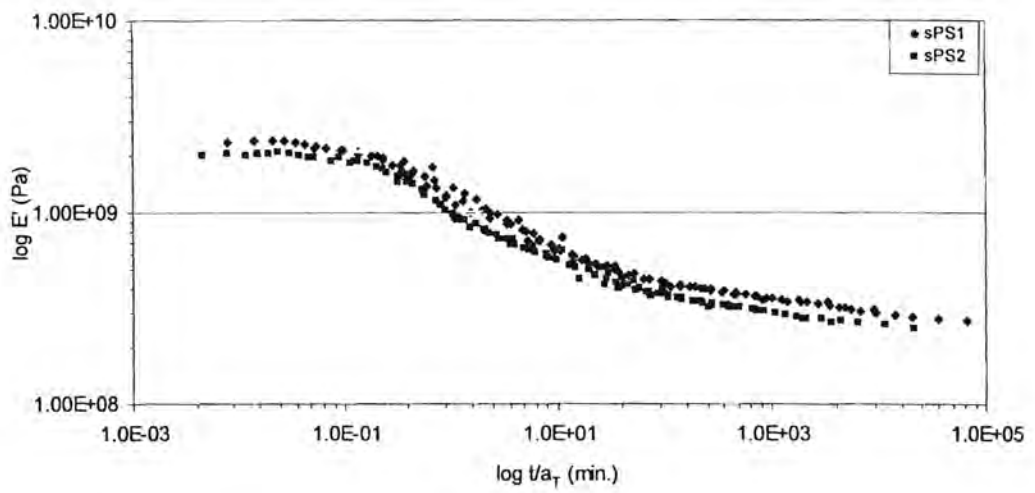
เนื่องจากพอลิเมอร์หลักที่ใช้ในการผสมคือ sPS โดยทุกพอลิเมอร์ผสมจะมีอัตราส่วนของ sPS อยู่ที่ 80% และมีพอลิเมอร์อื่นอยู่ที่ 20% และ sPS ที่ใช้ผสมจะมีค่ามวลโมเลกุลที่แตกต่างกัน (sPS1, sPS2) ซึ่งกราฟการรับแรงหลักจะสามารถบอกถึงความแตกต่างของน้ำหนักโมเลกุลได้เป็นอย่างดี โดยปรกติแล้วถ้าพอลิเมอร์มีมวลโมเลกุลสูงขึ้น ความสามารถในการรับแรงจะดีขึ้น และยากยิ่งขึ้นที่จะแยกพอลิเมอร์นั้นออกเป็นสองส่วนหรือขาดออกจากกันเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าจะมีมากกว่าและการเกี่ยวพันกัน (Entanglement) ของพอลิเมอร์ ที่มีมวลโมเลกุลสูงกว่าก็จะมีมากกว่า ทำให้ยากยิ่งขึ้นที่จะแยกพอลิเมอร์ออกจากกัน กราฟการรับแรงรวมของพอลิเมอร์ผสมที่ใช้ในการทดลองนี้สามารถแสดงถึงการที่ E' ของ sPS1 จะมากกว่า sPS2 โดยตลอดทั้งในพอลิเมอร์บริสุทธิ์และในระบบของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งสมบัติในการรับแรงที่ดีกว่านี้มาจากการที่ sPS1 มีมวลโมเลกุลสูงกว่า sPS2 กราฟต่างๆจะสามารถแสดงได้ดังนี้



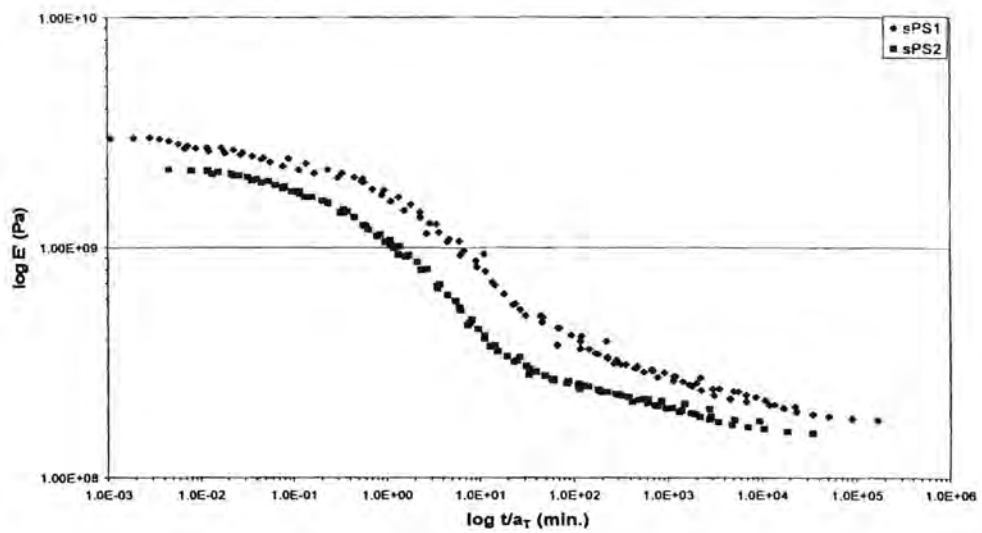
รูปที่ 3.50 Master curve for sPS1 and sPS2



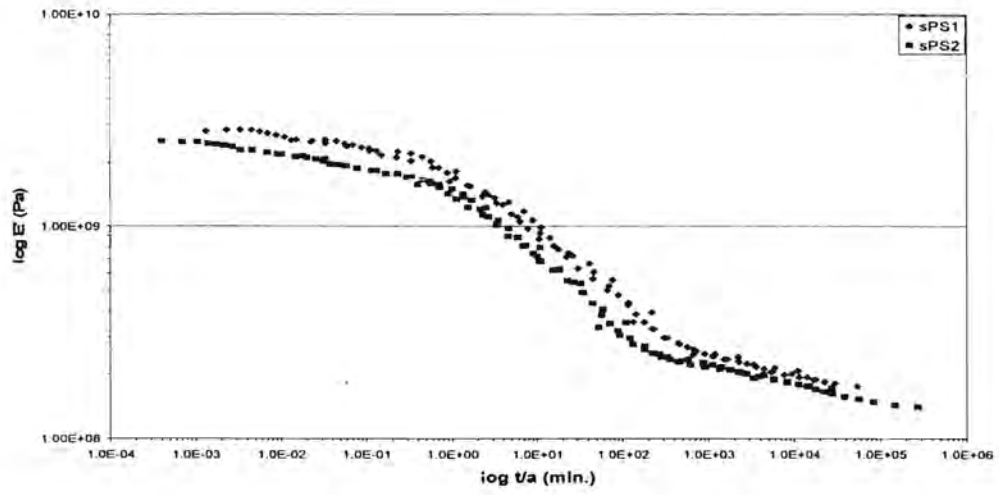
รูปที่ 3.51 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PIP



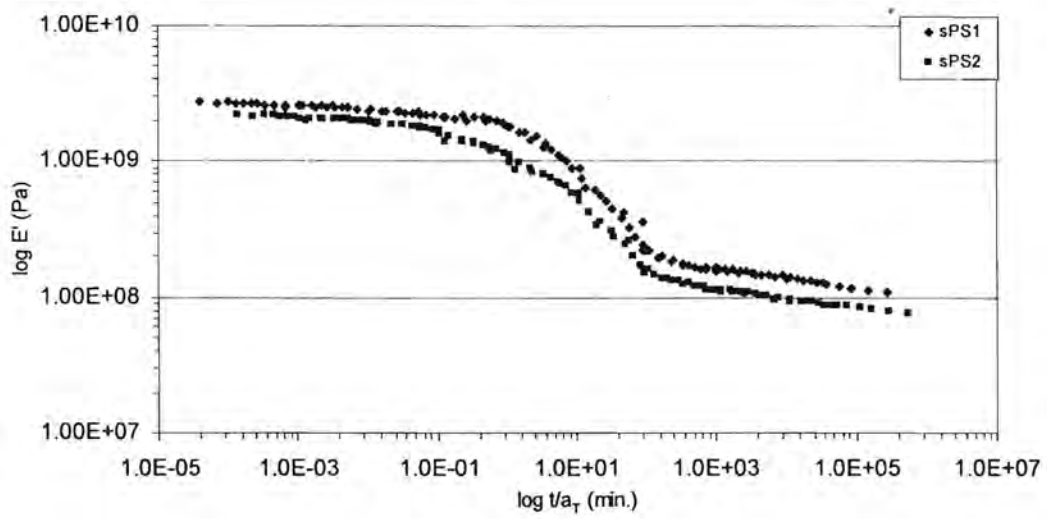
รูปที่ 3.52 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PBMA



รูปที่ 3.53 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PEMA



รูปที่ 3.54 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PHMA



รูปที่ 3.55 Master curve for sPS1 and sPS2 blended with PaMS

### 3.8 ค่าคงที่ของ Williams Landel and Ferry (WLF)

สมการของ WLF แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่าง  $T_g$  และค่าตัวเลื่อนกราฟการรับแรงร่วม  $a_T$  โดยจะสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\log a_T = \frac{C_1(T - T_g)}{C_2 + T - T_g} \quad (3.1)$$

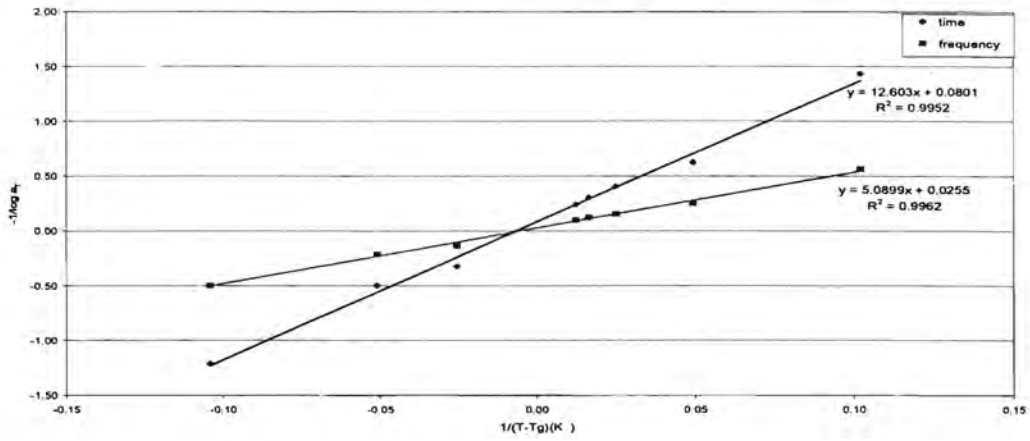
ซึ่งค่า  $C_1$  และ  $C_2$  จะเป็นค่าคงที่ของ WLF เนื่องจากการทดลองนี้ค่า  $T_g$  และ ค่า  $a_T$  จะสามารถหามาได้จากการทดลองจริง ค่า  $C_1$  และ  $C_2$  จะสามารถกำหนดได้โดยการแทนค่าส่วนกลับของสมการ WLF ได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{-1}{\log a_T} = \frac{C_2}{C_1} \frac{1}{(T - T_g)} + \frac{1}{C_1} \quad (3.2)$$

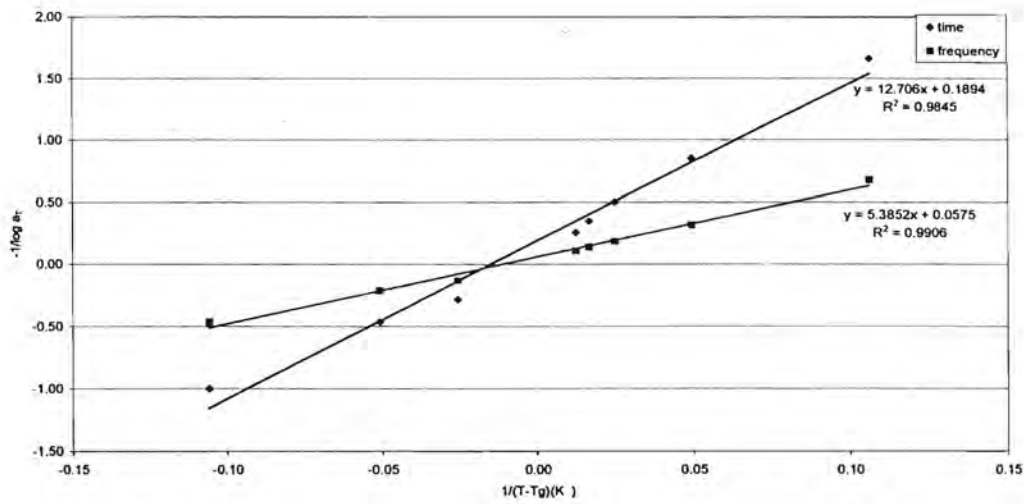
ซึ่งถ้าสมการของ WLF สามารถใช้ได้กับผลการทดลองนี้ ค่าส่วนกลับนี้จะเป็นสมการเส้นตรงซึ่งจะสามารถหาค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ได้จากค่าความชัน และจุดตัดแกนของกราฟดังกล่าว

ในการทดลองนี้พบว่าสมการ WLF สามารถประยุกต์ใช้ได้กับข้อมูลดังกล่าวโดยจะสามารถเขียนสมการเส้นตรงได้ดังแสดง

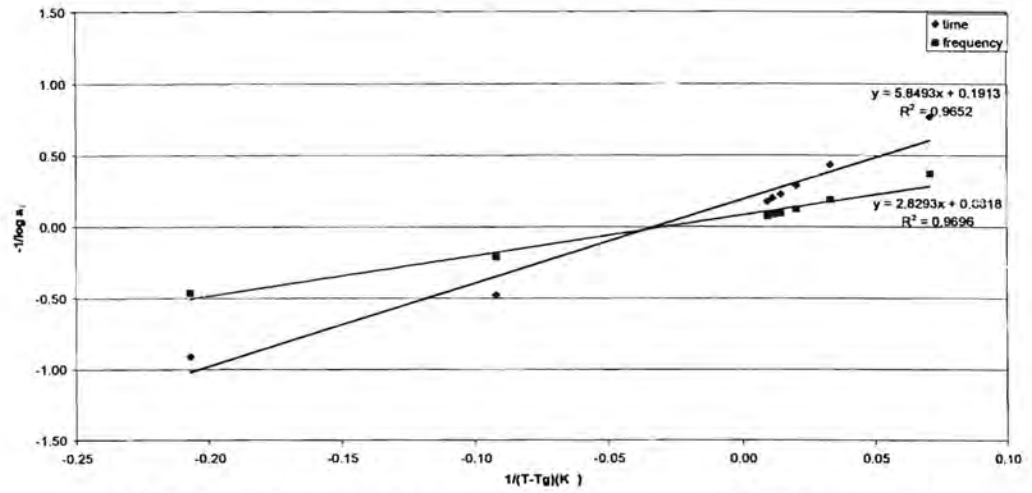




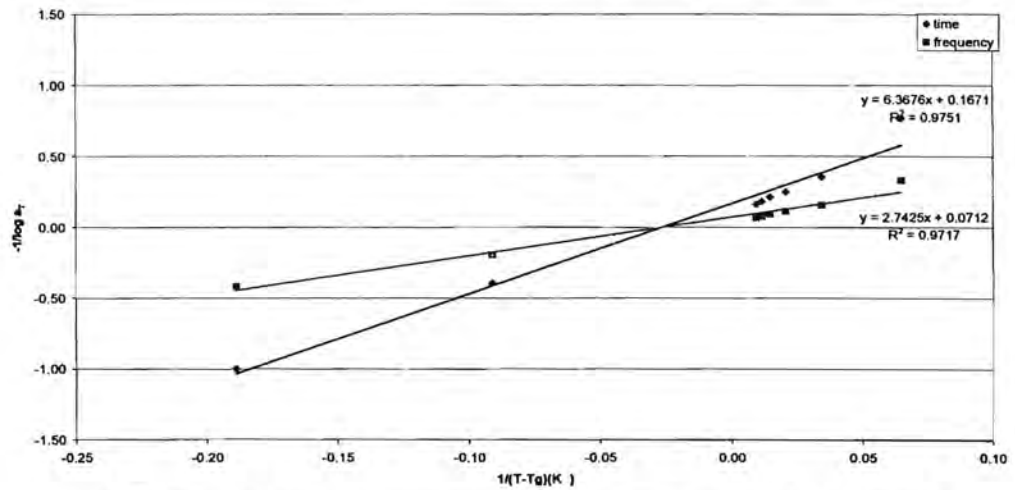
รูปที่ 3.56 Relationship between  $-1/\log a_t$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS1



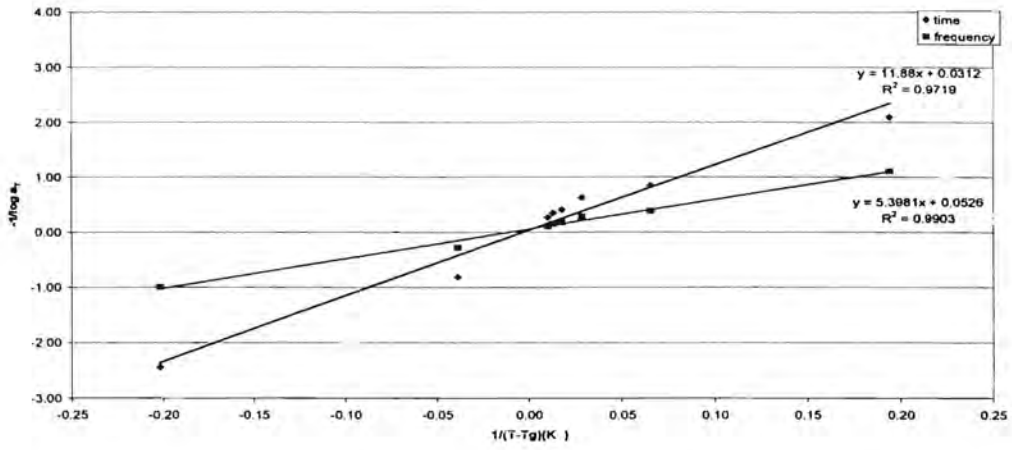
รูปที่ 3.57 Relationship between  $-1/\log a_t$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS2



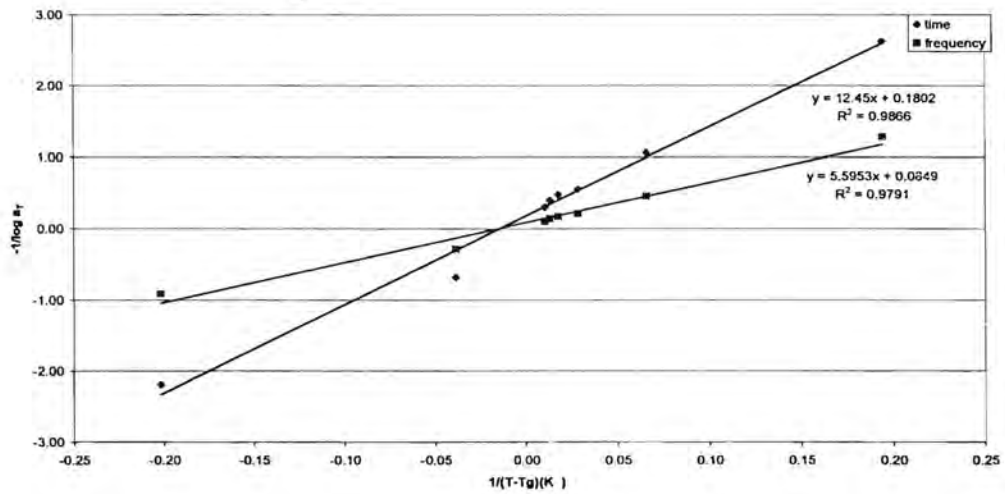
รูปที่ 3.58 Relationship between  $-1/\log a_t$  versus  $1/(T-T_g)$  for SPS1/PIP



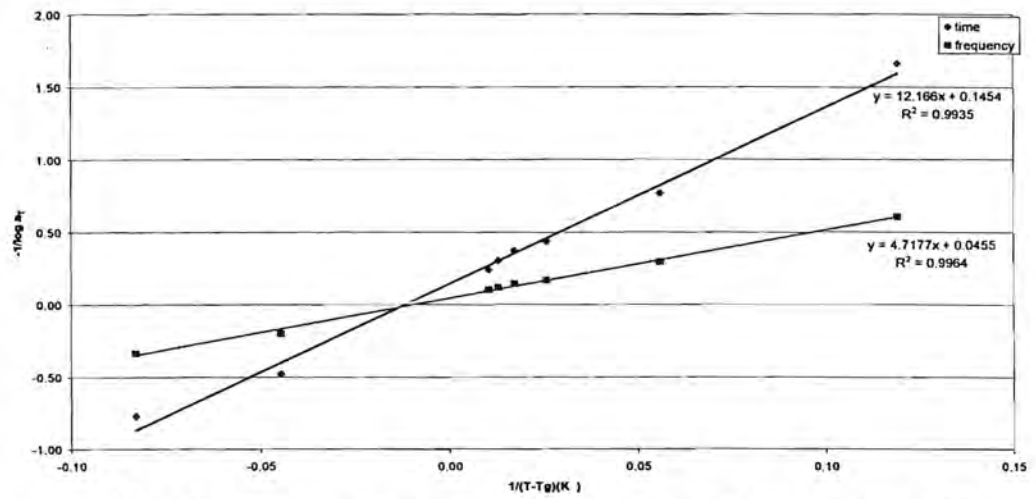
รูปที่ 3.59 Relationship between  $-1/\log a_t$  versus  $1/(T-T_g)$  for SPS2/PIP



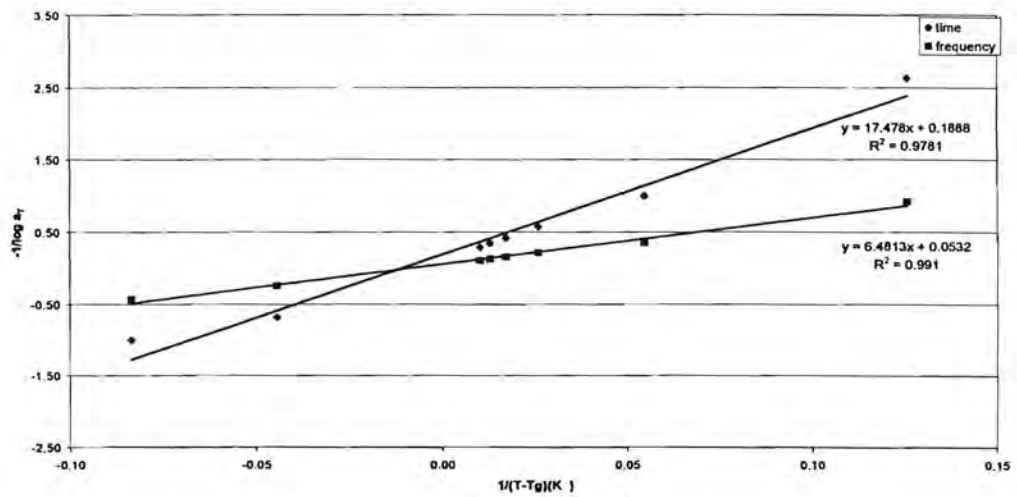
รูปที่ 3.60 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS1/PBMA



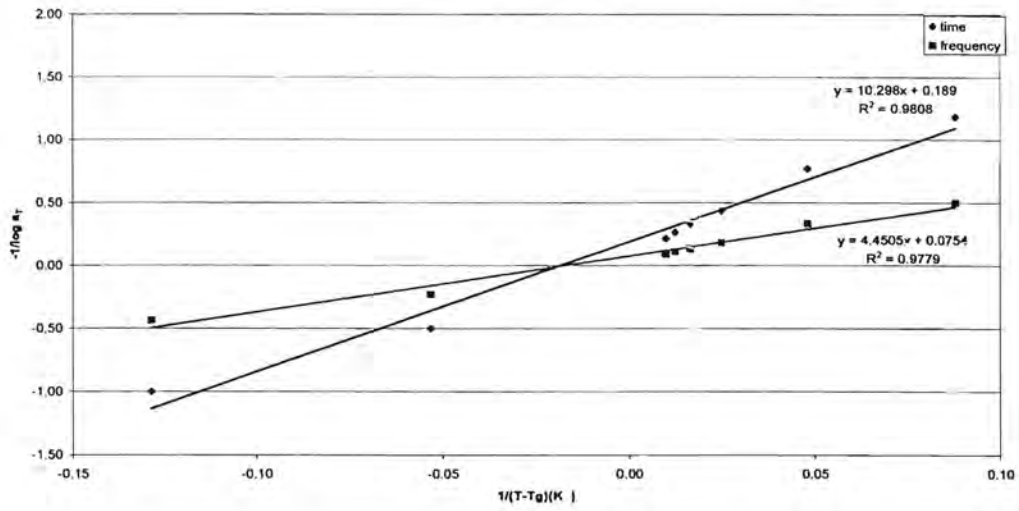
รูปที่ 3.61 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS2/PBMA



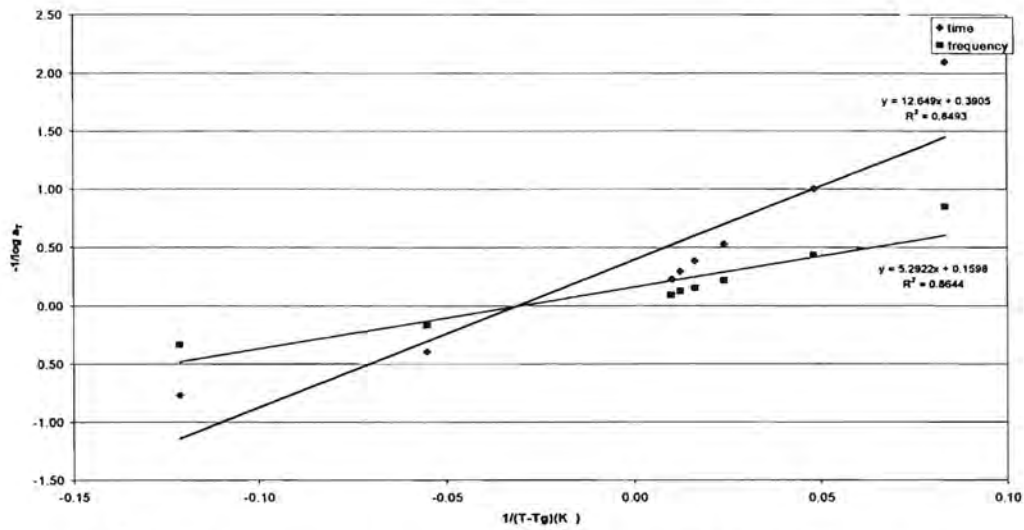
รูปที่ 3.62 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS1/PEMA



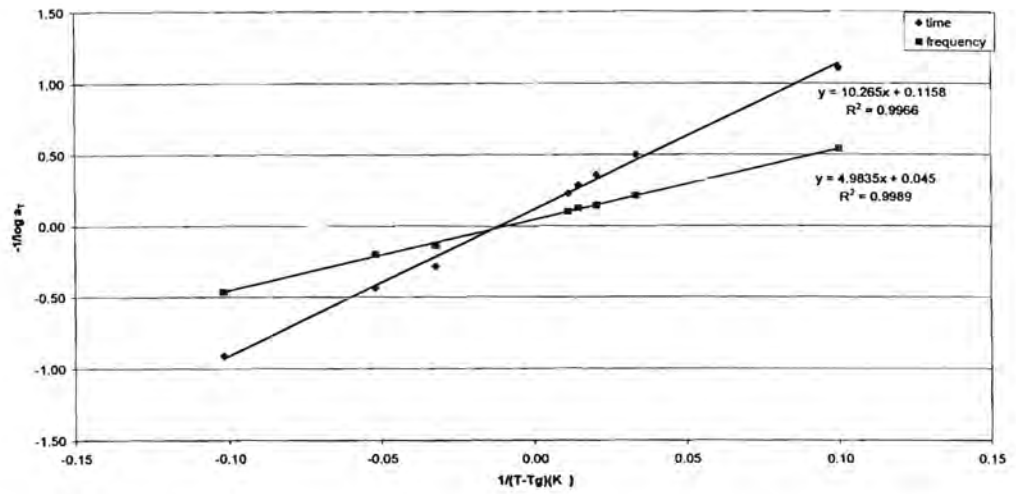
รูปที่ 3.63 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS2/PEMA



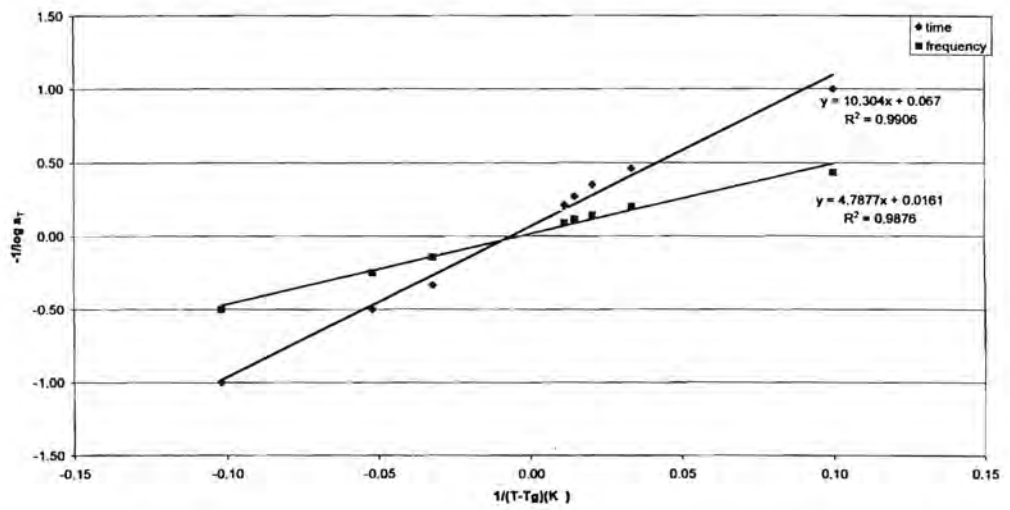
รูปที่ 3.64 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS1/PHMA



รูปที่ 3.65 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS2/PHMA



รูปที่ 3.66 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS1/PaMS



รูปที่ 3.67 Relationship between  $-1/\log a_T$  versus  $1/(T-T_g)$  for sPS2/PaMS

ค่า  $C_1$  และ  $C_2$  ที่สามารถหาได้จากเส้นตรงดังกล่าวจะสามารถสรุปได้ดังตารางด้านล่าง

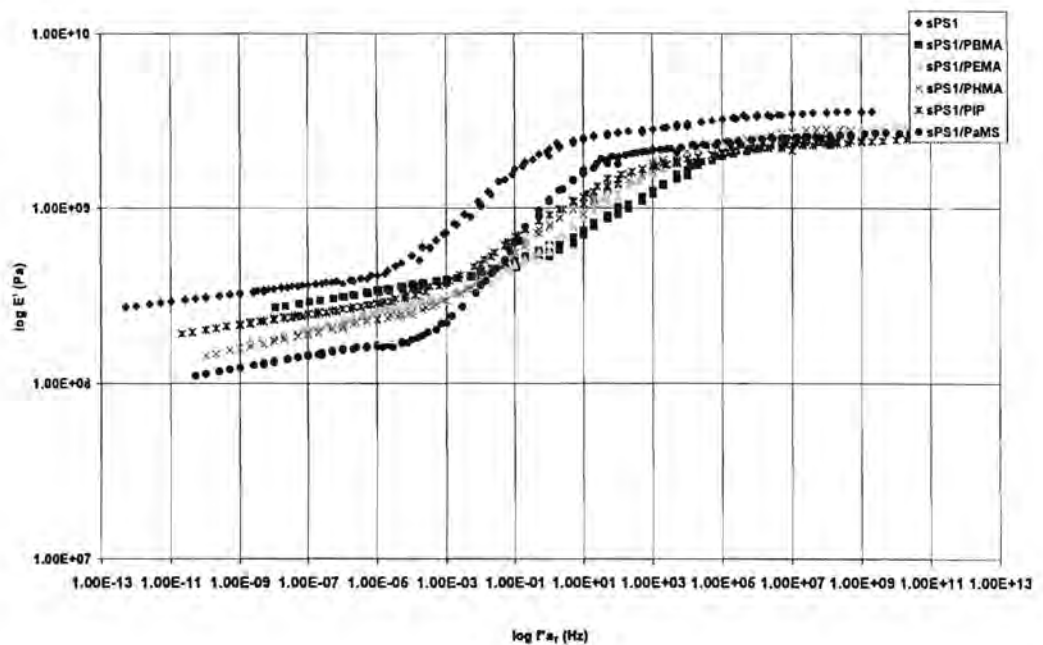
ตารางที่ 3.5  $C_1$  and  $C_2$  for pure sPS and all blend systems

System	Time dependence		Frequency dependence	
	$C_1$	$C_2$	$C_1$	$C_2$
sPS1	12.48	157.34	39.22	199.60
sPS1/PIP	5.23	30.58	12.22	34.59
sPS1/PBMA	32.05	380.77	19.01	102.63
sPS1/PEMA	6.88	93.67	21.98	103.69
sPS1/PHMA	5.29	54.40	13.26	59.03
sPS1/PaMS	8.64	88.64	22.22	110.74
sPS2	5.28	67.09	10.39	93.66
sPS2/PIP	5.98	38.11	14.04	36.16
sPS2/PBMA	5.55	69.09	11.78	65.90
sPS2/PEMA	5.30	92.57	18.80	121.83
sPS2/PHMA	2.56	32.39	6.26	33.12
sPS2/PaMS	14.93	153.79	62.11	297.37

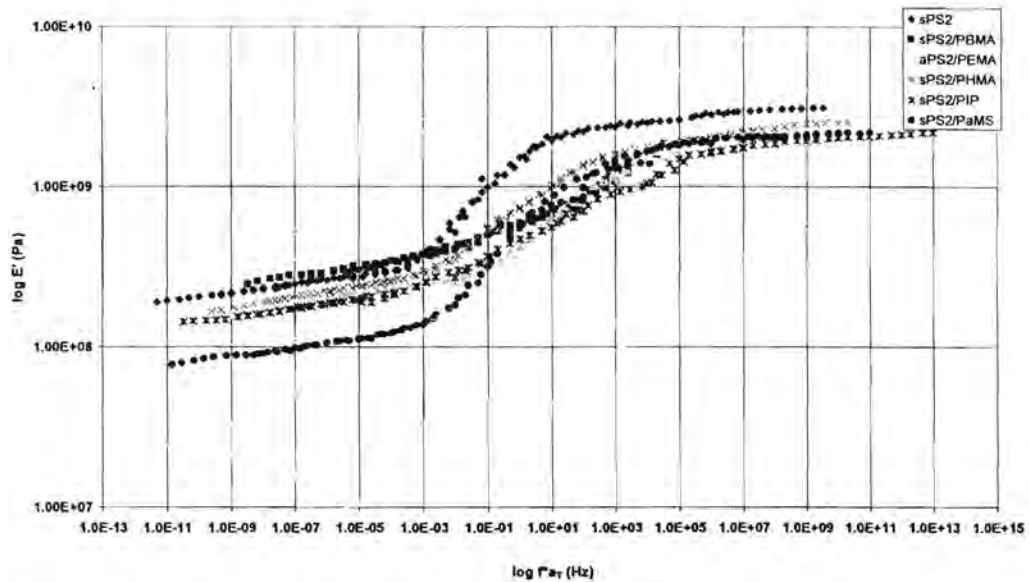


### 3.9 ผลกระทบอันเนื่องมาจากการผสมพอลิเมอร์

พอลิเมอร์ผสมจะทำให้อุณหภูมิคล้ายแก้ว ( $T_g$ ) ของระบบมีค่าลดลง อันจะทำให้สามารถรับแรงในช่วงอุณหภูมิที่กว้างขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิใช้งานของ sPS จะทำให้สมบัติทางกลมีค่าด้อยลงบ้างอันเป็นผลกระทบต่อเนื่องของการลดค่า  $T_g$  แต่อย่างไรก็ตามปริมาณเนื้อ sPS ในพอลิเมอร์ผสมจะมีปริมาณน้อยลงซึ่งเป็นการประหยัดต้นทุนในการนำพอลิเมอร์ผสมไปใช้อีกทางหนึ่งด้วย ในการทดลองในตอนนี้สามารถสรุประบบที่สามารถผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับ sPS ได้ทั้งหมดนี้ระบบคือ sPS/PIP, sPS/PBMA, sPS/PEMA, sPS/PHMA และ sPS/PaMS ซึ่งเมื่อให้อุณหภูมิเปรียบเทียบเป็น  $100.25^\circ\text{C}$  แล้วจะสามารถเขียนกราฟการรับแรงรวมที่เป็นฟังก์ชันของความถี่ได้ดังนี้



รูปที่ 3.68  $E'$  master curve for all sPS1 blend systems



รูปที่ 3.69 E' master curve for all sPS2 blend systems

จากกราฟดังกล่าวจะเห็นได้ว่าค่าความคงตัว (Storage Modulus, E') ของระบบพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าลดลงโดยตลอดที่น้อยกว่าค่า E' ของ sPS บริสุทธิ์อันเป็นผลมาจากการลดปริมาณ sPS ในพอลิเมอร์ผสมลง และจะสามารถแบ่งกราฟดังกล่าวได้เป็นสามช่วงโดยการพิจารณาความถี่ ช่วงทั้งสามในการแบ่งพิจารณาค่าความถี่คือ ช่วงที่น้อยกว่า  $1 \cdot 10^{-3}$ , ช่วง  $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5$  และช่วงที่มากกว่า  $1 \cdot 10^5$

เมื่อพิจารณาระบบของ sPS1 นอกจากค่า E' จะลดลงในทุกช่วงแล้ว ช่วงที่มีความถี่สูง (มากกว่า  $1 \cdot 10^5$ ) จะสามารถเทียบได้กับการรับแรงกระแทก เนื่องจากพลังงานที่ให้ในเวลาที่สูงมาก (เวลาเป็นส่วนกลับของความถี่) ค่าการลดลงของ E' เป็นในทำนองเดียวกันในทุกระบบ คือจะมีค่าน้อยลงจนเท่ากับค่าของพอลิเมอร์ผสม sPS/PaMS และในช่วงที่ความถี่ต่ำ (น้อยกว่า  $1 \cdot 10^{-3}$ ) เป็นการรับแรงที่ใช้เวลารับแรงเป็นเวลานาน (เวลาเป็นส่วนกลับของความถี่) จะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์ผสมมีการลดลงของ E' ที่ไม่เท่ากัน โดยจะสามารถเรียงลำดับได้จาก PBMA > PIP > PEMA > PHMA > PaMS ซึ่งการลดลงนี้ถ้ามีการลดลงน้อยแสดงถึงการรับแรงที่ใช้เวลานานได้ดีกว่า ช่วงกลางของความถี่ ( $1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^5$ ) กราฟจะมีการแปรเปลี่ยนที่แตกต่างกันออกไปเมื่อความถี่ลากผ่านค่า Tg ของแต่ละพอลิเมอร์ผสมที่มีค่าไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตามการเปรียบเทียบนี้ทำที่อุณหภูมิ  $100.25^\circ\text{C}$  ซึ่งอุณหภูมิในการใช้งานที่อุณหภูมิห้องก็จะมีค่า E' ที่แตกต่างไปจากนี้ ซึ่งในระบบของ sPS2 ก็จะสามารถสรุปได้ในทำนองเดียวกัน

อย่างไรก็ตามกราฟที่แสดงเป็นกราฟ log เพื่อเปรียบเทียบช่วงความถี่ที่ใกล้เคียงกัน จึงเป็นที่น่าสนใจที่จะสรุปค่าความแตกต่างของ  $E'$  ณ ช่วงต่างๆ ได้ดังนี้

$$\Delta E'_{avg} = E'_{sPS} - E'_{blended\ polymer} \quad (3.3)$$

ตารางที่ 3.6 Average storage modulus difference of all blend systems for sPS1

Range (Hz)	$\Delta E'_{avg}$ of sPS1 blend system				
	PIP	PBMA	PEMA	PHMA	PaMS
Over $1 \times 10^5$	1.23E+09	1.18E+09	9.68E+08	7.88E+08	8.76E+08
Under $1 \times 10^{-3}$	1.70E+08	1.35E+08	2.13E+08	2.36E+08	2.92E+08

ตารางที่ 3.7 Average storage modulus difference of all blend systems for sPS2

Range (Hz)	$\Delta E'_{avg}$ of sPS2 blend system (Pa)				
	PIP	PBMA	PEMA	PHMA	PaMS
Over $1 \times 10^5$	1.16E+09	8.81E+08	1.97E+09	7.59E+08	9.17E+08
Under $1 \times 10^{-3}$	8.51E+07	-2.74E+07	7.61E+07	6.89E+07	1.74E+08

จากตารางดังกล่าว จะเห็นได้ว่าการลดลงของ  $E'$  ในช่วงความถี่สูงจะลดลงมากกว่า ในช่วงความถี่ต่ำ ซึ่งจะสรุปได้ว่าการลดลงของ  $E'$  มีผลมากกว่าในการรับแรงกระแทกและ พอลิเมอร์ที่มีค่าสมบัติลดลงน้อยที่สุดคือ PBMA ซึ่งน่าจะเป็นทางออกในการเลือกพอลิเมอร์ผสมเพื่อการใช้งานทดแทนพอลิเมอร์ sPS บริสุทธิ์ในทางหนึ่งด้วย

## สรุปผลการทดลองตอนที่หนึ่ง

1. อัตราส่วนผลได้ (yield) ของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของปฏิกิริยาขึ้น
2. ความว่องไวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst Activity) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการทำปฏิกิริยา แต่จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่ามากขึ้น
3. การเพิ่มอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาจะทำให้ความเป็นซินดิโอเทคติกมีค่าสูงขึ้น
4. อุณหภูมิคล้ายแก้ว (Tg) และอุณหภูมิลอมเหลวผลึก (Tm) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มมวลโมเลกุลของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์ขึ้น
5. ในพอลิเมอร์ผสมทุกตัว (PBMA, PEMA, PCHA, Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene), Polyisoprene) ยกเว้น PVME จะสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้กับซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนและมีค่าอุณหภูมิลคล้ายแก้วเพียงค่าเดียวซึ่งอยู่ระหว่างอุณหภูมิลคล้ายแก้วของสารบริสุทธิ์ทั้งสอง และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของ ซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนในพอลิเมอร์ผสมขึ้น
6. ส่วน PVME จะแสดงถึงความเข้ากันได้เป็นบางส่วน (partial miscibility) ซึ่งจะตรวจวัดอุณหภูมิลคล้ายแก้วได้สองค่าและมีค่าอยู่ระหว่างอุณหภูมิลคล้ายแก้วของพอลิเมอร์บริสุทธิ์ทั้งสอง ซึ่งแสดงถึงการแยกเฟสในพอลิเมอร์ผสม
7. อุณหภูมิลอมเหลวผลึก (Tm) ของพอลิเมอร์ผสมจะมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิลอมเหลวผลึกของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนบริสุทธิ์ และจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่มาผสมมากยิ่งขึ้น
8. ความเป็นผลึกของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนจะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาผสม และสอดคล้องกับค่า Tm ซึ่งแสดงถึงคุณภาพของผลึกเมื่อมีค่าลดลงเรื่อยๆตามปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาผสมในทุกพอลิเมอร์ผสมที่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้กับซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีน
9. เปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึก (Percent Crystallinity) ของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณพอลิเมอร์ที่มาผสมเป็นเนื้อเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน sPS1 ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของอุณหภูมิลคล้ายแก้วของพอลิเมอร์ผสมเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิเมอร์ที่มาผสม ยกเว้นในกรณีของพอลิเมอร์ผสมของ Poly( $\alpha$ -methyl-Styrene)
10. การคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนที่เป็นอสัญฐานในพอลิเมอร์ผสมจากสมการของ Flory-Fox มีค่าสอดคล้องกับการคำนวณเปอร์เซ็นต์ส่วนที่เป็นอสัญฐานของซินดิโอเทคติกพอลิสไตรีนที่คำนวณมาจากเปอร์เซ็นต์ความเป็นผลึกที่ตรวจวัดโดย XRD
11. ค่าอุณหภูมิลคล้ายแก้วและปริมาณความเป็นผลึกของ sPS2 และ sPS3 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยจะแตกต่างกันไม่เกิน 5% ทั้งนี้เนื่องจากพอลิเมอร์ทั้งสองมีมวลโมเลกุลใกล้เคียงกัน

## สรุปผลการทดลองตอนที่สอง

1. จากผลการทดลองโดย DSC พบว่า sPS สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้กับ poly( $\alpha$ -methyl styrene), poly(ethyl methacrylate), poly(*n*-butyl methacrylate), poly(cyclohexyl acrylate), poly(*cis*-isoprene) และจะแยกเฟสเมื่อผสมกับ poly(vinyl methyl ether) ทั้งนี้เป็นการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีหลอมละลายผสมกัน

2. การเติม LCC หรือ GMS ไม่มีผลทำให้ค่า  $T_g$  ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าเปลี่ยนแปลงไป เมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่ง ทั้งนี้เป็นการตรวจสอบค่า  $T_g$  โดยใช้วิธีเตรียมตัวอย่างโดยการหลอมละลายผสมกัน

3. การเติม LCC หรือ GMS มีผลทำให้ค่า  $T_m$  ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อยจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง การหลอมละลายที่เกิดเร็วขึ้นนี้ จะสามารถพิจารณาได้จากการลดความหนืดหลอมละลายของพอลิเมอร์ผสมโดยสารเติมแต่ง โมเลกุลของ sPS จะเคลื่อนที่ได้เร็วขึ้นในสถานะที่เป็นอสัญฐานที่หลอมละลายซึ่งจะสามารถลด Gibbs' Free Energy ของระบบลงได้อีกอย่างรวดเร็วขึ้น จึงเป็นที่สังเกตได้ว่าการใส่สารเติมแต่งลงในพอลิเมอร์ผสมจะทำให้ระบบมีค่าอุณหภูมิหลอมเหลวผลึกที่ต่ำลงเป็นพิเศษเพิ่มเติมจากการลดค่า  $T_m$  โดยเป็นผลมาจากพอลิเมอร์อสัญฐานที่เติมเข้าไป

4. การเติม LCC หรือ GMS มีผลทำให้ค่า  $T_c$  ของพอลิเมอร์ผสมลดลงเล็กน้อยจากพอลิเมอร์ผสมที่ไม่ได้เติมสารเติมแต่ง ทั้งนี้โดยปรกติแล้วพอลิเมอร์ที่สามารถหลอมละลายเป็นเนื้อเดียวกันได้จะมีแนวโน้มที่จะคงสภาพการผสมเพราะการผสมจะทำให้ Gibbs Free Energy มีค่าต่ำที่สุด การลดความหนืดของการหลอมละลายโดย LCC หรือ GMS จะทำให้พอลิเมอร์ผสมนี้แยกออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นเหตุให้อุณหภูมิก่อตัวของผลึกมีค่าลดลงเพราะโมเลกุลของ sPS จะต้องแพร่ออกจากสารผสมไปจัดเรียงตัวเป็นผลึก อันจะทำให้ด้านต่อการผสมตัวในสภาพอสัญฐานของพอลิเมอร์ที่หลอมละลาย อุณหภูมิการก่อตัวของผลึกในระบบพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวจะมีค่าลดลงไปอีกเพิ่มเติมจากการกีดขวางกันของโมเลกุลธรรมดา

5. วิธีการผสมพอลิเมอร์มีผลต่อคุณสมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้ การผสมโดยการละลายในตัวทำละลายเดียวกันจะให้พอลิเมอร์ผสมที่เป็นเนื้อเดียวกันมากกว่าวิธีการผสมแบบหลอมละลาย เมื่อตัวอย่างมีปริมาณที่น้อย และพอลิเมอร์ที่ผสมด้วยวิธีการหลอมละลายจะให้ค่า  $T_g$  ที่สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ผสมโดยตัวทำละลายเดียวกัน เมื่อมีปริมาณความเข้มข้นของ sPS ในสารเริ่มต้นเท่าๆกัน

6. จากผลการทดลองด้วย XRD สามารถสรุปได้ว่า เปรอร์เซนต์การเป็นผลึกจะลดลงเมื่อลดปริมาณ sPS ในตัวอย่างลง ทั้งนี้เกิดเนื่องจากในโครงสร้างอสัณฐานต้องการปริมาณ sPS เพื่อมาผสมมีปริมาณมากขึ้นเมื่อลดปริมาณ sPS ลง และการใส่ LCC หรือ GMS มีแนวโน้มที่จะทำให้ปริมาณผลึกมีค่าลดลงเพิ่มเติมจากการลดลงดังที่ได้กล่าวมาของพอลิเมอร์ผสมดังกล่าวเพิ่มอีก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความเสถียรยิ่งขึ้นในสภาพอสัณฐานเมื่อผสม LCC หรือ GMS ทำให้ง่ายยิ่งขึ้นที่จะหลอมละลายผลึก sPS ในพอลิเมอร์ผสม และทำให้เนื้อที่เป็นอสัณฐานต้องการปริมาณ sPS เพิ่มเติมเป็นพิเศษ



## สรุปผลการทดลองตอนที่สาม

1. จากผลการทดลองโดย DSC ยืนยันการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ของพอลิเมอร์ผสมระหว่าง sPS และ poly( $\alpha$ -methyl styrene), poly(ethyl methacrylate), poly(*n*-butyl methacrylate), poly(cyclohexyl methacrylate) และ poly(*cis*-isoprene) โดยที่พอลิเมอร์ผสมดังกล่าวมี Tg เพียงค่าเดียวและ Tg อยู่ต่ำกว่าค่า Tg ของ sPS บริสุทธิ์

2. จากผลการทดลองโดย TGA พบว่าการเสื่อมสลายของพอลิเมอร์เมื่อพบกับความร้อน (Degrade) ของพอลิเมอร์ผสมมีค่าไม่เท่ากัน โดยพบว่า Poly(cyclohexyl methacrylate) มีการสูญเสียน้ำหนักปริมาณ 5% และ 10% เมื่อพบกับความร้อนที่อุณหภูมิต่ำที่สุด และ Poly( $\alpha$ -methyl styrene) มีการสูญเสียน้ำหนักปริมาณ 5% ที่อุณหภูมิสูงที่สุด และ poly(*cis*-isoprene) มีการสูญเสียน้ำหนักปริมาณ 10% ที่อุณหภูมิสูงที่สุด

3. ค่า E' (storage modulus) ของทุกพอลิเมอร์ผสมและของสอง sPS จะมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิหรือเวลาในการรับแรง ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของพอลิเมอร์สามารถขยับตัวได้ง่ายขึ้นมี Mobility สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและเวลาในการรับแรงนานขึ้น สามารถเลื่อนหลุดออกจากกันได้เร็วขึ้น

4. ค่า E' (storage modulus) ของทุกพอลิเมอร์ผสมและของสอง sPS จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความถี่ในการรับแรง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อให้แรงที่ความถี่สูงพอลิเมอร์จะไม่มีเวลาพอที่จะขยับออกจากกัน ดังนั้นจึงสามารถรับแรงได้สูงกว่าเมื่อให้แรงที่ความถี่ต่ำ

5. สามารถสร้างกราฟการรับแรงรวม (storage modulus master curves) ได้โดยอาศัยหลักการของการซ้อนทับของอุณหภูมิและเวลา (Time-Temperature Superposition (TTS) principle) ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อประมาณการรับแรงที่อุณหภูมิอ้างอิงที่ความถี่หรือเวลาในการรับแรงต่างๆในช่วงที่กว้างกว่าการทดลองจริง ทั้งนี้โดยการประมาณให้ค่าการรับแรงที่อุณหภูมิสูงขึ้นแทนค่าความถี่ที่ลดลง และการประมาณให้ค่าการรับแรงที่อุณหภูมิต่ำลงแทนค่าความถี่ที่มากขึ้นกว่าที่ทำการทดลอง ดังนั้นจะสามารถเขียน E' ที่ความถี่ต่างๆได้ในช่วงที่กว้างขึ้นกว่าการทดลองจริง

6. เมื่อพิจารณาลักษณะการรับแรงโดยกราฟการรับแรงรวม จะพบว่า sPS ที่ต่างมวลโมเลกุลประพฤติตัวในทำนองเดียวกัน โดยที่ sPS1 ที่มีมวลโมเลกุลที่สูงกว่าจะมีค่า E' ที่มากกว่าโดยตลอด และยังคงคุณสมบัตินี้ไว้แม้ว่าจะเป็นพอลิเมอร์ผสม เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลมีค่ามากกว่าและทำให้พอลิเมอร์สามารถขยับตัวได้ช้ากว่าพอลิเมอร์ที่มีมวลโมเลกุลที่ต่ำกว่า

7. William Landel Ferry (WLF) สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่ทดลองมา โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่าง  $1/\log a_T$  และ  $1/(T-T_g)$  ซึ่งจะสามารถหาค่าคงที่ของ WLF ได้จากกราฟดังกล่าว



8. พอลิเมอร์ผสมจะมีค่า  $E'$  ที่ต่ำลงมากกว่า sPS บริสุทธิ์ โดย PBMA จะมีการลดลงของ  $E'$  น้อยที่สุดซึ่งจะเหมาะสมในการทำพอลิเมอร์ผสมของ sPS มากที่สุด

## เอกสารอ้างอิง (References)

1. C. Schwecke, Walter Kaminsky, Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry, Vol.39, 2805-2812(2001)
2. Rong Fan, Bo-Geng Li, et.al. Journal of Applied Polymer Science, Vol.85, 2635-2643(2002)
3. Bin Chen, Xiliang Li, et.a., Polymer 43 (2002)953-961
4. Lei Zheng, Rajeswari M. Kasi, et.al., Journal of Polymer Science : Part A: Polymer Chemistry, Vol.40, 885-891(2002)
5. J. Y. Dong, E. Manias, and T.C. Chung, Macromolecules 35, 3439-3447, 2002
6. F. Picchioni, M. Aglietto, et.al., Polymer 43 (2002)3323-3329
7. Won-Mook Choi, C. Park, et.at. Journal of Applied Polymer Science, Vol.85, 2084-2091(2002)
8. F. Chiu, K. Shen., et.al., Polymer Engineering and Science, May 2001, Vol. 41m, No.5
9. C. Wang, Y.-C. Hsu, C.-F. Lo, Polymer 42 (2001) 8447-8460
10. K. Hodge, T. Prodpran, et.al., Journal of Applied Polymer Science, Vol.83, 2705-2715(2002)
11. Q. Chen, Y. Yu, et.al., Journal of Applied Polymer Science, Vol.83, 2528-2538(2002)
12. K. Tashiro, Akiko Yoshioka, Macromolecules 35, 410-414, 2002
13. D. Amutha Rani, Y. Yamamoto, et.al., Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol.40, 530-536(2002)
14. Y. Li, J. He, et.at., Polymer 43 (2002) 2489-2494
15. R. D. Sudduth, Pavan K. Yarala, Polymer Engineering and Science, April 2002, Vol.42, No.,4
16. Chi Wang, Yong-Wen Cheng, et.al., Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, Vol.40, 1626-1636(2002)
17. Paola Rizzo, M. Lamberti, et.al., Macromolecules 35, 5854-5860, 2002
18. F.C. Chiu, C.G. Peng, Polymer 43, 4879-4886, (2002)
19. A.Buckley, A.B.Conciatori and G.W.Calundann, U.S.Patent 4,434,262, 1984
20. A.Siegmann, A.Dagan and S.Kenig, Polymer, 26,1325-1330, (1985)

21. Y.C.Lin, H.W.Lee and H.H.Winter, *Polymer*, 34, 4703-4709, 1993
22. อัญชณา ชื่นเชาว์กิจ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 1998
23. สุรพันธ์ ปิวอนุสรณ์, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2000
24. นพวรรณ ไม้ทอง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2002
25. สุกลักษณ์ คุณประเสริฐ, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, สาขาวิศวกรรมเคมี, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2002
26. S.Wacharawichanant, S.Thongyai, S.Tanodekaew, J.S.Higgins and N.Clarke  
*Polymer*, 45, 2201-2209, 2004
27. M.Sivakumar, T.Suzuki, Y.Yamamoto, K.P.O. Mahesh, H.Yoshimizu, Y.Tsujita, *Journal of Membrane science* 238, 75-81, 2004
28. Y.Qian, H.Zhang, J.Zhou, W.Zhao, X.Sun, J.Huang  
*Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 208, 45-54, (2004)
29. S.C.Wu, F.C.Chang, *Polymer* 45, 733-738, (2004)
30. X.Sun, J.Xie, H.Zhang, J.Huang, *European Polymer Journal* 40, 1903-1908, (2004)
31. C.Wang, C.C.Chen, C.H.Hung, K.S.Lin, *Polymer* 45, 1-9, (2004)
32. S.K.Noh, S.Kim, Y.Yang, W.S.Lyoo, D.H.Lee,  
*European Polymer Journal* 40, 227-235, (2004)
33. Y.Y.Lyu, Y.Byun, J.H.Yim, S.Chang, S.Y.Lee, L.S.Pu, I.M.Lee  
*European Polymer Journal* 40, 1051-1056, (2004)
34. D.Larobina, L.Sanguigno, V.Venditto, G.Guerra, G.Mensitieri,  
*Polymer* 45 (2004) 429-436
35. K.Beckerle, C.Capacchione, H.Ebeling, R.Manivannan, R.Mulhaupt, A.Proto, T.P.Spaniol, J.Okuda, *Journal of Organometallic Chemistry* (2004)
36. C.Capacchione, A.Proto, H.Ebeling, R.Mülhaupt, K.Möller, R.Manivannan, T.P.Spaniol, J.Okuda,  
*Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 213, 137-140, (2004)
37. A.K.Ghosh, E.M.Woo, *Polymer* 45, 4749-4759, (2004)
38. J.Schellenberg, *European Polymer Journal* 40, 2259-2267, (2004)

39. Y.Uda, F.Kaneko, T.Kawaguchi, *Polymer* 45, 2221–2229, (2004)
40. C.I.Park, M.H.Kim, O.O.Park, *Polymer* 45, 1267–1273, (2004)
41. M.Giordano, M.Russo, A.Cusano, G.Mensitieri, G.Guerra,  
Sensors and Actuators B (2004)
42. C.Wang, W.P.Liao, M.L.Wang, C.C.Lin, *Polymer* 45, 973–981, (2004)
43. C.Wang, W.P.Liao, Y.W.Cheng, T.L.Lin, *Polymer* 45, 961–971, (2004)

ผลงานตีพิมพ์ที่ได้จากงานวิจัย

# Effect of Low Molar Mass Liquid Crystal and Lubricant on Miscibility and Thermal Properties of Syndiotactic Polystyrene Blends

Pichet Pahupongsab,<sup>1</sup> Supakanok Thongyai,<sup>1</sup> Sirirat Wacharawichanant,<sup>2</sup> Piyasan Praserttham<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Center of Excellence on Catalysis and Catalytic Reaction Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand

Received 15 April 2008; accepted 11 May 2009

DOI 10.1002/app.30751

Published online 30 June 2009 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).

**ABSTRACT:** This research concerned with the miscibility and thermal properties of syndiotactic polystyrene (SPS) blended with several polymers such as poly( $\alpha$ -methyl styrene)—PaMS, poly(ethyl methacrylate)—PEMA, poly(*n*-butyl methacrylate)—PBMA, poly(cyclohexyl acrylate)—PCHA, and poly(*cis*-isoprene)—PIP. The SPS synthesized by using metallocene catalyst and modified-methylaluminoxane (MMAO) as cocatalyst. From the experimental results, it was found that the SPS can be miscible with PaMS, PEMA, PBMA, PCHA, and PIP. Furthermore, the effects of the addition of low molar mass liquid crystal (cyclohexyl-biphenyl-cyclohexane, CBC33) and lubricant (glycerol monostearate, GMS) on thermal properties of the blended polymers with SPS are con-

cerned. Both CBC33 and GMS can lower the crystallization temperature ( $T_c$ ) of the blend and can also slightly lower the melting temperature ( $T_m$ ) of the blends. This might be because of the higher mobility of SPS molecules induced the separation from the crystal both in the case of the depression of  $T_c$  or  $T_m$ . The higher mobility of the blends happened together with the further reduction of the melt viscosity of the blends according to CBC33 that can be proven by Motong et al. in 2008 (Motong et al., *J Appl Polym Sci* 2008, 107, 1108). © 2009 Wiley Periodicals, Inc. *J Appl Polym Sci* 114: 2053–2059, 2009

**Key words:** miscibility; thermal properties; syndiotactic polystyrene; liquid crystal; lubricant

## INTRODUCTION

Generally, polystyrene (PS) is one of the most important commodity polymers in the industry. Its applications range from high modulus, transparent grade to rubber modified, tough resins and blends with outstanding impact resistance and mechanical properties. Recently, coordination polymerization techniques were introduced for preparation of new polystyrene, which has an entirely new range of possibilities and the feasibility for preparation of a highly stereoregular, syndiotactic polystyrene (SPS) was demonstrated.<sup>1</sup> SPS prepared by coordination polymerization is a new semicrystalline thermoplastic material with high crystalline melting temperature (270°C) and excellent chemical resistance. However, because SPS has some economic disadvantages such as low strength at low temperature,<sup>2</sup>

higher processing temperature,<sup>3</sup> and low efficiency of polymerization catalyst, it has been restricted to a few applications. So, many researchers are still interested in blending SPS with secondary polymer materials and in the miscibility of its polymer blends.

The previous researches have studied the miscibility of polystyrene with several polymers, viz. polyphenyleneether (PPE), polyvinylmethylether (PVME), poly-2-chlorostyrene (PCS), polymethylstyrene (PMS), polycarbonate of tetramethyl bisphenol-A (TMPC), polycyclohexyl acrylate (PCHA), polyethylmethacrylate (PEMA), polycyclohexyl methacrylate (PCHMA) and etc.<sup>4</sup> Widmaier and Mignard<sup>5</sup> investigated the blends of PS of molecular weights from 4000 to 80,000 g/mol to poly( $\alpha$ -methylstyrene) of molecular weights from 55,000 to 300,000 g/mol by freeze-drying from benzene solutions. Glass transition temperature ( $T_g$ ) measurements by differential scanning calorimetry (DSC) indicate that the miscibility behavior of the polymers is very sensitive to change of molecular weights. A decrease in PS chain length changes a two-phase system into a miscible or partially miscible blend. Cimmino et al.<sup>6,7</sup> investigated the dependence of miscibility on composition and temperature in SPS/PVME blends by means of

Correspondence to: S. Wacharawichanant (iamsirirat@yahoo.com).

Contract grant sponsor: Graduated School of Chulalongkorn University.

*Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 114, 2053–2059 (2009)  
© 2009 Wiley Periodicals, Inc.

solid-state NMR and DSC. The DSC experiments showed two  $T_g$  values corresponding to an SPS-rich phase (83 : 17 wt %) and a PVME-rich phase (13 : 87 wt %). For SPS/PPE blends, DSC and DMTA measurements give an intermediate single  $T_g$  value<sup>8-11</sup> between those of the pure components and obviously depended on the compositions. The  $T_g$  values of SPS and PPE are much different from each other (98 and 220°C, respectively), and this result constitutes an unambiguous proof of the blend miscibility within the whole composition range.

However, the excellent properties of polymer can become a cause of limitation in manufacturing processes especially the viscosity of melted polymers. The polymer blending procedure requires many complicated operations involving high temperature and high shear rate; therefore, their processing and manufacturing of polymer blends usually consume high energy. The processing properties of polymer blends can be modified by adding various additives, such as antioxidants, plasticizers, and others. Many additives can reduce melt viscosity of polymers to improve their processability, but most additives may cause many negative effects to important properties of polymers, especially the mechanical properties of the final products. Lubricant,<sup>12</sup> a small quantity polymers' additive, can provide a considerable decrease in resistance to the movement of chains or segments of amorphous polymer or at least partly amorphous structure. Low molar mass liquid crystals (LMMLCs) were also found to improve processability of polymers.<sup>13,14</sup> Patwardhan and Belfiore reported that addition of LMMLC to amorphous polymers could improve both processability and mechanical properties of the blends.<sup>15</sup> The addition of low molar mass liquid crystal (CBC33) can dramatically reduce the melt viscosity of polycarbonate as observed by the rheometer.<sup>13</sup>

This work investigates the miscibility and thermal properties of SPS, which synthesized by homogeneous half-metallocene catalyst system, blended with various polymers, and of these SPS blended properties after addition of low molar mass liquid crystal (CBC33) and lubricant (GMS).

## EXPERIMENTAL

### Materials

Styrene monomer purchased from Fluka Chemie A.G. was distilled from sodium under vacuum just before use. Trichloro(pentamethyl cyclopentadienyl)

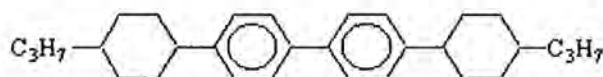


Figure 1 Structure of CBC33.

TABLE I  
Properties of Low Molar Mass Thermotropic  
Liquid crystals

Property	CBC33
Melting point (°C)	158
Smectic-nematic temperature (°C)	223
Clearing temperature (°C)	327
Molecular weight (g/mol)	403

titanium (IV) ( $Cp^*TiCl_3$ , 97.0%) was purchased from Aldrich. Modified methylaluminoxane (MMAO) 1.831 M in toluene was donated from Tosoh Akso, Japan. The low molar mass liquid crystal (LMMLC), CBC33, was purchased from Merck Co., Ltd. in the form of a white powder. The CBC33 structures that contain a cyclohexyl-biphenyl-cyclohexane backbone can be shown as Figure 1. Its molecular weight characteristics, transition temperatures, and other physical properties can be shown in Table I. The lubricant, glycerol monostearate (GMS), was kindly provided by Rikevita Ltd (Malasia) with the melting point of 65°C and the molecular weight of 358 g/mol. The chemical structure of GMS can be shown in Figure 2.

Poly(*n*-butyl methacrylate)—PBMA, poly( $\alpha$ -methyl styrene)—PaMS, poly(cyclohexyl acrylate)—PCHA, poly(cyclohexyl methacrylate)—PCHMA, poly(*cis*-isoprene)—PIP, poly(ethyl methacrylate)—PEMA were purchased from Scientific Polymer Products, Inc and used as received.

### Polymerization procedure

$Cp^*TiCl_3$  (~ 0.014 g) was stirred in 35 mL of toluene under argon atmosphere until dissolved. Styrene monomer (chemical reagent grade) was washed with 5% aqueous sodium hydroxide (NaOH) solution and distilled water, then distilled under reduced pressure.

Polymerization of styrene was carried out in a 250 cm<sup>3</sup> glass reactor equipped with a magnetic stirrer by introducing 46 mL of toluene, 32 mL of  $Cp^*TiCl_3$  dissolved in toluene, 13.6 mL of MMAO and 28.4 mL of styrene at the desired temperature of 25°C under argon atmosphere. The total volume of the polymerization mixture was 120 mL. The addition of styrene was regarded as the starting point of the polymerization reaction. After complete the

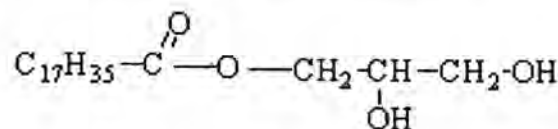


Figure 2 Structure of glycerol monostearate (GMS).



TABLE II  
Polymerization of Styrene Using  $Cp^*TiCl_3$  with MMAO<sup>a</sup>

% Yield <sup>b</sup>	72.67 wt %
Catalytic activity	5084.67 g PS/mole Ti-hr
% Syndiotactic index	93.38 %
$M_w^c$	1,943,500 g/mol
$M_n^c$	592,300 g/mol
Molecular weight distribution (MWD) <sup>c</sup>	3.3
$T_g^d$	97.90°C
$T_m^d$	271.41°C

<sup>a</sup> Conditions:  $[Cp^*TiCl_3] = 3.68 \times 10^{-4} M$ ,  $[MMAO] = 1.83 M$ ,  $[Styrene] = 2.06$ ,  $Al/Ti = 563$ ,  $25^\circ C$ .

<sup>b</sup> Calculated from (weight of synthesized polymer/weight of monomer)  $\times 100$ .

<sup>c</sup> Obtained from GPC and MWD was calculated from  $M_w/M_n$ .

<sup>d</sup> Obtained from DSC.

desired reaction time, the reactions were terminated by the addition methanol followed by 10% HCl in methanol. The precipitated polymer was washed several times with methanol and dried at room temperature. The polymer obtained was extracted with refluxing methyl ethyl ketone (MEK) for 12 h to isolate the SPS portion of the polymer obtained from other isomers.

Soxhlet extractor was used for syndiotactic content determination. The obtain polystyrene was extracted with boiling methyl ethyl ketone (MEK) or 2-butanone to give syndiotactic (insoluble) and atactic/isotactic (soluble) polystyrene. A % syndiotactic index (% S.I.) is computed from

$$\% \text{ S.I.} = \frac{\text{Insoluble Weight of PS}}{\text{Total Weight of PS}} \times 100 \quad (1)$$

The melting temperature ( $T_m$ ) and  $T_g$  values of the polymers were determined by a Perkin-Elmer DSC-Diamond. The analyses were performed at the heating rate of  $20^\circ C/min$  in the temperature range  $50\text{--}300^\circ C$ . The molecular weight ( $M_w$ ) and molecular weight distribution (MWD) were investigated by gel permeation chromatography (GPC). Samples were prepared accurately at a concentration of approximately  $0.5\text{--}1.0 \text{ mg/mL}$  in the mobile phase and dissolved by using the PL-SP 260 at a temperature of  $150^\circ C$  for, approximately, an hour. The dissolved sampled were transferred into PL-GPC 220. The GPC measurement was performed at Thai Petrochemical Industry Public Co., Ltd.

#### Polymer blend preparation and characterization

The blends of SPS/polymers and their blends with, CBC33, the liquid crystal or, GMS, the lubricant were prepared by mechanical mixing using a digital hot plate at various compositions. The SPS/polymers

were mixed together with CBC33 or GMS at  $310^\circ C$ , and all the blended samples were kept at  $300^\circ C$  for 5 minutes before immediately quenched to  $200^\circ C$  and held for 20 minutes, before further cooled down to room temperature. The melting temperature ( $T_m$ ), the crystallization temperature ( $T_c$ ) and the glass transition temperature ( $T_g$ ) of the blends were determined by a Perkin-Elmer DSC-Diamond. The analyses were performed at the heating rate of  $20^\circ C/min$  in the temperature range  $50\text{--}300^\circ C$ .

## RESULTS AND DISCUSSION

### Polymerization of styrene

The results of the polymerization of styrene, using Pentamethylcyclopentadienyl titanium trichloride ( $Cp^*TiCl_3$ ) with modified-methylaluminumoxane (MMAO) as cocatalyst, can be summarized as in Table II.

### Effect of LMMLC and lubricant on thermal properties of polymer blends

#### Glass transition temperature

The glass transition temperature is the characteristic of the amorphous part of the polymers. At  $T_g$ , a dramatic change occurs in the local movement of molecule level of polymer chain from glassy state to rubbery state, which this changes almost all of the physical and mechanical properties of polymer.<sup>16</sup>

The miscibility of binary blends is frequently ascertained by measurements of their  $T_g$ . Figure 3 shows  $T_g$  of each composition of SPS/PaMS blend. It is observed that the  $T_g$  of pure SPS and PaMS is  $97.90$  and  $87.33^\circ C$ , respectively. All the blends with different compositions exhibit single  $T_g$  which shifted to a higher temperatures in the same trend as the SPS content in the samples. This result may imply the miscibility of the two components in the blends under the DSC condition. The thermal

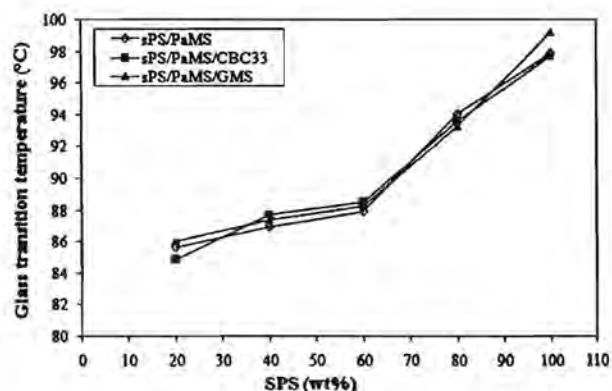


Figure 3 Glass transition temperature of SPS/PaMS blends before and after adding CBC33 and GMS.

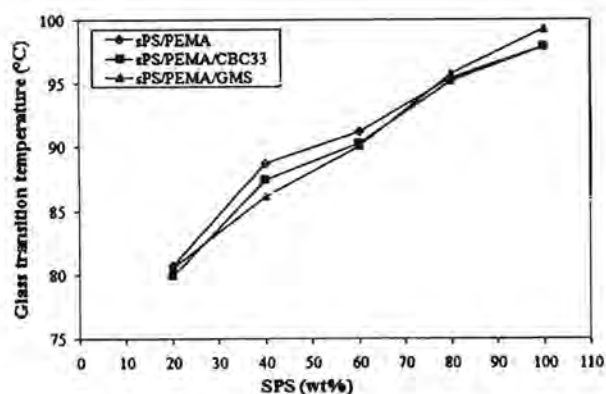


Figure 4 Glass transition temperature SPS/PEMA blends before and after adding CBC33 and GMS.

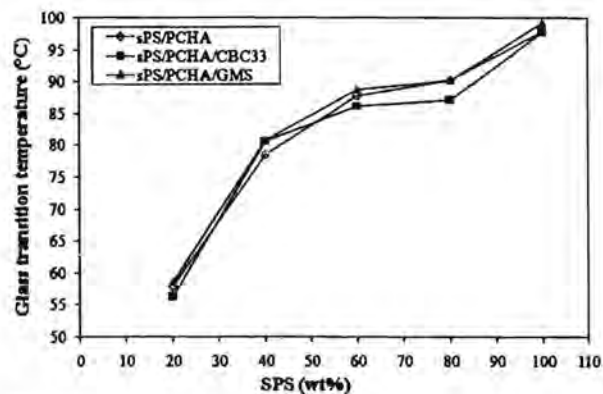


Figure 6 Glass transition temperature SPS/PCHA blends before and after adding CBC33 and GMS.

characteristics of SPS/PaMS/CBC33 blends and SPS/PaMS/GMS blends are shown that  $T_g$  of binary blends are in the same vicinity of their blends with CBC33 and GMS. The difference between  $T_g$  of binary blends and their blends with additives are less than 1°C, and cannot be distinguished from each other. These phenomena may be resulted from the too small (1.0% w/w) amount of additives in the matrix phase of the binary blends that are not enough to plasticize the blends to such an extent that the significant reducing in  $T_g$  of the blends can be observed.

Figures 4–7 show  $T_g$  of each composition of SPS/PEMA, SPS/PBMA, SPS/PCHA, SPS/PIP blend. It is observed that all the blends with different compositions exhibit single  $T_g$ , which shifts to a higher temperature with the SPS content. This result may imply that the miscibility of the two components in the amorphous state of the blends. The values of  $T_g$  of binary blends are in the same vicinity to their blends with CBC33 and GMS. Thus, the additions of CBC33 and GMS have not significantly affected  $T_g$  of binary blends as same as SPS/PaMS blends.

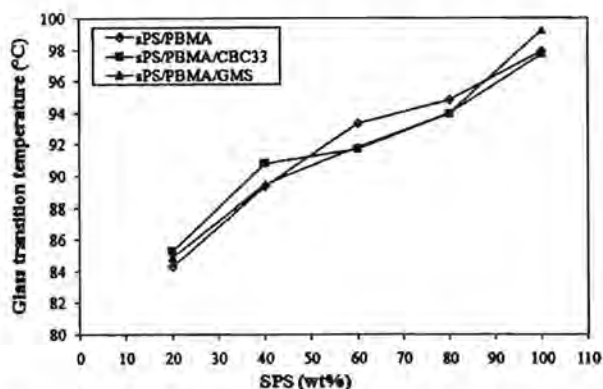


Figure 5 Glass transition temperature SPS/PBMA blends before and after adding CBC33 and GMS.

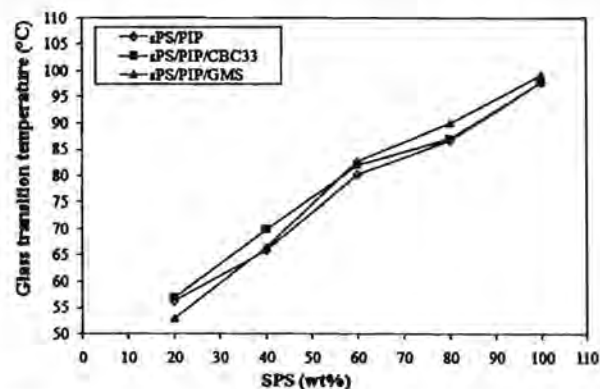


Figure 7 Glass transition temperature SPS/PIP blends before and after adding CBC33 and GMS.

From these results, it was found that the SPS have tendency to be miscible with PaMS, PEMA, PBMA, PCHA, and PIP by melt mixing method. The glass transition temperatures of all the blends with additives do not significantly change from additive less binary blends. This phenomenon proves that additives do not have significant direct plasticizing effects on glass transition temperature of pure binary blends when added in the small quantity.

#### Crystallization temperature

The crystallization temperature is the temperature that the SPS in the blends started to crystallize due to lower temperature from the cooling ramp rate in DSC. From Figure 8, when the crystallization temperature at cooling rate of 20°C/min ( $T_c$ ) of SPS/PaMS blends and their blends with additives were compared, they can be showed that addition of CBC33 have affected in the slightly increasing  $T_c$  of their blends in the amount of less than 3°C apart from the pure blend. These differences were located

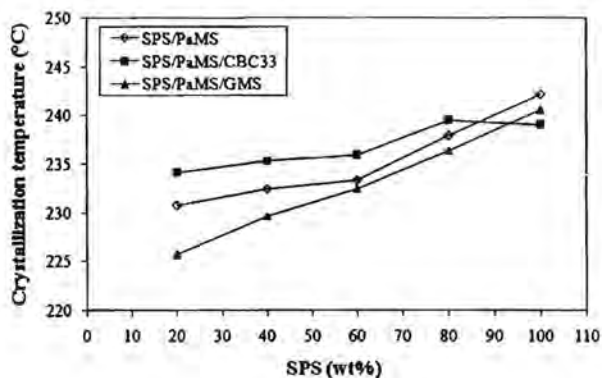


Figure 8 Crystallization temperature of SPS/PaMS blends before and after adding CBC33 and GMS.

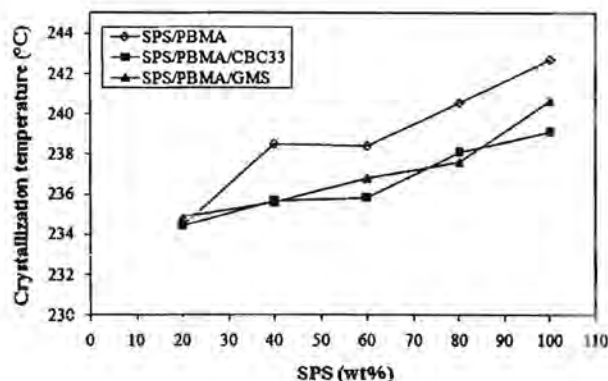


Figure 10 Crystallization temperature of SPS/PBMA blends before and after adding CBC33 and GMS.

in error limit of the DSC that is less than  $\pm 5^\circ\text{C}$  apart from each other. But the addition of GMS has the adverse affected by slightly decreasing the  $T_c$  of their blends in the vicinity of less than  $3^\circ\text{C}$  apart from the pure blend. These differences still were in the error limit of the DSC, and the increases/decreases were not significant while the concentration of the blend changed. So, in the system of SPS/PaMS, the additives (CBC33, GMS) of the small amount in the SPS/PaMS blend were not changed significantly the crystallization temperatures of the blend. This might be because of too similar molecular structures between the SPS and PaMS.

From Figure 9, it can be seen that the addition of CBC33 in SPS/PEMA blends affected the decreasing of  $T_c$  in their blends about  $4\text{--}11^\circ\text{C}$  from pure blend without CBC33. The addition of GMS also affected the decreasing  $T_c$  of their blends about  $2\text{--}10^\circ\text{C}$ . These temperature differences were significant and we can draw the conclusion that the additives tend to significantly decrease the  $T_c$  of SPS/PEMA blends, regarded the small amount of the additive.

For SPS/PBMA blends, the additions of CBC33 or GMS have affected in decreasing of  $T_c$  in their

blends about  $3^\circ\text{C}$  apart from the pure blend  $T_c$  as shown in Figure 10. Although the decreases of  $T_c$  were in the error limit of the DSC, but the unanimous decreases in  $T_c$  implied the significant variations. Thus, the additions of CBC33 or GMS have significant trended in decreasing the  $T_c$  of SPS/PBMA blends, regarded the small amount of the additive.

Figure 11 shows the values of  $T_c$  of SPS/PCHA blends before and after addition of CBC33 or GMS. It can be concluded that the additions of CBC33 or GMS have affected in decreasing of  $T_c$  of the blends about  $2\text{--}5^\circ\text{C}$  from the pure blend. Thus, both additives have significant effects in decreasing the  $T_c$  of SPS/PCHA blends, regarded the small amount of the additive.

Similarly, for SPS/PIP blends, the addition of CBC33 or GMS have affected significantly in decreasing of  $T_c$  of the blends about  $2\text{--}7^\circ\text{C}$  from the pure blend as shown in Figure 12. Thus, both additives also have significant effects in decreasing the  $T_c$  of SPS/PIP blends from the pure blend, regarded the small amount of the additive.

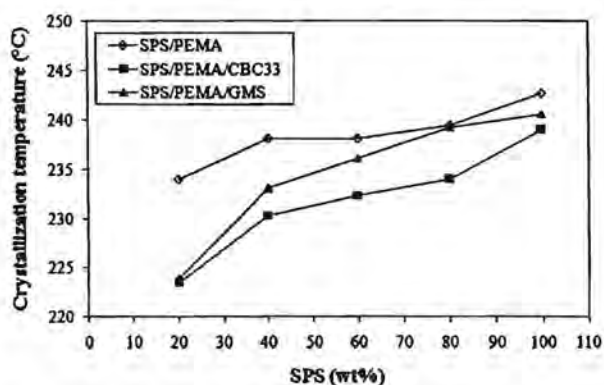


Figure 9 Crystallization temperature of SPS/PEMA blends before and after adding CBC33 and GMS.

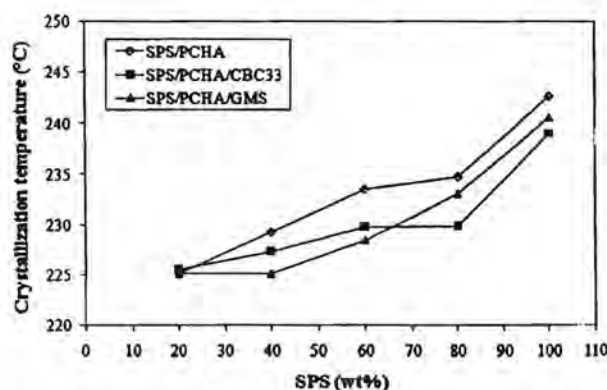


Figure 11 Crystallization temperature of SPS/PCHA blends before and after adding CBC33 and GMS.



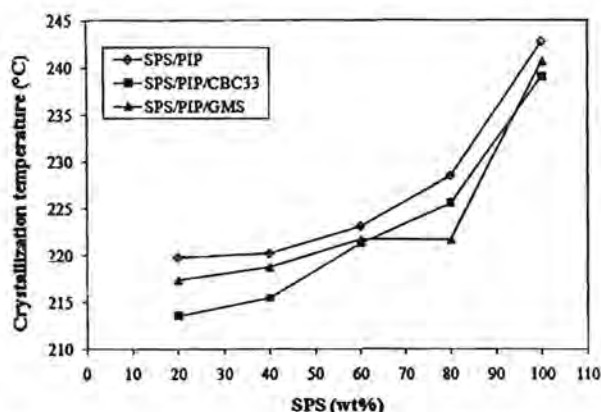


Figure 12 Crystallization temperature of SPS/PIP blends before and after adding CBC33 and GMS.

To summarize from these results, the effects of adding CBC33 or GMS resulted in the significantly slightly decreasing  $T_c$  of the polymer blends concerned except the blend with PaMS. These might be because CBC33 and GMS can reduce melt viscosity of the blends,<sup>13,17</sup> so the molecules of the polymers in the blend could move or separate easily. Therefore, the mobile SPS molecules have more difficulty to form the crystal from the induced of cooling temperature, because more mobile SPS molecules may tend to move apart from the order (crystal). The crystalline temperature will decrease according to the mobility of the molecules when added the CBC33 or the GMS due to the less order of the easily mobile chain molecules.

### Melting temperature

For polymer blends, the depression phenomenon of the crystalline melting point temperature ( $T_m$ ) usually happened from the lower of the blends' Gibbs free energy. From Figure 13, the crystalline melting temperature  $T_m$  of the pure binary blends and their blends with additives have unanimous lowering tendency than the  $T_m$  of the pure component of SPS, although the decreases were in the error limit of the DSC. The decreases were more pronounced with the additions of CBC33 or GMS which the  $T_m$  of the addition blends were unanimously and slightly lower than the  $T_m$  of the pure blends. In every systems concerned in this research, the crystalline melting points when added the CBC33 or GMS were lowered than the pure polymer blend. From melting point depression phenomenon, the crystalline melting point will be lower if the additives were added to the pure blends. However, because of the small amount of the CBC33 or GMS added, the quantities of the crystalline melting point depression will not only come from the melting point depression

phenomenon alone but also contribute from the addition of the CBC33. The decreasing in the crystalline melting point due to the addition of small molecule can be calculated from the equation below,<sup>18</sup>

$$\frac{1}{T_m} - \frac{1}{T_m^0} = -\frac{R}{\Delta H_f} \ln X_A \quad (2)$$

where,  $\Delta H_f$  represents the molar enthalpy of the fusion from the SPS crystal. To a first approximation, the melting point depression depends on the mole fraction of impurity ( $X_B$ ) and the mole fraction of crystallizable polymer (being  $X_A$ ). For polymer blends, the crystalline melting temperature depression phenomenon that results from the lower of the blend Gibbs free energy needed to have the large amount of  $X_B$  to overcome the effect from the molar enthalpy of the fusion. Thus, by this equation, the crystalline melting temperature of the binary blends and their blends with very small amount of additives will have very slightly tendency to lower the temperature from the pure component of the polymers. However, in this research, the effects in lowering the crystalline melting point ( $T_m$ ) might also come from the contribution from the addition of the CBC33 more than the melting point depression by normal additive. These might be because of the molecular mobility enhancement from both CBC33 and GMS,<sup>13,17</sup> the crystal of the blends will melt easier. The more mobile SPS molecules can slide and depart from each other easier than the blend's SPS molecules without additive; therefore, the crystal will melt easier than the polymer blend without the additive. Moreover, as we have concluded before, the ease of the moving of the SPS molecules may enhance the depression in the crystalline temperature ( $T_c$ ). By the same assumption, the systems will also have the tendency to be apart from the shape of the crystal (melting of the crystal) faster than the

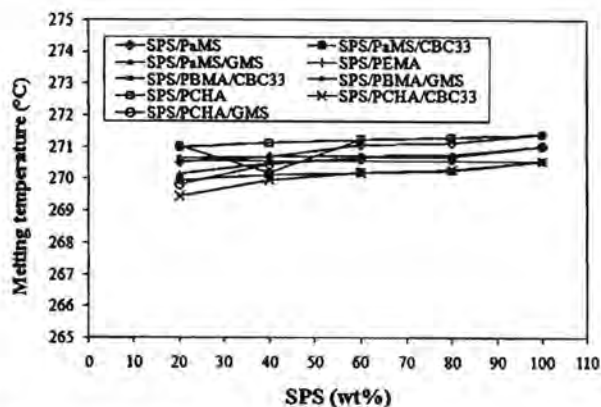


Figure 13 Melting temperature depression of their blends.

normal pure SPS molecules in the normal blend, so the  $T_m$  will be lower than usual.

### CONCLUSIONS

In this research, the miscibility and thermal properties of SPS blended with several polymers such as PaMS, PEMA, PBMA, PCHA, and PIP were investigated. The SPS was synthesized by using metallocene catalyst. From DSC, it was found that the SPS have tendency to miscible with PaMS, PEMA, PBMA, PCHA and PIP by melt mixing method. The glass transition temperatures of all the blends with additives do not significantly change from non additive binary blends. This phenomenon proves that additives do not have direct plasticizing effects on glass transition temperature of pure binary blends, regarded the small amount of additives.

Both CBC33 and GMS significantly decrease the crystallization temperature ( $T_c$ ) of polymer blends. Because CBC33 and GMS reduce melt viscosity of the blends,<sup>13,17</sup> the polymers' molecules could move or separate easily. The SPS in the blends might subject to more difficulty to ally their molecules in the shape of the crystal from the fast mobility melt of the polymer blends when added CBC33 or GMS. Therefore, when mobile melt molecule tends to form the crystal, it will hardly form the crystal in case of GMS and CBC33 addition in the blend. Thus, the ease of the moving of the molecule will enhance the depression in the crystalline temperature.

The CBC33 and GMS slightly decrease crystalline melting temperature ( $T_m$ ) of their blends. By the same assumption, because CBC33 and GMS reduced melt viscosity of the blends, crystal of the blends will melt easier. In other words, the  $T_m$  tends to decrease when added with GMS or CBC33 because of the effects from the mobility of the molecules. It

can be concluded that the effects of lowering the crystalline melting point largely come from the contribution from the addition of the small amount of CBC33 more than the normal melting point depression by normal additive.

The authors would like to thank Tosoh Akso, Japan for the MMAO.

### References

1. Ishihara, N.; Kuramoto, M.; Uoi, M. *Macromolecules* 1998, 21, 3356.
2. Candi, F. D.; Romano, G.; Russo, R.; Vittoria, V. *Colloid Polym Sci* 1990, 268, 720.
3. Cimmino, S.; Di Pace, E.; Martuscelli, E.; Silvestre, C. *Polymer* 1991, 32, 1080.
4. Utracki, L. A. *Polymer Blends Handbook*; Kluwer Academic Publishers: London, 2002; vol. 1.
5. Widmaier, J. M.; Mignard, G. *Eur Polym J* 1987, 23, 989.
6. Cimmino, S.; Di Pace, E.; Martuscelli, E.; Silvestre, C. *Polymer* 1993, 34, 2799.
7. Cimmino, S.; Di Pace, E.; Martuscelli, E.; Silvestre, C.; Rice, D. M.; Karasz, F. E. *Polymer* 1993, 34, 214.
8. Guerra, G.; Vitagliano, V. M.; De Rosa, C.; Petraccone, V.; Corradini, P. *J Polym Sci Part B: Polym Phys* 1991, 29, 265.
9. Choi, S. H.; Cho, I.; Kim, K. U. *Polym J* 1999, 31, 828.
10. Li, H.; Li, G.; Yang, W.; Shen, J. *Polym Prepr Am Chem Soc Div Polym Chem* 1998, 39, 689.
11. Hong, B. K.; Jo, W. H.; Lee, S. C.; Kim, J. *Polymer* 1998, 39, 1793.
12. Lutz, J. T.; Grossman, R. F. *Polymer Modifiers and Additives*; Marcel Dekker: New York, 2001.
13. Motong, N.; Thongyai, S.; Clarke, N. *J Appl Polym Sci* 2008, 107, 1108.
14. Mothong, N.; Clarke, N.; Thompson, R. L.; Collins, S. A.; Thongyai, S. *J Polym Sci Part B: Polym Phys* 2007, 45, 2187.
15. Patwardhan, A. A.; Belfiore, L. A. *Polym Eng Sci* 1988, 28, 916.
16. Brandrup, J.; Immergut, E. H. *Polymer Handbook*; 3rd ed.; John Wiley & Sons: New York, 1989.
17. Wacharawichanant, S.; Thongyai, S.; Tanodekaew, S.; Higgins, J. S.; Clarke, N. *Polymer* 2004, 45, 2201.
18. Sperling, L. H. *Introduction to Physical Polymer Science*; Wiley-Interscience: New Jersey, 2006.

# The Crystallinity and Miscibility of Syndiotactic Polystyrene Blends after Mixing with Low Molar Mass Liquid Crystal or Commercial Lubricant<sup>1</sup>

Pichet Pahupongsab<sup>a</sup>, Supakanok Thongyai<sup>a</sup>, Sirirat Wacharawichanant<sup>b</sup>, and Piyasan Prasertolham<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Center of Excellence on Catalysis and Catalytic Reaction Engineering, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>b</sup> Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand  
e-mail: iamsirirat@yahoo.com

Received October 11, 2008;  
in final form, February 18, 2009

**Abstract**—The quantities of the crystallinity of syndiotactic polystyrene (SPS) blended with another polymer in the group of poly( $\alpha$ -methyl styrene), poly(*n*-butyl methacrylate) or poly(cyclohexyl acrylate) with or without the additives were measured by X-ray diffraction and calculated by Ruland's method. The SPS was synthesized by using metallocene catalyst and modified-methylaluminoxane as cocatalyst. The additive of low molar mass liquid crystal chemical (cyclohexyl-biphenyl-cyclohexane (CBC33)) or lubricant (glycerol monostearate (GMS)) was individually added to the blends of SPS in order to investigate the effects on the crystallinity of the blended SPS. From the experimental results, it was found that the percent crystallinities of the blends decreased with decreasing the percent of SPS in the blend because of the dilution of SPS. The depression of the percent crystallinity was in the order of PaMS > PCHA > PBMA according to the compatibility with SPS. The addition of GMS or CBC33 slightly decreased the percent crystallinity of the pure SPS. The addition of GMS impeded the depression of the SPS crystallinity in the blends, because their percent depression from pure SPS is similar (at around 25%) regardless to the components of the blends. The blends with added CBC33 have the similar depression of crystallinity as the pure blends because of the low concentration of CBC33 and the good compatibility of CBC33 with the SPS.

DOI: 10.1134/S0965545X10030090

## 1. INTRODUCTION

Syndiotactic polystyrene (SPS) is a semi-crystalline polymer synthesized from styrene monomer using a metallocene catalyst [1–4]. The syndiotacticity of SPS results from the homogeneous coordinative polymerization mechanism. Typically, group 4 transition metal complexes are utilized with co-catalysts such as methylaluminoxane (MAO) or pentafluorophenyl borate derivatives. Initial evaluation reactions of various titanium compounds with MAO have been published [1, 5–7]. SPS has attractive characteristics such as high melting temperature (about 270°C) and high crystallization rate. In particular, the thermal and mechanical behavior of SPS is very interesting if compared with that of an atactic and isotactic analogs [8]. Its high heat resistance and modulus of elasticity, low dielectric constant, excellent resistance to chemicals and relatively fast crystallization rate make SPS a potential thermoplastic for a large number of applications in the automotive and electronic industries [9].

A few studies on SPS-based blends such as SPS/poly(vinyl methyl ether) (PVME),

SPS/poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene oxide) (PPO), SPS/poly(p-phenylene sulfide) (PPS), SPS/polyphenylene ether (PPE), and SPS/poly(styrene-co- $\alpha$ -methyl styrene) blend have been reported in the literature [10–14]. Hong et al. [15] investigated the miscibility of SPS/atactic polystyrene (APS) blends, whose constituent polymers have close  $T_g$ s by crystallization kinetics and enthalpy relaxation. It is observed from crystallization kinetics experiment that both the spherulite growth rate and the overall crystallization rate of SPS in blends decrease with an increasing amount of APS, indicating that SPS is diluted with APS. When enthalpy relaxations of the blends are examined, it is revealed that the enthalpy recovery of SPS/APS blends shows a single peak whose relaxation times is intermediate between those of SPS and APS. It is concluded that SPS/APS blends are completely miscible over the entire composition. Duff et al. [16] prepared the blends of SPS with polyphenylene ether (PPE) to determine the effect of blending on the crystallisation mechanism of SPS. The miscibility of the blend was confirmed by both differential scanning calorimetry (DSC) and dynamic mechanical thermal analysis (DMTA). Crystallisation of the blends was

<sup>1</sup> The article is published in the original.



studied under isothermal and non-isothermal conditions using DSC. X-ray diffraction (XRD) was used to determine that the SPS polymorph present was the  $\beta$ -form. The diffuse scattering was shown to increase with PPE content, particularly with blends prepared using higher molecular weight PPE. Overall, the results indicate that the crystallisation of SPS is affected by blending with PPE, with the melting enthalpy of SPS decreasing and the half-time to crystallisation increasing with PPE concentration. This is thought to occur because of the lack of flexibility in the PPE chain compared with the SPS chain.

Chiu et al. [14] examined the miscibility, crystallization kinetics, melting behavior and crystal structure of SPS/poly(styrene-co- $\alpha$ -methyl styrene) blends. DSC, polarized light microscopy and wide angle X-ray diffraction (WAXD) technique were used to approach the goals. The single composition-dependent  $T_g$ s of the blends and the melting temperature ( $T_m$ ) depression of SPS in the blends indicated the miscible characteristic of the blend system at all compositions. Zhou et al. [17] studied isothermal crystallization, melting behavior and crystalline morphology of SPS blends with highly-impact polystyrene (HIPS). SPS blends with HIPS were prepared with a twin-screw extruder. Isothermal crystallization, melting behavior and crystalline morphology of SPS in SPS/HIPS blends were investigated by DSC, WAXD and polarized optical microscopy (POM). Experimental results indicated that the isothermal crystallization behavior of SPS in its blends not only depended on the melting temperature and crystallization temperature, but also on the HIPS content. Addition of HIPS restricted the crystallization of SPS melted at 320°C. For SPS melted at 280°C, addition of low HIPS content (10 wt % and 30 wt %) facilitated the crystallization of SPS and the formation of more content of  $\alpha$ -crystal. However, addition of high HIPS content (50 wt % and 70 wt %) restricted the crystallization of SPS and facilitated the formation of  $\beta$ -crystal. More content of  $\beta$ -crystal was formed with increase of the melting and crystallization temperature.

Polymeric blends of melt processable polymers and liquid crystalline compounds have been studied in many researches. This review covers liquid crystalline (LC) blends containing low molar mass liquid crystal chemical (LCC). The main reason of blending low molar mass liquid crystal blends is to improving the melt viscosity of the blends. Buckley et al. [18] investigated the blends of LCC with either polyolefin or polyester. The LCC have molecular weight less than about 1000 g/mol. The LCC consists of groups *N,N*-bis(*p*-methoxybenzylidene)- $\alpha,\alpha'$ -bi-*p*-toluidine, *p*-methoxycinnamic acid, *N,N*-bis(4-octyloxybenzylidene)-*p*-phenylenediamine. The LCC used is present in an amount of from about 0.5 to 5% by weight, and the melt viscosity of the blend was determined by a capillary rheometer. The melt viscosity of

LCC blends reduced by as much as 25 to 30% compared with the pure matrix polymers. Siegmann et al. [19] prepared the polymer blends of liquid crystalline aromatic copolyester (based on 6-hydroxy-2-naphthanoic acid (HNA) and phydroxybenzoic acid) and an amorphous polyamide (PA) by melted mixing method. The rheological behavior of the blends was very different from pure component and viscosity of blends significantly changed. Only 5% by weight of liquid crystal polymer (LCP) in the blend could reduce the viscosity 20–25 times. Wacharawichanant et al. [20] investigated the effects on molecular motion in melt mixed poly(styrene-co-acrylonitrile) (SAN) containing 25% by weight of acrylonitrile (AN) and poly(methyl methacrylate) (PMMA) (20/80 wt %) blends after adding two LCCs (CBC33 and CBC53) and two lubricants (GMS and zinc stearate) by using light scattering techniques. The samples were assessed in terms of the apparent diffusion coefficient ( $D_{app}$ ) obtained from observation of phase separation in the blends. The early stages of phase separation as observed by light scattering were dominated by diffusion processes and approximately conformed to the Cahn–Hilliard linearised theory.

The major effect of LCC was to increase the molecular mobility of the blends. The LC generally increased the Cahn–Hilliard apparent diffusion coefficient,  $D_{app}$ , of the blend when added with concentrations as low as 0.2 wt %. GMS and zinc stearate can also improve the mobility of the blend but to a lesser extent and the effect does not increase at higher concentration. On the other hand, the more LCC added, the higher the mobility.

This work studied the crystallinity of SPS, which synthesized by homogeneous half-metallocene catalyst system, blend with various polymers. Also, the effect of LCC and GMS on the crystallinity of the polymer blends was the first time to investigate by wide-angle X-ray diffraction (WAXD). It will also be interesting to investigate the crystalline properties of

SPS in the blends to compare with previous reports and understand the background phenomena beside. The effects of addition of LCC or GMS in homopolymer [21–23] and in phase separated blends [20] are reported, but the effects in crystallinity is new and highly interesting.

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1. Materials

SPS was synthesized in our laboratory. The percent syndiotactic index is 93.38%, the weight average molecular weight ( $M_w$ ) is 1943500 g/mol and the number average molecular weight ( $M_n$ ) is 592300 g/mol. The melting temperature ( $T_m$ ) and the glass transition temperature ( $T_g$ ) are 271.41°C and 97.90°C, respectively. Poly(*n*-butyl methacrylate) (PBMA), poly( $\alpha$ -methyl styrene) (PaMS), poly(cyclohexyl acrylate)



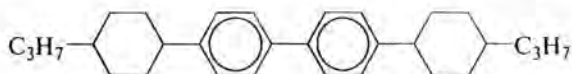


Fig. 1. Structure of CBC33.

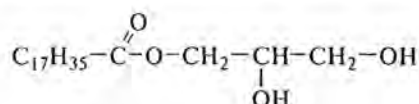


Fig. 2. Structure of glycerol monostearate (GMS).

(PCHA), were purchased from Scientific Polymer Products, Inc. and used as received.

Low molar mass liquid crystal chemical (LCC, cyclohexyl-biphenyl-cyclohexane (CBC33)) was purchased from Merck Co., Ltd. CBC33 liquid crystal was used in this research in the form of a white powder. Its structure which contains a cyclohexyl-biphenyl-cyclohexane backbone is shown as Fig. 1. Molecular weight characteristics, transition temperatures, and other physical properties of CBC33 are shown in Table 1. The lubricant, glycerol monostearate (GMS) was kindly provided by Rikevita Ltd. (Malasia). The melting point is 65°C and the molecular weight is 358 g/mol. The chemical structure of GMS is shown in Fig. 2.

### 2.2. Polymer Blend Preparation

The blends of SPS and other polymer with or without LCC or lubricant were prepared by using a digital hot plate at various compositions. The blends of SPS and another polymer in the group of PaMS, PBMA, and PCHA respectively were melt-mixed on hot plate each at the SPS composition of 80, 60, and 40%. The blends were further melt-mixed with CBC33 or GMS of 1 wt % each at 310°C. After homogenized, all the samples were kept at 300°C for five minutes and immediately quenched to 200°C and held for twenty minutes and cool down before further experiments at room temperature.

### 2.3. Polymer Characterization

The molecular weight ( $M_w$ ) and molecular weight distribution (MWD) were investigated by gel permeation chromatography (GPC). Samples were prepared accurately at concentration of approximately 0.5–1.0 mg/ml in the mobile phase and dissolved by using the PL-SP 260 GPC sample preparation system at a temperature of 150°C for approximately hour. The dissolved samples were transferred into PL-GPC 220. GPC were performed at Thai Petrochemical Industry Public Co., Ltd. The glass transition temperature ( $T_g$ ) values of the polymers were determined with a Perkin-Elmer DSC-Diamond. The analyses were performed at the heating rate of 20°C/min in the temperature range 50 to 300°C. X-ray diffraction (XRD) was performed to determine the bulk crystalline phase of samples. It was conducted using a SIEMENS D-5000 X-ray diffractometer with  $\text{CuK}\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.54439 \text{ \AA}$ ). The spectra were scanned at a rate of 0.04 degree/second in the range  $2\theta = 10\text{--}40$  degree.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

### 3.1. Crystallization Controlled Conditions

All the blends produced in this research have the same crystallization condition. As freshly melted at 300°C which is higher than the crystalline melting point of pure SPS at 272°C, the blends were left at 200°C long enough to fully established crystallinity. Thus, all the blends have the same thermal history of the isothermal crystallization at 200°C. The PaMS, PBMA and PCHA each can be miscible with SPS in all the composition ranges utilized in this research. Usually the crystallization of the semi-crystalline polymer largely depended on the thermal history of the system. The SPS can have four kinds of crystal, namely  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  and  $\delta$ . The  $\alpha$  and  $\beta$  crystal can be thermally formed from the melt SPS, while  $\delta$  and  $\gamma$  crystal can be formed from the solution of special solvent [24–25].

### 3.2. Glass Transition Temperature

The  $T_g$  is a characteristic of the amorphous part of polymers. At  $T_g$ , a dramatic change occurs in the local movement of molecule level of polymer chain from glassy state to rubbery state, which changes almost all of the physical and mechanical properties of polymer [26].

The miscibility of binary blends is frequently ascertained by measurements of their  $T_g$ . Figure 3 shows  $T_g$  of each composition of SPS/PaMS blend. It is observed that the  $T_g$  of pure SPS, PaMS, PBMA and PCHA is 97.90, 87.33, 31.85 and 25.49°C, respectively. All the blends with different compositions exhibit single  $T_g$  which shifted to a higher temperatures in the same trend as the SPS content in the samples. This result may imply the miscibility of the two components in the blends under the DSC condition. The thermal characteristics of SPS/PaMS/CBC33 blends and SPS/PaMS/GMS blends show that  $T_g$  of binary blends are close to those of their blends with CBC33 and GMS. The difference between  $T_g$  of

Table 1. Properties of low molar mass thermotropic liquid crystals CBC33

Melting point, °C	Smectic-Nematic Temperature, °C	Clearing Temperature, °C	Molecular weight, g/mol
158	223	327	403

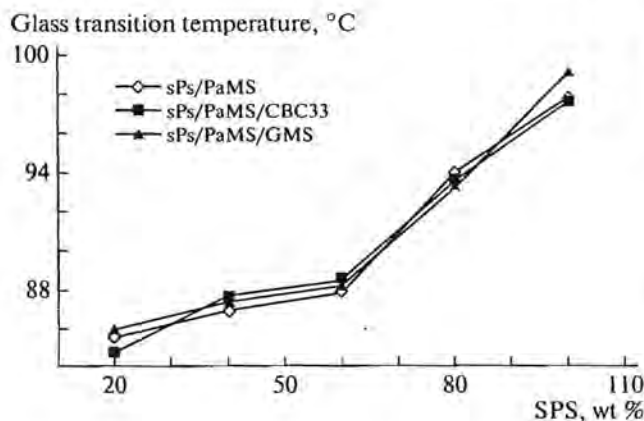


Fig. 3. Glass transition temperature of SPS/PaMS blends before and after adding CBC33 and GMS.

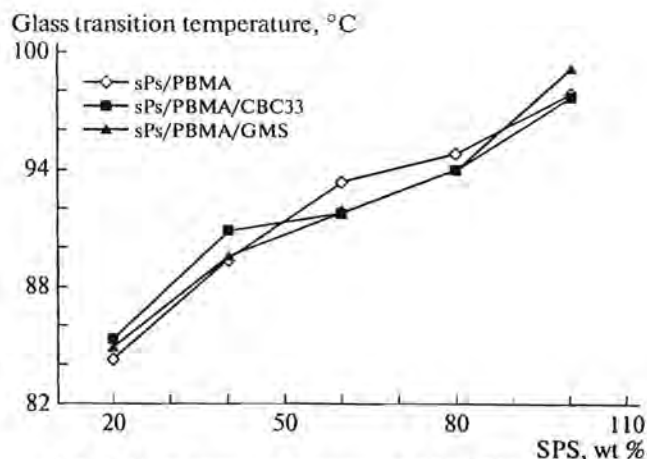


Fig. 4. Glass transition temperature SPS/PBMA blends before and after adding CBC33 and GMS.

binary blends and their blends with additives are less than 1°C, and cannot be distinguished from each other. These phenomena may be resulted from the too small (1.0% w/w) amount of additives in the matrix phase of the binary blends that are not enough to plasticize the blends to such an extent that the significant reducing in  $T_g$  of the blends can be observed.

Figures 4, 5 show  $T_g$  of each composition of SPS/PBMA and SPS/PCHA blend. It is observed that all the blends with different compositions exhibit single  $T_g$  which shifts to a higher temperature with the SPS content. This result may imply the miscibility of the two components in the amorphous state of the blends. The values of  $T_g$  of binary blends are close to those of their blends with CBC33 and GMS. Thus, the additions of CBC33 and GMS have not significantly affected  $T_g$  of SPS/PBMA and SPS/PCHA blends as same as SPS/PaMS blends.

From these results, it was found that the SPS have tendency to be miscible with PaMS, PBMA and PCHA by melt mixing method. The glass transition temperatures of all the blends with additives do not significantly change from  $T_g$  of additive-free binary blends. This phenomenon proves that additives do not have direct plasticizing effects on glass transition temperature of pure binary blends.

### 3.3. Effect of Additives on the Crystallinity

The crystallinity is determined by measuring the integrated area of the crystalline reflections and the integrated area of the non-crystalline background and comparing the two. In this research calculated percent of crystallinity from Ruland's Method [27].

The intensity of the X-rays scattered over all angles by a given assemblage of atoms is independent of their state of order or disorder. It follows that if the crystalline and amorphous scattering in the diffraction pattern can be separated from each other, the crystalline

fraction is equal to the ratio of the integrated crystalline scattering to the total scattering, both crystalline and amorphous. In the ensuing treatment, we shall adhere rather closely to the presentation given by Ruland [27]. We designate the magnitude of reciprocal-lattice vector  $\rho_{hkl}$  by the symbol  $s$ .

$$s = \frac{2 \sin \theta}{\lambda} \quad (1)$$

The fraction of crystalline material in the specimen is given by

$$x_c = \frac{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I_c ds}{\int_{s_0}^{s_p} s^2 I ds} (K(s_0, s_p, D, \bar{f}^2)) = \text{const.} \quad (2)$$

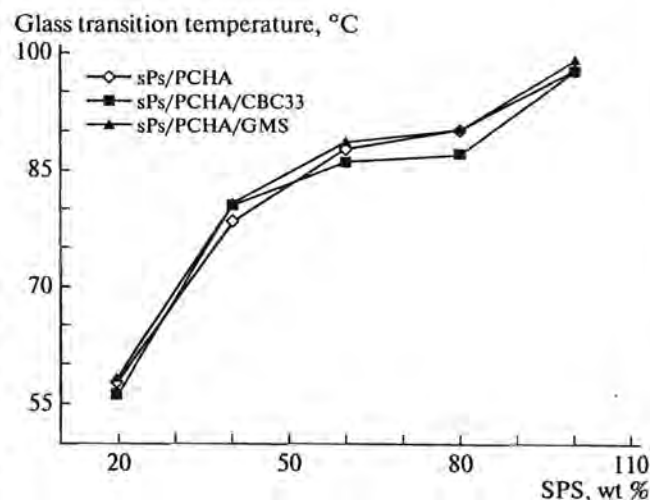


Fig. 5. Glass transition temperature SPS/PCHA blends before and after adding CBC33 and GMS.

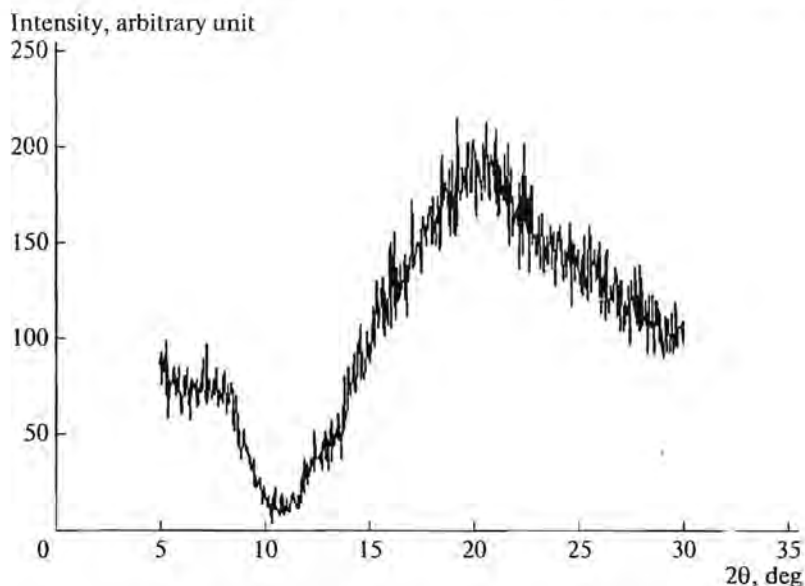


Fig. 6. X-ray diffraction pattern of pure amorphous SPS.

$I(s)$  is the intensity of coherent X-ray scattering from a specimen at the point  $s$  in reciprocal space.  $I_c(s)$  is the part of the intensity at the same point that is concentrated in the crystalline peaks.  $(K(s_0, s_p, D, \bar{f}^2))$  is lost from peaks and appears as diffuse scatter in the background as a result of atomic thermal vibrations and lattice imperfections. The  $K$  can be found from the empirical chart and can be assumed as a constant for each system.

However, Ruland found that calculated values of the coefficient  $K$  is

$$K = \frac{\int_{s_0}^{s_p} s^2 \bar{f}^2 ds}{\int_{s_0}^{s_p} s^2 \bar{f}^2 D ds} \quad (3)$$

X-ray diffraction pattern of pure amorphous SPS came from the melted SPS scattering at 300°C and is shown in Fig. 6. The curve is look like back of the turtle without any peak at all. All the crystalline content come from the excess area above the summation of the pure amorphous SPS and the amorphous another polymer weighs by composition of the polymer in the blend.

The percent crystallinity in Tables 2–4 come from the XRD data of the blend as shown in Figs. 7–9 and the pure component and were calculated according to the method that explains above. Crystallinity measurements offer a useful way to ascertain the influence of another polymer blended with SPS on the crystallization behaviour of SPS. Table 2 shows percent crystallinity of SPS/PaMS, SPS/PaMS/GMS and SPS/PaMS/LCC blends at various compositions.

When LCC and GMS were added into the pure SPS, percent crystallinity decreased about 6–7%. This might be because of the faster movement of molecules SPS that results from the contribution from small molecules [20–22]. However, the GMS affect the crystallinity of SPS in the same quantity as LCC regardless of the different function of the additive. The LCC can increase the mobility of the bulk phases [21] while the GMS cannot [20]. Nevertheless, the variation of the crystallinity of the pure SPS when added the additive of GMS and LCC is in the error limit of the experiments. Thus, we cannot definitely conclude about these depressions of the amount of crystal of SPS. In other word, the depressions can be negligible. The same 100% SPS data will be used in Tables 2–5.

Table 2 and Fig. 7 showed the depression of the quantity of the SPS crystal from pure 100% SPS. However, the depression according to the blend and

Table 2. Crystallinity of SPS/PaMS, SPS/PaMS/GMS and SPS/PaMS/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PaMS	SPS/PaMS/GMS	SPS/PaMS/LCC
40	19	39	20
60	24	27	23
80	38	27	29
100	57	49	52



**Table 3.** Crystallinity of SPS/PBMA, SPS/PBMA/GMS and SPS/PBMA/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PBMA	SPS/PBMA/GMS	SPS/PBMA/LCC
40	40	37	35
60	37	34	31
80	38	38	42
100	57	50	52

**Table 4.** Crystallinity of SPS/PCHA, SPS/PCHA/GMS and SPS/PCHA/LCC blends at various compositions

% SPS	% Crystallinity		
	SPS/PCHA	SPS/PCHA/GMS	SPS/PCHA/LCC
40	35	37	29
60	47	37	28
80	44	40	29
100	57	50	52

**Table 5.** Reduction in Crystallinity at 40% SPS compared with 100% SPS

Second polymer	Crystallinity (Reduction, %)		
	Blend	Blend/GMS	Blend/LCC
PaMS	19 (-66.2)	39 (-22.3)	20 (-61.3)
PBMA	40 (-30.9)	37 (-25.5)	35 (-32.6)
PCHA	35 (-39.2)	37 (-25.4)	29 (-44.0)

the blend/LCC is approximately the same while the depression according to the blend/GMS comes with less extent. Normally, the miscible blends of crystalline polymer and the amorphous polymer will reduce the crystalline melting temperature and the percent crystal in the blends according to the dilution effects. Thus, the LCC did not depress the percent crystal of SPS in the blends of PaMS more than the normal miscible blend of PaMS, while the GMS helped maintain high level of percent crystal of SPS.

Figure 8 shows the X-ray diffraction patterns for SPS/PBMA blends and their blend with additives at various compositions. Table 3 shows percent crystallinity of SPS/PBMA, SPS/PBMA/GMS and SPS/PBMA/LCC blends at various compositions. As the PBMA content increases, percent of the crystallinity decreases. For the effects of addition LCC and

GMS, no effect in reduction of percent crystallinity of SPS/PBMA blends has occurred as well as SPS/PaMS blends.

The depression of the percent crystallinity of SPS when cooperated with PBMA is less than with PaMS. However, the depression according to LCC close to that for the pure blend and quite equal amount of depression according to GMS were found also with the blend of PBMA.

Figure 9 shows the X-ray diffraction patterns for SPS/PCHA blends and their blend with additives at various compositions. Table 4 shows percent crystallinity of SPS/PCHA, SPS/PCHA/GMS and SPS/PCHA/LCC blends at various compositions. As the PCHA content increases, percent of crystallinity decreases. The amount of the depression of the crystallinity from PCHA is slightly larger than that from PBMA. This might be because PBMA has the methyl group at the acrylate so its miscibility is less than that for PCHA which has no group at the acrylate. According to the steric hindrance of the methyl group, the PBMA is less miscible with SPS compared to PCHA regardless of the side group of the acrylate. However, the PaMS has the most depression effects and even better than the PCHA. The reason is that PaMS has the most similar molecules with the SPS and thus form the most miscible pair with SPS. In this research, the most compatible pair with SPS can be arrange as PaMS > PCHA > PBMA, and the depression of the crystallinity of SPS will be in the same order.

From Tables 2–4, it is seen that the percent crystallinities decrease when the percent of SPS in the blend decreases. However, in the first step of reduction of SPS content (to 80 wt %), the percent of the crystallinity dramatically decreases compared to other steps. This result correspond to the previous DSC study [23] that detect the dramatically decrease in  $T_g$  in 80 wt % SPS samples. For lower concentrations of SPS, both XRD and DSC results show some depression when adding the second polymer to the SPS but in the smaller amount than for 80 wt % samples.

Table 5 concluded the effects of depression of crystallinity of SPS when blend with another polymer with or without GMS or LCC. We have selected the maximum dilution of 40% SPS to effectively monitor the effects of the 1 wt % additive (GMS and LCC). As we have discuss, the most reduction in percent crystallinity of SPS can be labeled as PaMS > PCHA > PBMA. The depression according to LCC cannot be distinguished from that of normal pure blend. Moreover, when concentrated on the effects from GMS, the depressions caused by GMS are in the same range ( $\approx -25\%$ ) regardless of the system proposed (PaMS, PCHA, or PBMA). Nevertheless the PaMS systems showed the lowest depression according to GMS. This might be because of the functionality of GMS that different from LCC. The GMS does not increase the mobility of the bulk phase as the LCC does [20], so the effects from the addition are not the same. The GMS

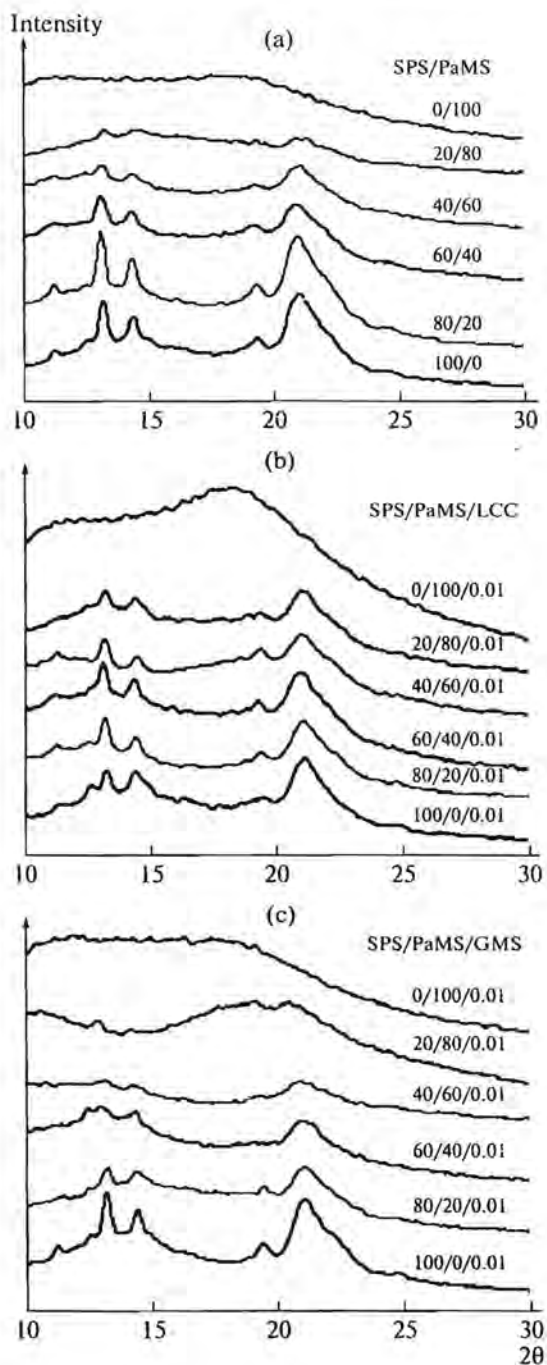


Fig. 7. The X-ray diffraction patterns for SPS/PaMS blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PaMS blends; (b) SPS/PaMS/LCC blends with 1 wt% of LCC and (c) SPS/PaMS/GMS blends with 1 wt% of GMS. % SPS = 0, 20, 40, 60, 80 and 100.

might hinder the movement of the molecules of the bulk polymer, so the SPS tended to be crystal rather dissolve in the amorphous phase. The mobility effect of LCC cannot clearly be seen from comparison with

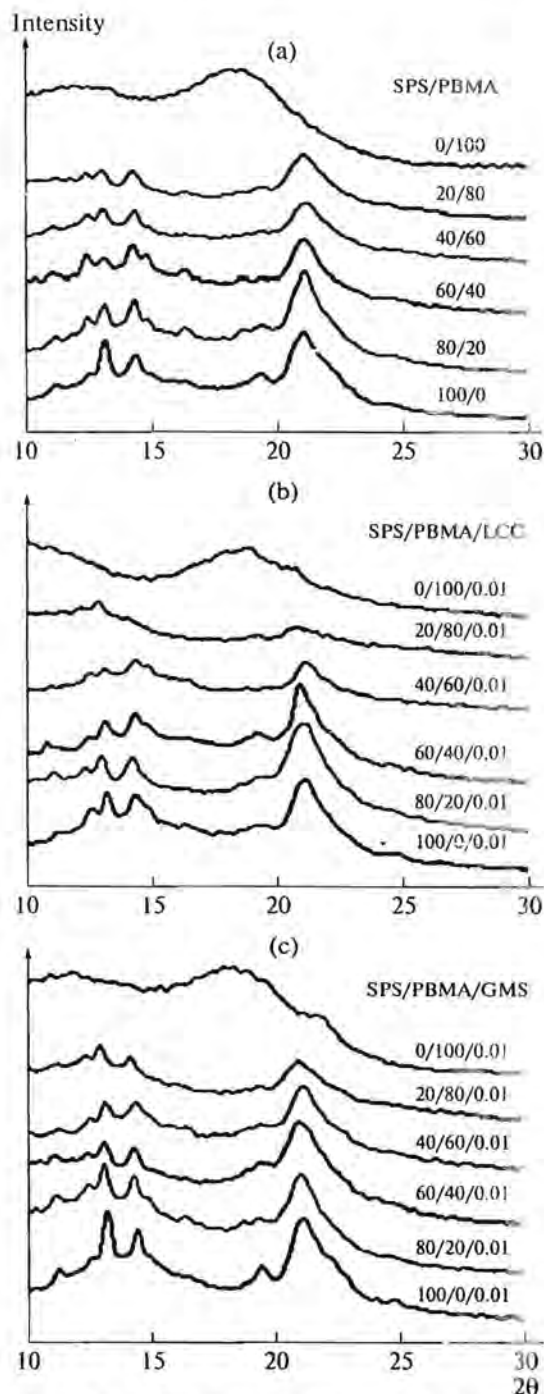


Fig. 8. The X-ray diffraction patterns for SPS/PBMA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PBMA blends; (b) SPS/PBMA/LCC blends with 1 wt% of LCC and (c) SPS/PBMA/GMS blends with 1 wt% of GMS. % SPS = 0, 20, 40, 60, 80 and 100.

the data for the pure blend. This might be because of the small amount of LCC is harder to monitor. However, no large variation in the series of LCC has been found. Thus, the LCC has no effects on crystallinity.

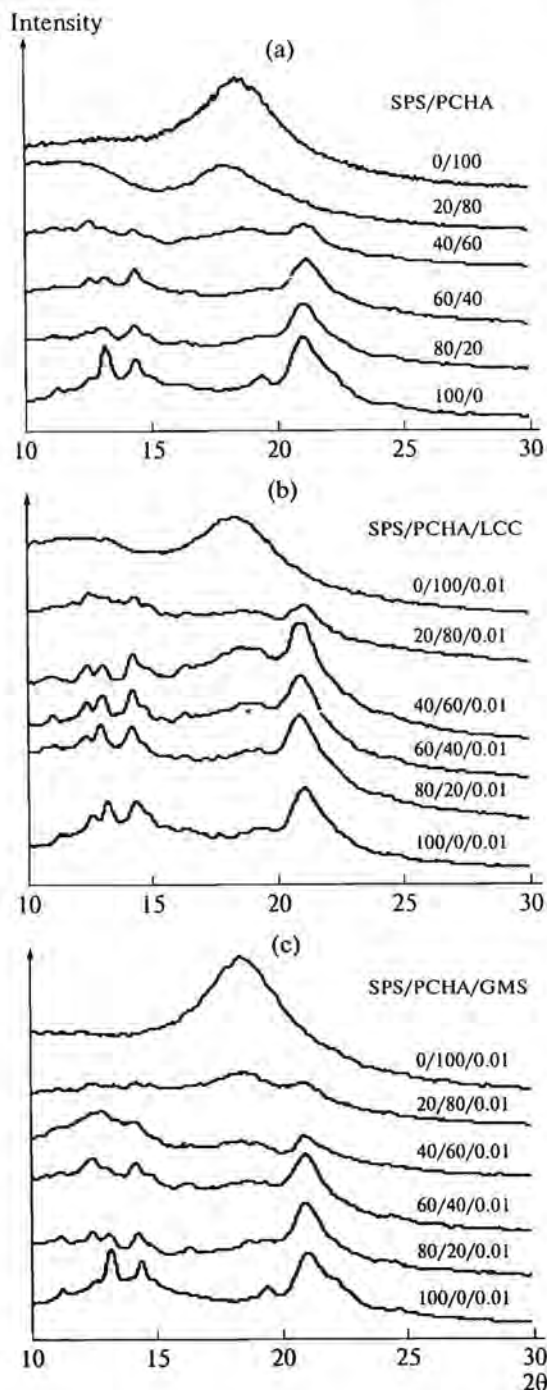


Fig. 9. The X-ray diffraction patterns for SPS/PCHA blends and their blend with additives at various compositions: (a) SPS/PCHA blends; (b) SPS/PCHA/LCC blends with 1 wt% of LCC and (c) SPS/PCHA/GMS blends with 1 wt% of GMS. % SPS = 0, 20, 40, 60, 80 and 100.

#### 4. CONCLUSIONS

In this research, it was found that the SPS have tendency to be miscible with PaMS, PBMA and PCHA

by melt mixing method. The glass transition temperatures of all the blends with additives do not significantly change from additive-free binary blends. The percent of crystallinity of SPS blended with several polymers such as PaMS, PBMA, and PCHA were investigated at various concentrations with or without 1% wt additive that are GMS or LCC. From XRD results, the percent crystallinity of the blend is measured and found to decrease when decrease the percent of SPS in the blend. This may be resulted from the larger amorphous phase or dilution of SPS in the pure blend of low concentration of SPS. The depression of the percent crystallinity is in the order of PaMS > PCHA > PBMA according to the compatibility with the SPS. The depressions are usually largest at the reduction of SPS content to 80 wt % SPS and slightly decrease as the more dilution of SPS. The addition of GMS in the 40% SPS blend reduced around 25% of the SPS crystallinity from 57% in the pure SPS regardless of the components of the blend. The addition of LCC in the 40% SPS blend has no effect on SPS crystallinity that remains close to that of the pure blend without LCC. These might be because of the low concentration of LCC and the compatibility of LCC with the blend. The different effects of GMS and LCC might be because of the different function of the molecules in the blend. The LCC will increase the mobility of the polymer molecules [18, 20–21] while the GMS might impede the movement of the SPS molecules that will results in the higher equilibrium quantities of the SPS crystal in all systems.

#### REFERENCES

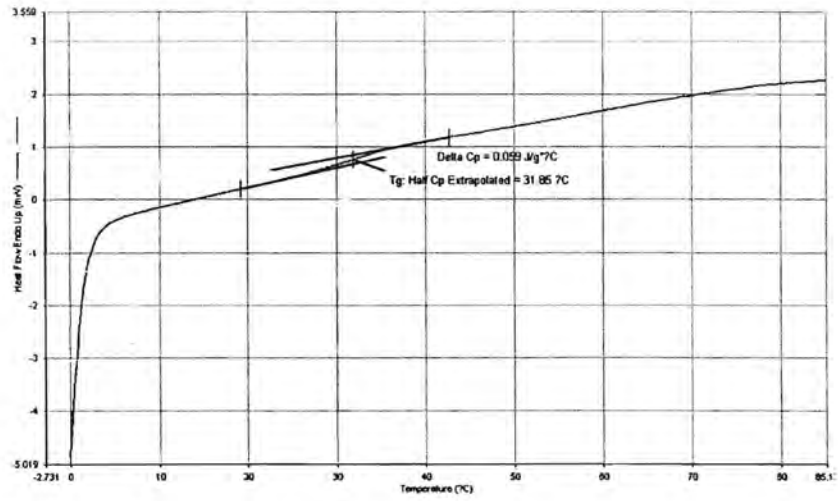
1. N. Ishihara, T. Seimiya, M. Kuramoto, and M. Uoi, *Macromolecules* **19**, 2464 (1986).
2. A. Zambelli, P. Longo, C. Pellecchia, and A. Grassi, *Macromolecules* **20**, 2035 (1987).
3. A. Zambelli, L. Oliva, and C. Pellecchia, *Macromolecules* **22**, 2129 (1989).
4. R. Fan, K. Cao, B. Li, et al., *Eur. Polym. J.* **37**, 2335 (2001).
5. N. Ishihara, M. Kuramoto, and M. Uoi, *Macromolecules* **21**, 3356 (1988).
6. M. Kobayashi, T. Nakaoki, and N. Ishihara, *Macromolecules* **22**, 4377 (1989).
7. A. Zambelli, L. Oliva, and C. Pellecchia, *Macromolecules* **22**, 2129 (1989).
8. F. Picchioni, M. Aglietto, E. Passaglia, and F. Ciardelli, *Polymer* **43**, 3323 (2002).
9. B. Chen, X. Li, S. Xu, et al., *Polymer* **43**, 953 (2002).
10. T. K. Mandal and E. M. Woo, *Polymer* **40**, 2813 (1999).
11. B. K. Hong, W. H. Jo, S. C. Lee, and J. Kim, *Polymer* **39**, 1793 (1998).
12. S. H. Hwang, M. J. Kim, and J. C. Jung, *Eur. Polym. J.* **38**, 1881 (2002).
13. S. Stack, O. Donoghue, and C. Birkinshaw, *Polym. Degrad. Stab.* **79**, 29 (2003).
14. F. C. Chiu and M. T. Li, *Polymer* **44**, 8013 (2003).

15. B. K. Hong, W. H. Jo, and J. Kim, *Polymer* **39**, 3753 (1998).
16. S. Duff, S. Tsuyama, T. Iwamoto, et al., *Polymer* **42**, 991 (2001).
17. W. Zhou, M. Lu, and K. Mai, *Polymer* **48**, 3858 (2007).
18. A. Buckley, A. B. Conciatori, and G. W. Calundann, US Patent No. 4434262 (1984).
19. A. Siegmann, A. Dagan, and S. Kenig, *Polymer* **26**, 1325 (1985).
20. S. Wacharawichanant, S. Thongyai, S. Tanodekaew, et al., *Polymer* **45**, 2201 (2004).
21. N. Motong, N. Clarke, R. L. Thompson, et al., *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* **45**, 2187 (2007).
22. N. Motong, S. Thongyai, and N. Clarke, *J. Appl. Polym. Sci.* **107**, 1108 (2008).
23. S. Khunprasert, S. Thongyai, W. Chinsirikul, and S. Wacharawichanant, *J. Appl. Polym. Sci.* (in press).
24. T.-M. Wu, S.-F. Hsu, and J.-Y. Wu, *J. Polym. Sci., Part A: Polym. Chem.* **41**, 560 (2003).
25. T.-M. Wu, S.-F. Hsu, and J.-Y. Wu, *Polym. Eng. Sci.* **42**, 2295 (2002).
26. J. Brandrup and E. H. Immergut, *Polymer Handbook* (Wiley, New York, 1989).
27. L. E. Alexander, *X-Ray Diffraction Methods in Polymer Science* (Wiley, New York, 1969).

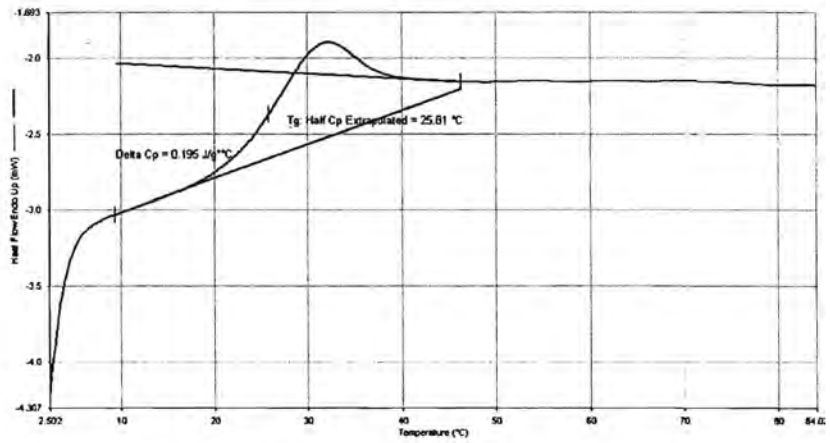


ข้อมูลการทดลองโดยละเอียดตอนที่หนึ่ง

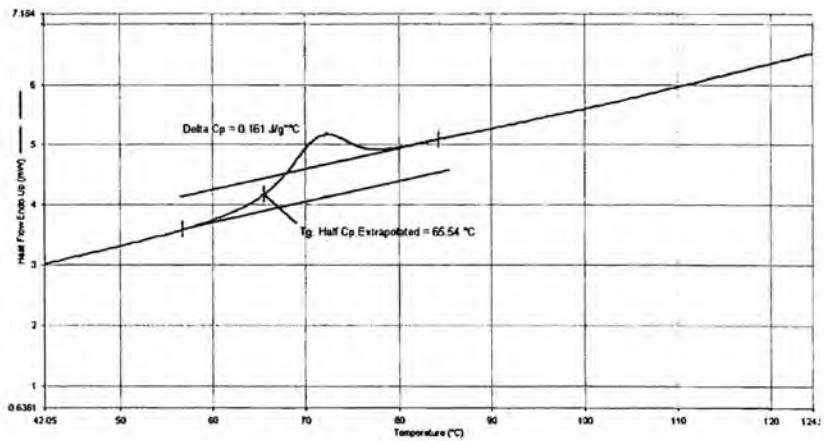
### The Data of DSC Characterization



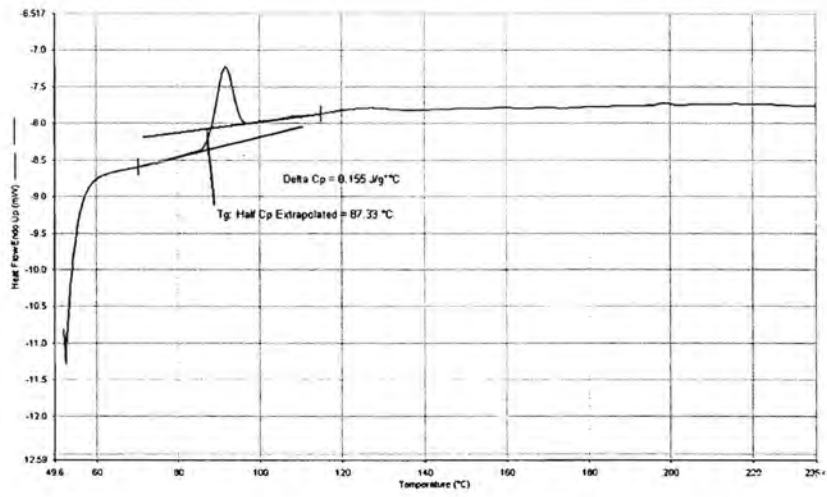
รูปที่ A.1 DSC curve of PBMA



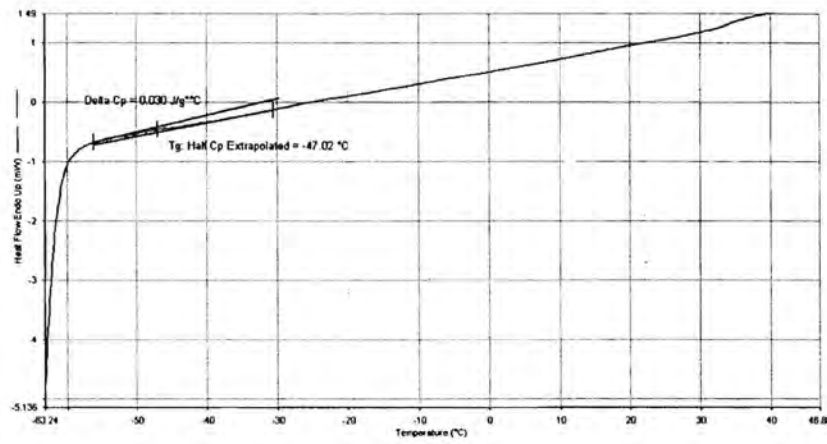
รูปที่ A.2 DSC curve of PCHA



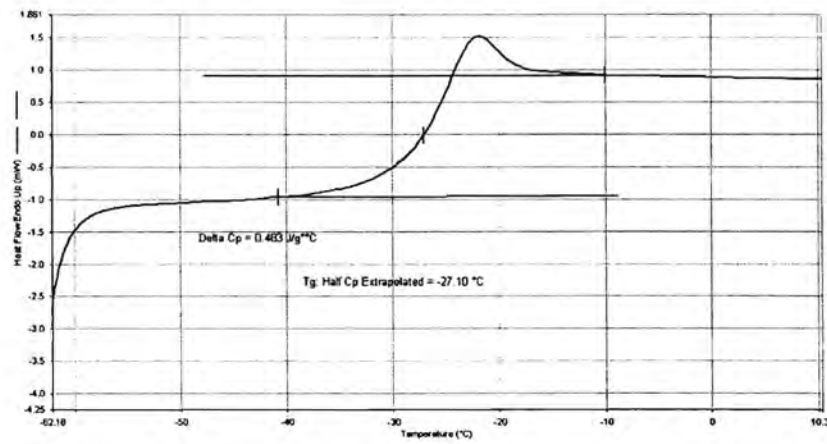
รูปที่ A.3 DSC curve of PEMA



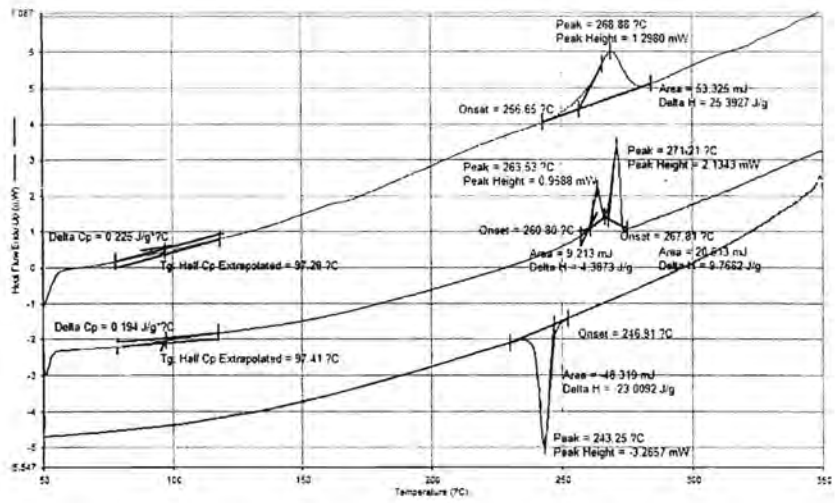
รูปที่ A.4 DSC curve of Poly( $\alpha$ -methylstyrene)



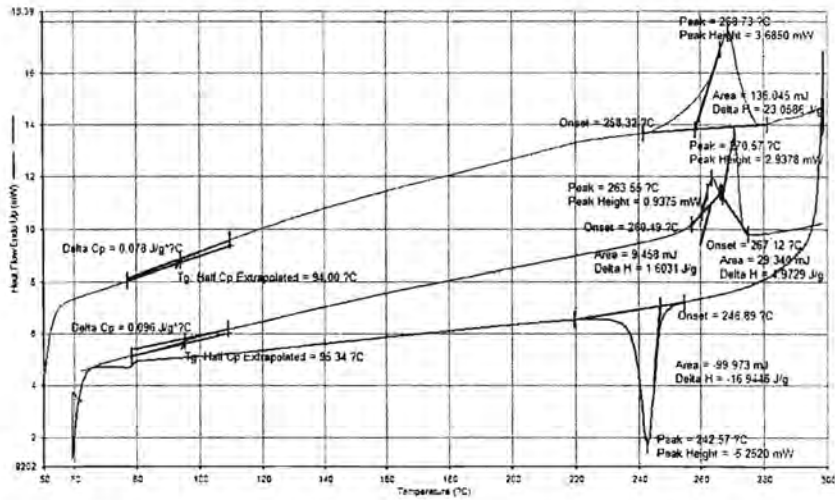
รูปที่ A.5 DSC curve of Polyisoprene



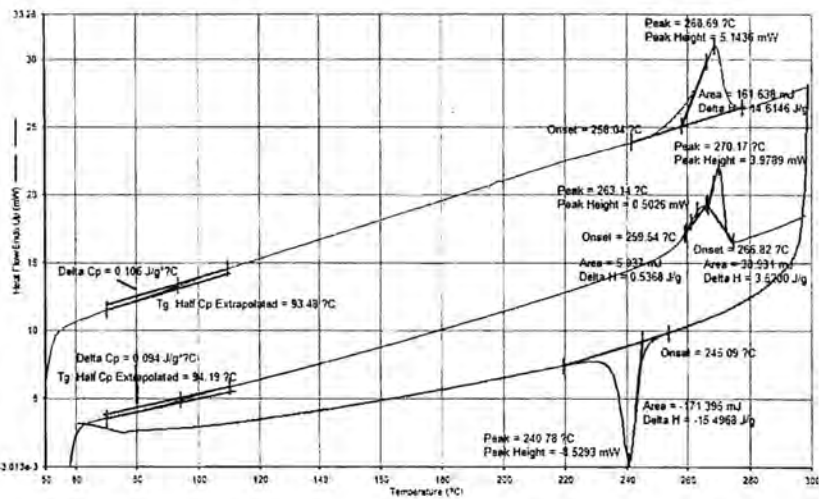
รูปที่ A.6 DSC curve of PVME



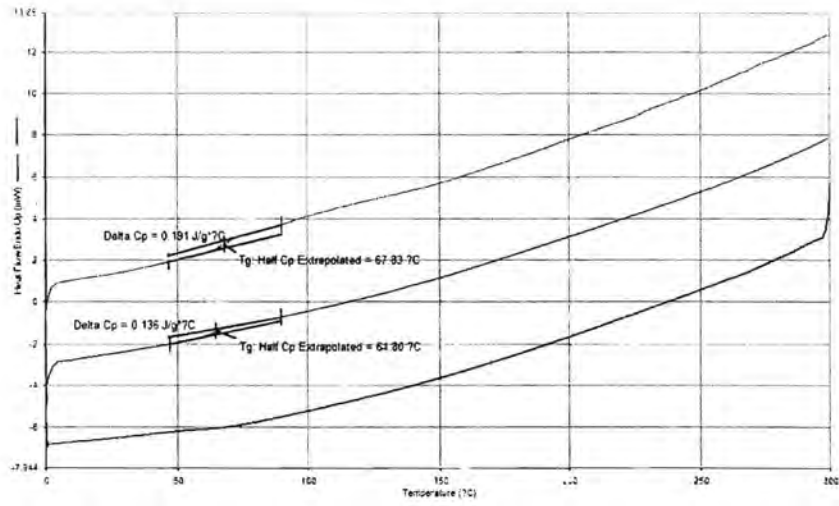
รูปที่ A.7 DSC curve of sPS1



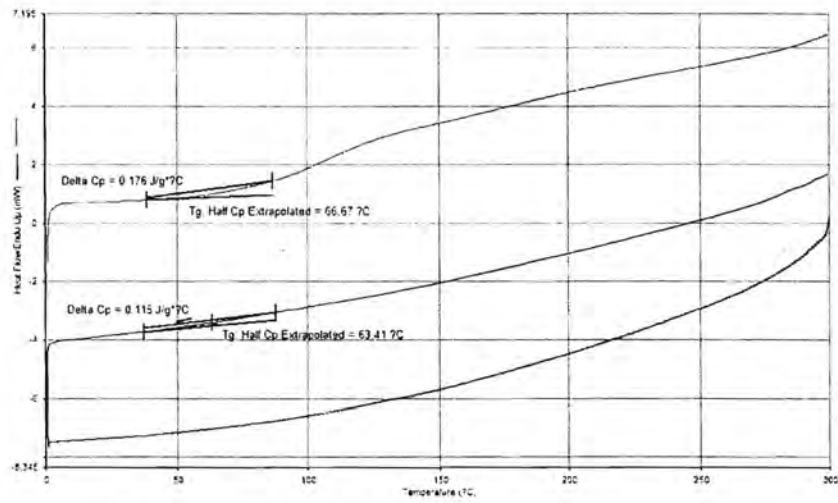
รูปที่ A.8 DSC curve of sPS2



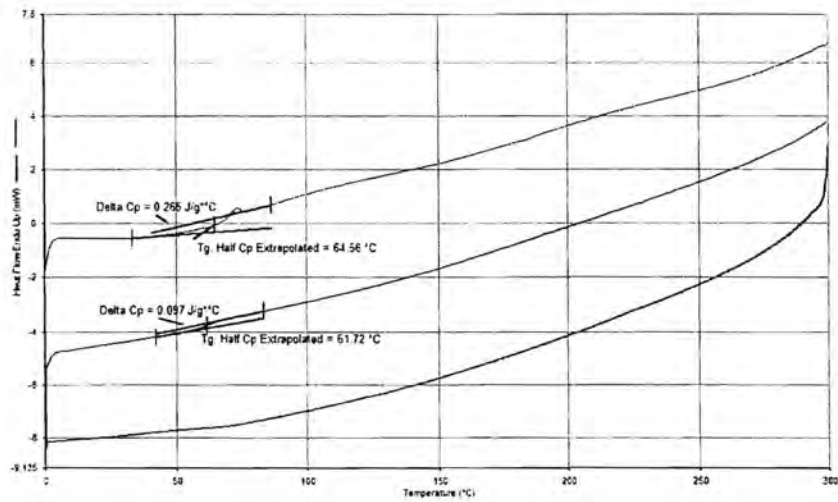
รูปที่ A.9 DSC curve of sPS3



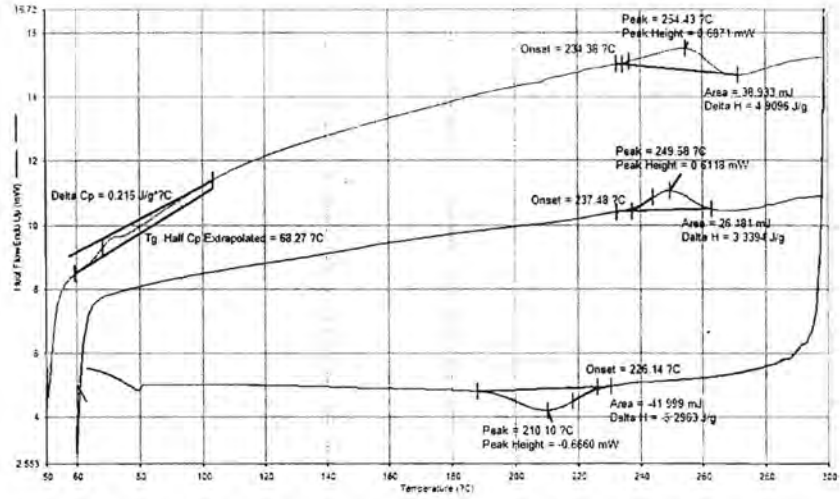
รูปที่ A.10 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 50/50 wt%



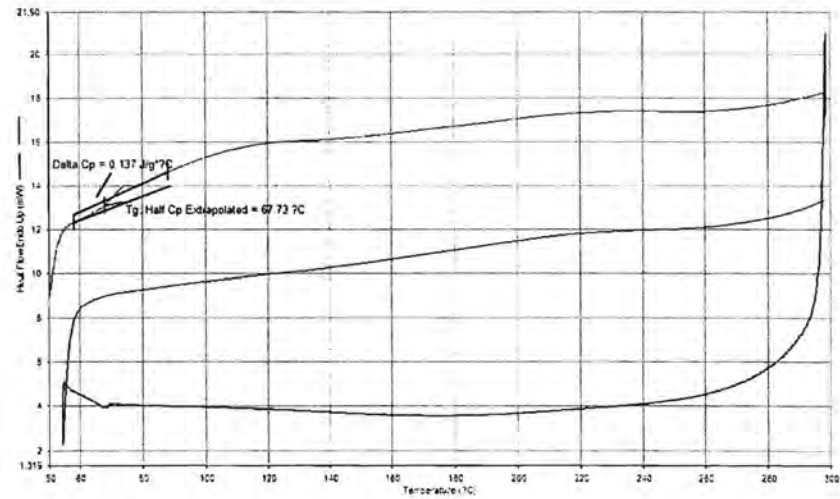
รูปที่ A.11 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 50/50 wt%



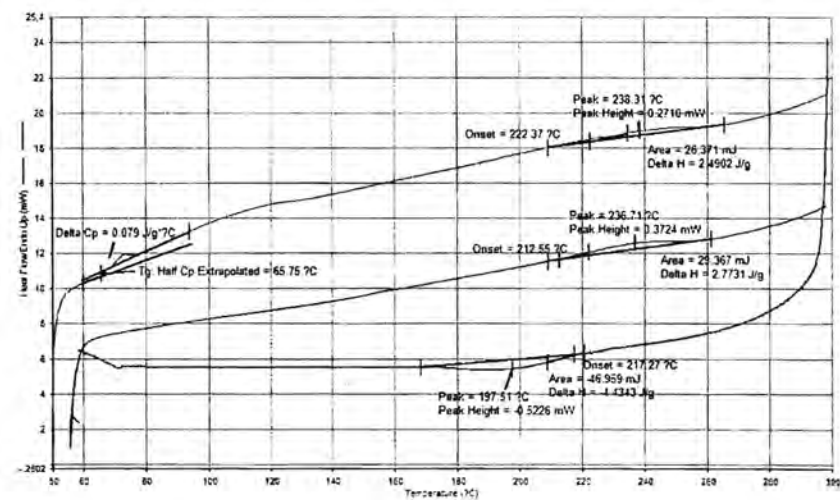
รูปที่ A.12 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 50/50 wt%



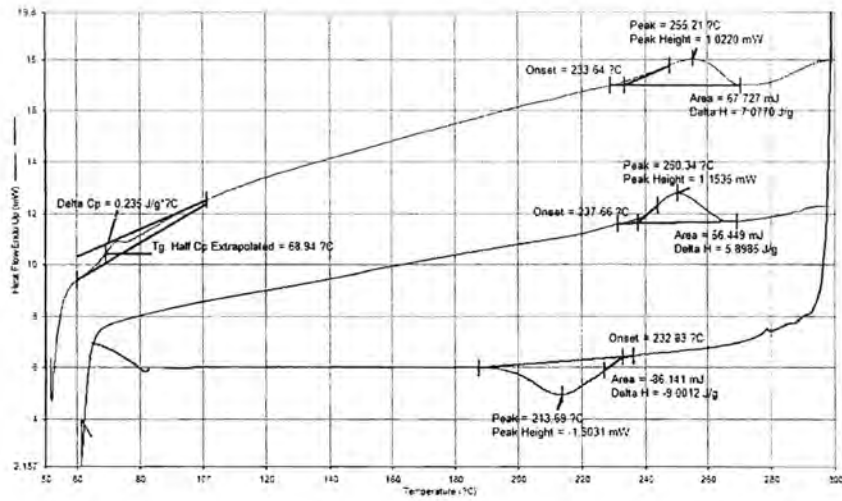
รูปที่ A.13 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 60/40 wt%



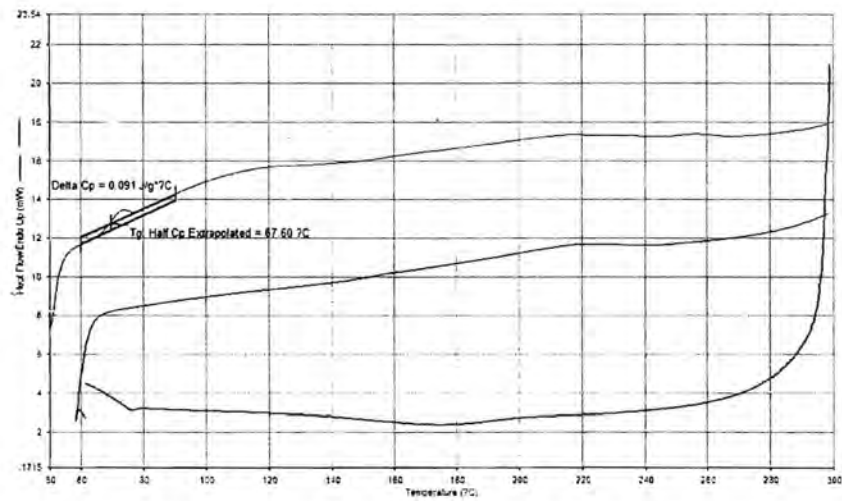
รูปที่ A.14 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 60/40 wt%



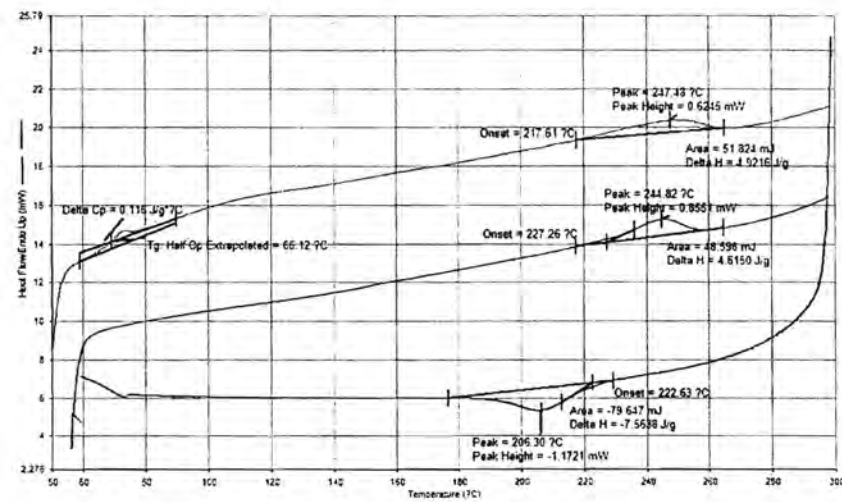
รูปที่ A.15 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 60/40 wt%



รูปที่ A.16 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 70/30 wt%

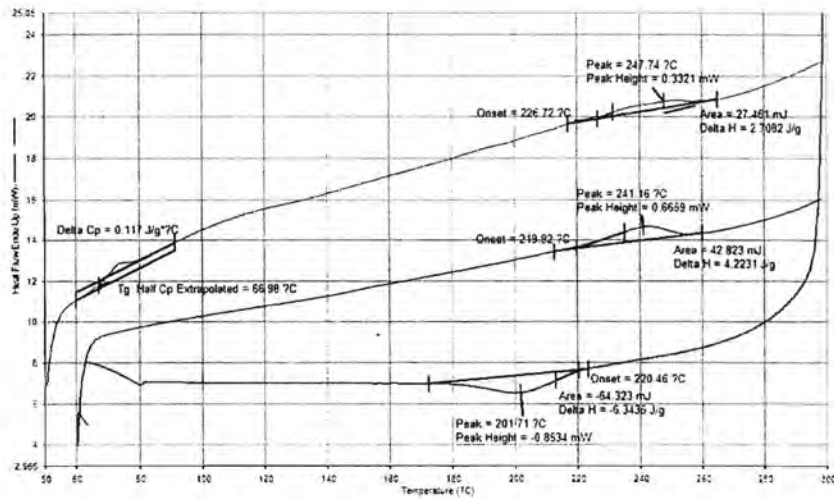


รูปที่ A.17 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 70/30 wt%

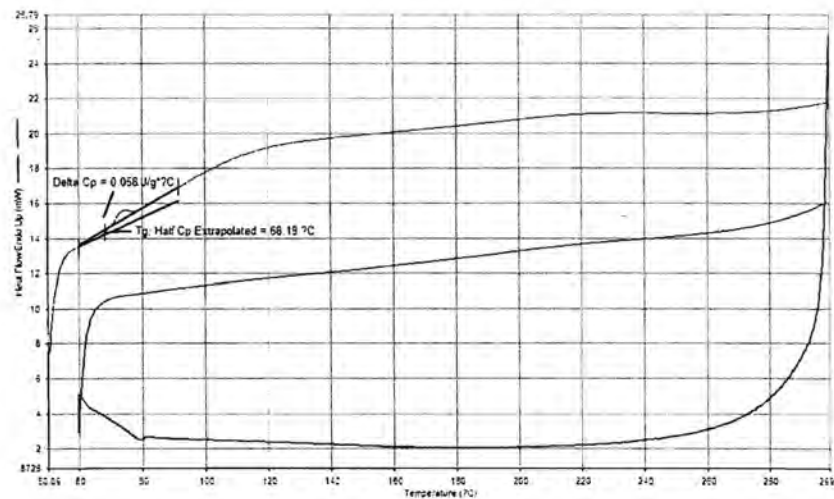


รูปที่ A.18 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 70/30 wt%

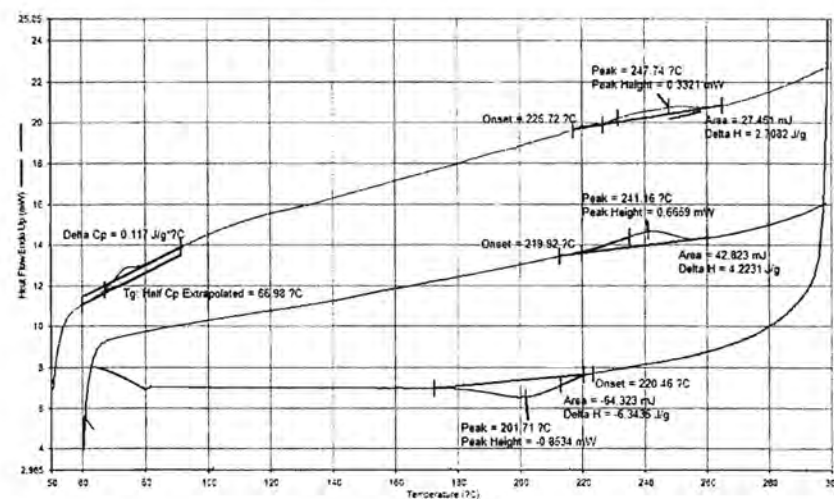




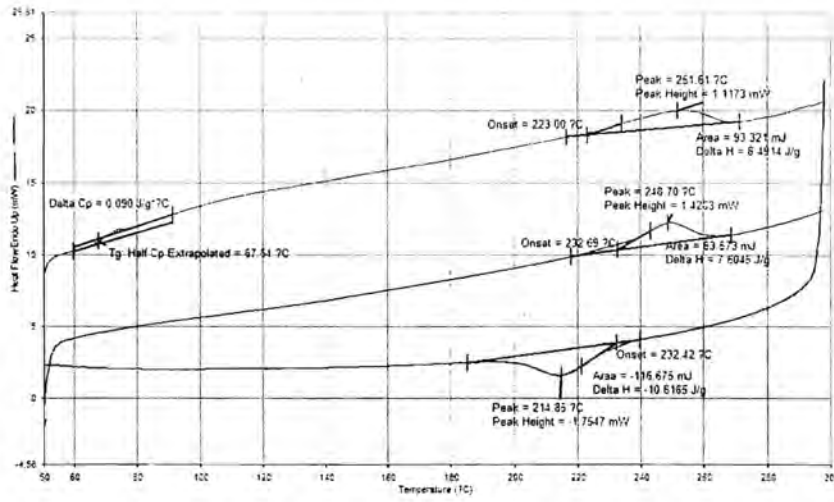
รูปที่ A.19 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 80/20 wt%



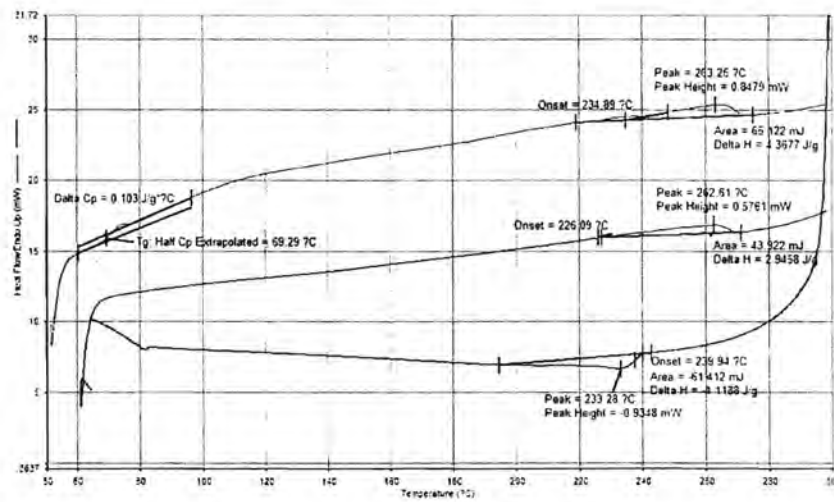
รูปที่ A.20 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 80/20 wt%



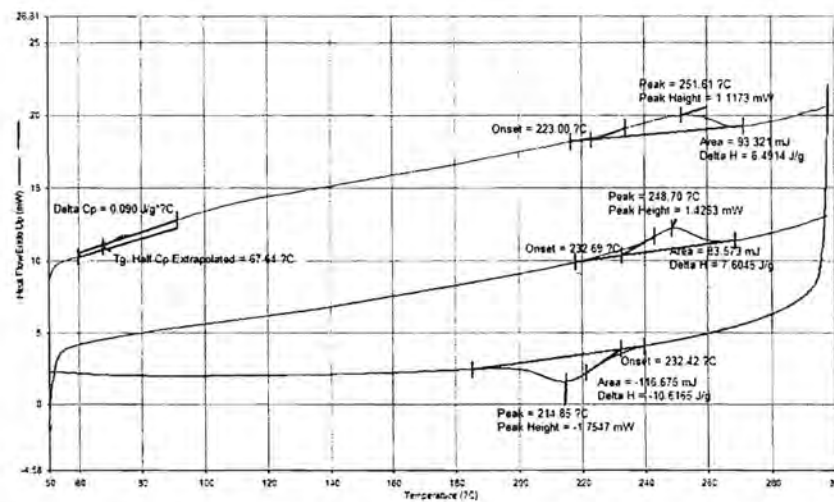
รูปที่ A.21 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 80/20 wt%



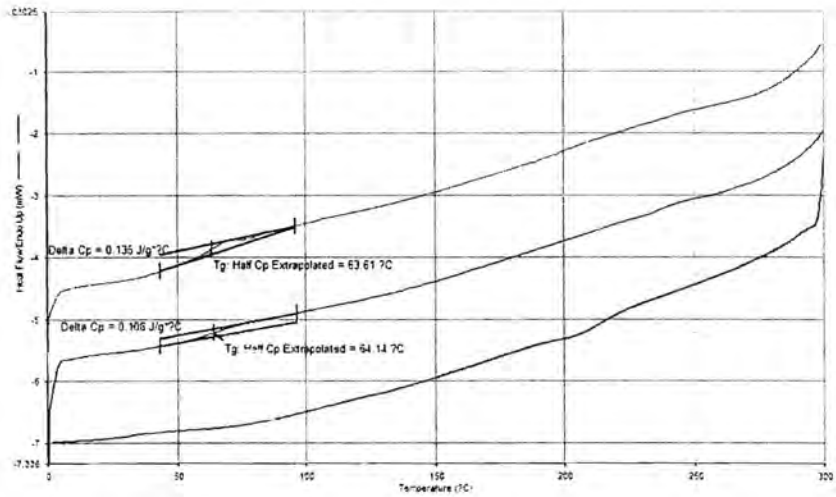
รูปที่ A.22 DSC curve of sPS1 / PBMA blends at composition 90/10 wt%



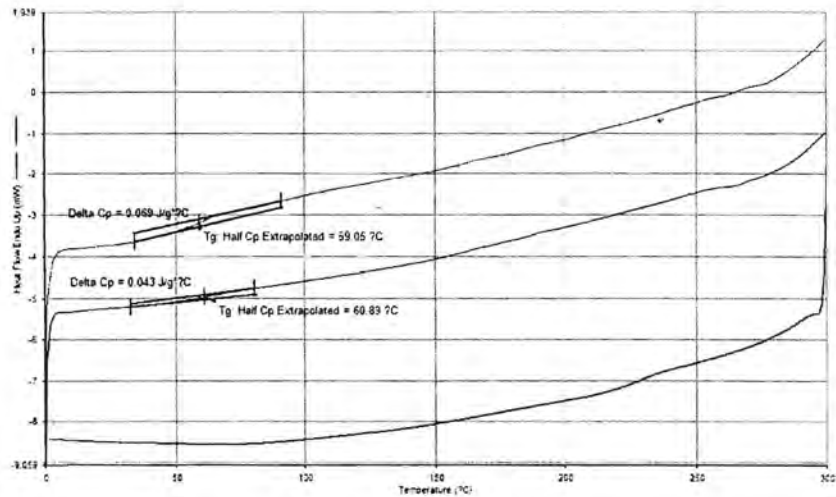
รูปที่ A.23 DSC curve of sPS2 / PBMA blends at composition 90/10 wt%



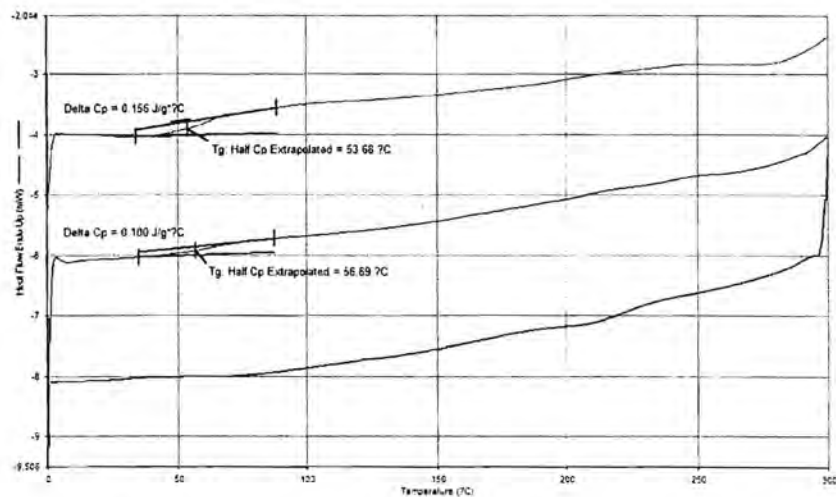
รูปที่ A.24 DSC curve of sPS3 / PBMA blends at composition 90/10 wt%



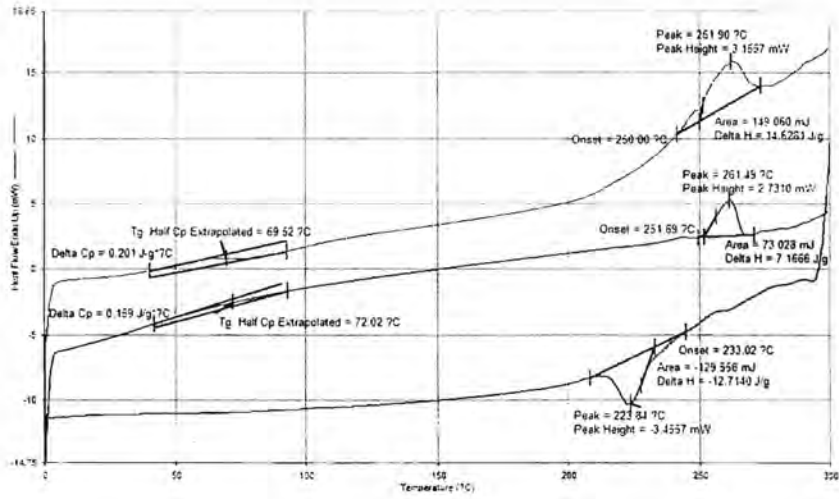
รูปที่ A.25 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 50/50 wt%



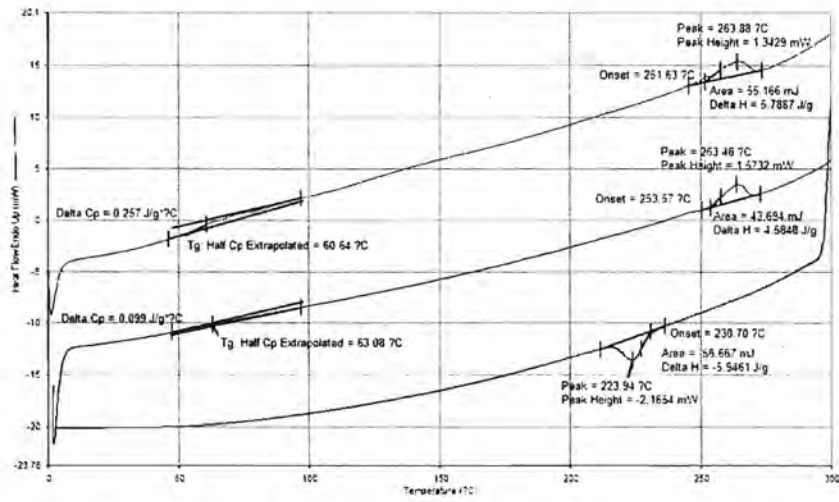
รูปที่ A.26 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 50/50 wt%



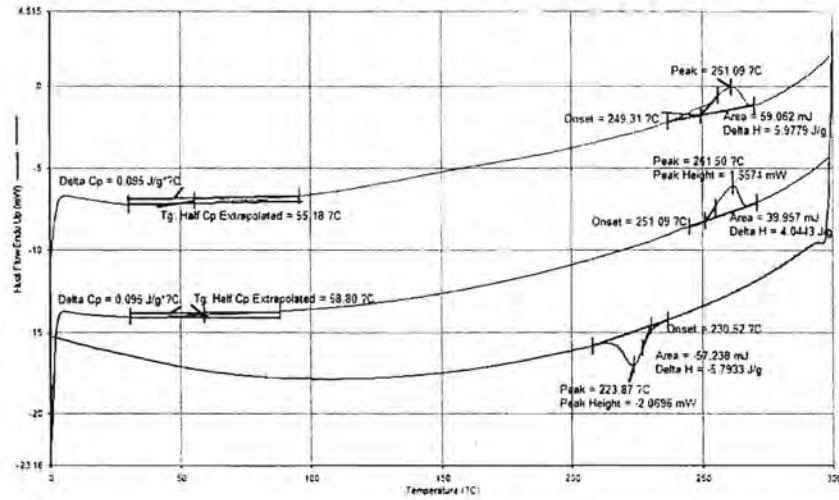
รูปที่ A.27 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 50/50 wt%



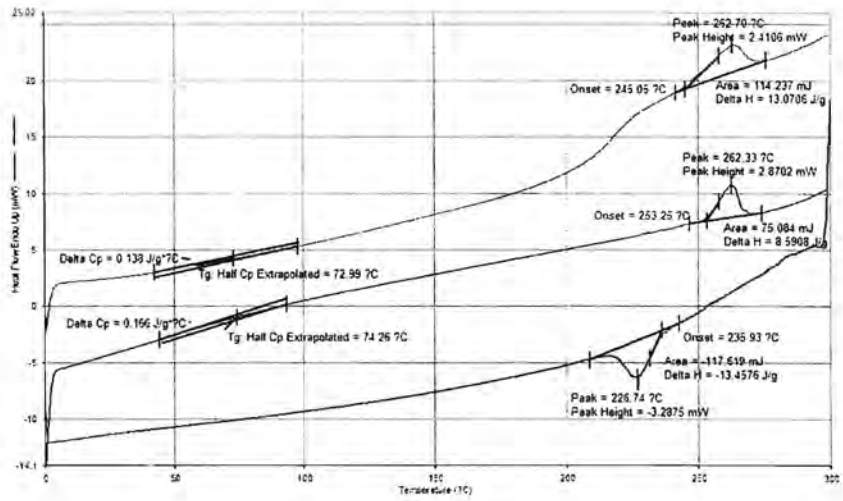
รูปที่ A.28 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 60/40 wt%



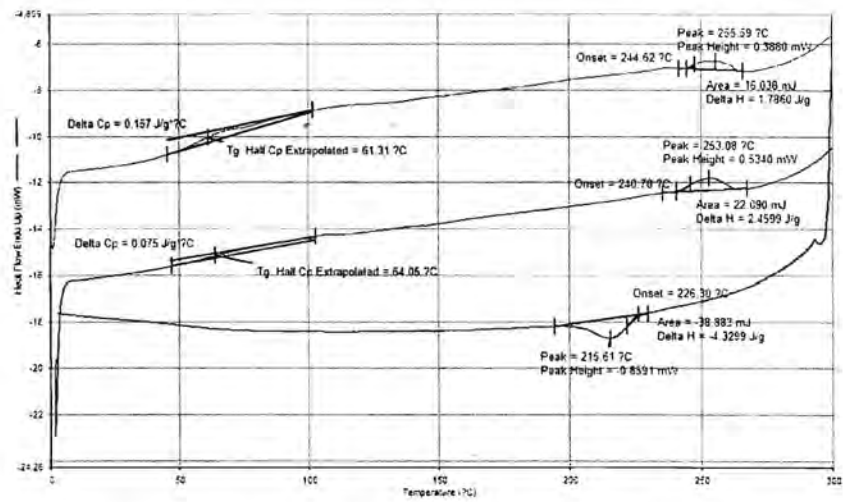
รูปที่ A.29 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 60/40 wt%



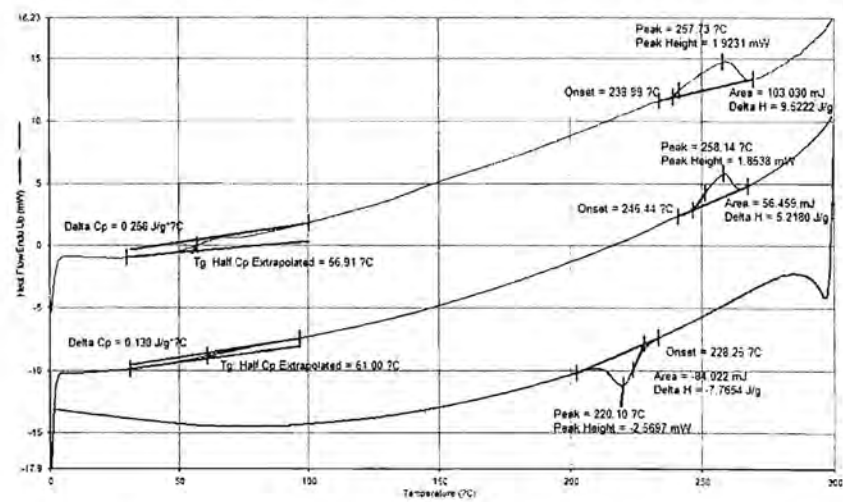
รูปที่ A.30 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 60/40 wt%



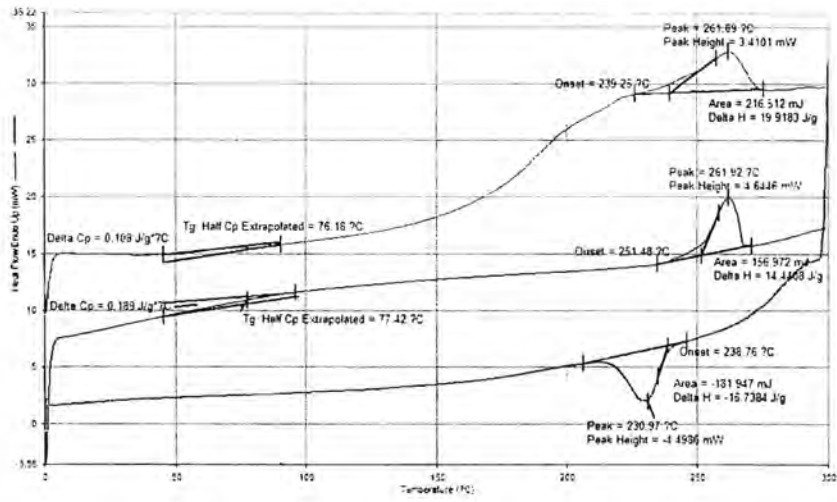
รูปที่ A.31 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 70/30 wt%



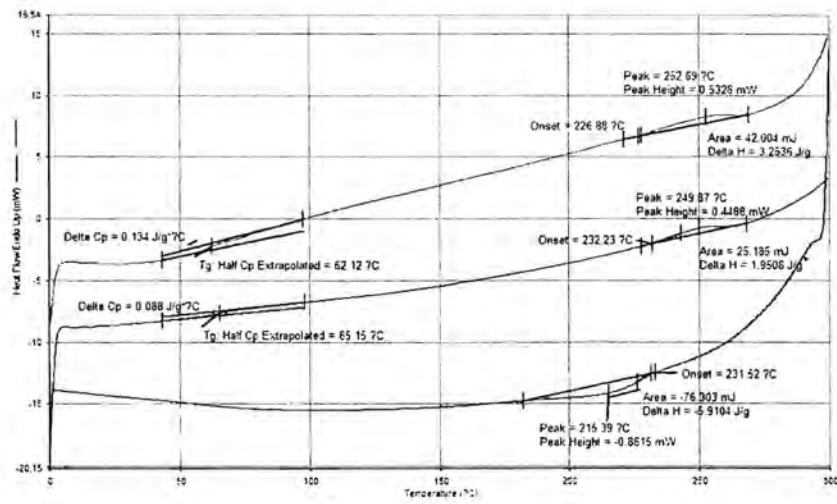
รูปที่ A.32 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 70/30 wt%



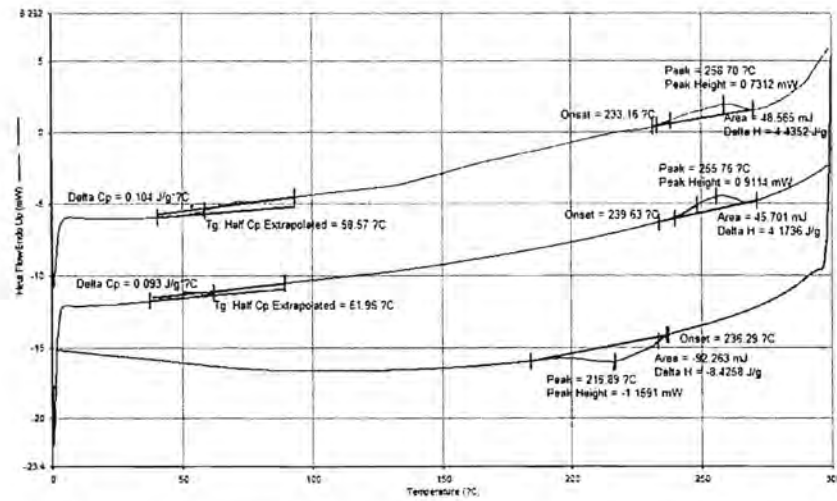
รูปที่ A.33 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 70/30 wt%



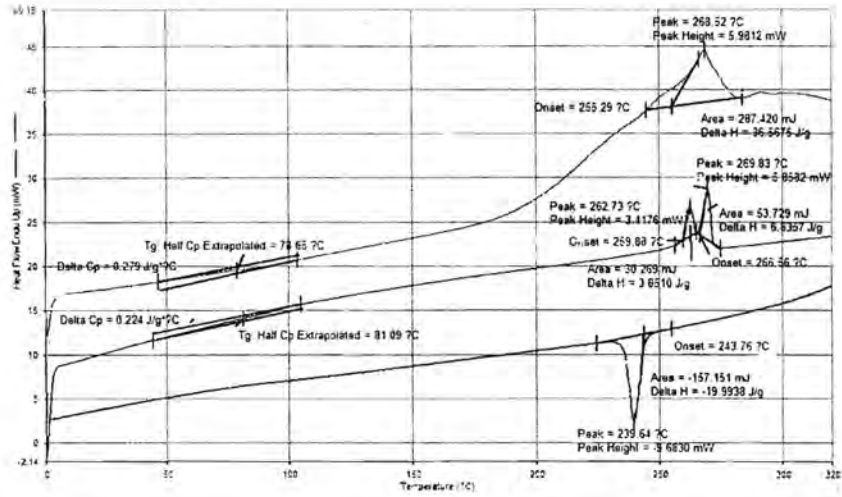
รูปที่ A.34 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 80/20 wt%



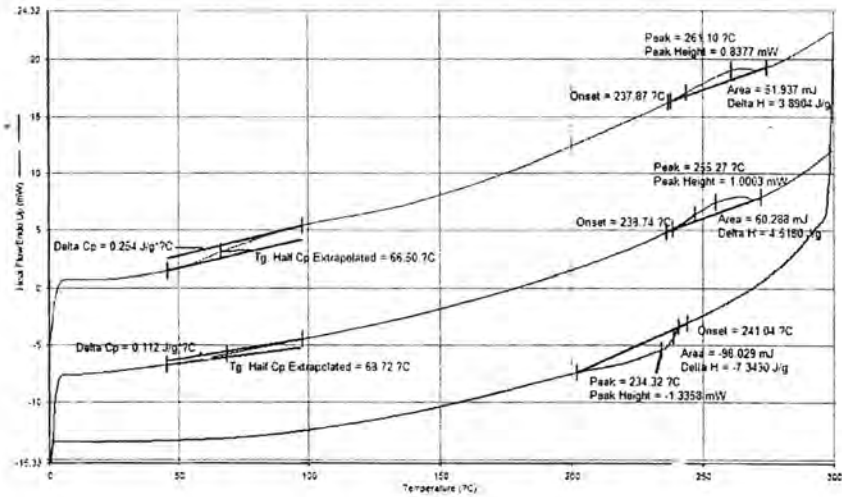
รูปที่ A.35 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 80/20 wt%



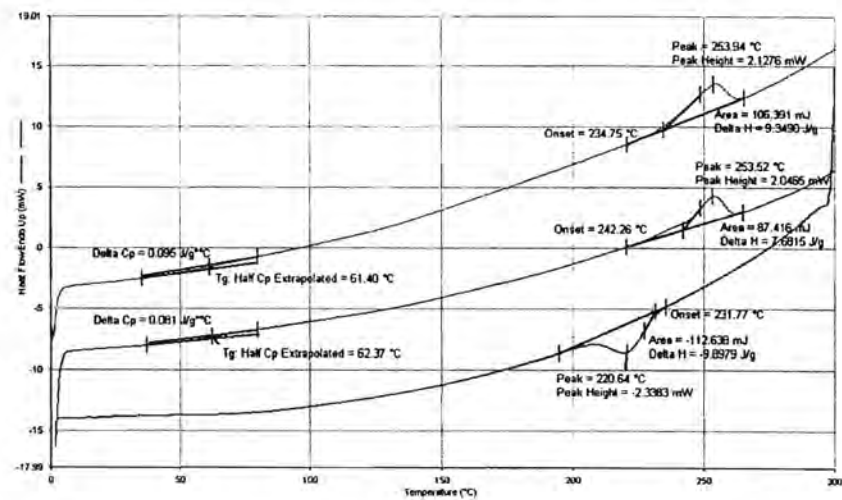
รูปที่ A.36 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 80/20 wt%



รูปที่ A.37 DSC curve of sPS1 / PCHA blends at composition 90/10 wt%

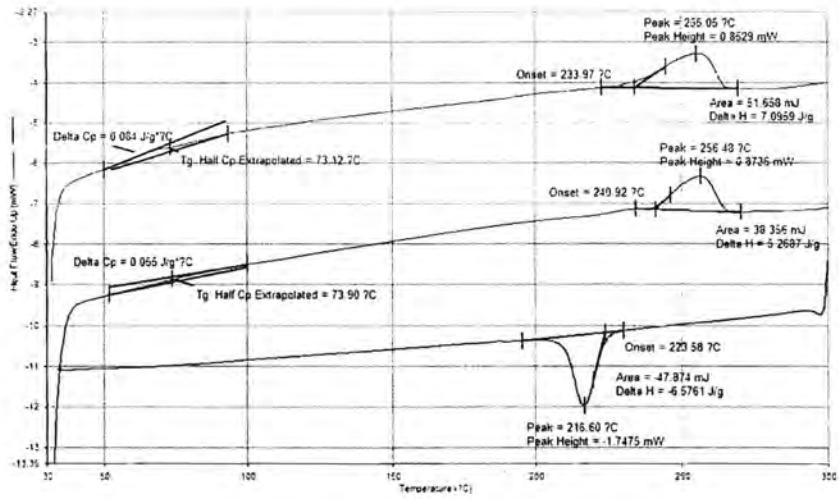


รูปที่ A.38 DSC curve of sPS2 / PCHA blends at composition 90/10 wt%

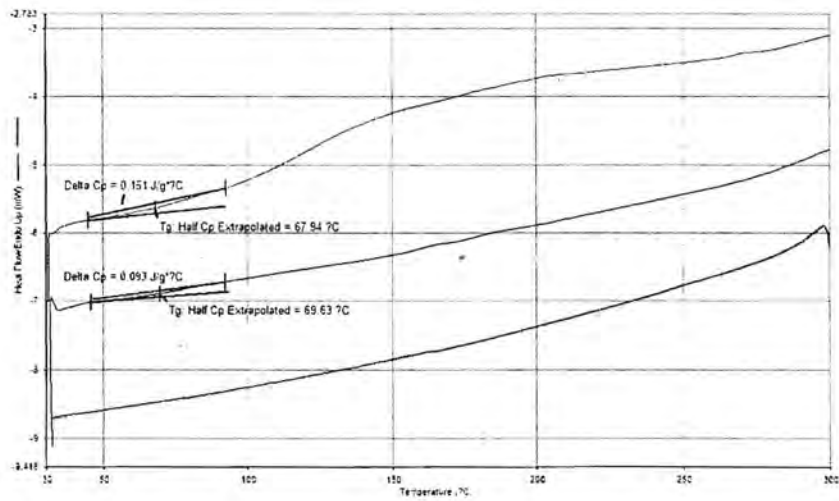


รูปที่ A.39 DSC curve of sPS3 / PCHA blends at composition 90/10 wt%

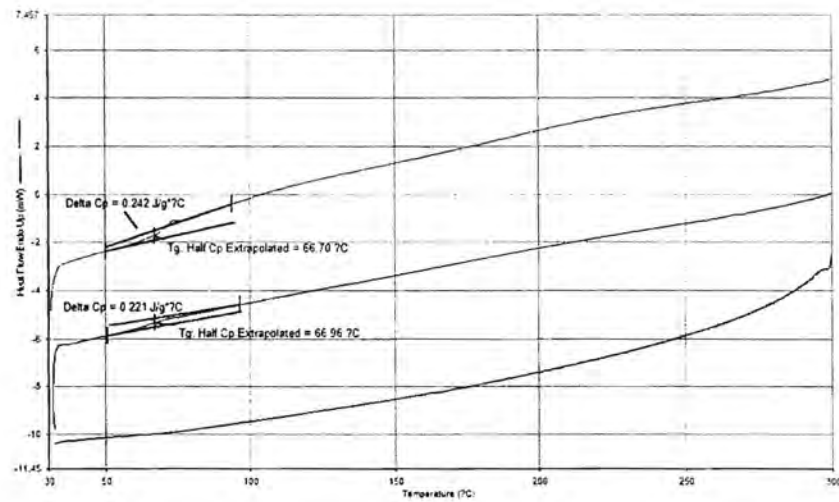




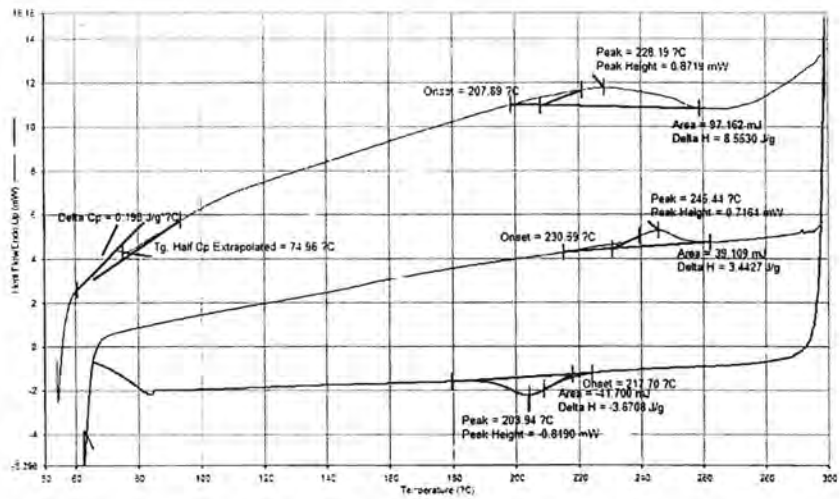
รูปที่ A.40 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 50/50 wt%



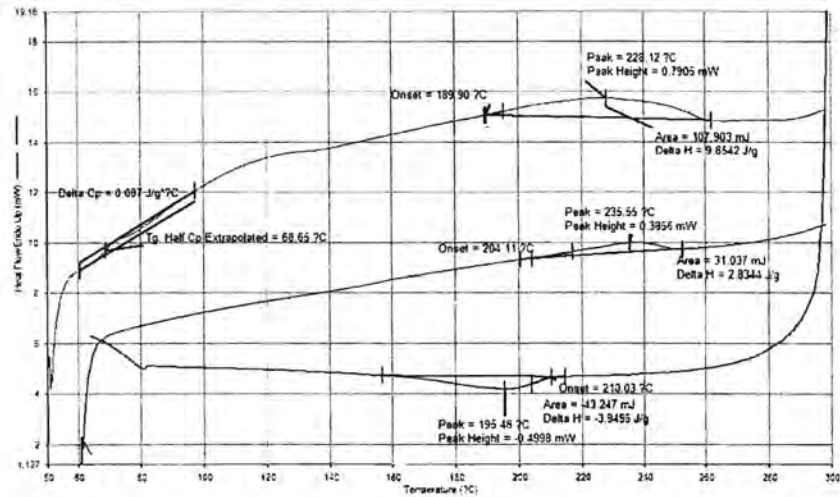
รูปที่ A.41 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 50/50 wt%



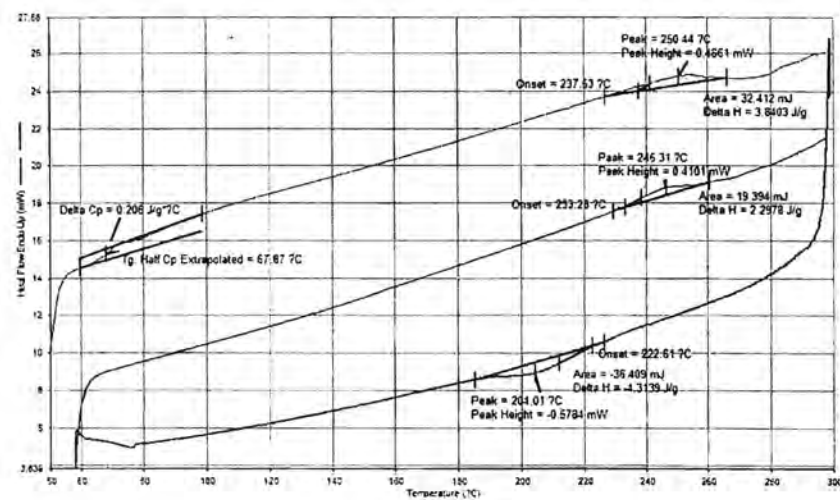
รูปที่ A.42 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 50/50 wt%



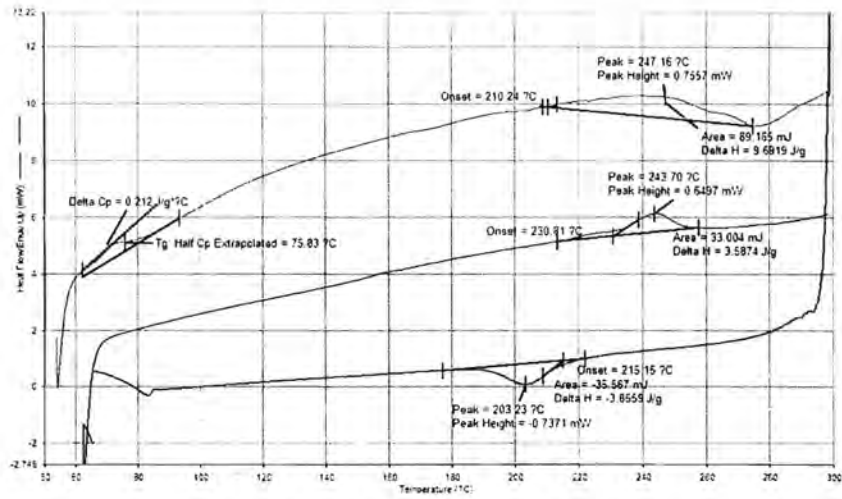
รูปที่ A.43 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 60/40 wt%



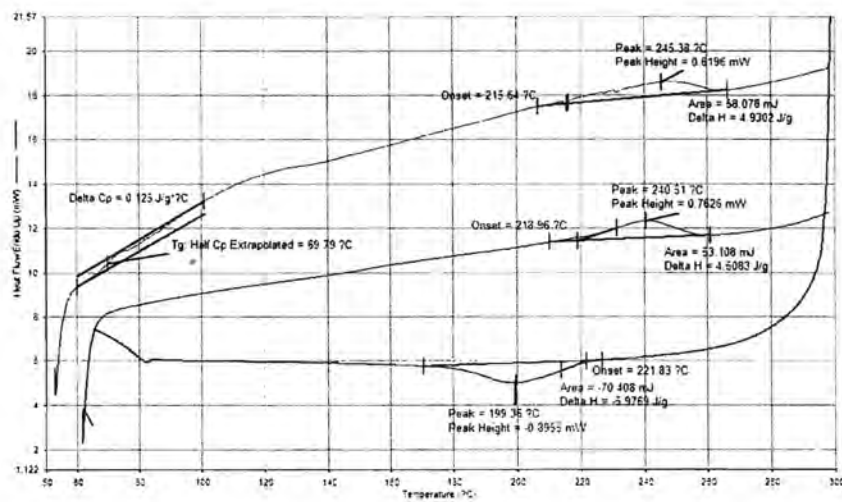
รูปที่ A.44 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 60/40 wt%



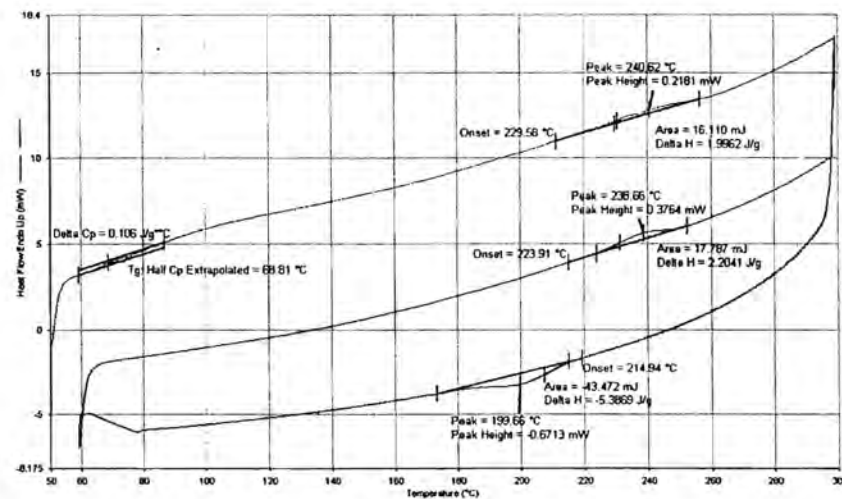
รูปที่ A.45 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 60/40 wt%



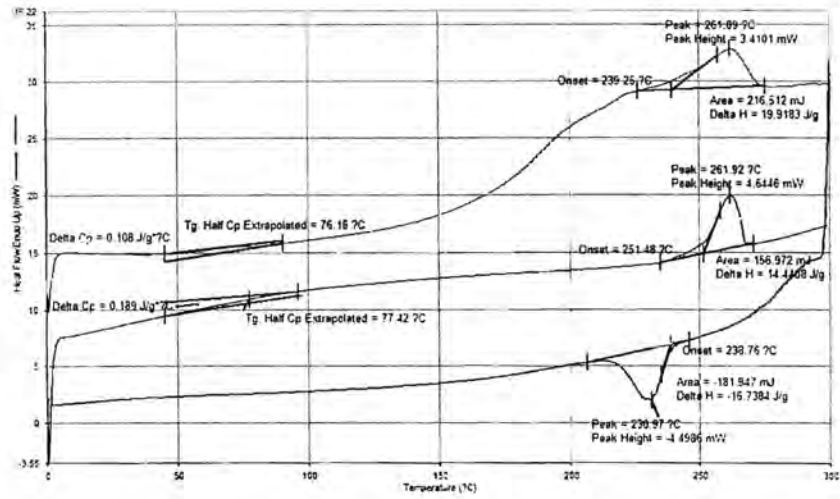
รูปที่ A.46 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 70/30 wt%



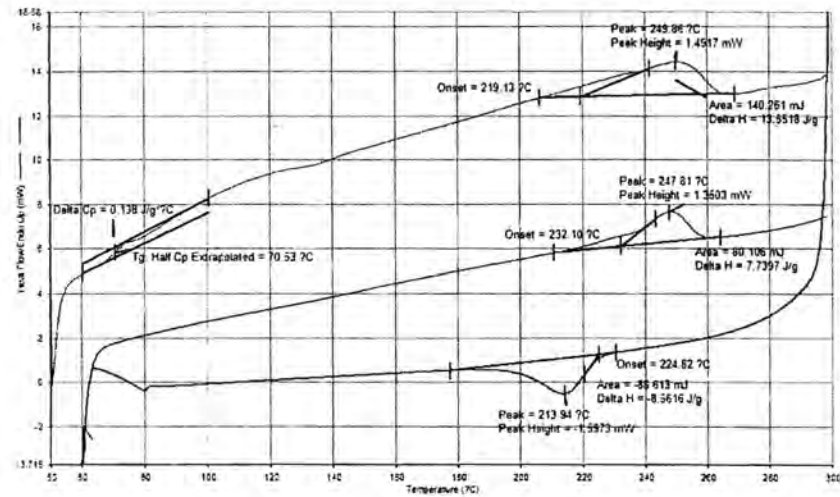
รูปที่ A.47 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 70/30 wt%



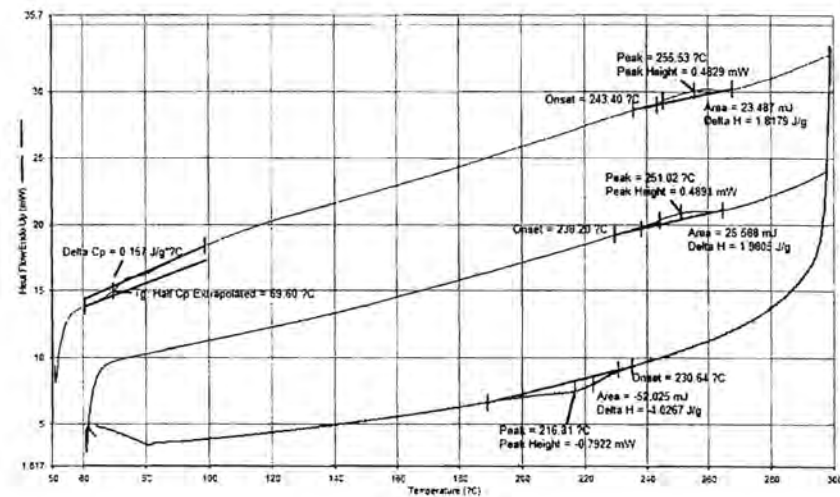
รูปที่ A.48 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 70/30 wt%



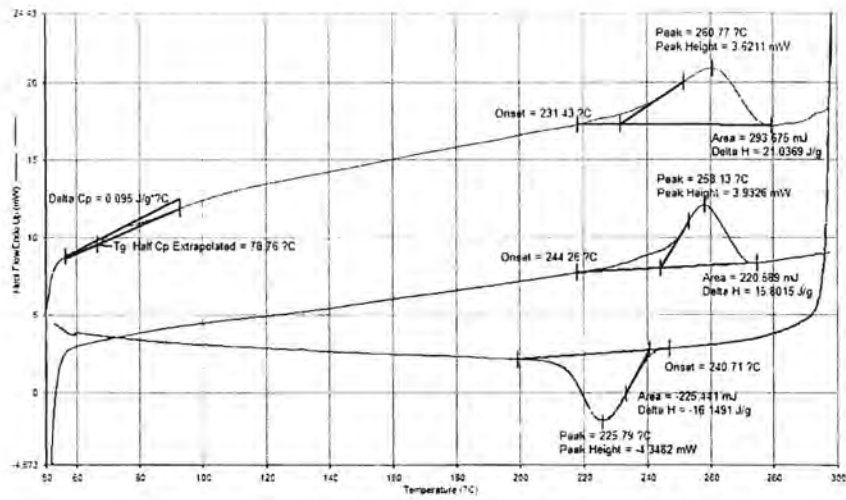
รูปที่ A.49 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 80/20 wt%



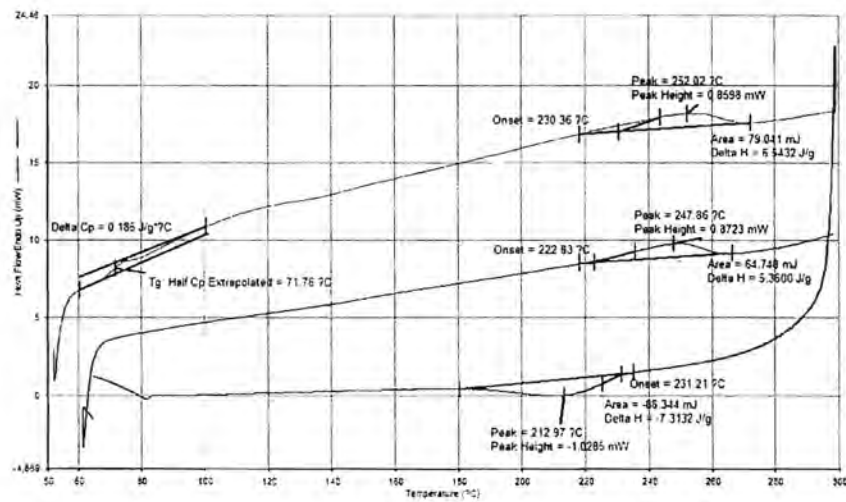
รูปที่ A.50 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 80/20 wt%



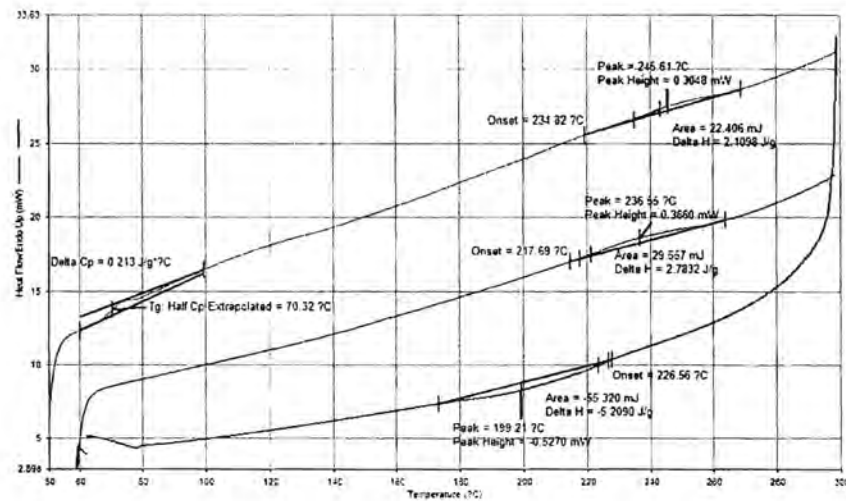
รูปที่ A.51 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 80/20 wt%



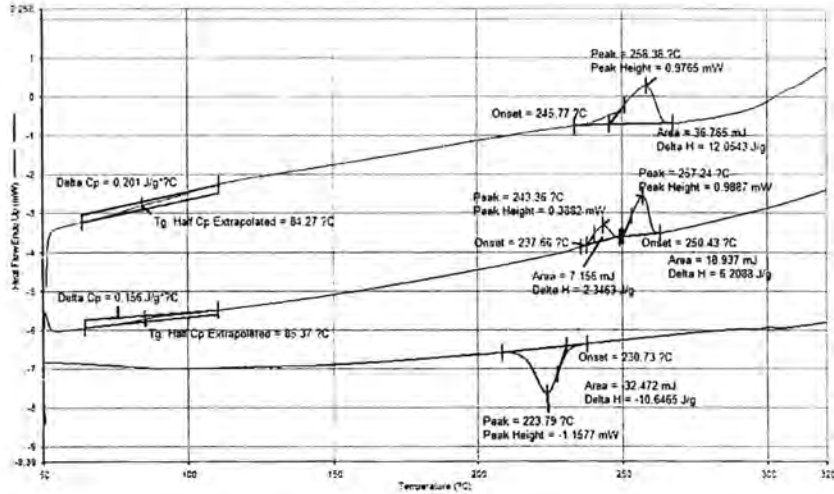
รูปที่ A.52 DSC curve of sPS1 / PEMA blends at composition 90/10 wt%



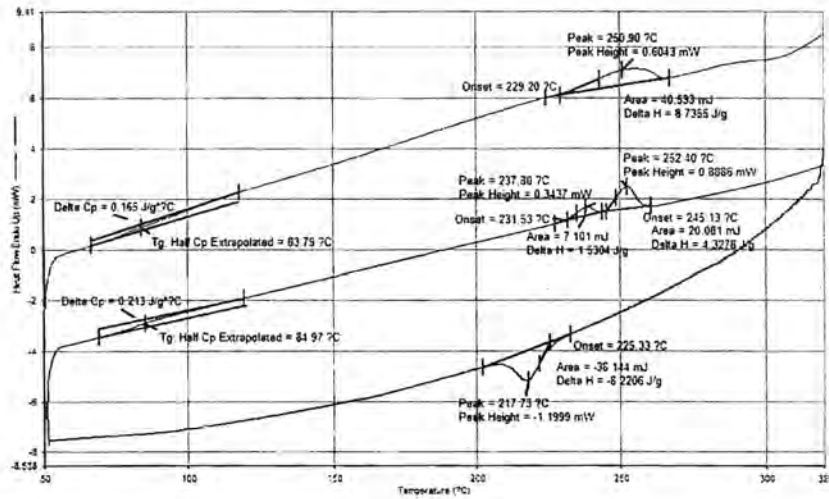
รูปที่ A.53 DSC curve of sPS2 / PEMA blends at composition 90/10 wt%



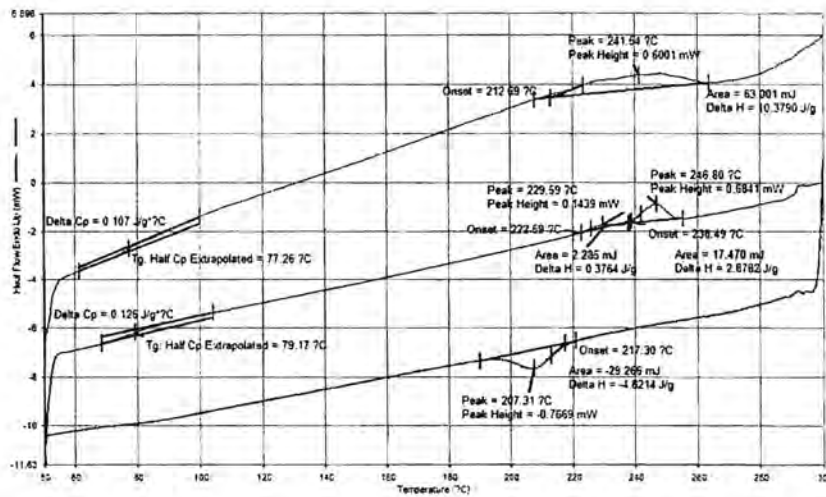
รูปที่ A.54 DSC curve of sPS3 / PEMA blends at composition 90/10 wt%



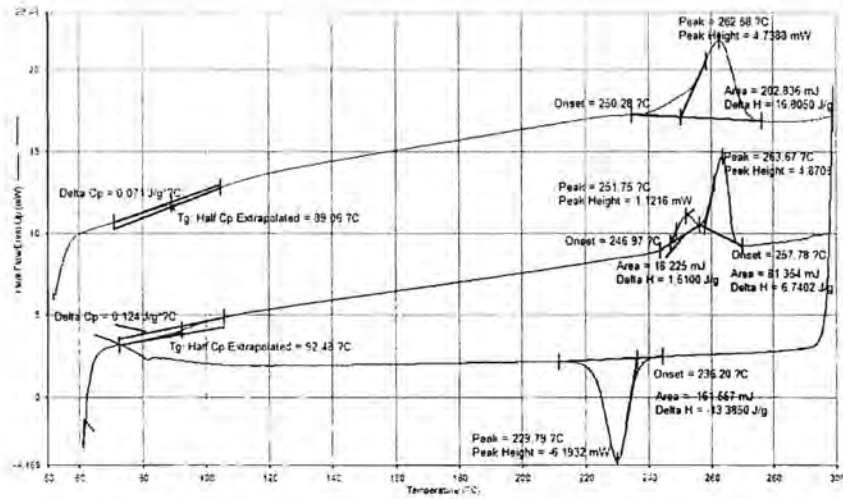
รูปที่ A.55 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%



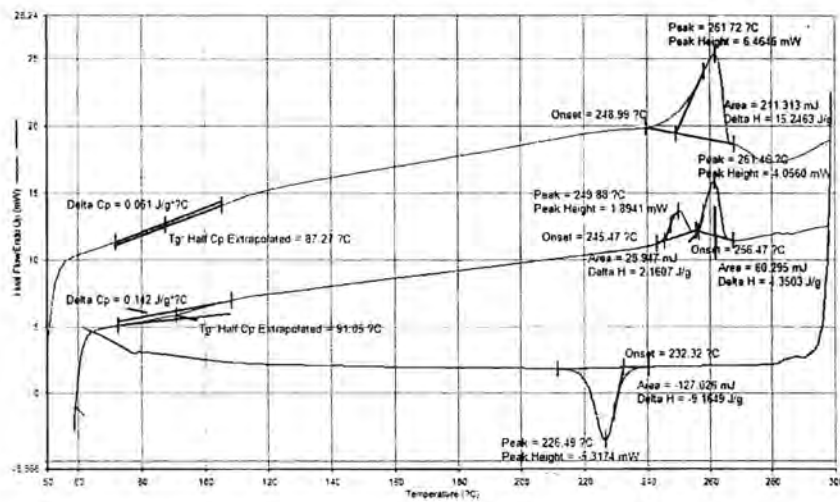
รูปที่ A.56 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%



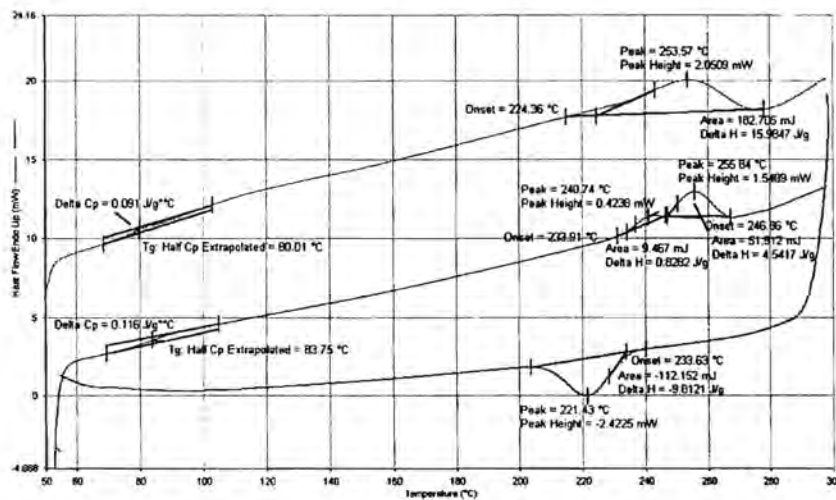
รูปที่ A.57 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 50/50 wt%



รูปที่ A.58 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%

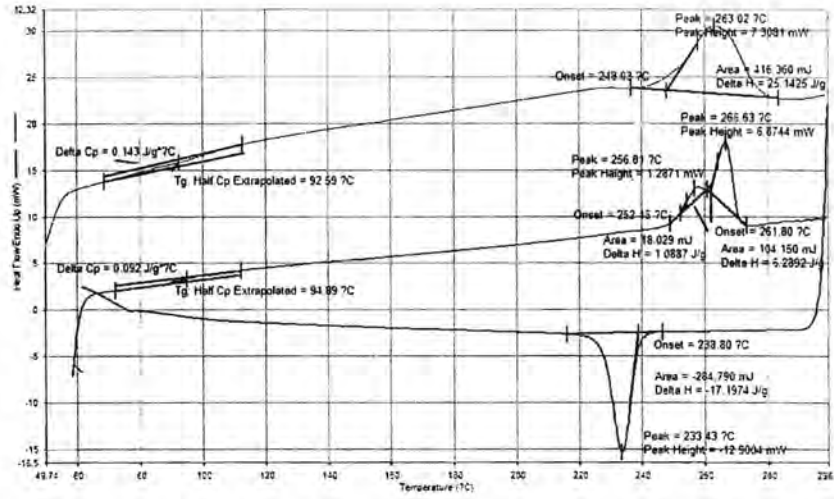


รูปที่ A.59 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%

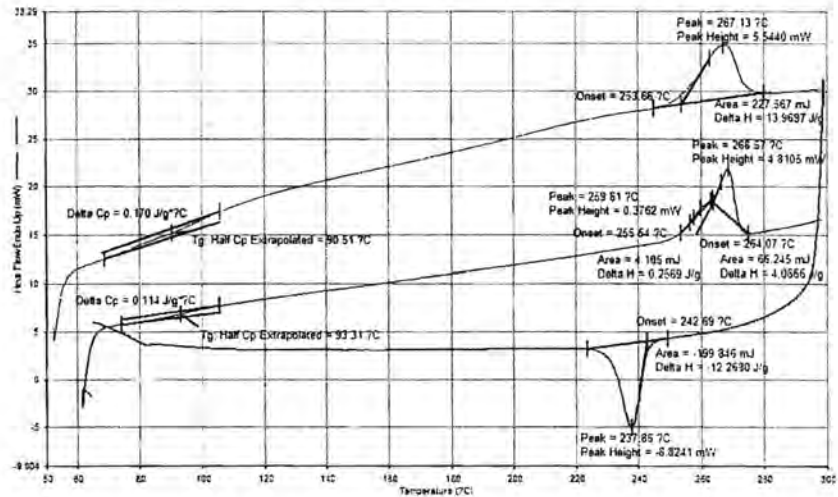


รูปที่ A.60 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 60/40 wt%

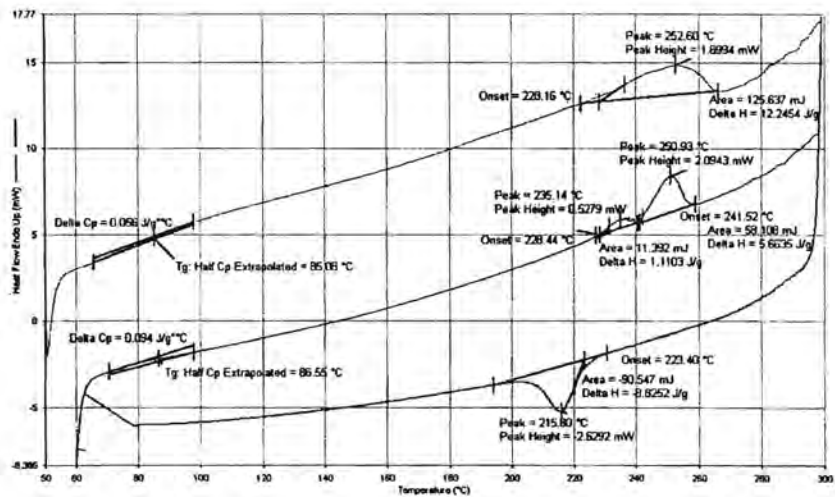




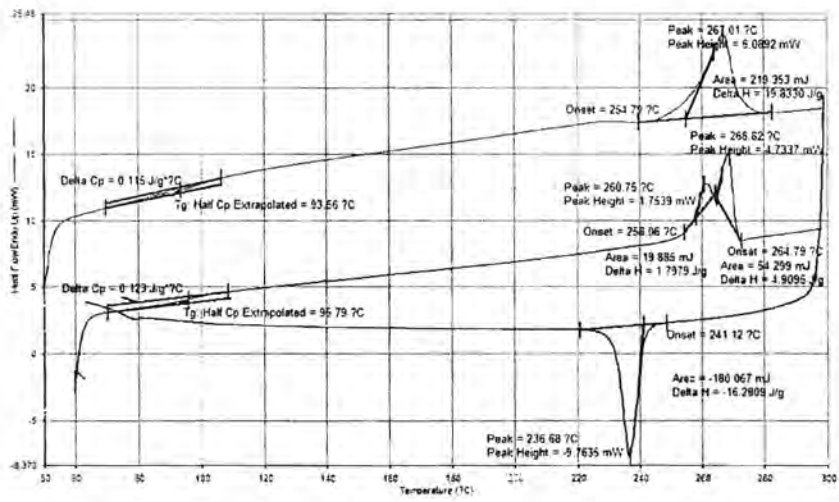
รูปที่ A.61 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 70/30 wt%



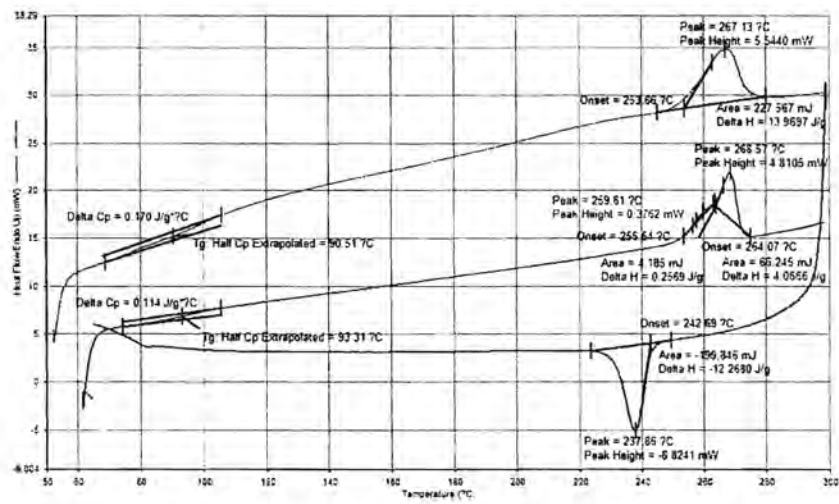
รูปที่ A.62 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 70/30 wt%



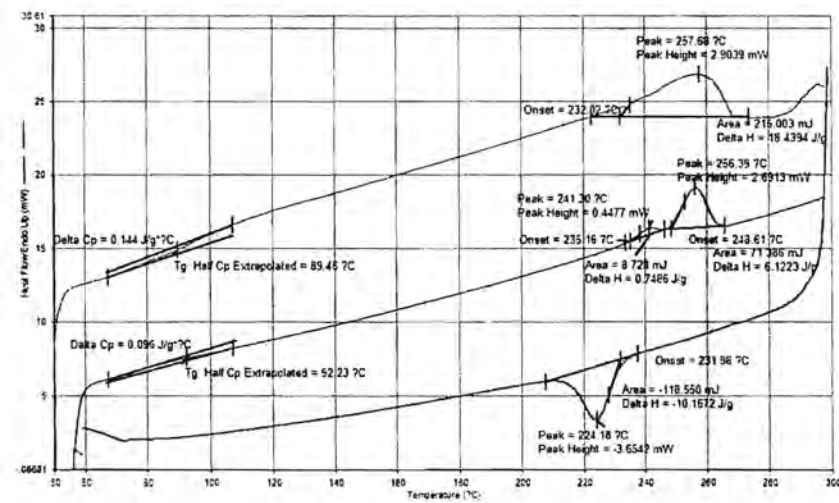
รูปที่ A.63 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 70/30 wt%



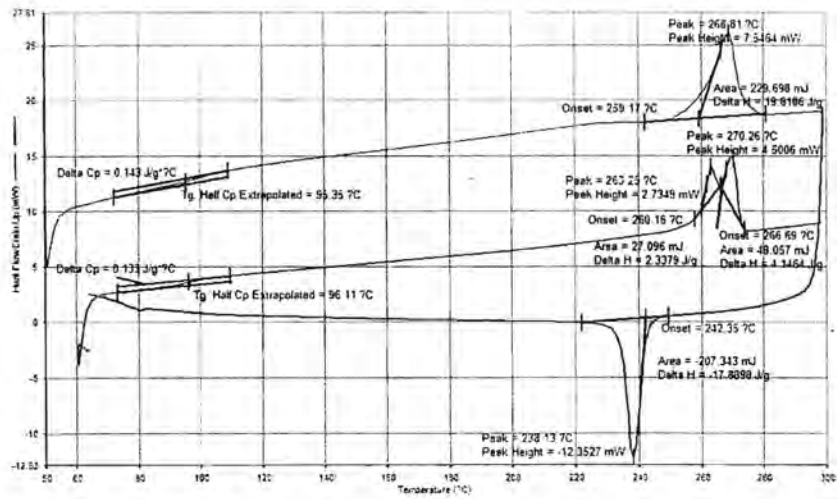
รูปที่ A.64 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%



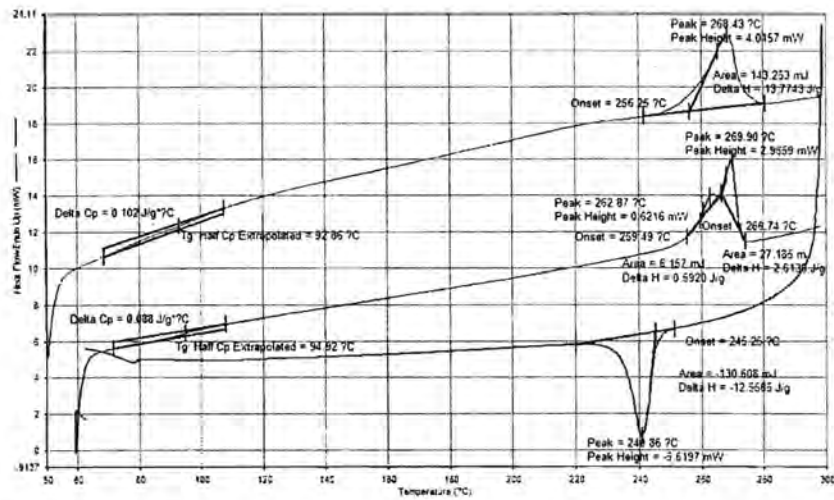
รูปที่ A.65 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%



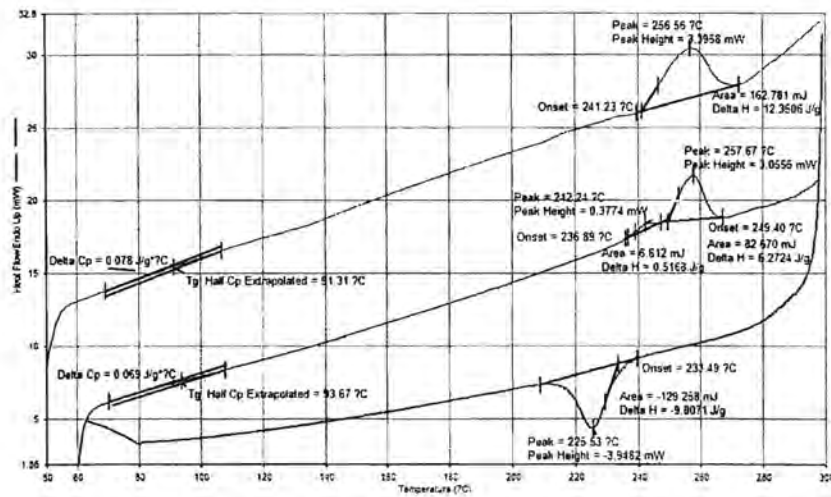
รูปที่ A.66 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 80/20 wt%



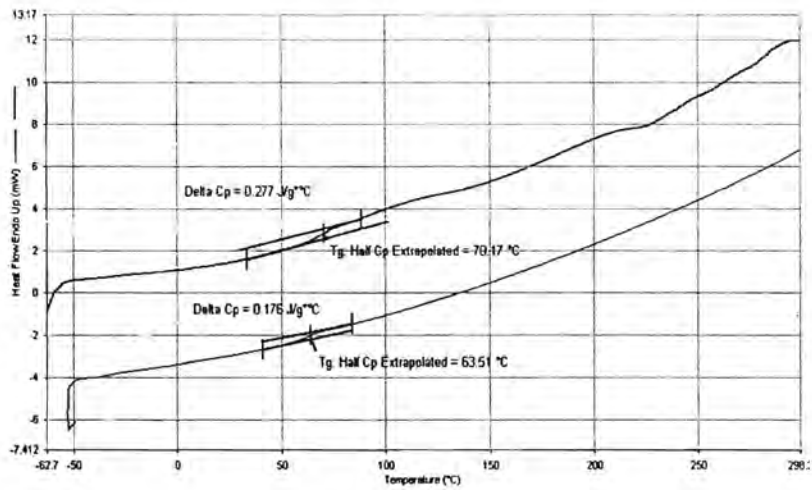
รูปที่ A.67 DSC curve of sPS1 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%



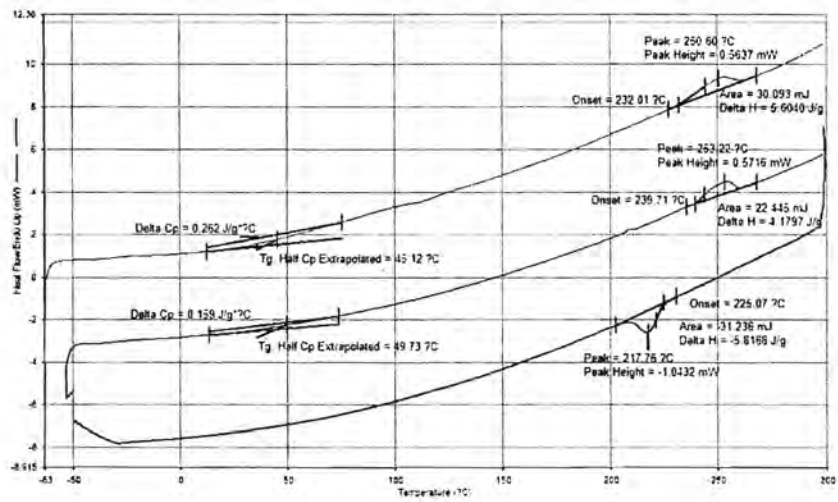
รูปที่ A.68 DSC curve of sPS2 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%



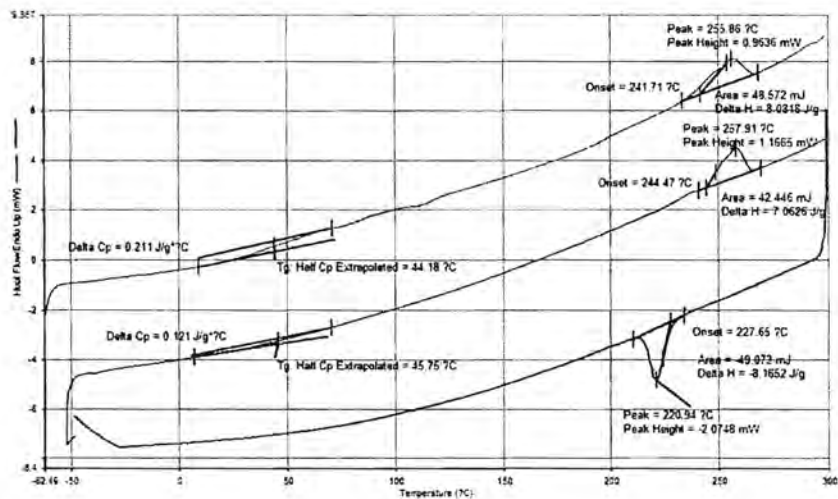
รูปที่ A.69 DSC curve of sPS3 / Poly( $\alpha$ -methylstyrene) blends at composition 90/10 wt%



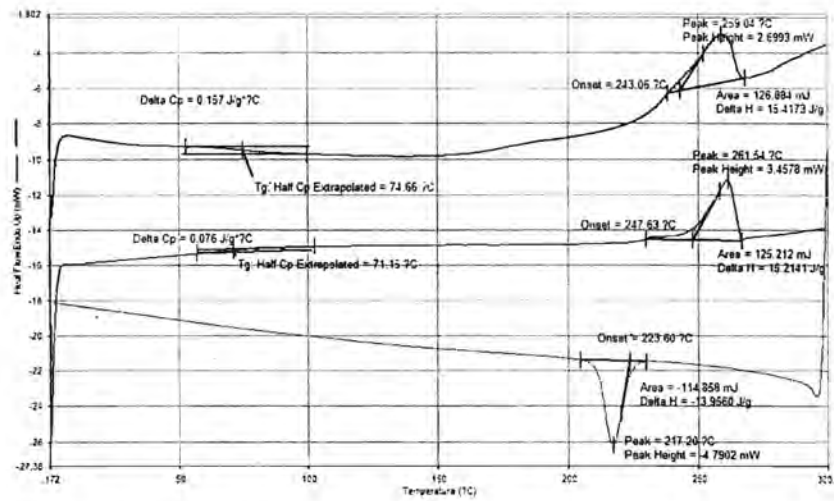
รูปที่ A.70 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%



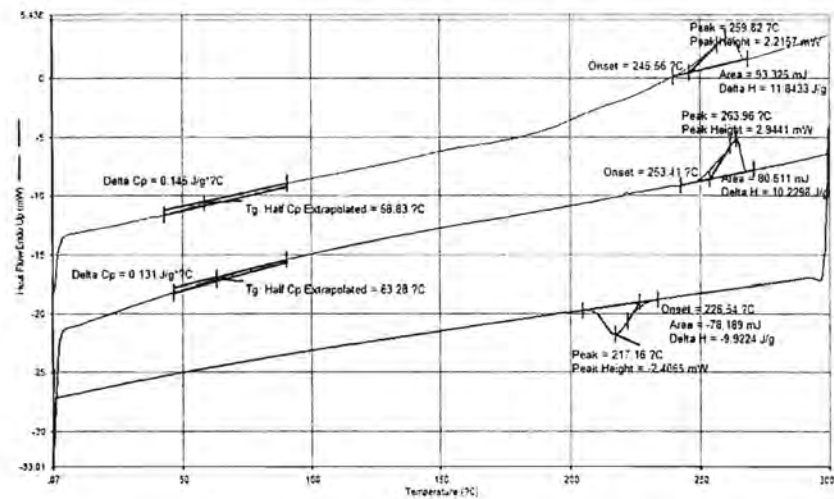
รูปที่ A.71 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%



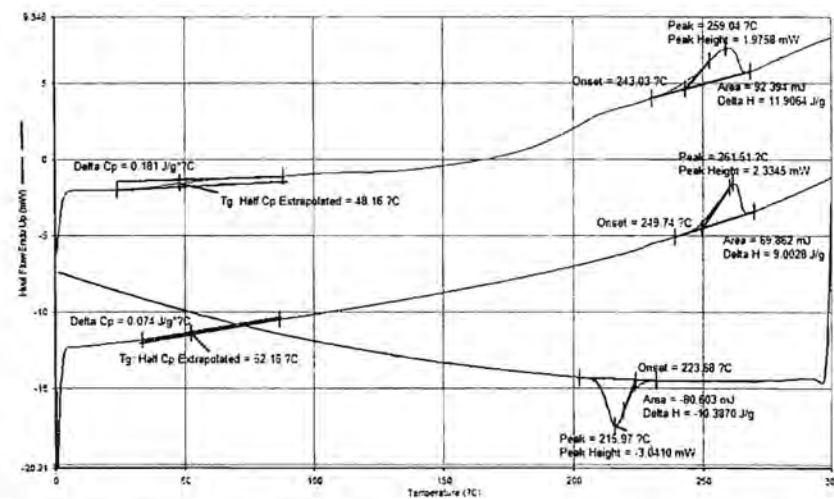
รูปที่ A.72 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 50/50 wt%



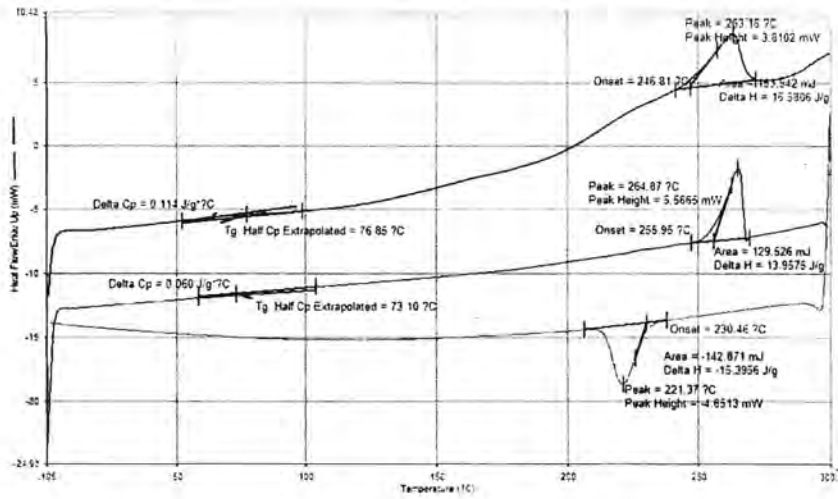
รูปที่ A.73 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%



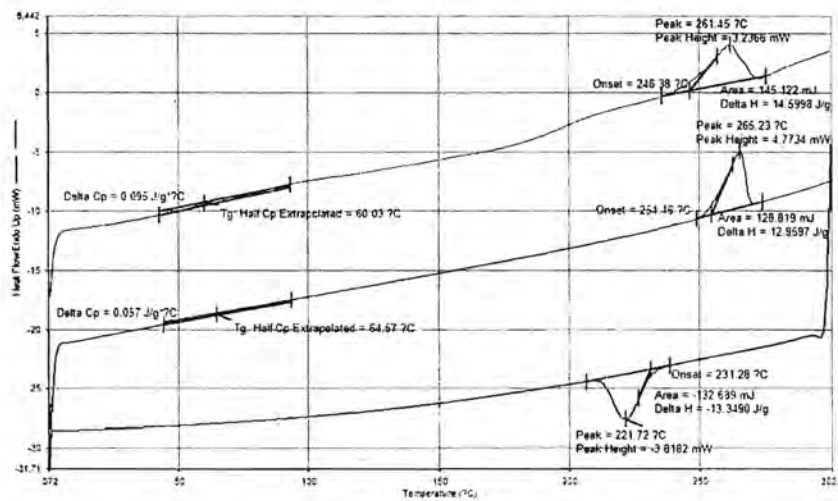
รูปที่ A.74 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%



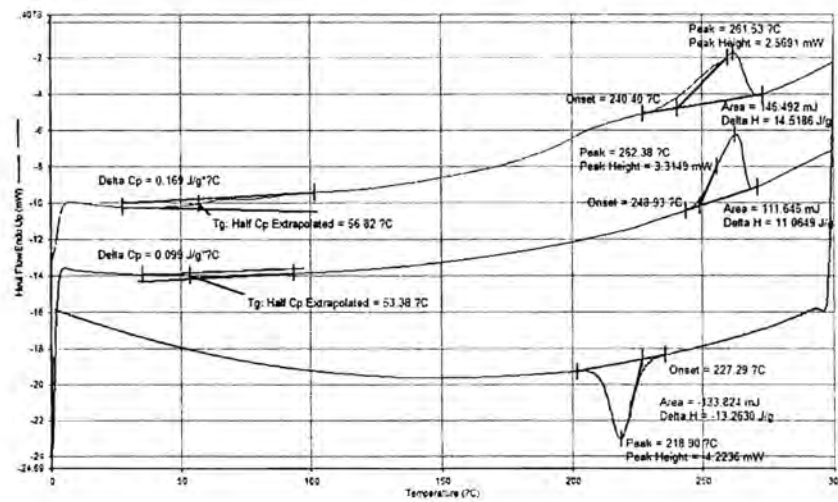
รูปที่ A.75 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 60/40 wt%



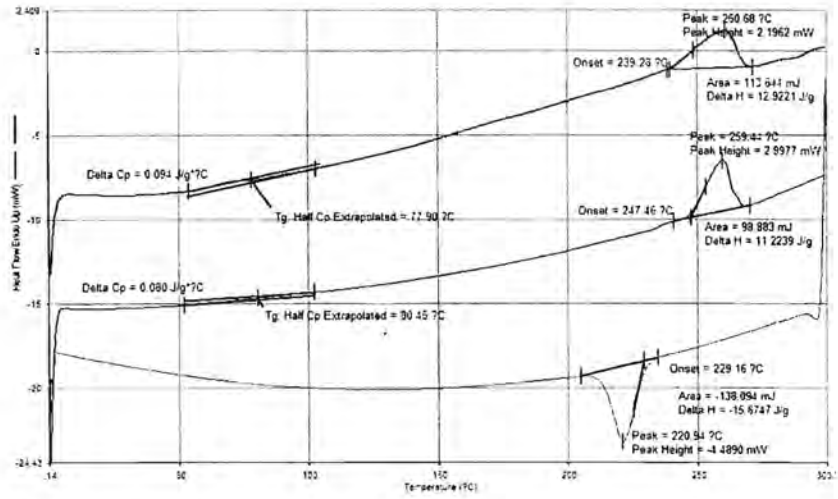
รูปที่ A.76 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%



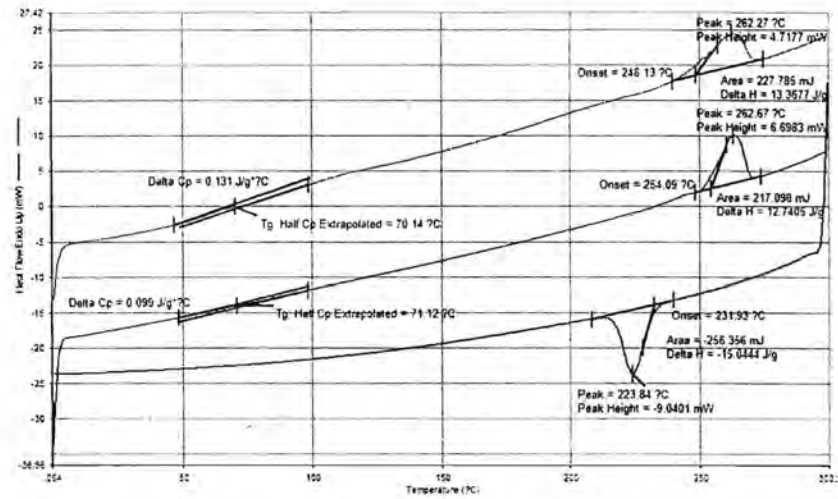
รูปที่ A.77 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%



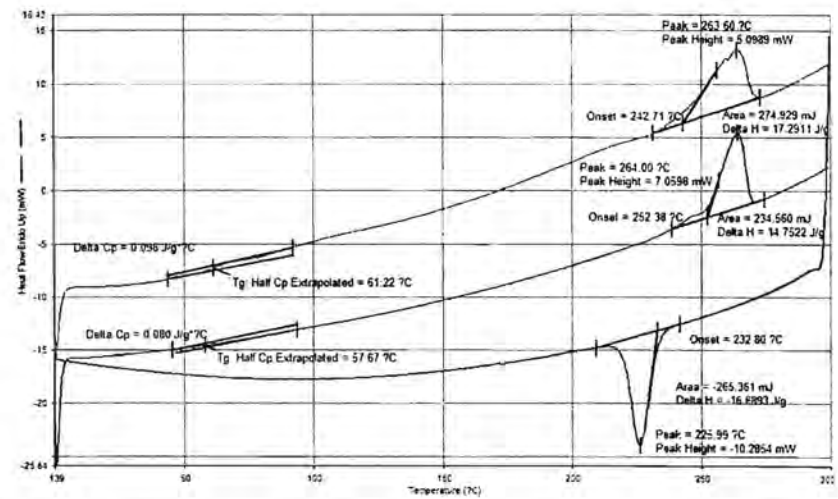
รูปที่ A.78 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%



รูปที่ A.79 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%

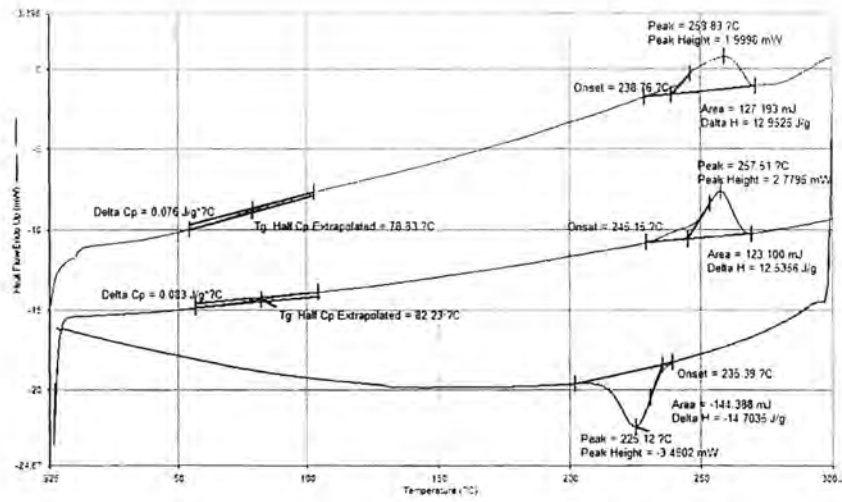


รูปที่ A.80 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%

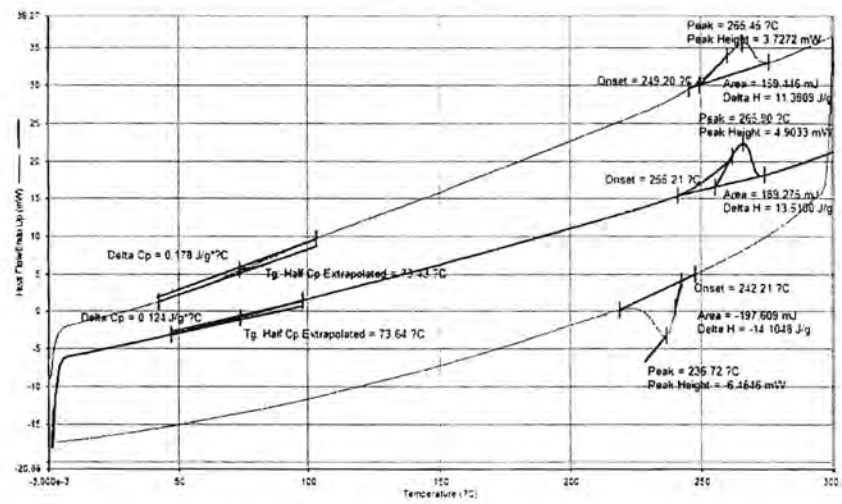


รูปที่ A.81 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%

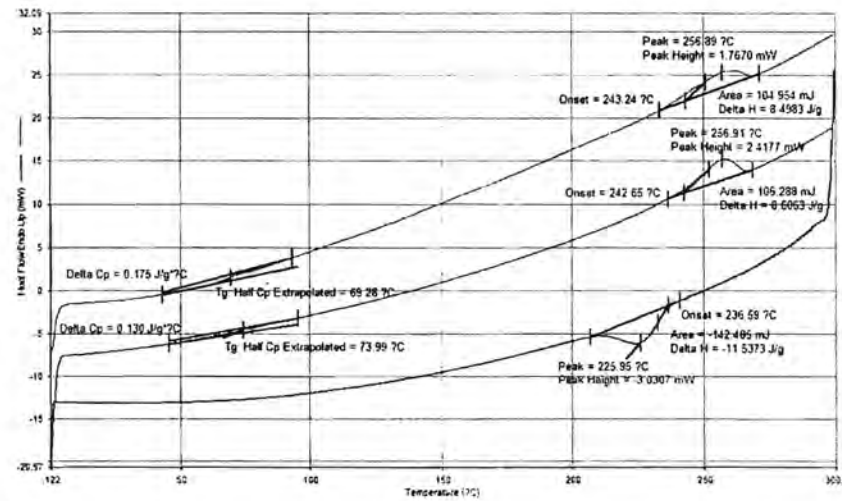




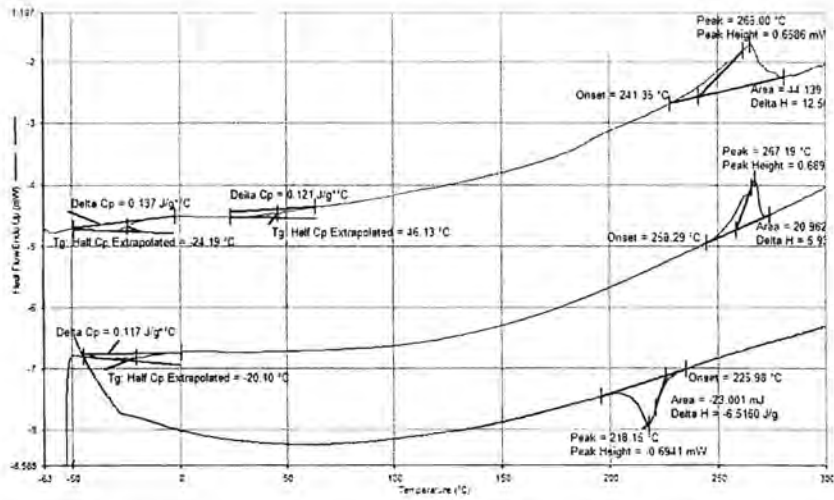
รูปที่ A.82 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%



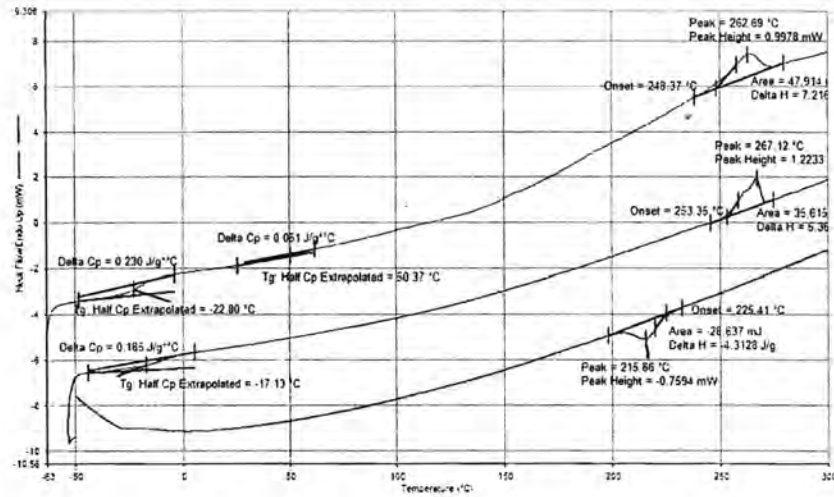
รูปที่ A.83 DSC curve of sPS2 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%



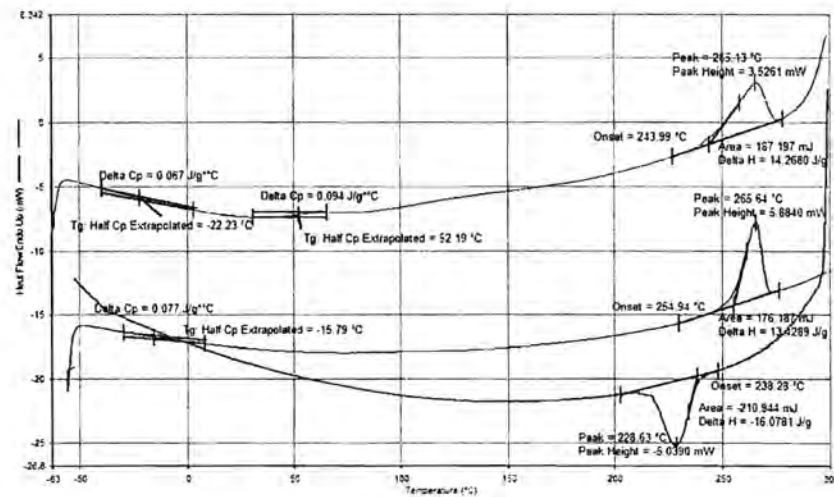
รูปที่ A.84 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 90/10 wt%



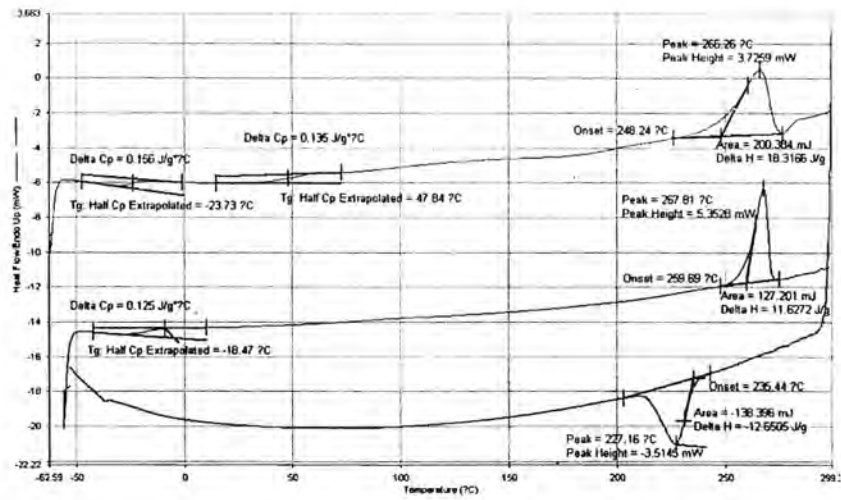
รูปที่ A.85 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 50/50 wt%



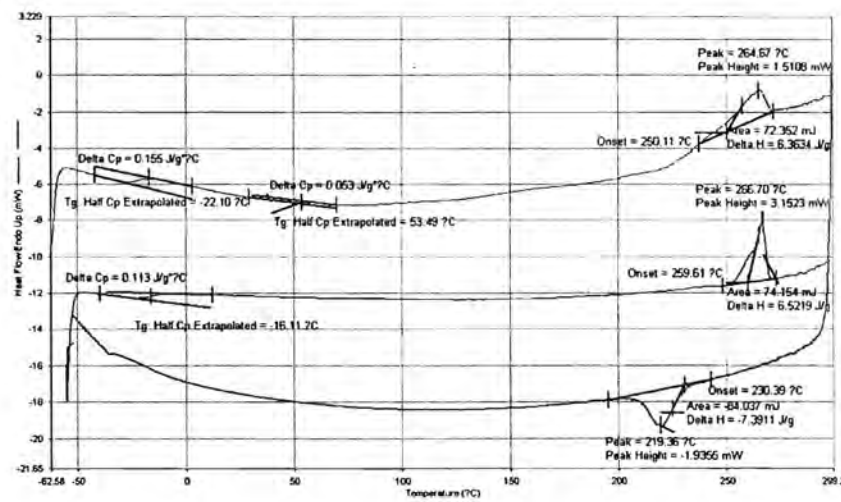
รูปที่ A.86 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 50/50 wt%



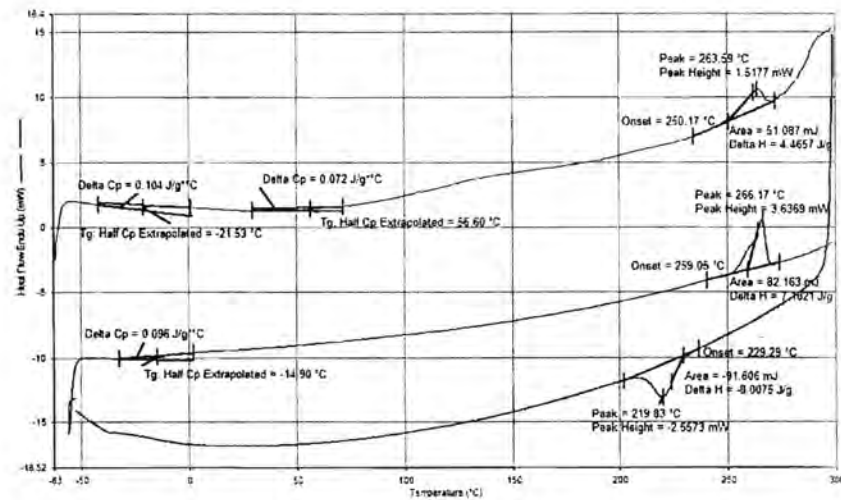
รูปที่ A.87 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 50/50 wt%



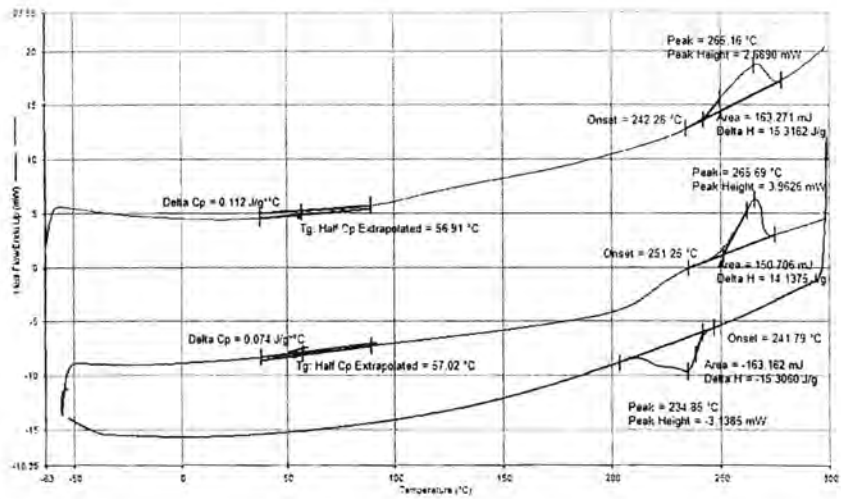
รูปที่ A.88 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 60/40 wt%



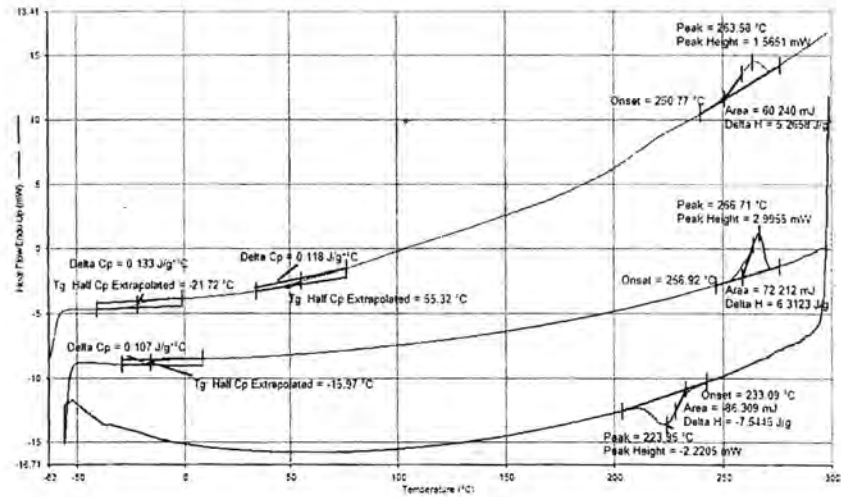
รูปที่ A.89 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 60/40 wt%



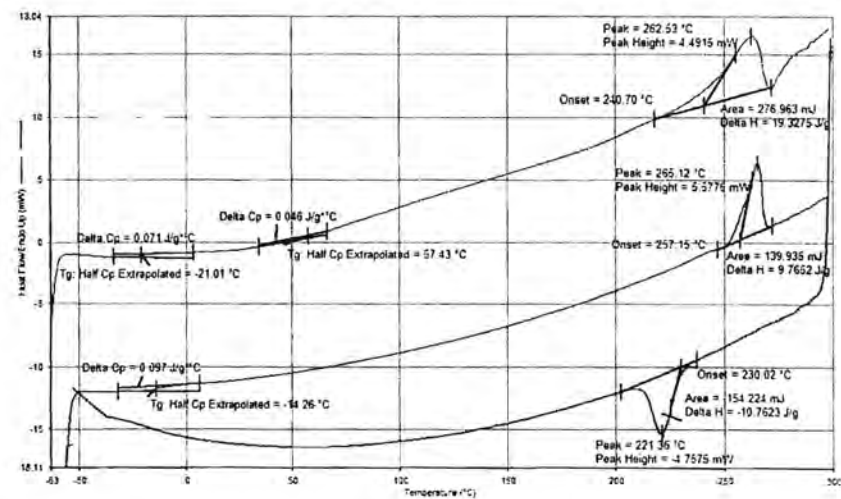
รูปที่ A.90 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 60/40 wt%



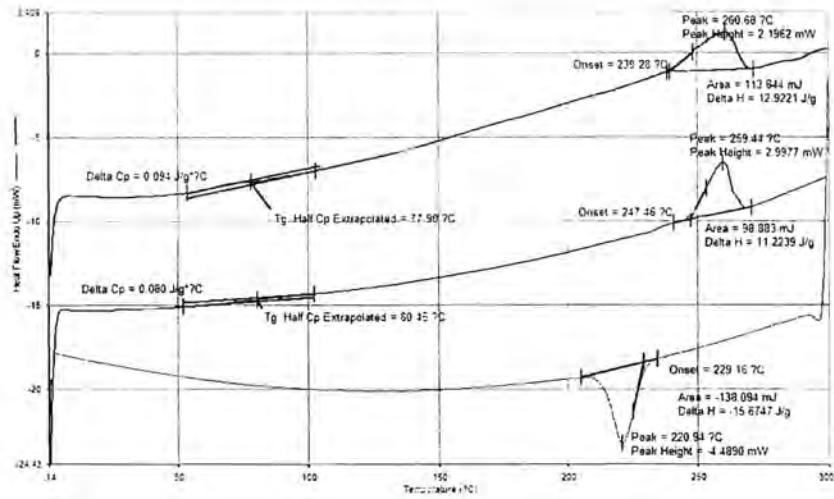
รูปที่ A.91 DSC curve of sPS1 / Polyisoprene blends at composition 70/30 wt%



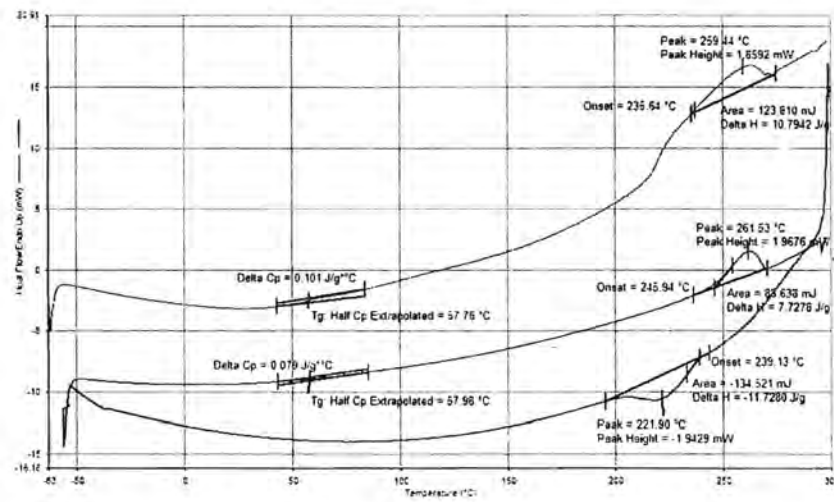
รูปที่ A.92 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 70/30 wt%



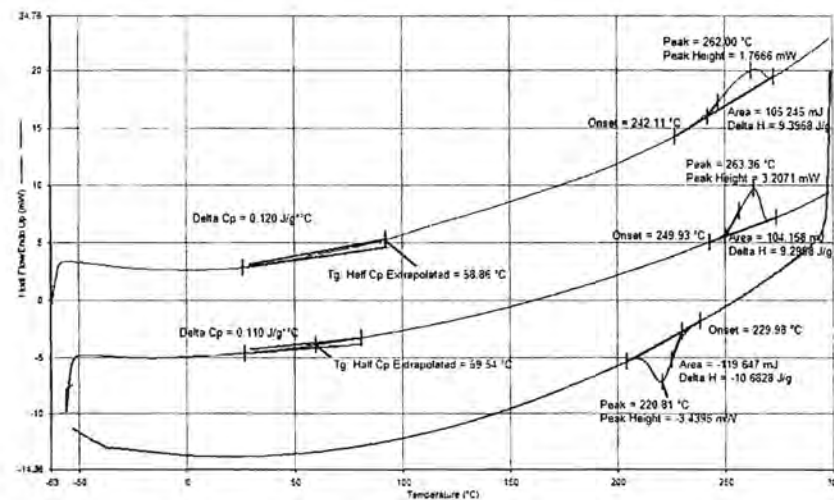
รูปที่ A.93 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 70/30 wt%



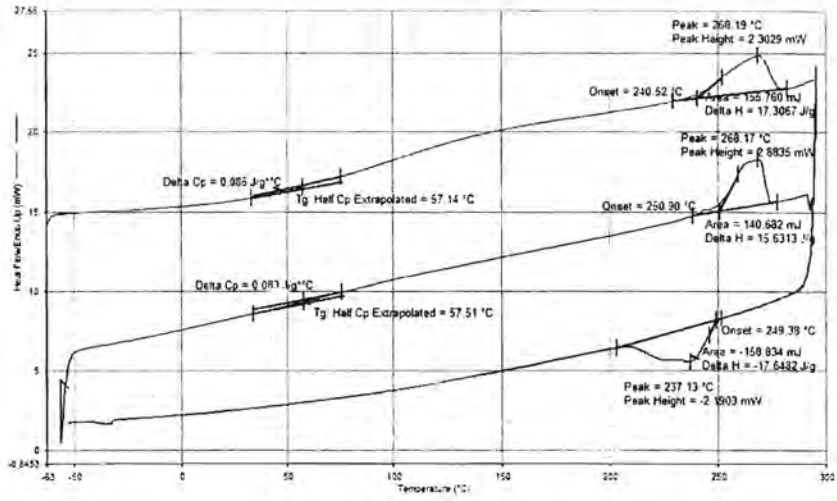
รูปที่ A.94 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 80/20 wt%



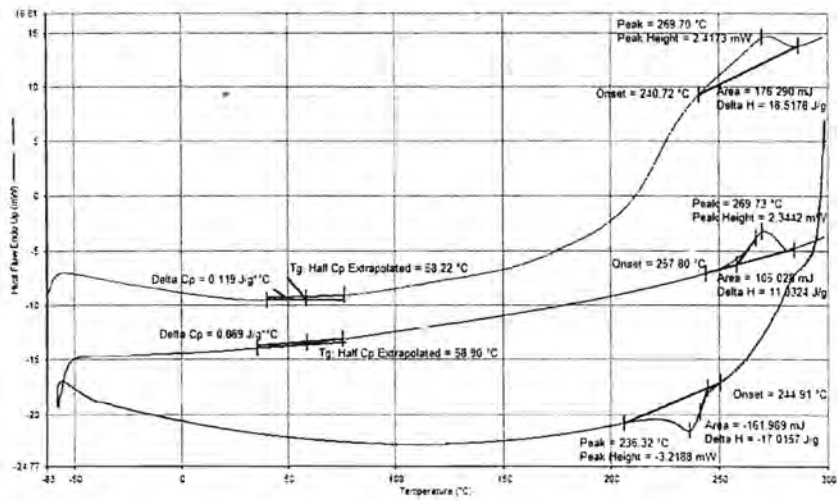
รูปที่ A.95 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 80/20 wt%



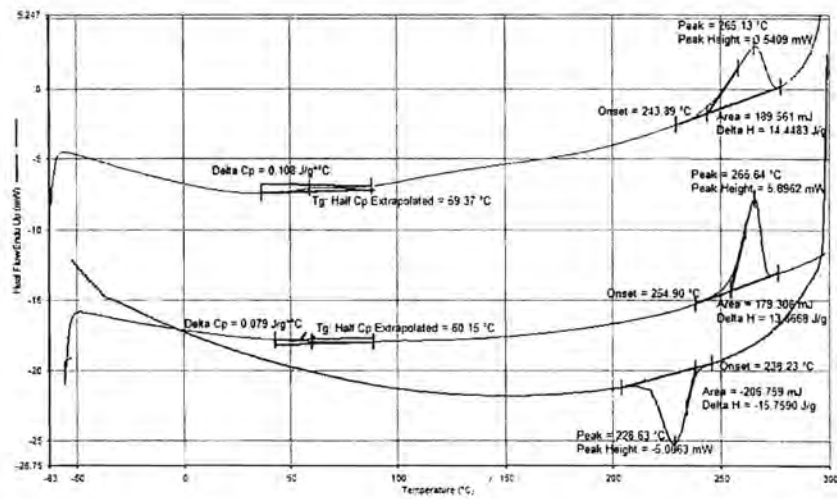
รูปที่ A.96 DSC curve of sPS3 / Polyisoprene blends at composition 80/20 wt%



รูปที่ A.97 DSC curve of sPS1 / PVME blends at composition 90/10 wt%

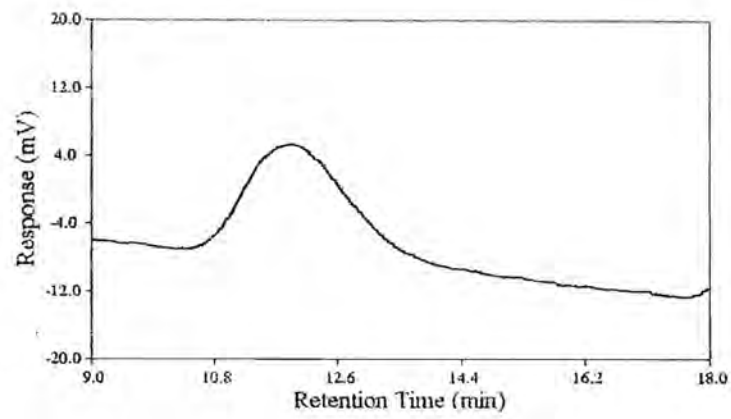


รูปที่ A.98 DSC curve of sPS2 / PVME blends at composition 90/10 wt%

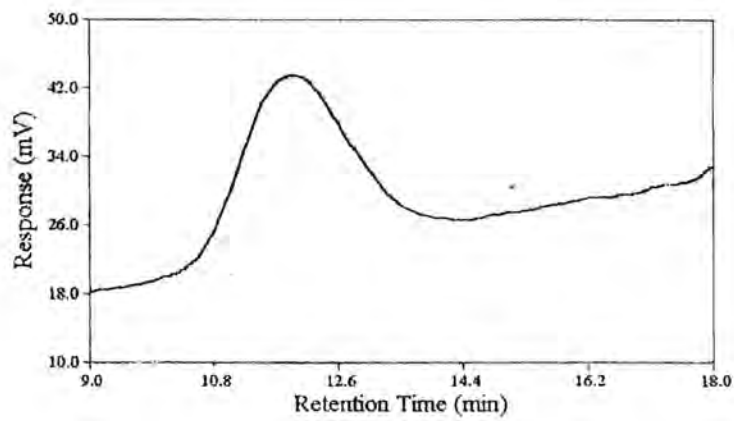


รูปที่ A.99 DSC curve of sPS3 / PVME blends at composition 90/10 wt%

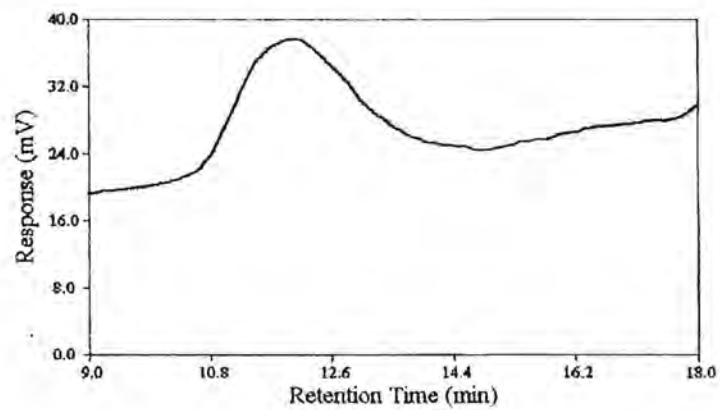
### The Data of GPC Characterization



รูปที่ A.100 The chromatogram of sPS1



รูปที่ A.101 The chromatogram of sPS2



รูปที่ A.102 The chromatogram of sPS3



**ข้อมูลการทดลองโดยละเอียดตอนที่สอง**

## The Data of DSC Characterization

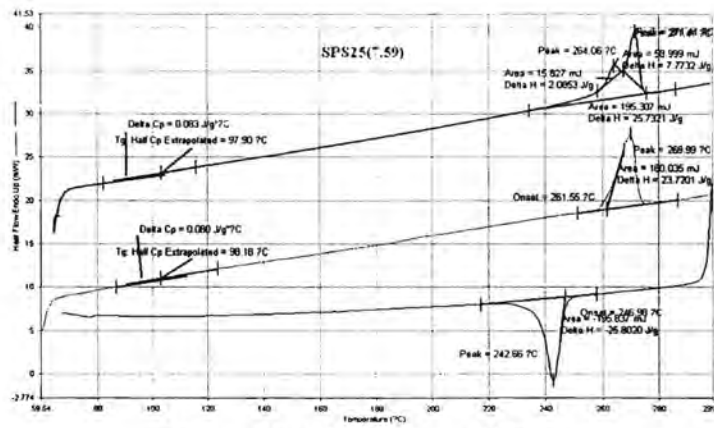


Figure B.1 DSC curve of SPS

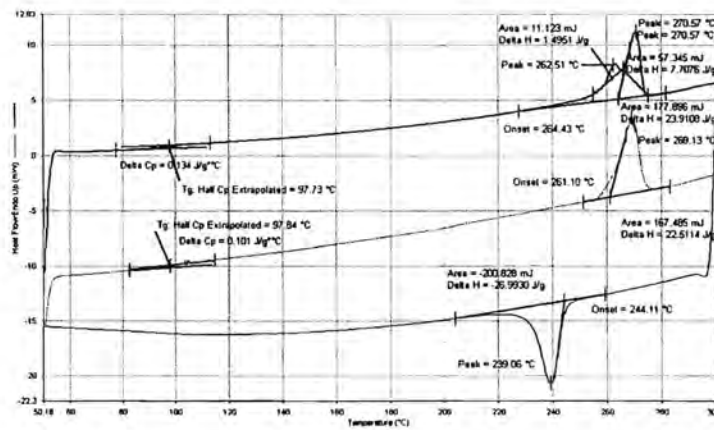


Figure B.2 DSC curve of SPS blended with LCC

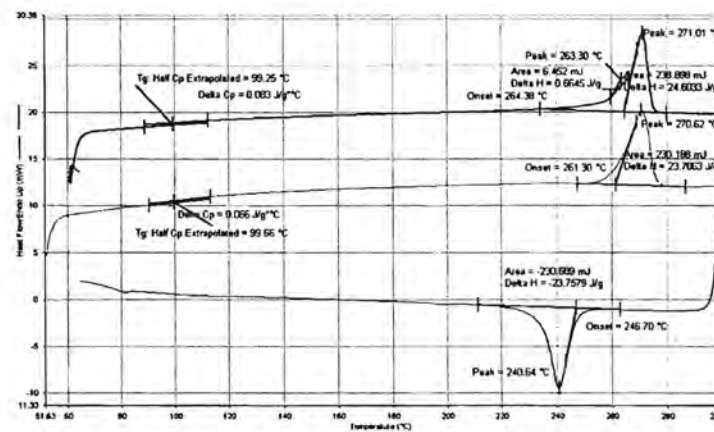


Figure B.3 DSC curve of SPS blended with GMS

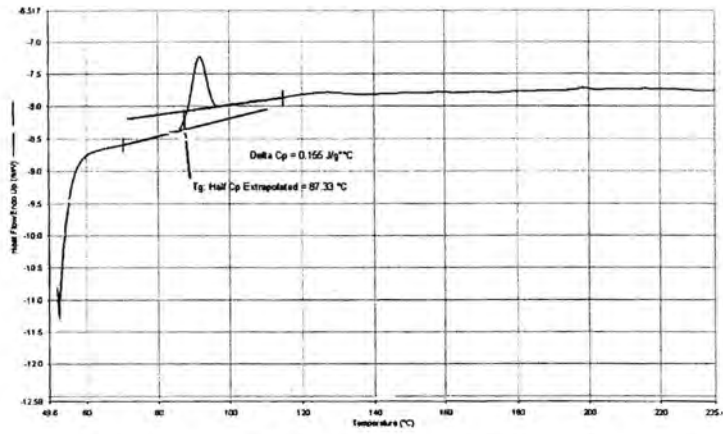


Figure B.4 DSC curve of PaMS

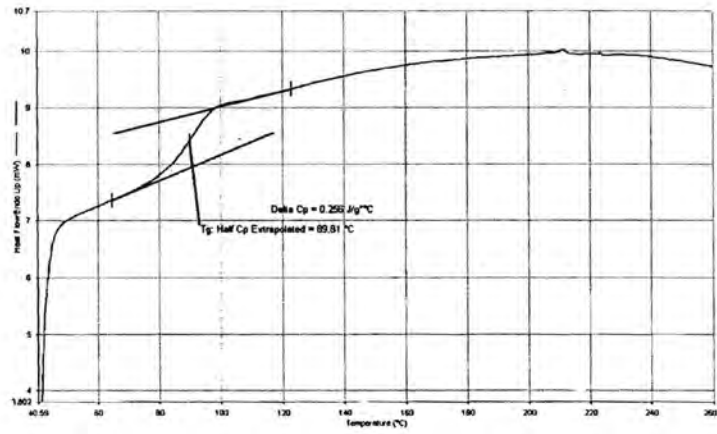


Figure B.5 DSC curve of PaMS blended with LCC

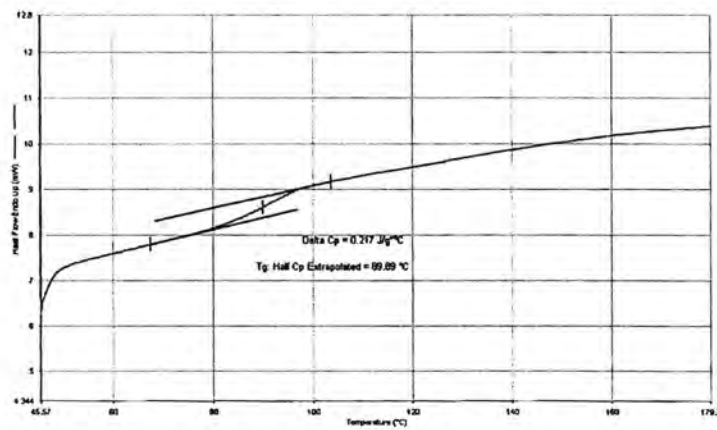


Figure B.6 DSC curve of PaMS blended with GMS

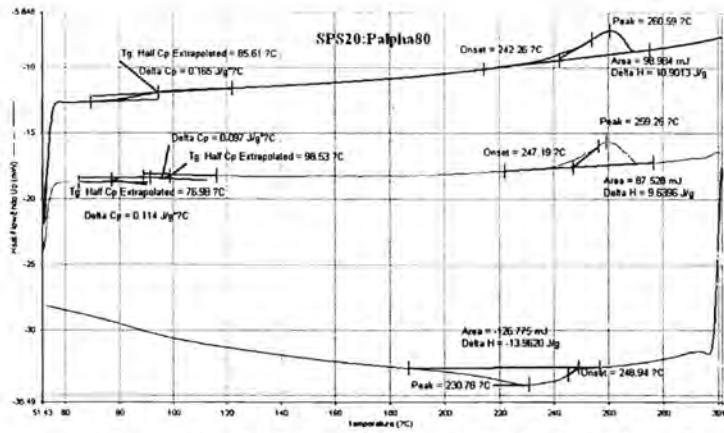


Figure B.7 DSC curve of SPS20/PaMS80 blends

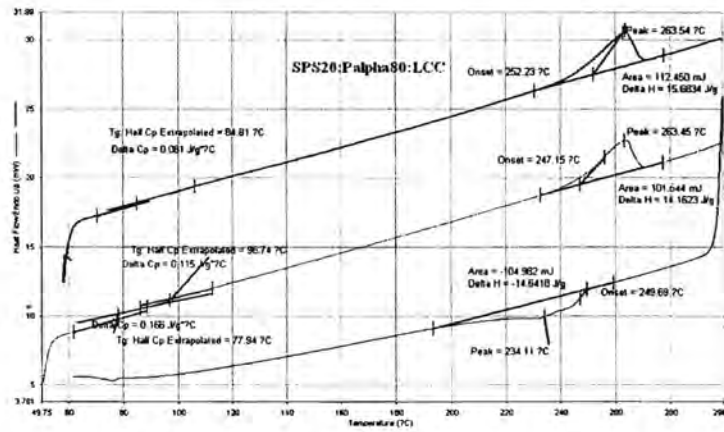


Figure B.8 DSC curve of SPS20/PaMS80/LCC blends

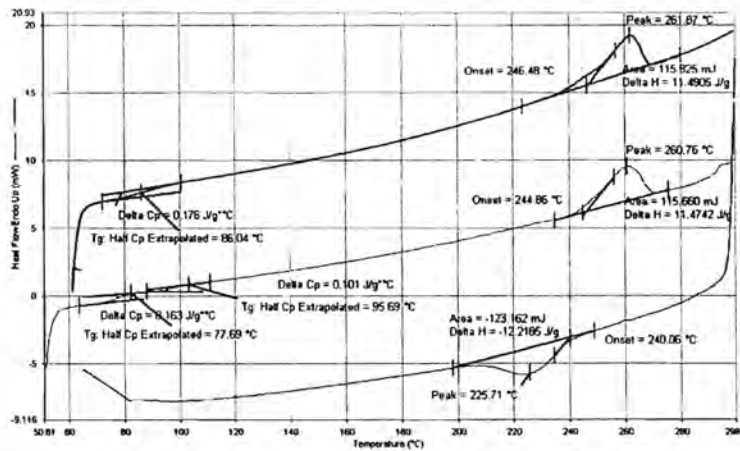


Figure B.9 DSC curve of SPS20/PaMS80/GMS blends

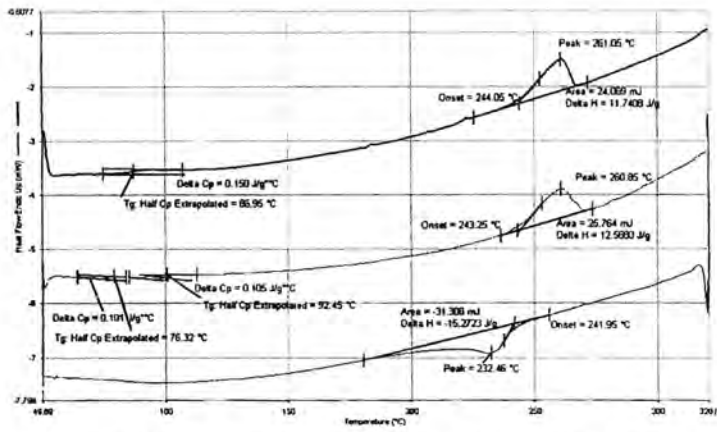


Figure B.10 DSC curve of SPS40/PaMS60 blends

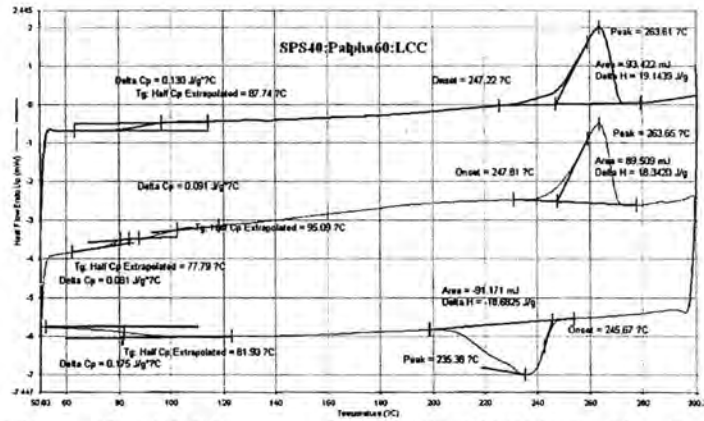


Figure B.11 DSC curve of SPS40/PaMS60/LCC blends

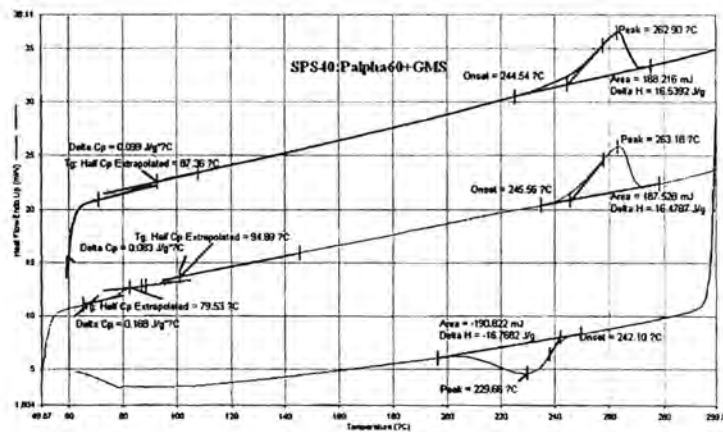


Figure B.12 DSC curve of SPS40/PaMS60/GMS blends

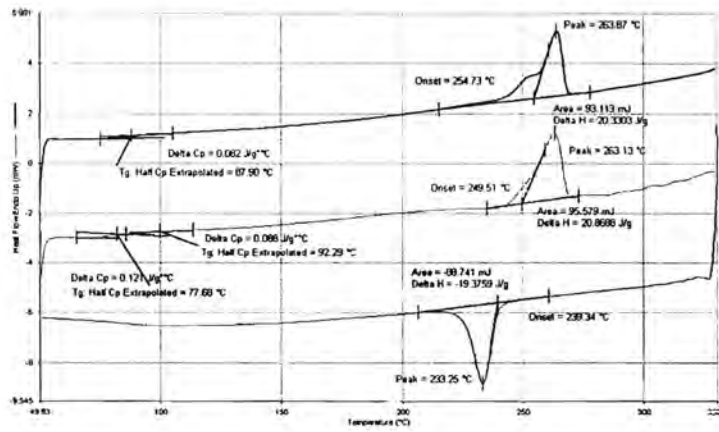


Figure B.13 DSC curve of SPS60/PaMS40 blends

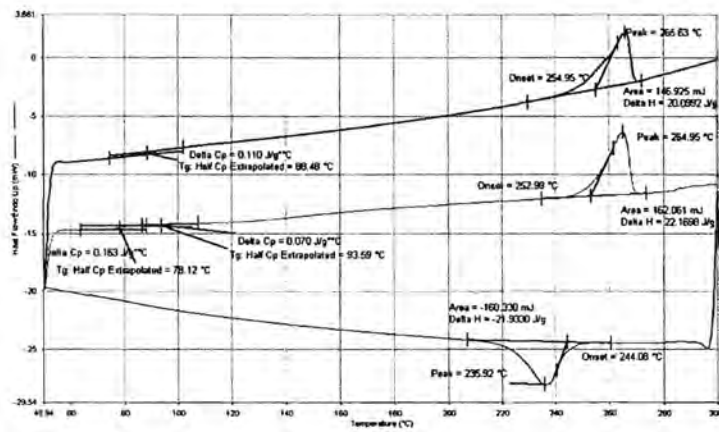


Figure B.14 DSC curve of SPS60/PaMS40/LCC blends

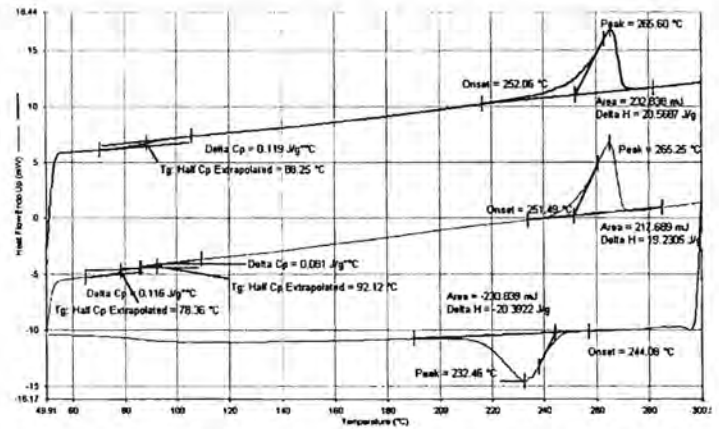


Figure B.15 DSC curve of SPS60/PaMS40/GMS blends

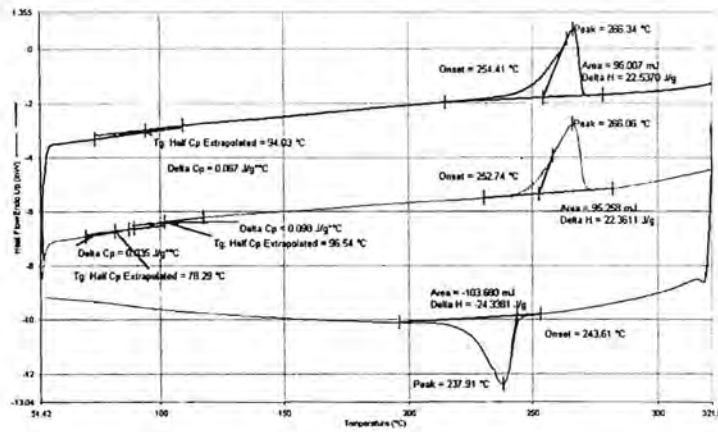


Figure B.16 DSC curve of SPS80/PaMS20 blends

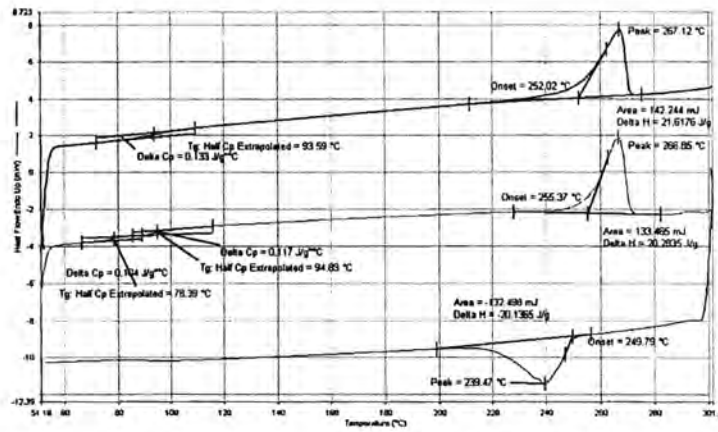


Figure B.17 DSC curve of SPS80/PaMS20/LCC blends

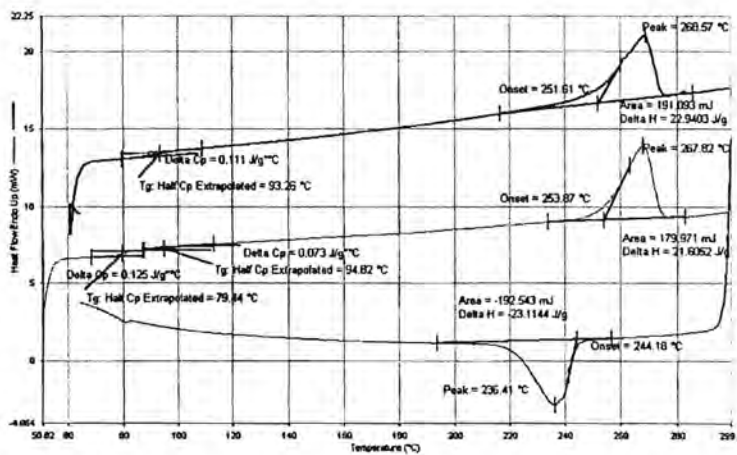


Figure B.18 DSC curve of SPS80/PaMS20/GMS blends



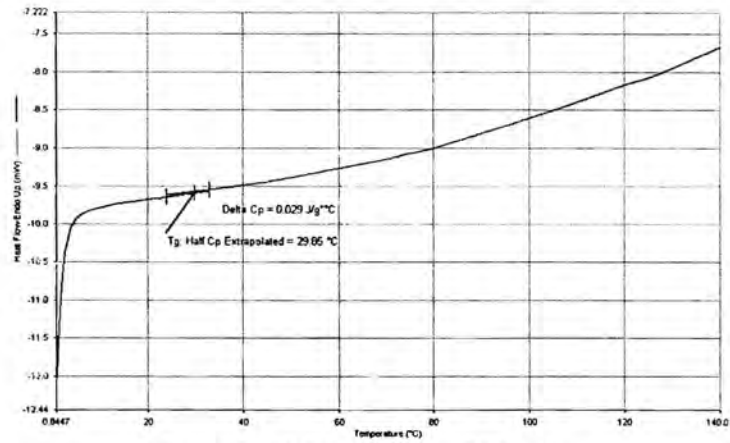


Figure B.19 DSC curve of PBMA

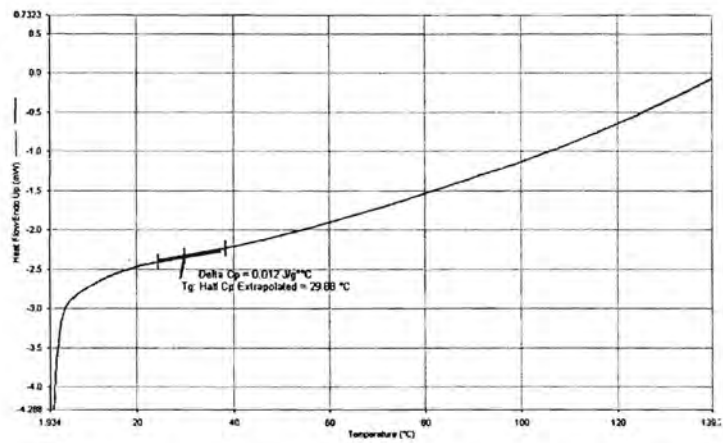


Figure B.20 DSC curve of PBMA blended with LCC

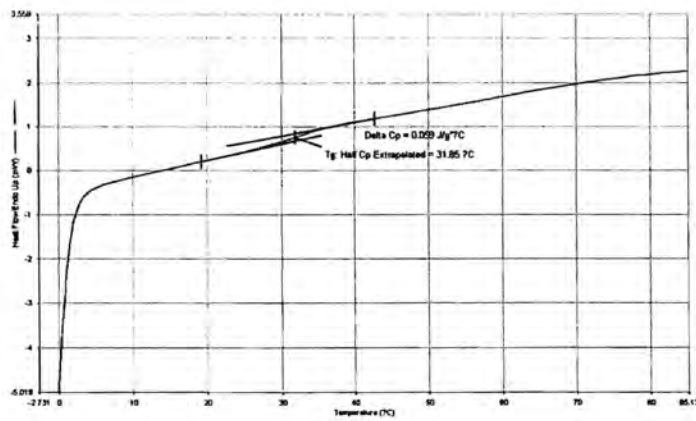


Figure B.21 DSC curve of PBMA blended with GMS

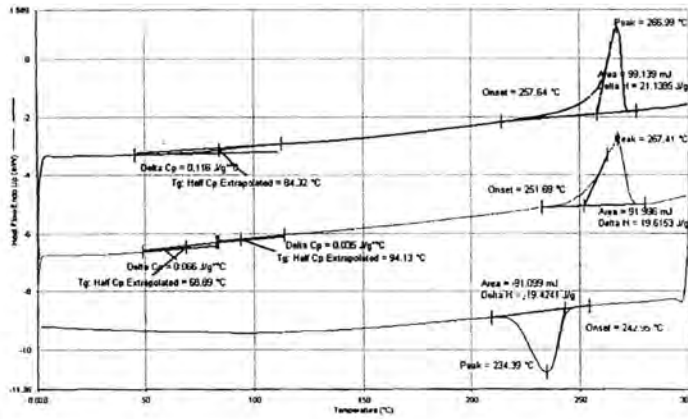


Figure B.22 DSC curve of SPS20/PBMA80 blends

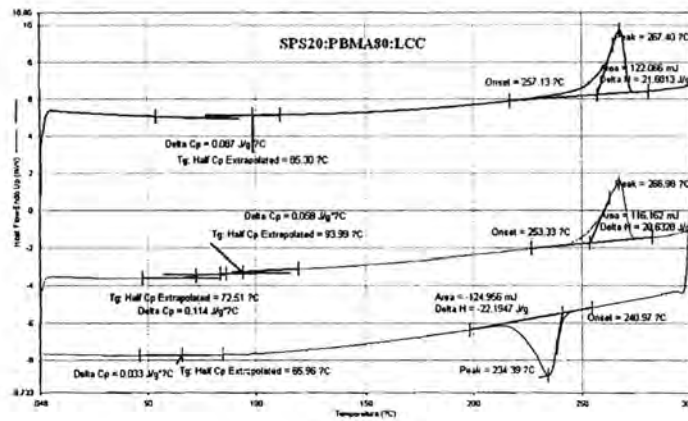


Figure B.23 DSC curve of SPS20/PBMA80/LCC blends

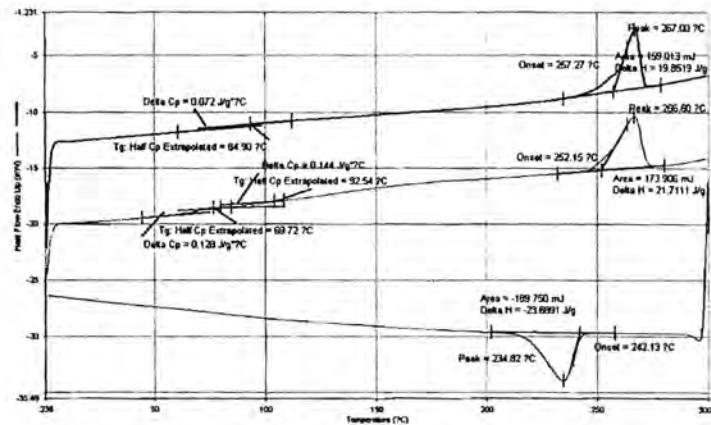


Figure B.24 DSC curve of SPS20/PBMA80/GMS blends

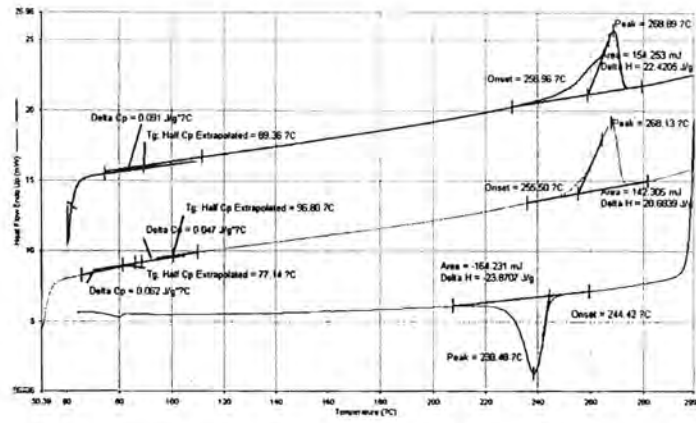


Figure B.25 DSC curve of SPS40/PBMA60 blends

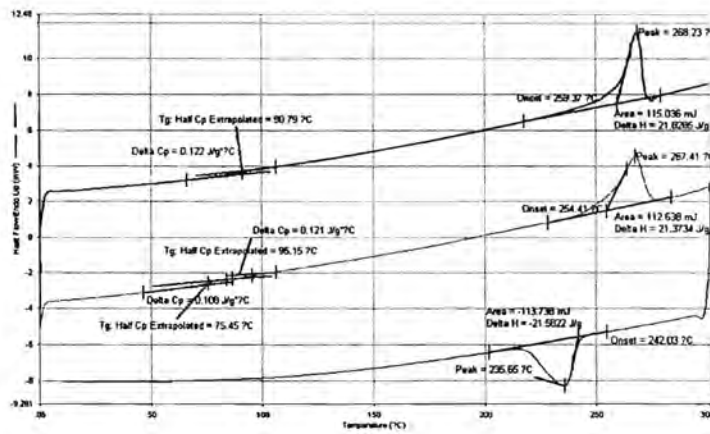


Figure B.26 DSC curve of SPS40/PBMA60/LCC blends

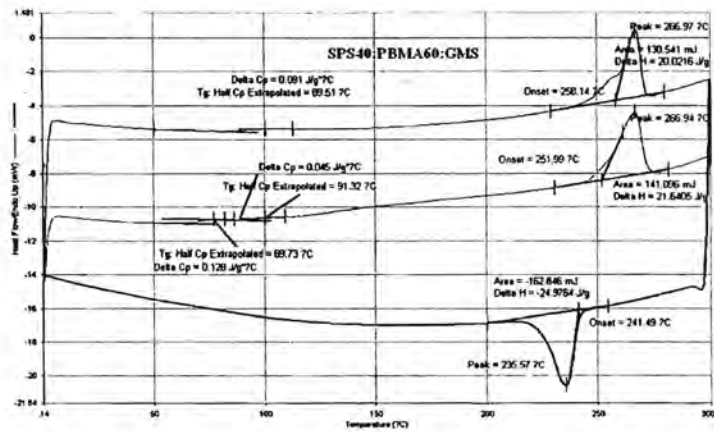


Figure B.27 DSC curve of SPS40/PBMA60/GMS blends

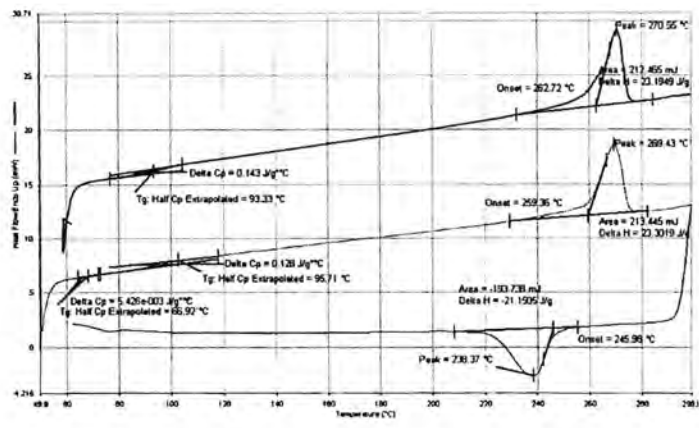


Figure B.28 DSC curve of SPS60/PBMA40 blends

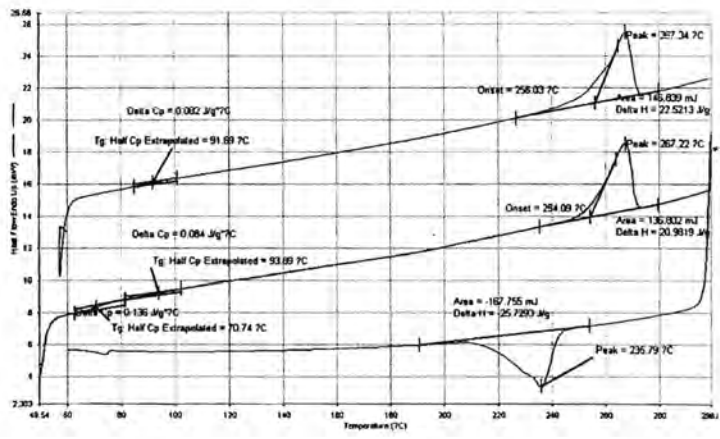


Figure B.29 DSC curve of SPS60/PBMA40/LCC blends

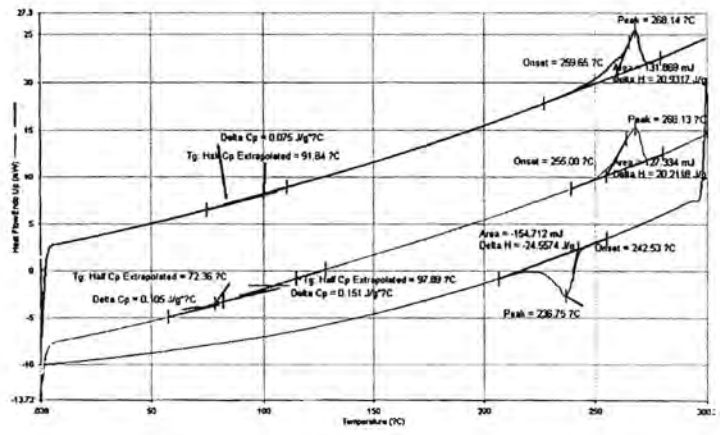


Figure B.30 DSC curve of SPS60/PBMA40/GMS blends

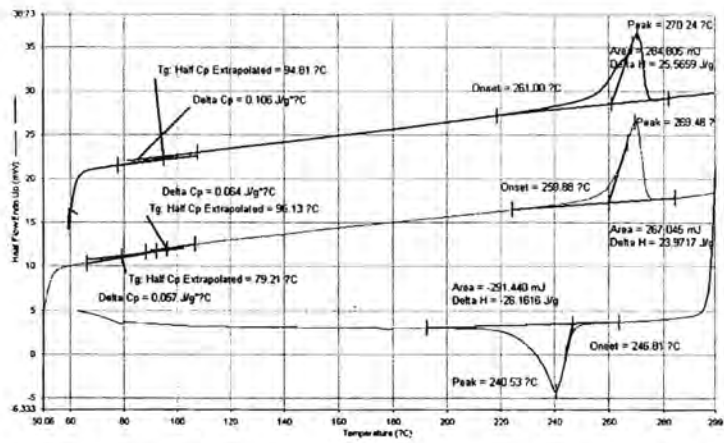


Figure B.31 DSC curve of SPS80/PBMA20 blends

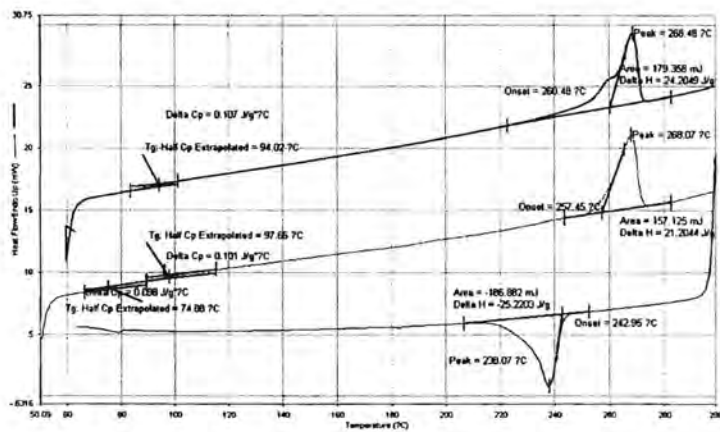


Figure B.32 DSC curve of SPS80/PBMA20/LCC blends

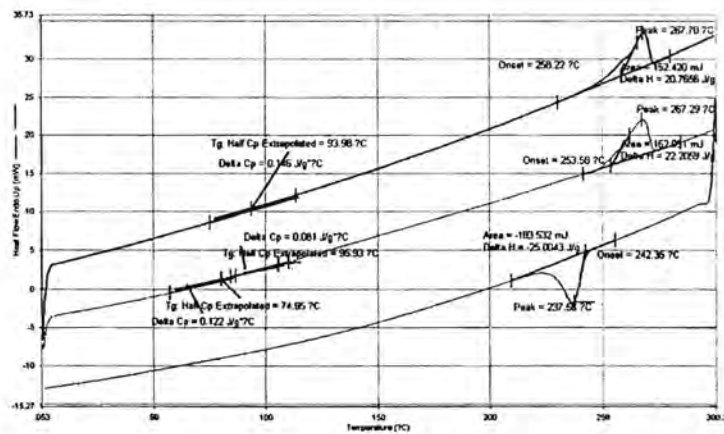


Figure B.33 DSC curve of SPS80/PBMA20/GMS blends

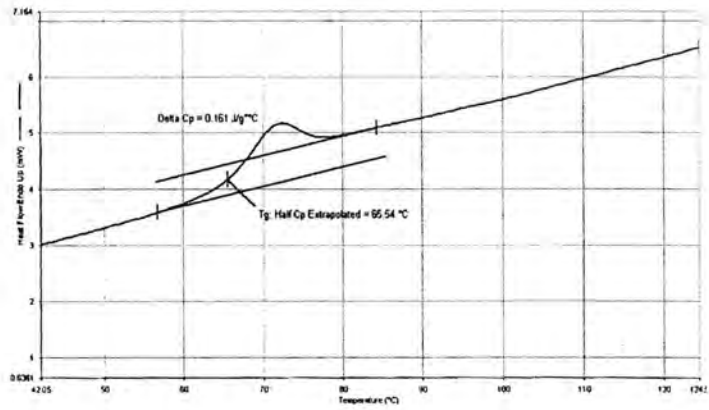


Figure B.34 DSC curve of PEMA

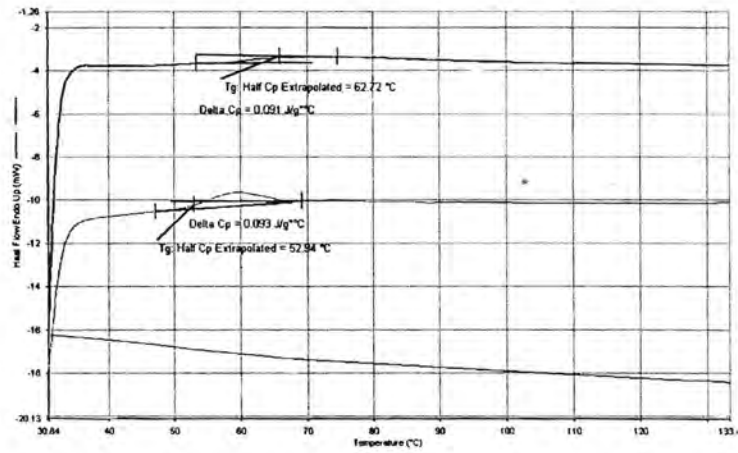


Figure B.35 DSC curve of PEMA blended with LCC

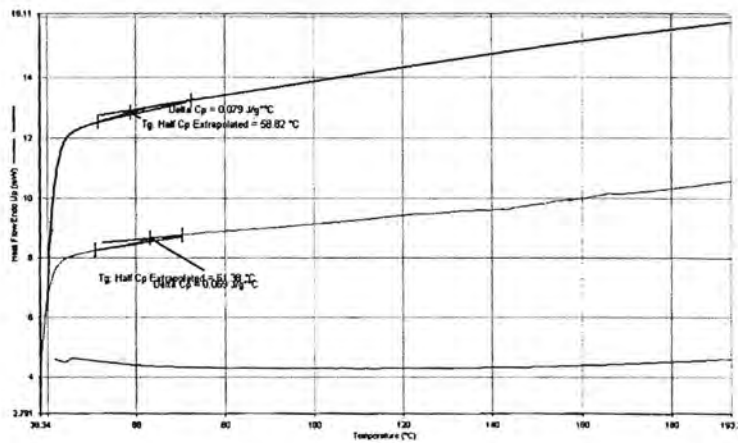


Figure B.36 DSC curve of PEMA blended with GMS

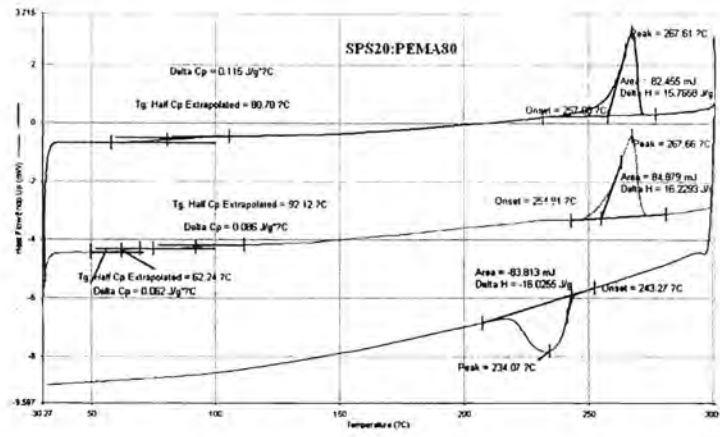


Figure B.37 DSC curve of SPS20/PEMA80 blends

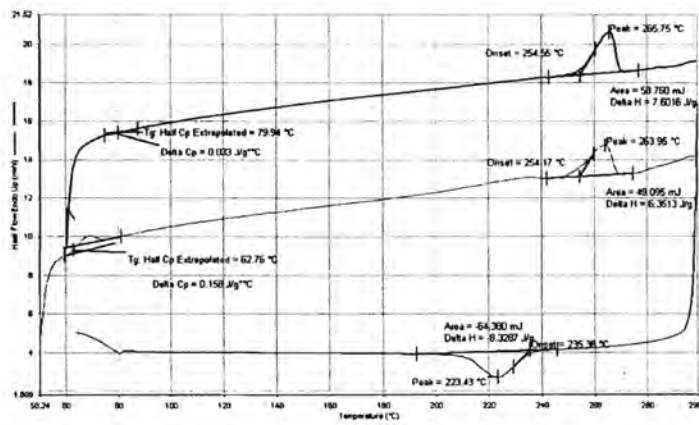


Figure B.38 DSC curve of SPS20/PEMA80/LCC blends

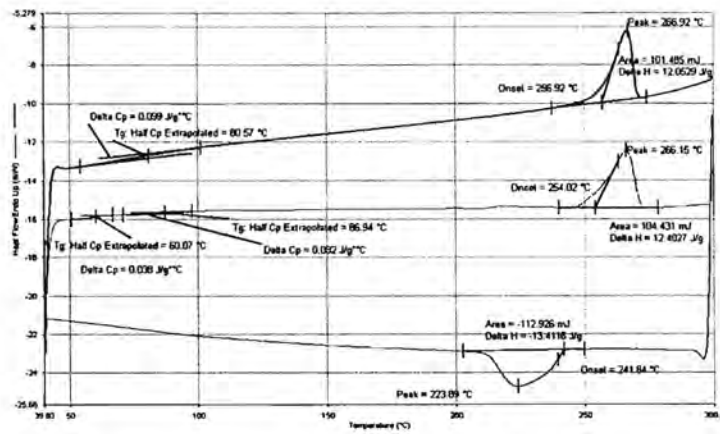


Figure B.39 DSC curve of SPS20/PEMA80/GMS blends



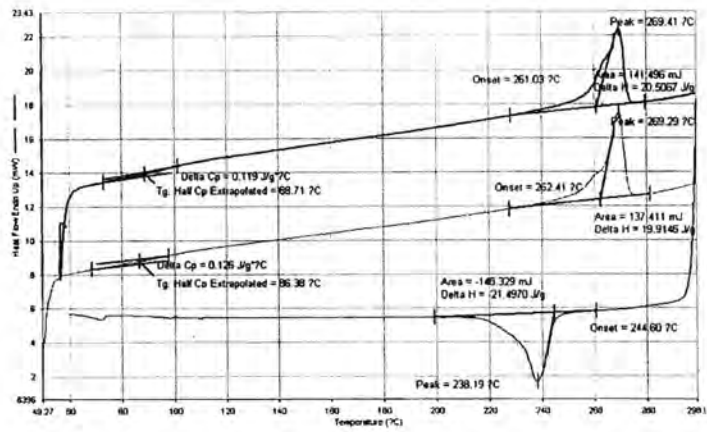


Figure B.40 DSC curve of SPS40/PEMA60 blends

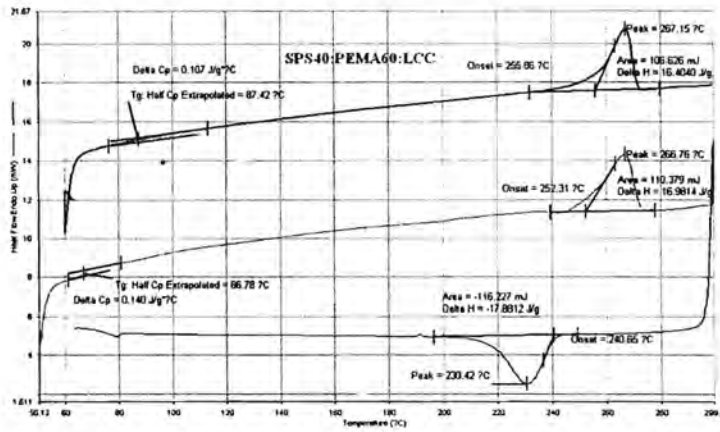


Figure B.41 DSC curve of SPS40/PEMA60/LCC blends

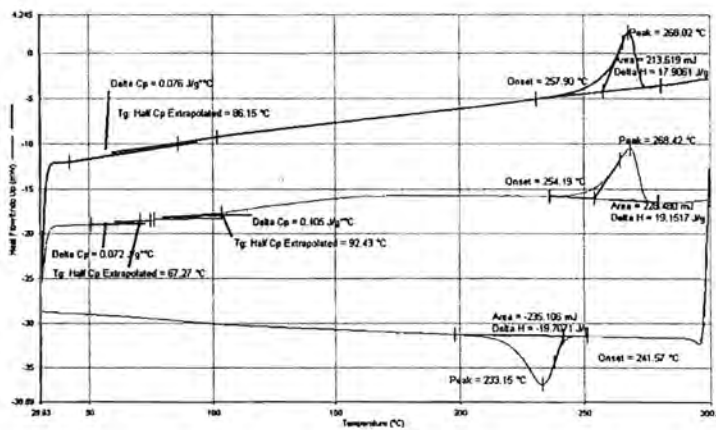


Figure B.42 DSC curve of SPS40/PEMA60/GMS blends

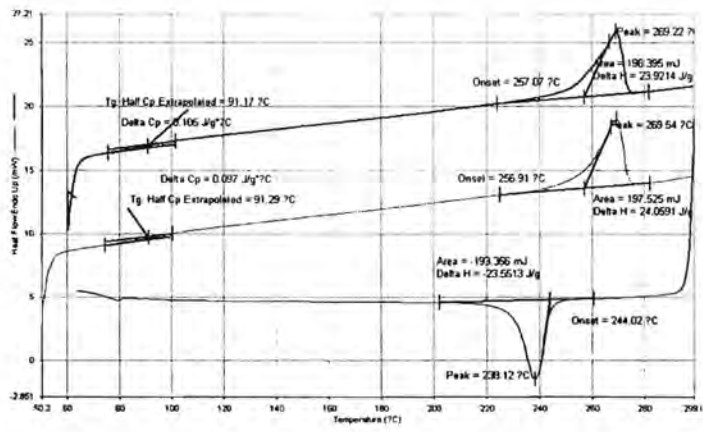


Figure B.43 DSC curve of SPS60/PEMA40 blends

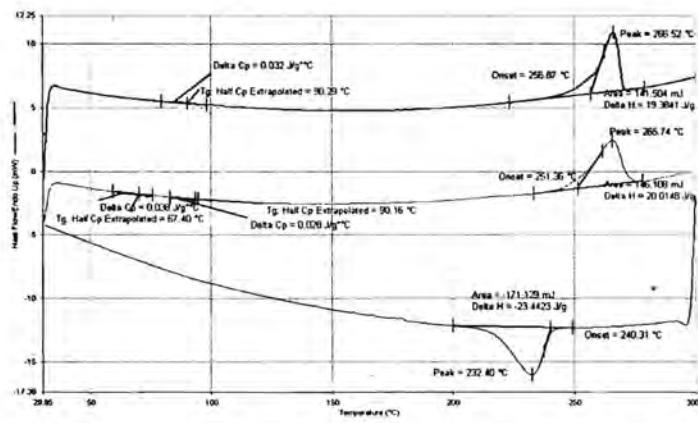


Figure B.44 DSC curve of SPS60/PEMA40/LCC blends

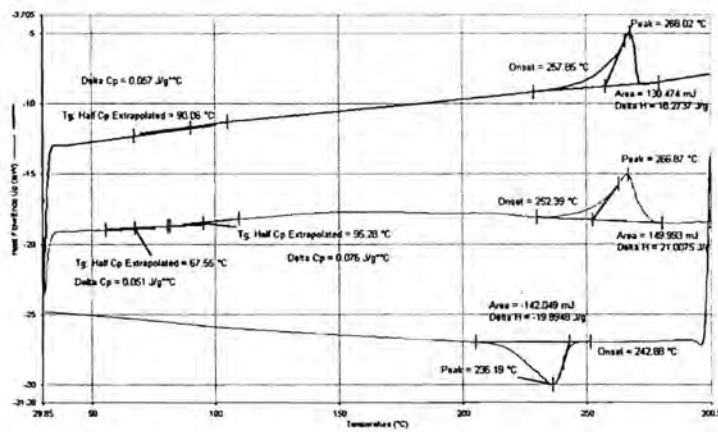


Figure B.45 DSC curve of SPS60/PEMA40/GMS blends

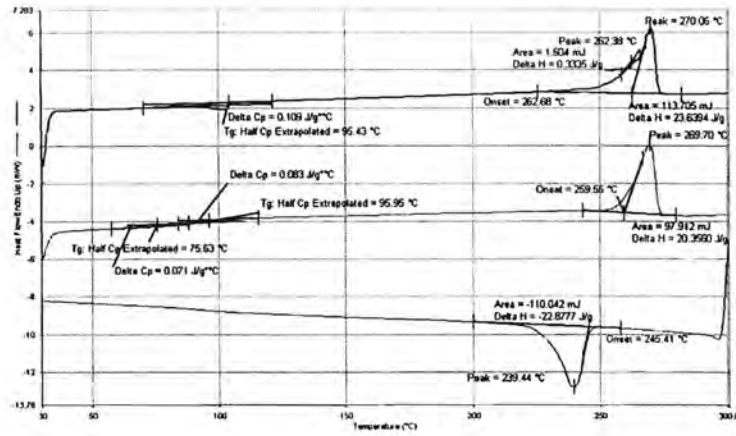


Figure B.46 DSC curve of SPS80/PEMA20 blends

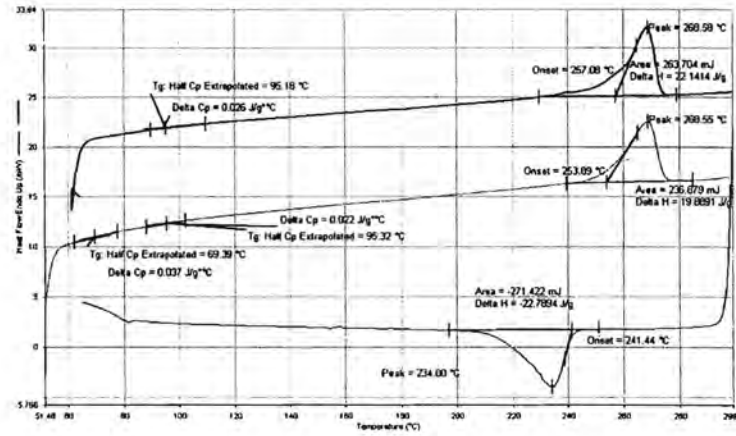


Figure B.47 DSC curve of SPS80/PEMA20/LCC blends

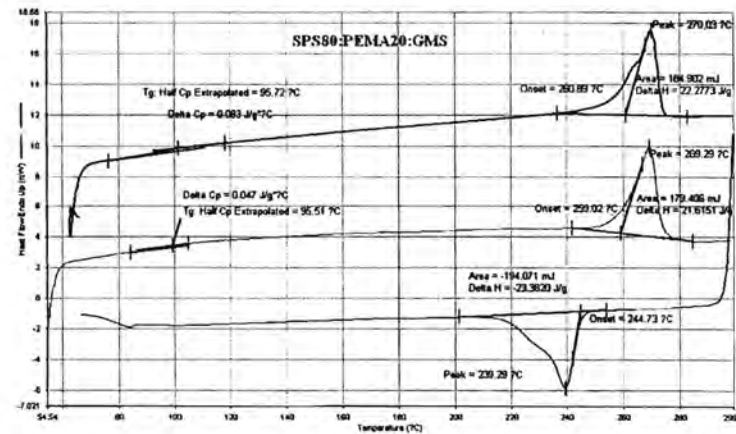


Figure B.48 DSC curve of SPS80/PEMA20/GMS blends

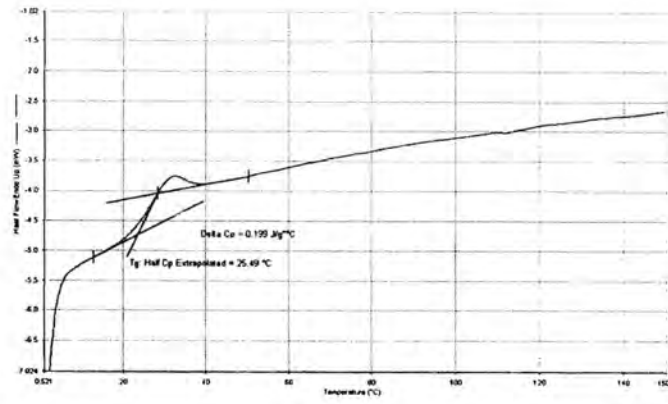


Figure B.49 DSC curve of PCHA

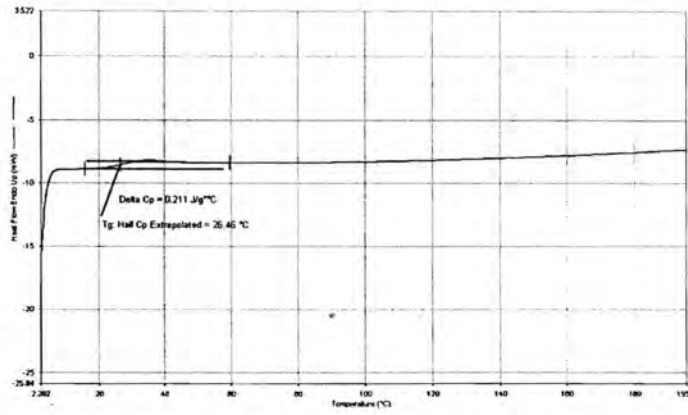


Figure B.50 DSC curve of PCHA blended with LCC

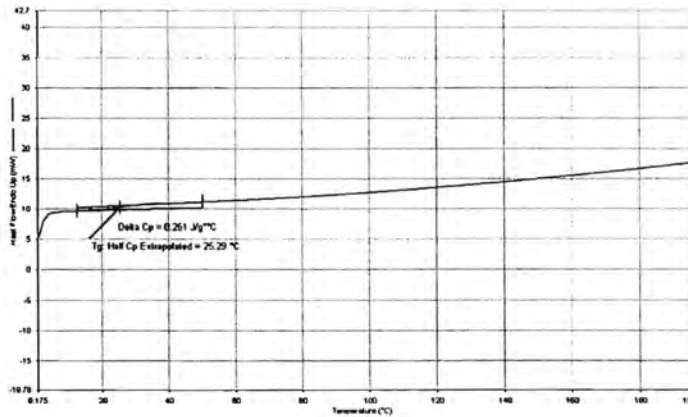


Figure B.51 DSC curve of PCHA blended with GMS

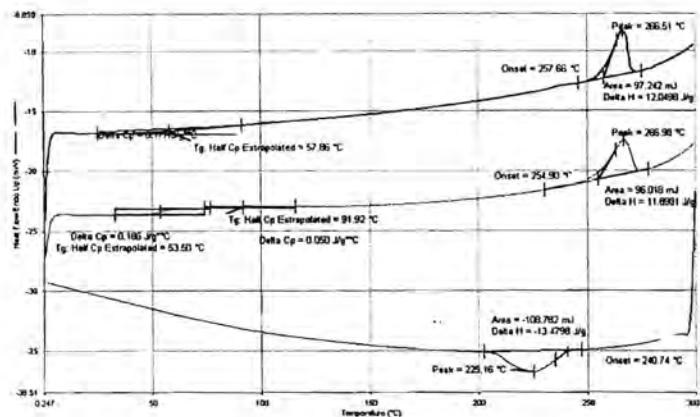


Figure B.52 DSC curve of SPS20/PCHA80 blends

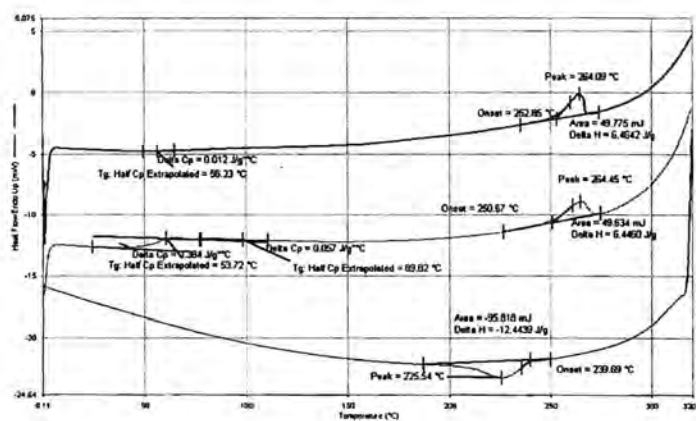


Figure B.53 DSC curve of SPS20/PCHA80/LCC blends

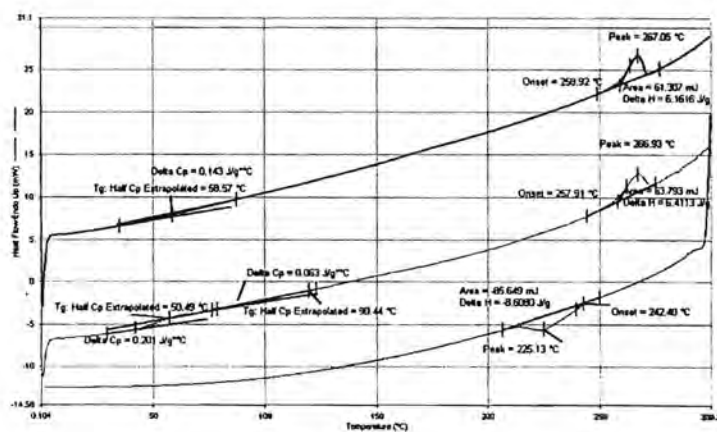


Figure B.54 DSC curve of SPS20/PCHA80/GMS blends

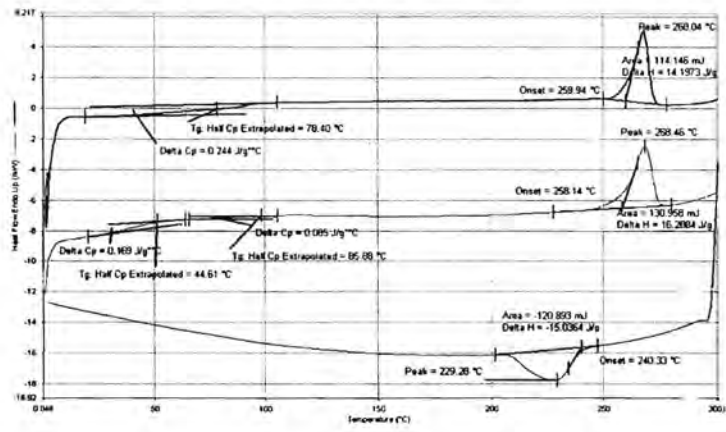


Figure B.55 DSC curve of SPS40/PCHA60 blends

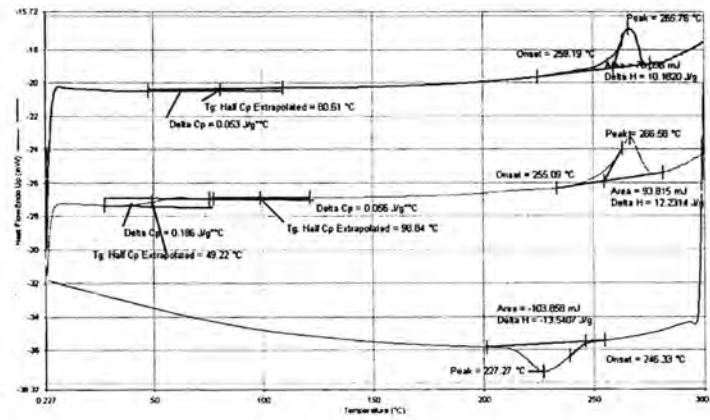


Figure B.56 DSC curve of SPS40/PCHA60/LCC blends

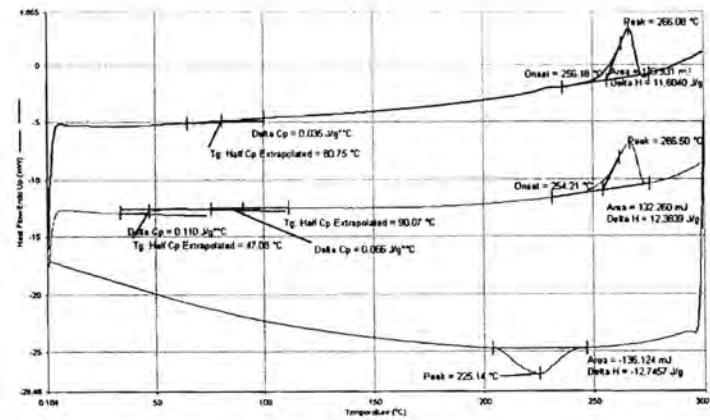


Figure B.57 DSC curve of SPS40/PCHA60/GMS blends

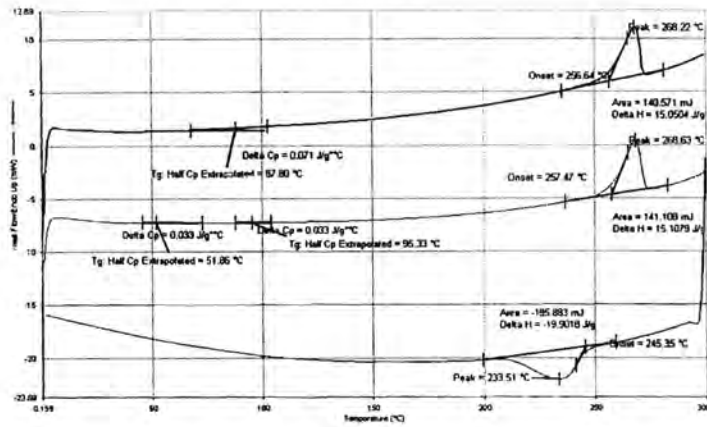


Figure B.58 DSC curve of SPS60/PCHA40 blends

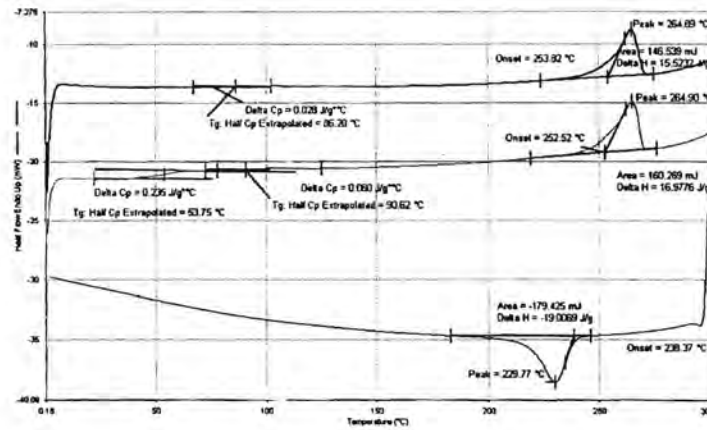


Figure B.59 DSC curve of SPS60/PCHA40/LCC blends

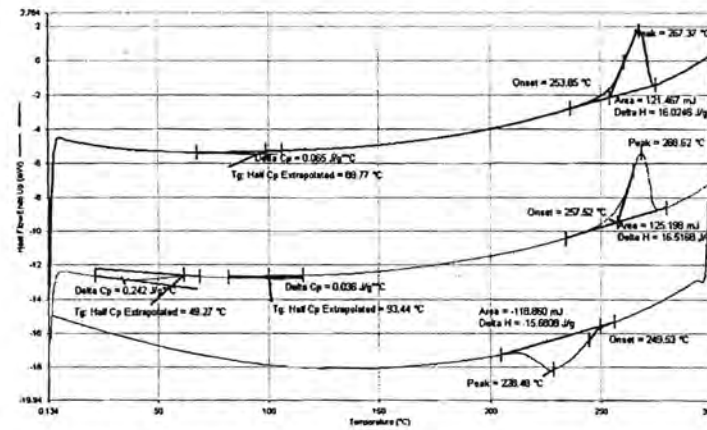


Figure B.60 DSC curve of SPS60/PCHA40/GMS blends



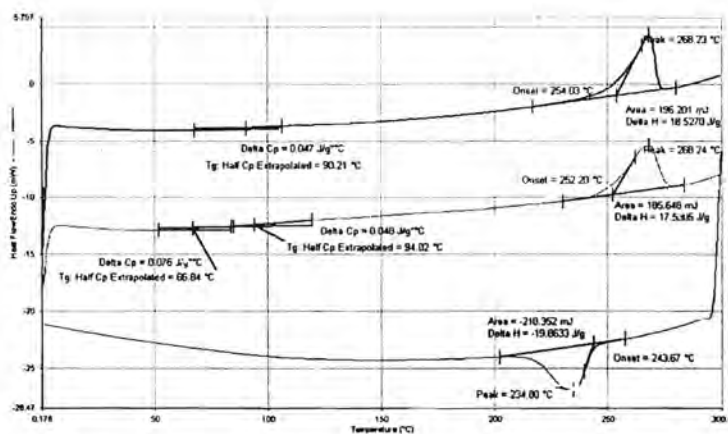


Figure B.61 DSC curve of SPS80/PCHA20 blends

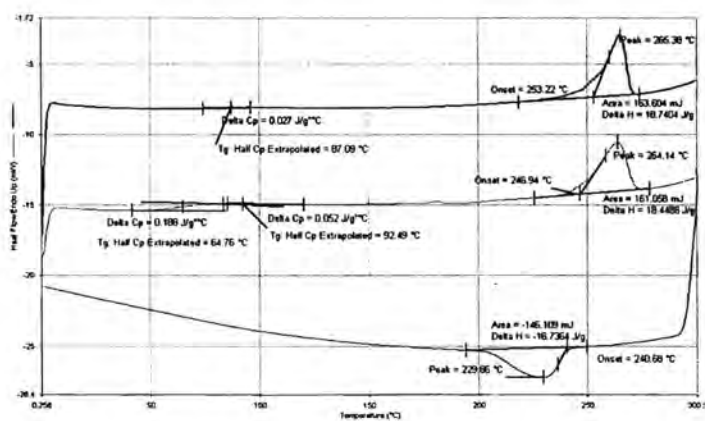


Figure B.62 DSC curve of SPS80/PCHA20/LCC blends

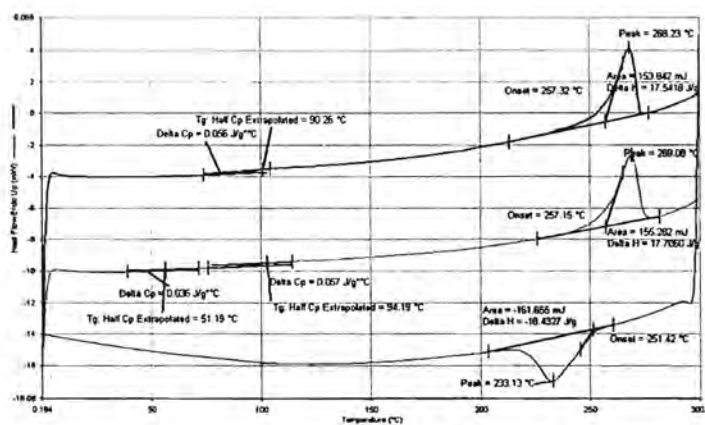


Figure B.63 DSC curve of SPS80/PCHA20/GMS blends

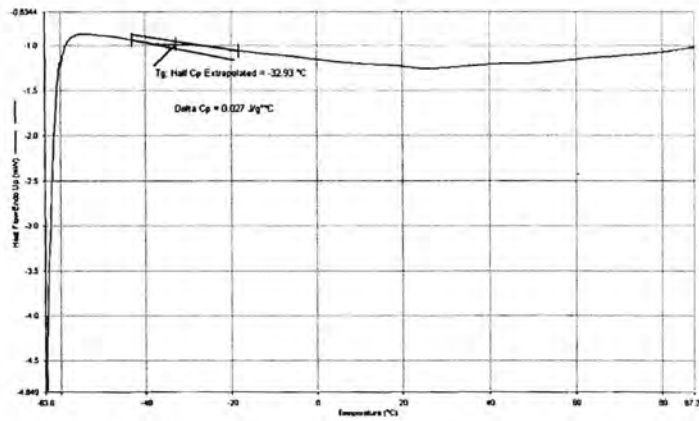


Figure B.64 DSC curve of PIP

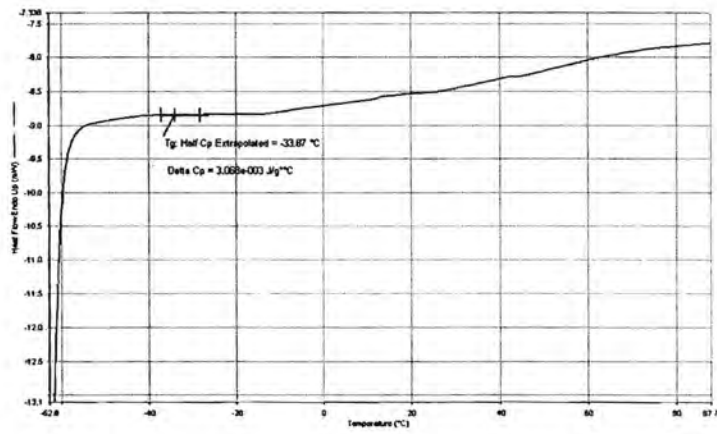


Figure B.65 DSC curve of PIP blended with LCC

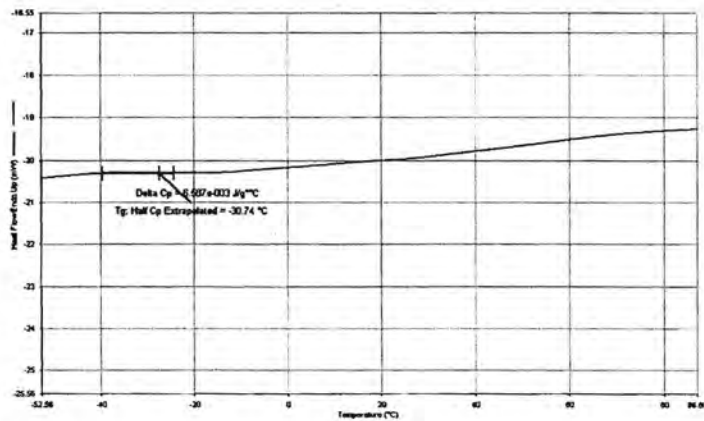


Figure B.66 DSC curve of PIP blended with GMS

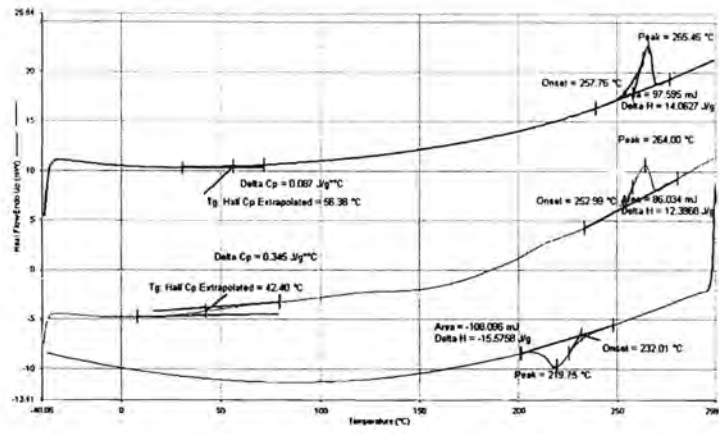


Figure B.67 DSC curve of SPS20/PIP80 blends

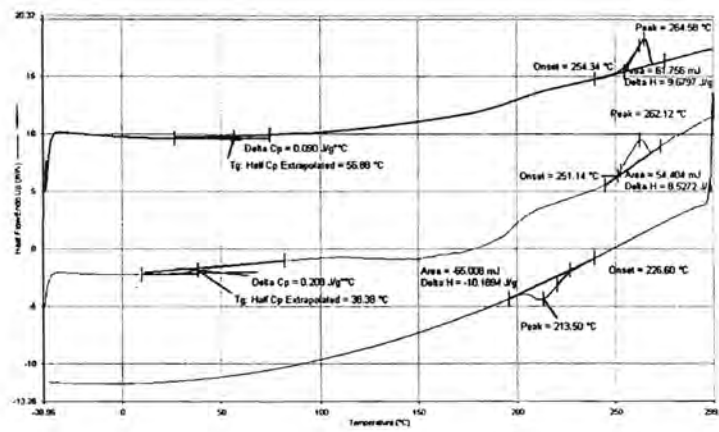


Figure B.68 DSC curve of SPS20/PIP80/LCC blends

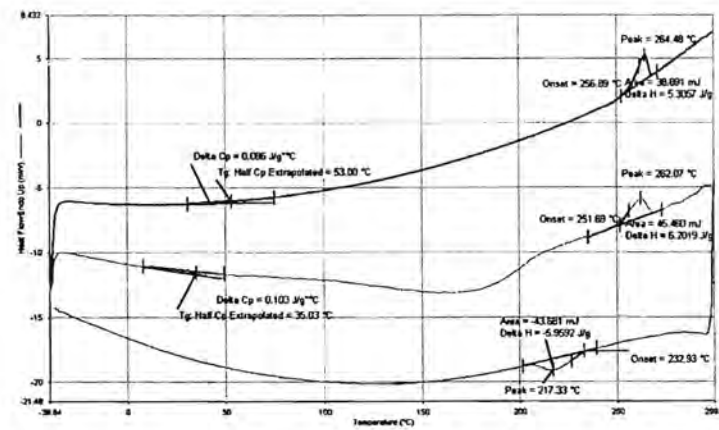


Figure B.69 DSC curve of SPS20/PIP80/GMS blends

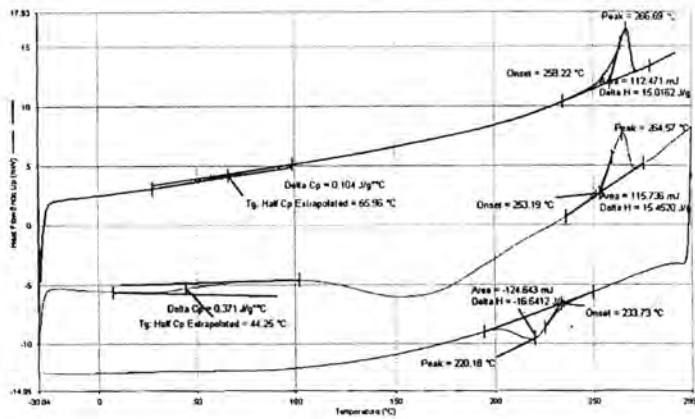


Figure B.70 DSC curve of SPS40/PIP60 blends

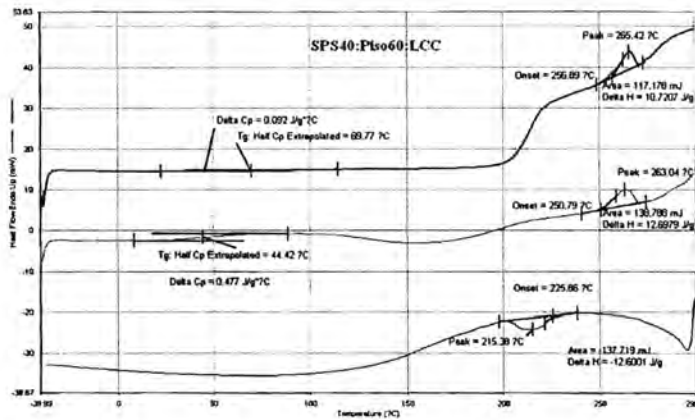


Figure B.71 DSC curve of SPS40/PIP60/LCC blends

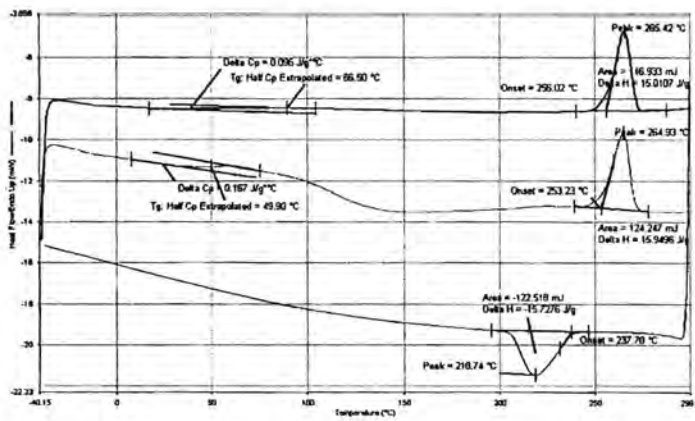


Figure B.72 DSC curve of SPS40/PIP60/GMS blends

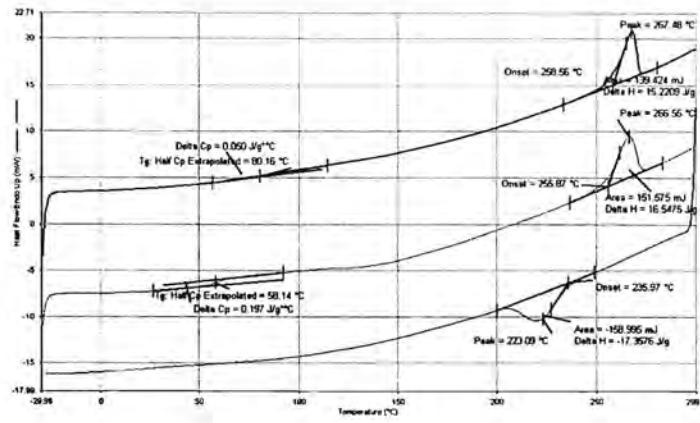


Figure B.73 DSC curve of SPS60/PIP40 blends

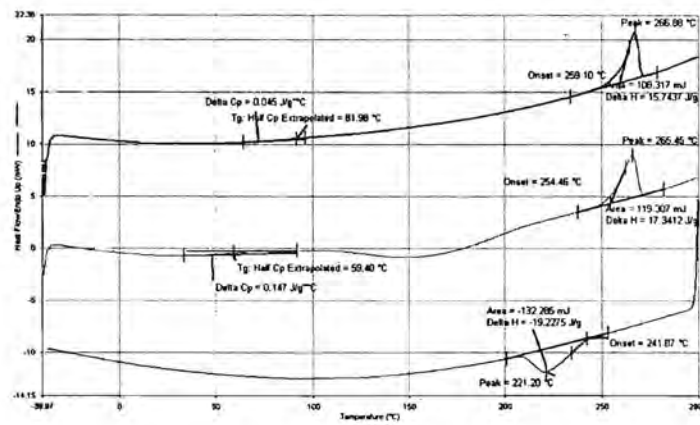


Figure B.74 DSC curve of SPS60/PIP40/LCC blends

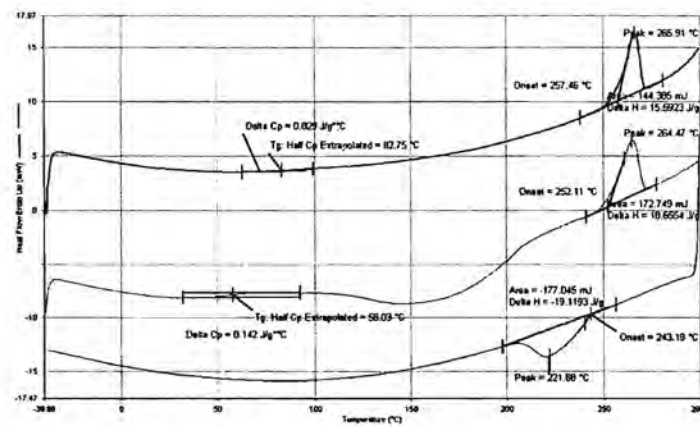


Figure B.75 DSC curve of SPS60/PIP40/GMS blends

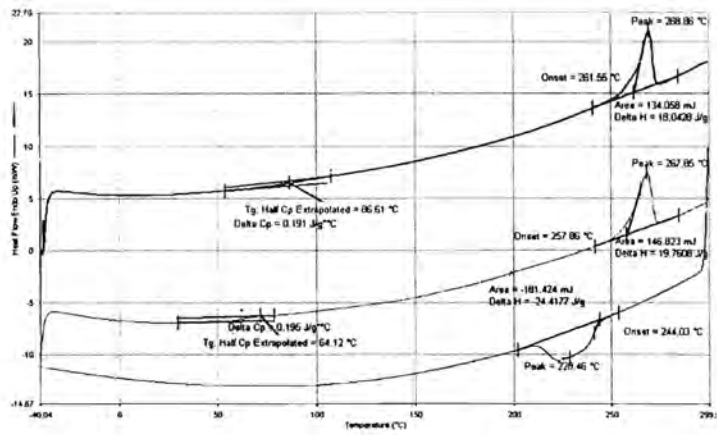


Figure B.76 DSC curve of SPS80/PIP20 blends

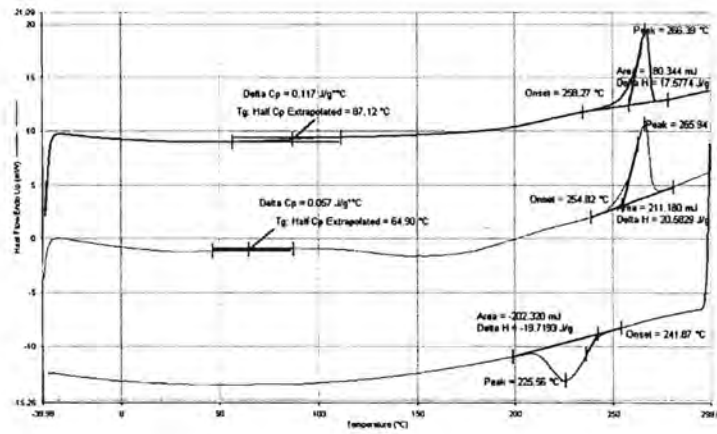


Figure B.77 DSC curve of SPS80/PIP20/LCC blends

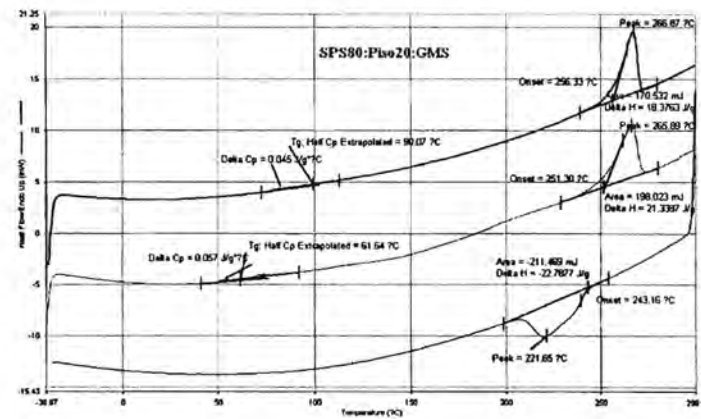


Figure B.78 DSC curve of SPS80/PIP20/GMS blends

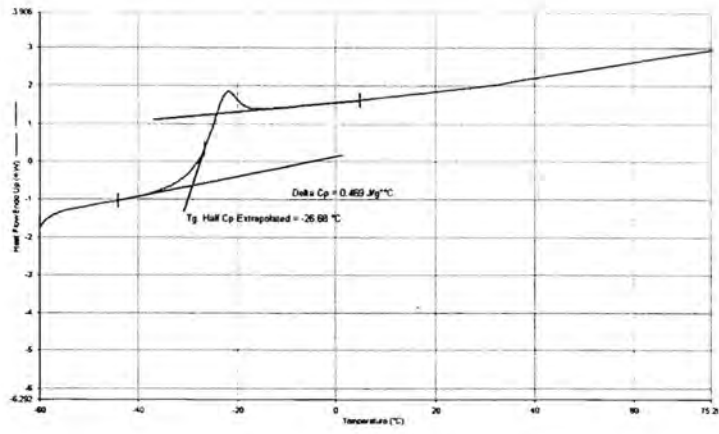


Figure B.79 DSC curve of PVME

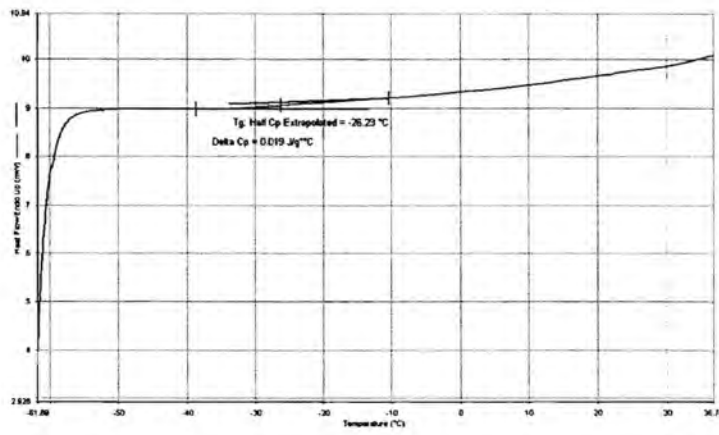


Figure B.80 DSC curve of PVME blended with LCC

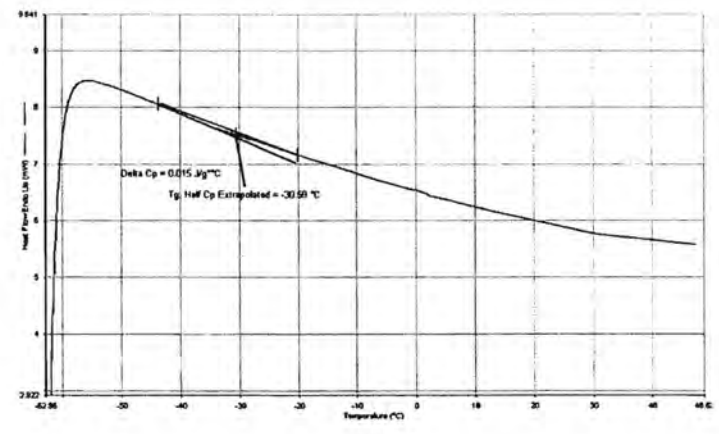


Figure B.81 DSC curve of PVME blended with GMS



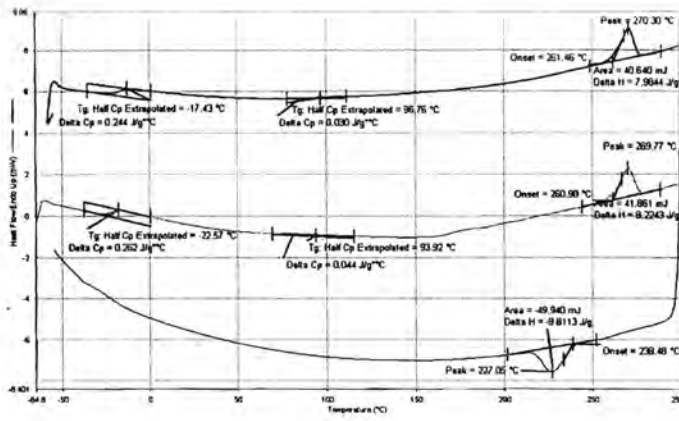


Figure B.82 DSC curve of SPS20/PVME80 blends

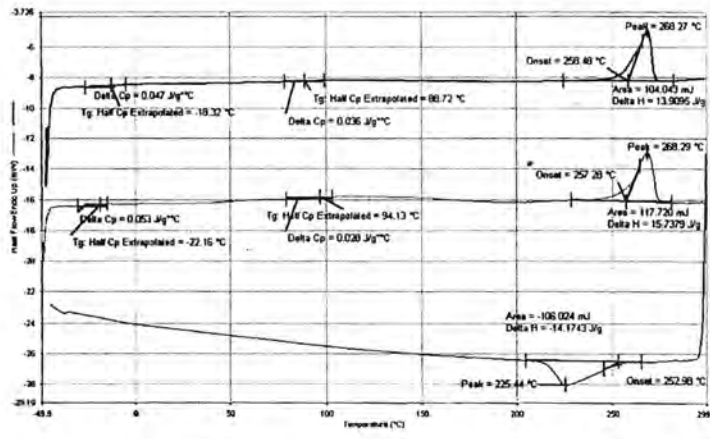


Figure B.83 DSC curve of SPS20/PVME80/LCC blends

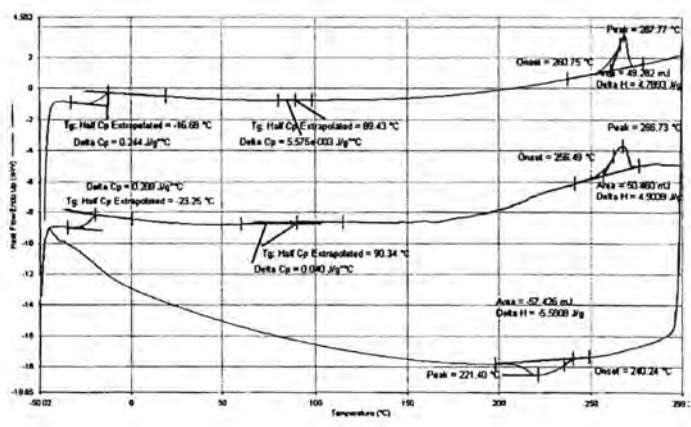


Figure B.84 DSC curve of SPS20/PVME80/GMS blends

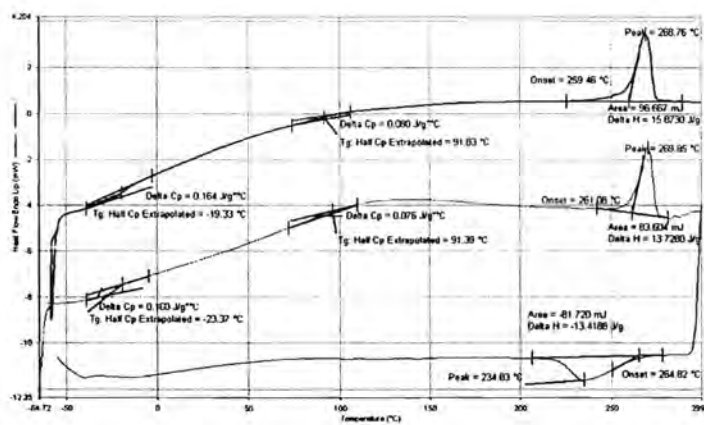


Figure B.85 DSC curve of SPS40/PVME60 blends

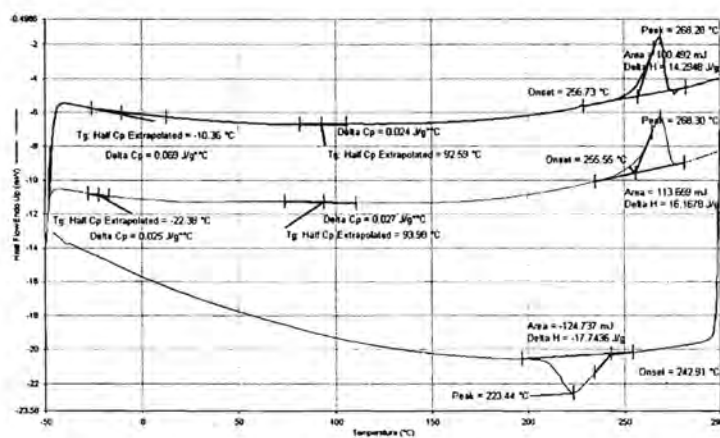


Figure B.86 DSC curve of SPS40/PVME60/LCC blends

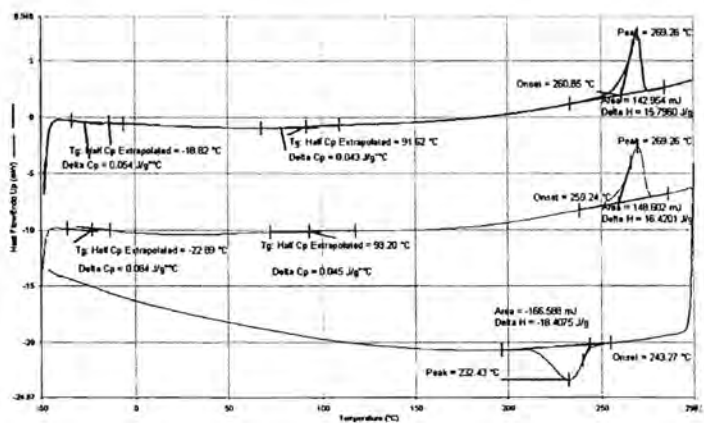


Figure B.87 DSC curve of SPS40/PVME60/GMS blends

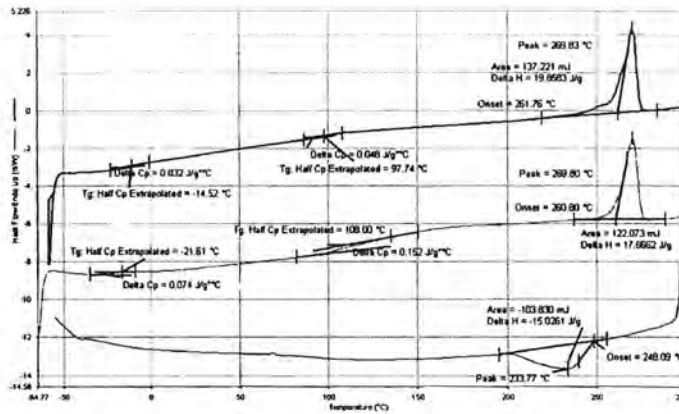


Figure B.88 DSC curve of SPS60/PVME40 blends

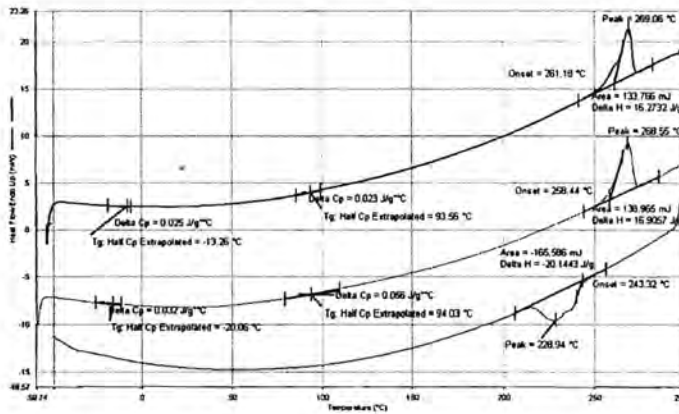


Figure B.89 DSC curve of SPS60/PVME40/LCC blends

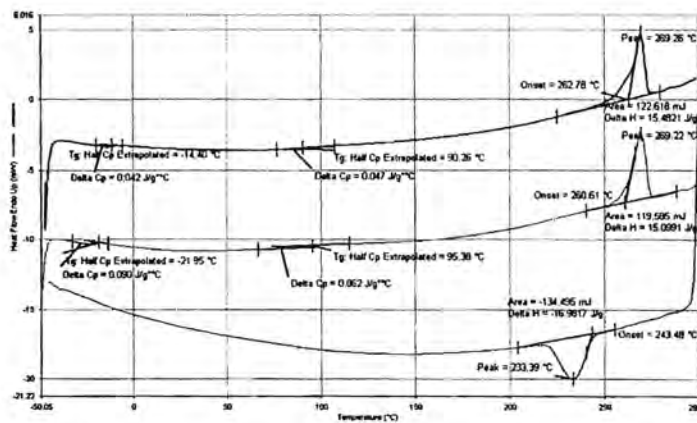


Figure B.90 DSC curve of SPS60/PVME40/GMS blends

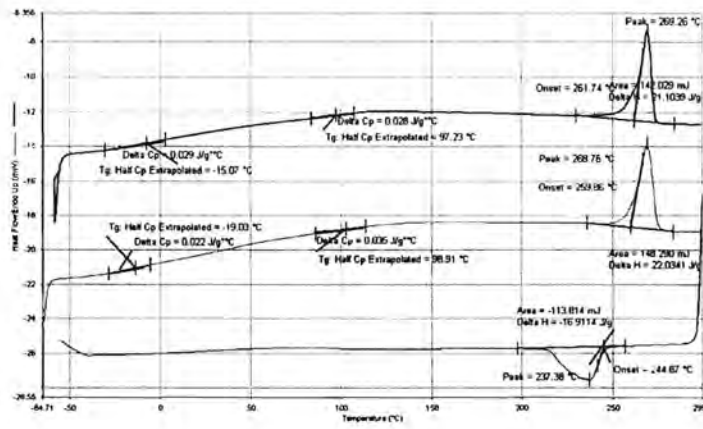


Figure B.91 DSC curve of SPS80/PVME20 blends

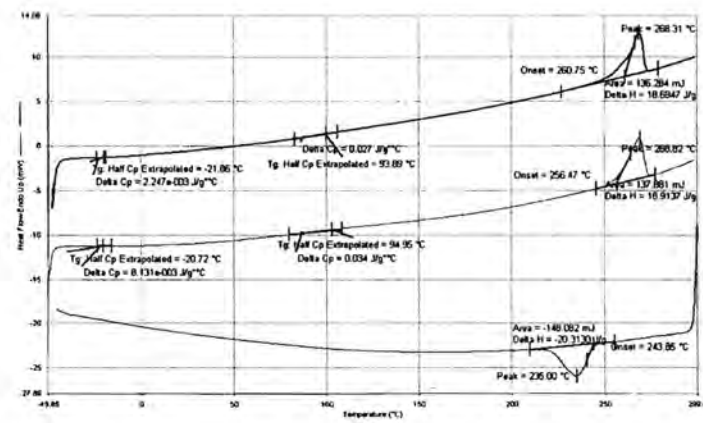


Figure B.92 DSC curve of SPS80/PVME20/LCC blends

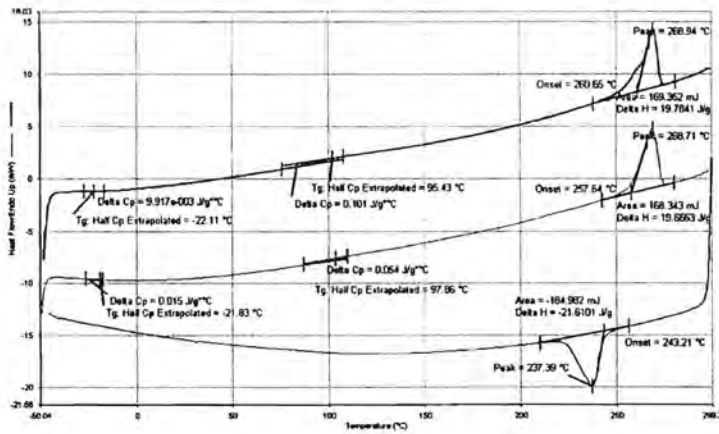
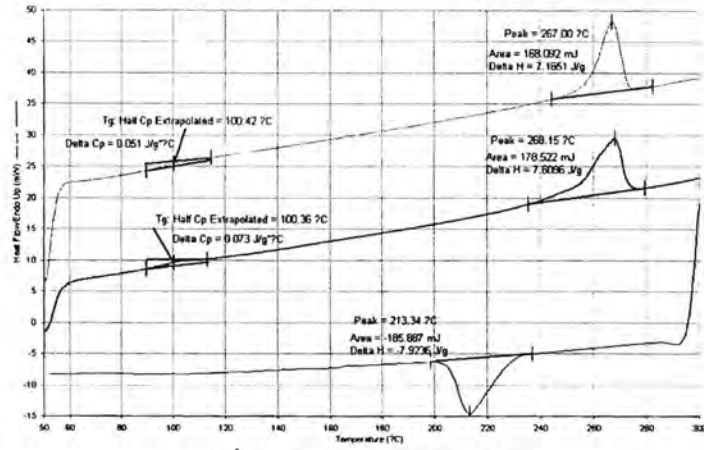


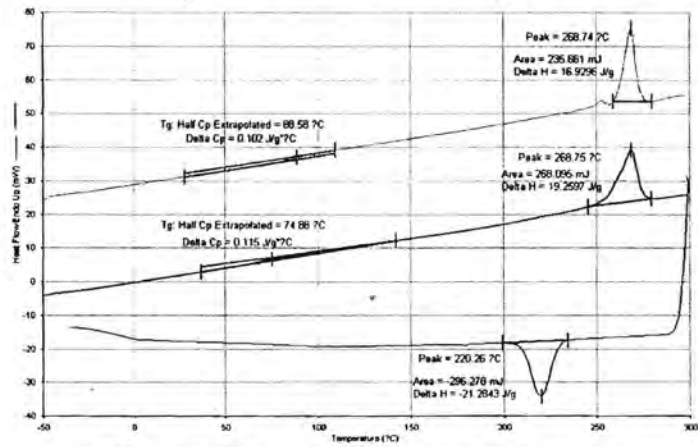
Figure B.93 DSC curve of SPS80/PVME20/GMS blends

ข้อมูลการทดลองโดยละเอียดตอนที่สาม

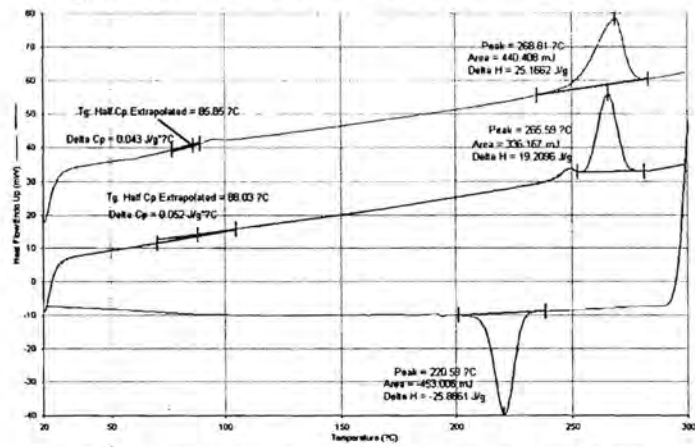
## The Data of DSC Characterization



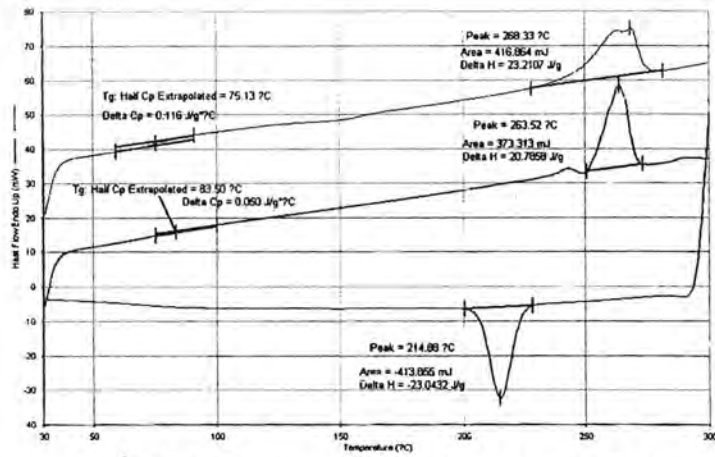
รูปที่ C.1 DSC curve of sPS1



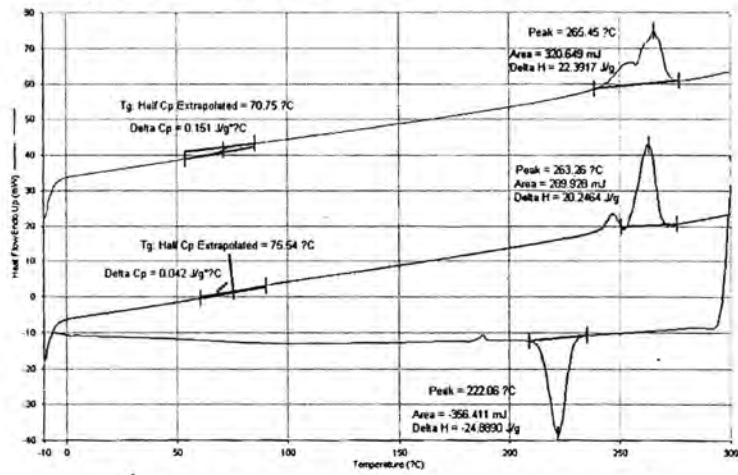
รูปที่ C.2 DSC curve of sPS1 blended with PIP



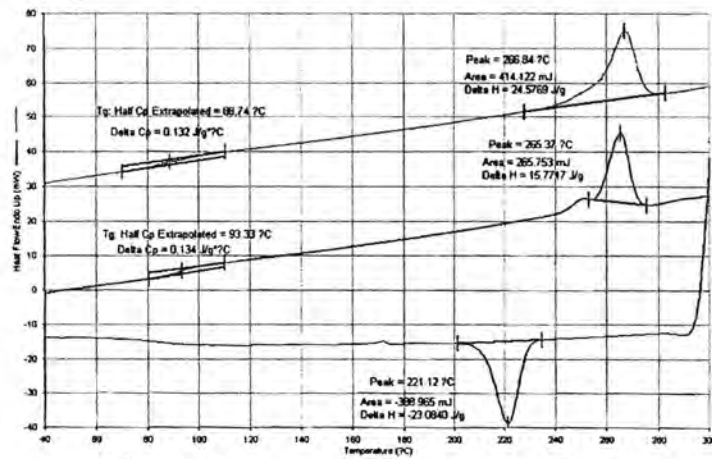
รูปที่ C.3 DSC curve of sPS1 blended with PBMA



รูปที่ C.4 DSC curve of sPS1 blended with PEMA

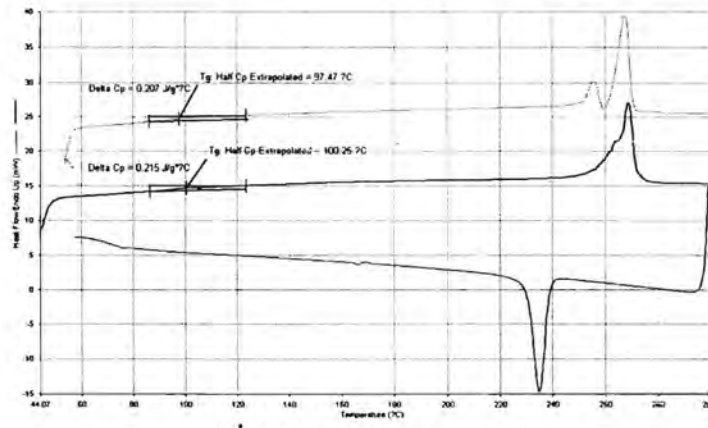


รูปที่ C.5 DSC curve of sPS1 blended with PHMA

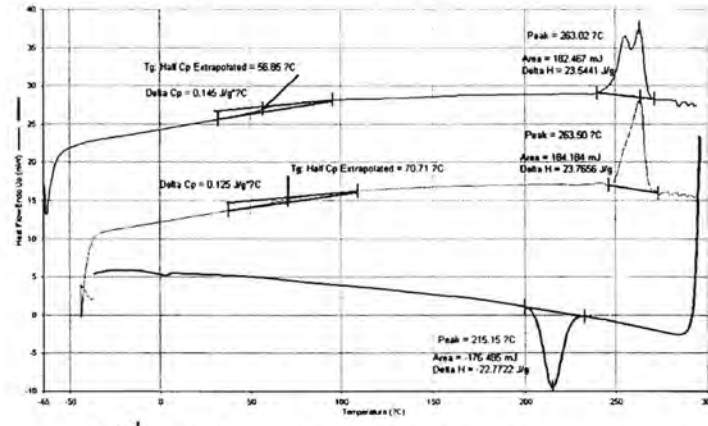


รูปที่ C.6 DSC curve of sPS1 blended with PaMS

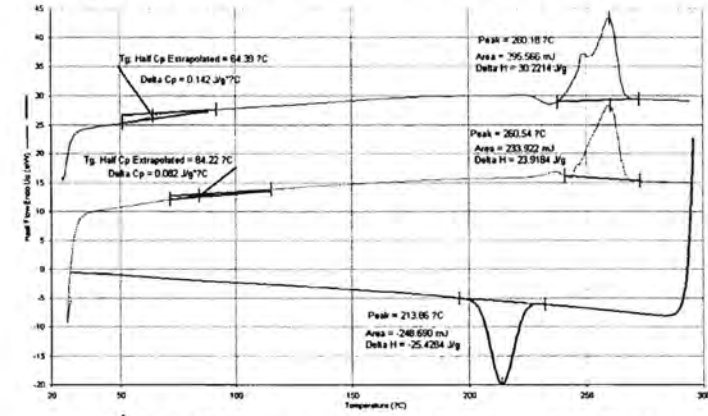




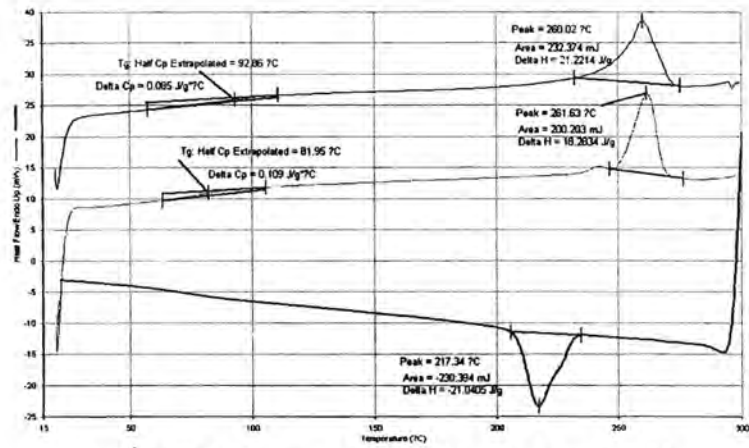
รูปที่ C.7 DSC curve of sPS2



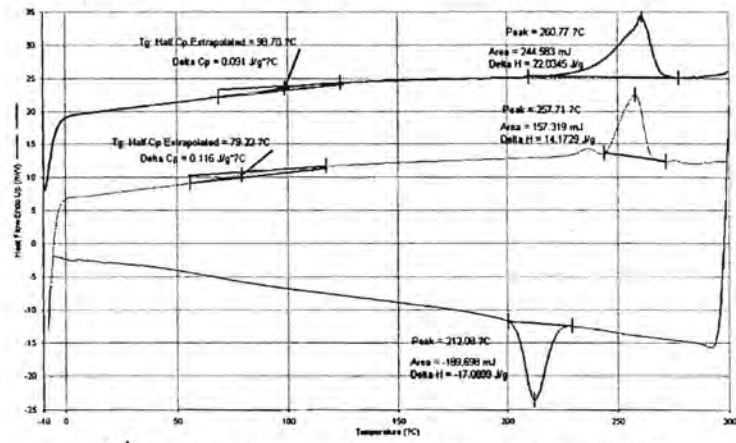
รูปที่ C.8 DSC curve of sPS2 blended with PIP



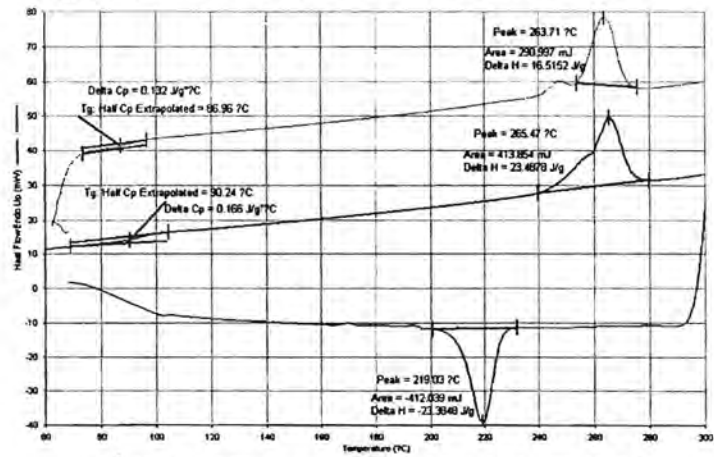
รูปที่ C.9 DSC curve of sPS2 blended with PBMA



รูปที่ C.10 DSC curve of sPS2 blended with PEMA

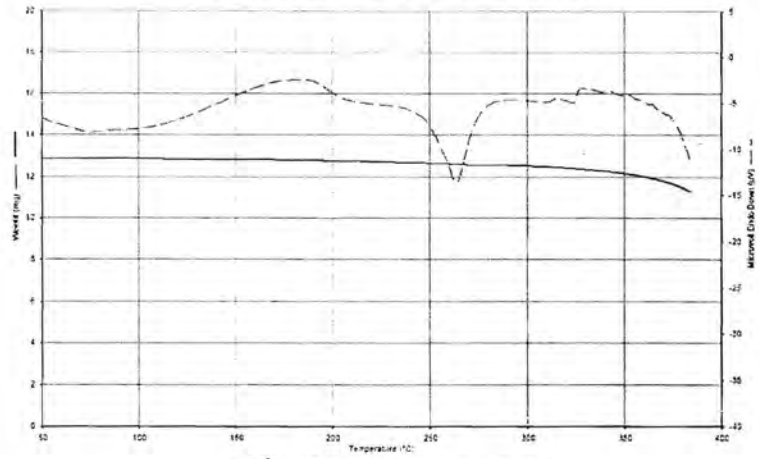


รูปที่ C.11 DSC curve of sPS2 blended with PHMA

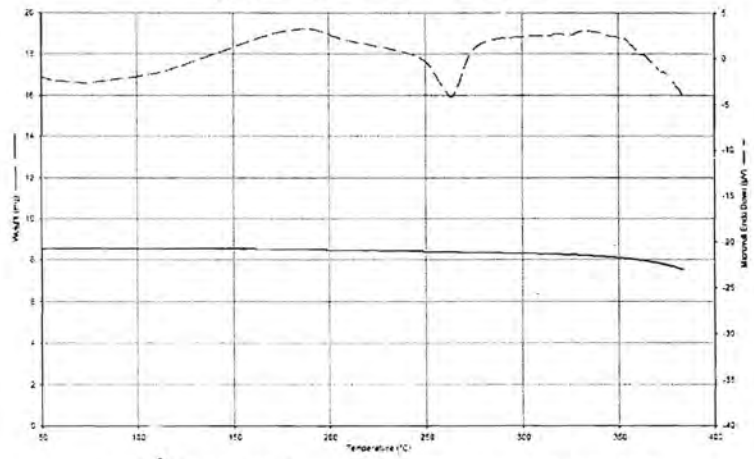


รูปที่ C.12 DSC curve of sPS2 blended with PaMS

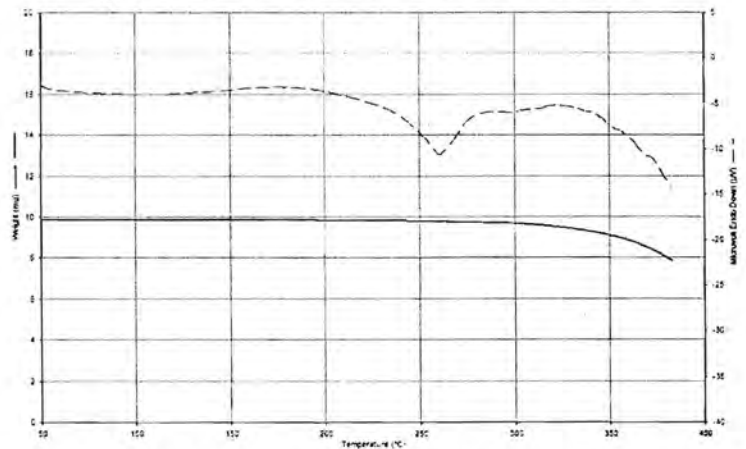
The Data of TGA Characterization



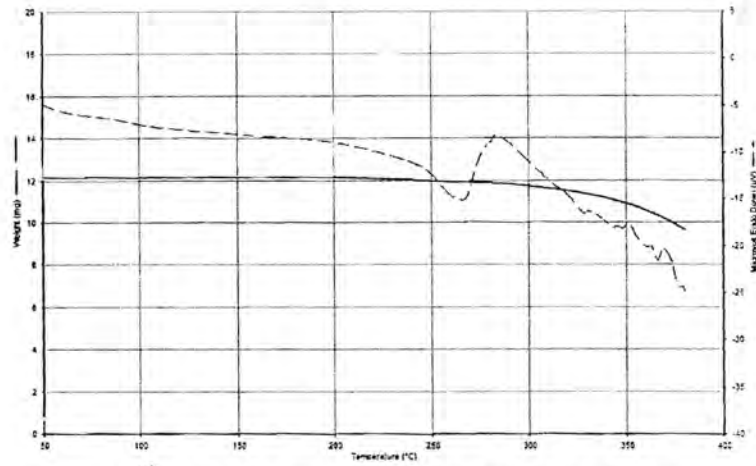
รูปที่ C.13 TGA curve of sPS



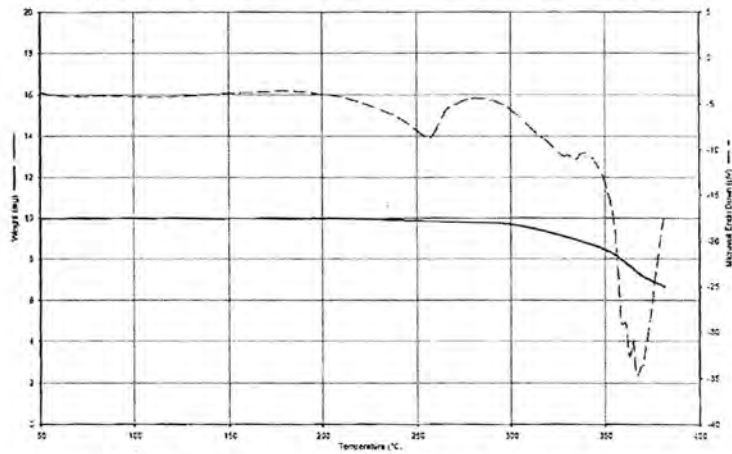
รูปที่ C.14 TGA curve of sPS blended with PIP



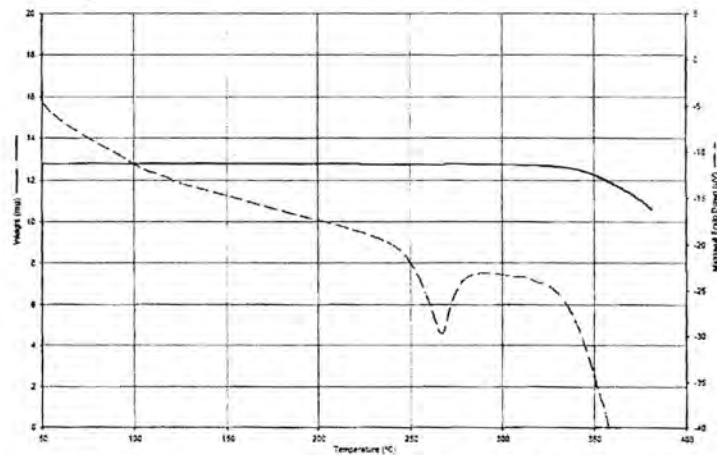
รูปที่ C.15 TGA curve of sPS blended with PBMA



รูปที่ C.16 TGA curve of sPS blended with PEMA



รูปที่ C.17 TGA curve of sPS blended with PHMA



รูปที่ C.18 TGA curve of sPS blended with PaMS

The Data of DMA Characterization

sPS1= sPS Mw.  $31.7 \times 10^4$ , sPS2= sPS Mw.  $13.0 \times 10^4$

ตารางที่ C.1 DMA data of sPS1 for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	62.05358	3590717564	1.56E+08	325.7563	0.057544	9806.65	0.133333
50	61.97859	3590717564	2.17E+08	327.8397	0.073696	9806.65	0.233333
20	61.90699	3594178154	2.14E+08	328.5341	0.071507	9806.65	0.350000
10	61.82243	3579891231	2.1E+08	328.5341	0.07038	9806.65	0.450000
5	61.74651	3545210769	2.13E+08	328.5341	0.072006	9806.65	0.566667
2	61.64837	3522528000	2.23E+08	329.2285	0.075972	9806.65	0.716667
1	61.50456	3496106077	2.27E+08	329.2285	0.077997	9806.65	0.900000
0.5	61.34686	3474709154	2.35E+08	329.923	0.081323	9806.65	1.116667
0.2	61.05954	3442222385	2.51E+08	330.6174	0.087388	9806.65	1.533333
0.1	60.55433	3426128077	2.58E+08	331.3119	0.090357	9806.65	2.283333
0.05	59.81489	3412839923	2.67E+08	332.7008	0.094054	9806.65	3.383333
0.02	58.13942	3405226385	2.73E+08	334.7841	0.096167	9806.65	5.966667
0.01	56.02696	3289889006	1.85E+08	336.173	0.062098	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.2 DMA data of sPS1 for temperature 80 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G'')	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	81.53671	3426595533	1.83E+08	345.8951	0.069175	9806.65	0.133333
50	81.42533	3357376142	2.25E+08	350.0618	0.07971	9806.65	0.233333
20	81.30535	3347080769	2.32E+08	350.7562	0.081492	9806.65	0.350000
10	81.18936	3308673462	2.33E+08	351.4507	0.082015	9806.65	0.450000
5	81.0654	3256579615	2.38E+08	352.8395	0.085069	9806.65	0.566667
2	80.91781	3235936569	2.55E+08	353.534	0.092406	9806.65	0.716667
1	80.72418	3169567463	2.73E+08	354.9229	0.100446	9806.65	0.900000
0.5	80.50755	3111716337	2.99E+08	356.3117	0.111842	9806.65	1.116667
0.2	80.11018	3047894990	3.6E+08	358.3951	0.138288	9806.65	1.533333
0.1	79.9632	3019951720	4.23E+08	362.5617	0.16677	9806.65	2.283333
0.05	80.31148	2904022654	5.21E+08	370.895	0.21346	9806.65	3.383333
0.02	80.02028	2818382931	7.64E+08	379.9227	0.345265	9806.65	5.966667
0.01	78.37097	2710191632	7.23E+08	396.5892	0.309062	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.3 DMA data of sPS1 for temperature 90 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	90.7568	2930893245	91434802	707.6984	0.030568	9806.65	0.133333
50	90.77919	2904022654	1.42E+08	707.0039	0.042952	9806.65	0.233333
20	90.80066	2877398415	1.32E+08	707.0039	0.039469	9806.65	0.333333
10	90.82857	2837212500	1.3E+08	707.0039	0.0392	9806.65	0.450000
5	90.85157	2801813077	1.35E+08	707.0039	0.04135	9806.65	0.566667
2	90.86722	2757295962	1.5E+08	707.6984	0.047124	9806.65	0.700000
1	90.88531	2717085769	1.59E+08	707.6984	0.051132	9806.65	0.883333
0.5	90.90617	2673349615	1.69E+08	707.6984	0.055699	9806.65	1.100000
0.2	90.91414	2602017115	1.89E+08	707.6984	0.064304	9806.65	1.516667
0.1	90.85802	2535510577	2.09E+08	708.3928	0.073552	9806.65	2.266667
0.05	90.62522	2438796154	2.27E+08	708.3928	0.082148	9806.65	3.350000
0.02	89.86826	2213286923	2.55E+08	709.0872	0.095629	9806.65	5.933333
0.01	89.51218	1986094917	2.08E+08	709.0872	0.076096	9806.65	11.01667



ตารางที่ C.4 DMA data of sPS1 for temperature 100.25 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	100.8889	2685344446	1.2E+08	684.7819	0.042705	9806.65	0.133333
50	100.8224	2606153550	1.93E+08	684.7819	0.063865	9806.65	0.233333
20	100.7663	2558585887	2.06E+08	684.7819	0.069434	9806.65	0.333333
10	100.6982	2460367604	2.22E+08	685.4763	0.077059	9806.65	0.450000
5	100.6292	2365919697	2.38E+08	685.4763	0.086315	9806.65	0.566667
2	100.5565	2275097431	2.67E+08	686.1707	0.103531	9806.65	0.700000
1	100.4681	2186257327	2.85E+08	686.1707	0.117482	9806.65	0.883333
0.5	100.3442	2035228846	3.04E+08	686.8652	0.134364	9806.65	1.100000
0.2	100.163	1827662192	3.2E+08	686.8652	0.157735	9806.65	1.516667
0.1	99.86422	1671149596	3.28E+08	687.5596	0.176539	9806.65	2.266667
0.05	99.62928	1455459081	3.28E+08	688.254	0.195474	9806.65	3.366667
0.02	99.65995	1196740531	3.13E+08	688.9485	0.218023	9806.65	5.950000
0.01	100.3856	1025651926	2.74E+08	691.0318	0.219868	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.5 DMA data of sPS1 for temperature 110 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	110.743	2365919697	2.56E+08	657.6987	0.112228	9806.65	0.133333
50	110.6183	2103778440	3.35E+08	659.0876	0.14656	9806.65	0.233333
20	110.4995	1892343619	3.53E+08	660.4764	0.170368	9806.65	0.333333
10	110.373	1733803998	3.57E+08	661.8653	0.190473	9806.65	0.450000
5	110.2418	1555965632	3.61E+08	662.5598	0.215509	9806.65	0.566667
2	110.0943	1419252212	3.34E+08	663.2542	0.235306	9806.65	0.716667
1	109.9094	1245981538	3.09E+08	663.9487	0.24821	9806.65	0.900000
0.5	109.7045	1093139904	2.79E+08	664.6431	0.255518	9806.65	1.116667
0.2	109.3913	922816635	2.38E+08	665.3375	0.258444	9806.65	1.533333
0.1	109.0259	814377212	2.08E+08	666.7264	0.254921	9806.65	2.283333
0.05	108.9076	713809087	1.76E+08	668.8097	0.246365	9806.65	3.383333
0.02	109.7807	594419712	1.34E+08	672.2819	0.225011	9806.65	5.966667
0.01	111.2284	507029087	97330980	678.5319	0.191963	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.6 DMA data of sPS1 for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	119.7255	1054386896	3.33E+08	676.4485	0.24504	9806.65	0.133333
50	119.8147	893305484	3.27E+08	678.5319	0.27471	9806.65	0.233333
20	119.9277	803526122	2.74E+08	679.9208	0.28382	9806.65	0.333333
10	120.0659	721107479	2.3E+08	681.3096	0.278977	9806.65	0.450000
5	120.202	654636174	1.91E+08	682.6985	0.267632	9806.65	0.566667
2	120.3721	603180385	1.47E+08	683.3929	0.243264	9806.65	0.716667
1	120.5949	537380865	1.19E+08	684.0874	0.221428	9806.65	0.900000
0.5	120.847	488559471	95919700	685.4763	0.196332	9806.65	1.116667
0.2	121.3164	442017115	72817362	683.3929	0.164739	8878.284	1.533333
0.1	121.9518	415128125	58876689	680.6152	0.141828	7997.734	2.283333
0.05	122.4387	395507572	48728188	677.8375	0.123204	7147.645	3.366667
0.02	120.8822	385519519	43163741	675.0597	0.111963	6271.995	5.966667
0.01	118.0439	372391706	50070276	666.7264	0.124707	5406.057	11.05

ตารางที่ C.7 DMA data of sPS1 for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	139.934	469894109	1.06E+08	699.3651	0.212364	9806.65	0.130000
50	139.8521	422668614	84492776	702.1428	0.180521	9806.65	0.283333
20	139.8065	413999675	60997452	702.1428	0.142342	9371.608	0.383333
10	139.7556	398107171	48265499	697.2817	0.117453	8243.77	0.500000
5	139.714	390840896	38974706	693.1151	0.09792	7291.044	0.616667
2	139.6647	384794808	30449609	689.6429	0.079132	6440.79	0.766667
1	139.6062	378129832	26209582	683.3929	0.069314	5303.915	0.95000
0.5	139.5562	371051058	23241465	683.3929	0.062637	5276.568	1.166667
0.2	139.4866	363520745	20917097	682.0041	0.05754	4813.593	1.583333
0.1	139.4997	358476899	19947835	681.3096	0.055646	4545.61	2.333333
0.05	139.7778	353122139	19440174	680.6152	0.055052	4357.7	3.416667
0.02	140.8038	344555457	18510422	680.6152	0.053723	4287.002	6.000000
0.01	141.3851	339691707	18824222	681.3096	0.055416	4288.004	11.08333

ตารางที่ C.8 DMA data of sPS1 for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	159.7761	378459567	33569011	704.9206	0.088699	4965.342	0.133333
50	159.8318	373057476	27511505	706.3095	0.073746	4908.842	0.233333
20	159.8808	364929639	21261895	705.6151	0.058263	4585.677	0.350000
10	159.9355	358947115	18584639	704.9206	0.051775	4418.334	0.450000
5	159.9893	353444303	16630323	704.9206	0.047052	4292.826	0.566667
2	160.0478	346351298	16067820	704.2261	0.046392	4162.859	0.716667
1	160.1494	341142837	15850056	704.2261	0.046462	4096.967	0.900000
0.5	160.2395	335936538	15976369	704.2261	0.047558	4030.562	1.100000
0.2	160.4211	328952043	16447781	704.2261	0.050001	3957.634	1.516667
0.1	160.7235	323206563	17040376	704.2261	0.052723	3908.926	2.266667
0.05	161.0519	317547668	17729333	704.9206	0.055832	3859.205	3.350000
0.02	161.3691	308188365	20548131	705.6151	0.066674	3787.699	5.933333
0.01	161.3024	306246226	18861265	706.3095	0.061589	3741.898	11.03333

ตารางที่ C.9 DMA data of sPS1 for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E''(G'')	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	179.4777	334206394	16723697	724.3649	0.05004	3723.911	0.133333
50	179.5366	330295601	15413254	727.8371	0.046665	3986.767	0.233333
20	179.5919	325264808	14522580	727.8371	0.044648	3849.994	0.333333
10	179.6489	320948365	14179599	728.5316	0.04418	3807.708	0.450000
5	179.704	316441034	14086659	728.5316	0.044516	3736.679	0.566667
2	179.7705	310302212	14380658	728.5316	0.046344	3676.599	0.700000
1	179.8523	305475433	14777162	728.5316	0.048374	3628.592	0.883333
0.5	179.9484	300567788	15197153	728.5316	0.050561	3580.442	1.100000
0.2	180.1228	293835288	15937390	728.5316	0.054239	3515.749	1.516667
0.1	180.381	288499351	16546418	728.5316	0.057353	3464.076	2.266667
0.05	180.6789	283011514	17268154	729.226	0.061016	3413.519	3.350000
0.02	180.8428	276551442	17876310	729.9204	0.06464	3310.581	5.933333
0.01	180.6324	272540048	17598663	729.9204	0.064573	3288.044	11.01667

ตารางที่ C.10 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	60.1161	2.41E+09	1.02E+08	-1024.23	0.057112	9806.65	0.116667
50	60.2951	2.49E+09	1.09E+08	-1024.23	0.059027	9806.65	0.233333
20	60.45095	2.5E+09	1.03E+08	-1024.23	0.055469	9806.65	0.333333
10	60.60649	2.48E+09	99449250	-1024.23	0.054029	9615.176	0.433333
5	60.74567	2.47E+09	99430586	-1024.23	0.054446	9301.882	0.550000
2	60.90214	2.44E+09	1.01E+08	-1024.93	0.055969	9180.126	0.700000
1	61.08793	2.42E+09	1.02E+08	-1024.93	0.057101	9089.992	0.883333
0.5	61.24131	2.39E+09	1.03E+08	-1024.93	0.058295	9030.851	1.100000
0.2	61.37741	2.36E+09	1.06E+08	-1024.93	0.060333	9191.332	1.516667
0.1	61.18854	2.34E+09	1.07E+08	-1024.93	0.061765	9266.926	2.266667
0.05	60.34386	2.32E+09	1.1E+08	-1024.93	0.063993	9315.082	3.333333
0.02	56.82627	2.29E+09	1.1E+08	-1025.62	0.064735	9546.487	5.933333
0.01	53.17033	2.32E+09	1.05E+08	-1027.71	0.061213	9260.242	11.01667



ตารางที่ C.11 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 65 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	65.83502	2.24E+09	97334359	-1022.15	0.054689	9806.65	0.133333
50	65.9211	2.32E+09	1.06E+08	-1020.76	0.057771	9806.65	0.233333
20	65.98713	2.32E+09	1.01E+08	-1020.76	0.055112	9806.65	0.333333
10	66.05624	2.29E+09	99257148	-1020.76	0.054622	9806.65	0.450000
5	66.10313	2.27E+09	1E+08	-1020.07	0.055852	9806.65	0.566667
2	66.16824	2.23E+09	1.01E+08	-1020.07	0.056793	9806.65	0.716667
1	66.23395	2.2E+09	1.02E+08	-1020.07	0.058532	9806.65	0.883333
0.5	66.28393	2.18E+09	1.04E+08	-1020.07	0.060321	9806.65	1.100000
0.2	66.33114	2.14E+09	1.08E+08	-1019.37	0.063807	9806.65	1.516667
0.1	66.12751	2.11E+09	1.12E+08	-1019.37	0.066471	9806.65	2.266667
0.05	65.48824	2.09E+09	1.15E+08	-1018.68	0.069621	9806.65	3.350000
0.02	63.68365	2.05E+09	1.22E+08	-1017.99	0.075218	9806.65	5.950000
0.01	66.29751	2E+09	93132461	-1017.29	0.058717	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.12 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 70.71 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G'')	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	72.3009	2.04E+09	1.04E+08	-1031.87	0.046963	9806.65	0.133333
50	72.39113	2.11E+09	1.24E+08	-1029.79	0.053971	9806.65	0.233333
20	72.47522	2.11E+09	1.2E+08	-1029.79	0.052425	9806.65	0.333333
10	72.55685	2.09E+09	1.2E+08	-1029.1	0.053118	9806.65	0.450000
5	72.62345	2.06E+09	1.23E+08	-1029.1	0.055059	9806.65	0.566667
2	72.70539	2.01E+09	1.28E+08	-1028.4	0.058606	9806.65	0.700000
1	72.7769	1.97E+09	1.33E+08	-1028.4	0.061883	9806.65	0.883333
0.5	72.82386	1.93E+09	1.39E+08	-1027.71	0.065973	9806.65	1.116667
0.2	72.83675	1.88E+09	1.5E+08	-1027.01	0.073233	9806.65	1.533333
0.1	72.65138	1.79E+09	1.57E+08	-1026.32	0.079008	9806.65	2.283333
0.05	71.96454	1.74E+09	1.68E+08	-1025.62	0.086194	9806.65	3.366667
0.02	69.50132	1.6E+09	1.76E+08	-1024.23	0.093011	9806.65	5.950000
0.01	67.16569	1.49E+09	1.59E+08	-1024.23	0.083377	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.13 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 85 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	84.91834	1.77E+09	2.08E+08	-1027.71	0.115555	9806.65	0.133333
50	84.98602	1.8E+09	2.2E+08	-1020.76	0.119783	9806.65	0.233333
20	85.05033	1.77E+09	2.16E+08	-1017.29	0.119417	9806.65	0.333333
10	85.13547	1.74E+09	2.12E+08	-1015.21	0.119889	9806.65	0.450000
5	85.21294	1.7E+09	2.11E+08	-1013.12	0.121349	9806.65	0.566667
2	85.30727	1.63E+09	2.12E+08	-1011.74	0.127605	9806.65	0.716667
1	85.41078	1.58E+09	2.14E+08	-1010.35	0.132812	9806.65	0.900000
0.5	85.51031	1.52E+09	2.15E+08	-1008.96	0.138618	9806.65	1.116667
0.2	85.65823	1.44E+09	2.21E+08	-1007.57	0.149787	9806.65	1.533333
0.1	85.71549	1.32E+09	2.25E+08	-1005.49	0.158059	9806.65	2.283333
0.05	85.3036	1.24E+09	2.31E+08	-1002.71	0.167204	9806.65	3.366667
0.02	83.22298	1.11E+09	2.39E+08	-1000.62	0.177984	9806.65	5.966667
0.01	81.90892	1E+09	2.29E+08	-999.235	0.172391	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.14 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	100.2038	1.4E+09	2.48E+08	-836.736	0.189721	9806.65	0.133333
50	100.3513	1.32E+09	2.5E+08	-828.403	0.195146	9806.65	0.233333
20	100.5163	1.22E+09	2.39E+08	-824.931	0.195503	9806.65	0.350000
10	100.6801	1.16E+09	2.3E+08	-824.931	0.199043	9151.409	0.450000
5	100.8438	1.09E+09	2.22E+08	-824.931	0.204334	8756.395	0.566667
2	101.0362	9.88E+08	2.11E+08	-826.32	0.213736	8226.543	0.716667
1	101.269	9.14E+08	2E+08	-827.708	0.218856	7789.597	0.900000
0.5	101.5198	8.42E+08	1.88E+08	-829.097	0.222657	7340.775	1.116667
0.2	101.9156	7.52E+08	1.7E+08	-831.875	0.225986	6722.001	1.533333
0.1	102.481	6.59E+08	1.56E+08	-833.264	0.226498	6304.098	2.283333
0.05	102.6153	5.94E+08	1.43E+08	-836.042	0.22687	5758.893	3.366667
0.02	101.5183	5.41E+08	1.35E+08	-840.208	0.22854	4958.609	5.950000
0.01	99.24773	4.88E+08	1.33E+08	-842.292	0.229706	5643.928	11.05000

ตารางที่ C.15 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	120.2316	7E+08	1.88E+08	-688.82	0.269077	5525.273	0.133333
50	120.215	6.4E+08	1.71E+08	-686.043	0.267049	5467.645	0.233333
20	120.206	5.63E+08	1.46E+08	-688.82	0.259733	4843.024	0.333333
10	120.1971	5.12E+08	1.28E+08	-692.293	0.249546	4435.103	0.450000
5	120.1807	4.67E+08	1.11E+08	-695.07	0.236944	4077.832	0.566667
2	120.1662	4.18E+08	90799250	-698.543	0.217189	3586.561	0.716667
1	120.1554	3.87E+08	77533289	-699.932	0.200105	3401.087	0.900000
0.5	120.1246	3.63E+08	66275133	-702.015	0.182825	3200.543	1.116667
0.2	120.0508	3.36E+08	54161410	-703.404	0.161331	3036.965	1.533333
0.1	119.9869	3.2E+08	46908219	-705.487	0.146548	2906.298	2.283333
0.05	119.8619	3.07E+08	41350164	-706.181	0.134649	2797.544	3.366667
0.02	119.7197	2.93E+08	35518719	-707.57	0.121086	2679.429	5.950000
0.01	119.9721	2.85E+08	32611330	-710.348	0.114469	2431.156	11.05000

ตารางที่ C.16 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	140.7719	3.6E+08	88699648	-671.459	0.246566	5732.294	0.133333
50	140.7772	3.41E+08	72794992	-666.598	0.213772	5173.414	0.233333
20	140.7741	3.17E+08	56386902	-669.376	0.177729	4595.755	0.350000
10	140.7625	3.03E+08	46945156	-672.848	0.154719	4231.921	0.450000
5	140.7497	2.93E+08	39822258	-675.626	0.136053	3900.586	0.566667
2	140.731	2.81E+08	33440547	-678.404	0.119076	3564.472	0.716667
1	140.7016	2.73E+08	30022619	-680.487	0.109872	3390.557	0.900000
0.5	140.6575	2.67E+08	27543730	-682.57	0.103256	3159.342	1.116667
0.2	140.5785	2.58E+08	25437625	-682.57	0.098411	3049.861	1.533333
0.1	140.4314	2.53E+08	24036766	-683.959	0.095038	2919.117	2.283333
0.05	140.2748	2.48E+08	23156504	-685.348	0.093476	2815.115	3.366667
0.02	140.1071	2.41E+08	22992252	-686.043	0.095429	2700.855	5.950000
0.01	140.1011	2.37E+08	22126271	-686.043	0.093385	2629.164	11.03333

ตารางที่ C.17 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	159.5746	2.87E+08	33715336	-674.237	0.117374	2991.014	0.133333
50	159.6066	2.8E+08	28941049	-670.765	0.103227	3059.536	0.233333
20	159.6467	2.73E+08	25010131	-670.765	0.091721	2792.217	0.333333
10	159.6812	2.67E+08	23111113	-671.459	0.086623	2648.652	0.450000
5	159.7204	2.61E+08	21830402	-672.848	0.083656	2561.874	0.566667
2	159.7723	2.53E+08	20749229	-673.543	0.081872	2468.033	0.716667
1	159.8226	2.48E+08	20231168	-673.543	0.081603	2408.69	0.900000
0.5	159.8625	2.43E+08	19908633	-673.543	0.082047	2357.904	1.116667
0.2	159.9438	2.36E+08	19875318	-674.237	0.084345	2294.049	1.533333
0.1	160.075	2.31E+08	19879346	-674.237	0.086202	2252.091	2.283333
0.05	160.1845	2.26E+08	19984799	-674.237	0.088613	2212.327	3.366667
0.02	160.138	2.19E+08	19935947	-674.237	0.091055	2159.902	5.933333
0.01	159.9302	2.15E+08	19953348	-674.237	0.092924	2130.832	11.01667



ตารางที่ C.18 DMA data of sPS1 blended with PIP for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	179.1855	2.56E+08	22046697	-659.654	0.085993	2221.254	0.133333
50	179.2269	2.49E+08	21306006	-656.182	0.085497	2421.229	0.233333
20	179.2689	2.44E+08	19921627	-654.098	0.081774	2539.612	0.350000
10	179.3138	2.39E+08	19116389	-654.098	0.080024	2310.78	0.450000
5	179.3602	2.34E+08	18523152	-654.098	0.079188	2268.932	0.566667
2	179.4245	2.27E+08	18234164	-654.098	0.080181	2213.611	0.716667
1	179.5028	2.23E+08	18124664	-654.793	0.081442	2172.635	0.900000
0.5	179.5986	2.18E+08	18124371	-654.793	0.083223	2133.512	1.116667
0.2	179.7285	2.11E+08	18340252	-654.793	0.086824	2081.532	1.533333
0.1	179.9411	2.06E+08	18431035	-654.793	0.089347	2043.001	2.283333
0.05	180.1429	2.01E+08	18454924	-654.793	0.091673	2006.643	3.350000
0.02	180.1604	1.95E+08	18513512	-654.793	0.094719	1960.305	5.933333
0.01	180.043	1.92E+08	17745412	-654.793	0.0926	1927.375	11.01667

ตารางที่ C.19 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	60.1482	1.93E+09	91379870	85.48012	0.047423	6200	0.133333
50	60.09882	2E+09	1.01E+08	89.64676	0.05037	5970.336	0.233333
20	60.0445	2E+09	96669544	90.3412	0.048249	5959.019	0.350000
10	59.98988	1.97E+09	94502676	90.3412	0.047895	5959.019	0.450000
5	59.93649	1.94E+09	93664408	90.3412	0.04824	5959.019	0.566667
2	59.86643	1.9E+09	95869668	90.3412	0.05059	5959.019	0.716667
1	59.76953	1.87E+09	1.01E+08	91.03564	0.054323	5959.019	0.900000
0.5	59.64732	1.83E+09	1.03E+08	91.03564	0.056467	5959.019	1.116667
0.2	59.39888	1.78E+09	1.1E+08	91.03564	0.061852	5959.019	1.533333
0.1	58.91682	1.74E+09	1.14E+08	91.03564	0.065862	5959.019	2.283333
0.05	58.16072	1.65E+09	1.22E+08	91.73008	0.071811	5959.019	3.366667
0.02	56.54018	1.53E+09	1.31E+08	92.42452	0.079305	5959.019	5.950000
0.01	56.29823	1.45E+09	1.21E+08	92.42452	0.07415	5959.019	11.03333

ตารางที่ C.20 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 80 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	80.85674	1.82E+09	1.65E+08	850.753	0.084399	6200	0.133333
50	80.79568	1.76E+09	1.44E+08	855.6141	0.074967	6000.305	0.250000
20	80.73799	1.71E+09	1.49E+08	856.3085	0.080439	5999.559	0.350000
10	80.68368	1.65E+09	1.52E+08	857.0029	0.084782	5999.559	0.466667
5	80.62016	1.62E+09	1.54E+08	857.0029	0.089866	5999.559	0.583333
2	80.54928	1.48E+09	1.6E+08	857.6974	0.099489	5999.559	0.716667
1	80.44373	1.37E+09	1.62E+08	857.6974	0.105966	5999.559	0.900000
0.5	80.32467	1.3E+09	1.62E+08	857.6974	0.112253	5999.559	1.116667
0.2	80.08226	1.14E+09	1.62E+08	858.3918	0.121541	5999.559	1.533333
0.1	79.68459	1.02E+09	1.61E+08	859.0863	0.12831	5999.559	2.300000
0.05	79.18044	9.46E+08	1.6E+08	859.7807	0.135217	5999.559	3.383333
0.02	78.52409	8.39E+08	1.55E+08	861.1696	0.142542	5999.559	5.966667
0.01	78.96503	7.69E+08	1.41E+08	862.5585	0.14172	5999.559	11.05000

ตารางที่ C.21 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 84.22 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	85.33208	1.71E+09	1.58E+08	880.6139	0.097545	9806.65	0.133333
50	85.32993	1.56E+09	1.72E+08	882.6973	0.110308	9806.65	0.233333
20	85.32472	1.47E+09	1.72E+08	884.0861	0.117163	9806.65	0.333333
10	85.31615	1.38E+09	1.71E+08	884.7806	0.123688	9806.65	0.450000
5	85.30022	1.29E+09	1.69E+08	885.475	0.130757	9806.65	0.566667
2	85.28828	1.17E+09	1.66E+08	886.1694	0.141904	9806.65	0.716667
1	85.27634	1E+09	1.58E+08	886.8639	0.157591	9806.65	0.900000
0.5	85.23285	9.14E+08	1.44E+08	888.9472	0.157377	9806.65	1.116667
0.2	85.16456	8.28E+08	1.35E+08	890.3361	0.163055	9806.65	1.533333
0.1	85.01022	7.7E+08	1.28E+08	892.4194	0.166444	9806.65	2.283333
0.05	84.77502	7.24E+08	1.22E+08	893.1138	0.168045	9105.187	3.383333
0.02	84.27431	6.53E+08	1.13E+08	893.1138	0.168802	8504.206	5.950000
0.01	84.2936	6.18E+08	1.04E+08	893.8083	0.162267	7942.243	11.05000

ตารางที่ C.22 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 90 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	90.59547	1.27E+09	1.48E+08	899.3638	0.116218	9806.65	0.133333
50	90.56235	1.22E+09	1.67E+08	900.0582	0.136497	9806.65	0.233333
20	90.52493	1.13E+09	1.65E+08	901.4471	0.146263	9806.65	0.350000
10	90.49641	1.05E+09	1.59E+08	902.836	0.152105	9806.65	0.450000
5	90.45807	9.7E+08	1.53E+08	903.5305	0.158112	9806.65	0.566667
2	90.41022	8.75E+08	1.44E+08	904.2249	0.164104	9756.174	0.716667
1	90.35287	8.13E+08	1.35E+08	902.1415	0.166229	8670.738	0.900000
0.5	90.29152	7.55E+08	1.26E+08	901.4471	0.167349	8101.237	1.116667
0.2	90.13909	6.85E+08	1.15E+08	899.3638	0.167235	7477.493	1.533333
0.1	89.93022	6.4E+08	1.06E+08	897.9749	0.165396	7056.695	2.283333
0.05	89.69466	6E+08	98040456	897.2805	0.163389	6704.466	3.383333
0.02	89.48273	5.52E+08	88397988	897.2805	0.160286	6294.627	5.950000
0.01	89.88882	5.13E+08	77688828	897.2805	0.151345	6018.605	11.03333

ตารางที่ C.23 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	100.262	9.18E+08	1.55E+08	925.7525	0.177938	9806.65	0.133333
50	100.2648	7.89E+08	1.52E+08	929.9192	0.191181	9806.65	0.241546
20	100.2682	7.28E+08	1.36E+08	932.0025	0.192072	9706.028	0.333333
10	100.2666	6.79E+08	1.24E+08	929.9192	0.190701	8605.374	0.450000
5	100.2623	6.46E+08	1.12E+08	927.8358	0.187453	8103.616	0.566667
2	100.2657	6.19E+08	96758184	925.0581	0.180394	7460.711	0.716667
1	100.2626	5.96E+08	86376621	924.3636	0.173893	7229.591	0.900000
0.5	100.259	5.71E+08	77085423	922.2803	0.166617	6797.596	1.116667
0.2	100.2617	5.27E+08	66700202	922.2803	0.157493	6608.468	1.533333
0.1	100.2556	5.01E+08	60072734	920.8914	0.150591	6240.991	2.283333
0.05	100.2629	4.82E+08	54335391	920.197	0.143965	5903.473	3.383333
0.02	100.4016	4.4E+08	47759850	919.5026	0.135437	5482.351	5.966667
0.01	100.5144	4.1E+08	42954798	918.8081	0.127277	5142.337	11.05000

ตารางที่ C.24 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	120.2208	6.38E+08	1.74E+08	575.0603	0.197712	5880.429	0.133333
50	120.1298	6.07E+08	1.59E+08	594.5046	0.200681	9806.65	0.233333
20	120.0385	5.89E+08	1.32E+08	584.7825	0.183313	6021.776	0.350000
10	119.9508	5.55E+08	1.13E+08	584.088	0.170045	6021.776	0.466667
5	119.869	5.43E+08	96598792	584.088	0.156984	6021.776	0.566667
2	119.7801	5.22E+08	78302764	584.088	0.138761	6021.776	0.716667
1	119.6678	4.97E+08	67490445	584.7825	0.126687	6021.776	0.900000
0.5	119.5632	4.86E+08	58607939	585.4769	0.115817	6021.776	1.116667
0.2	119.4231	4.53E+08	50098191	586.1714	0.105193	6021.776	1.533333
0.1	119.362	4.36E+08	44904621	587.5602	0.098426	6021.776	2.283333
0.05	119.5811	4.14E+08	40897052	589.6436	0.093437	6021.776	3.366667
0.02	120.6773	3.98E+08	37389468	591.7269	0.090193	6021.776	5.966667
0.01	121.5016	3.74E+08	34536911	596.588	0.086576	5851.247	11.05000



ตารางที่ C.25 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	140.8597	4.62E+08	52848275	626.4489	0.1143	7465.307	0.133333
50	140.8413	4.5E+08	45782569	628.5322	0.101723	6825.542	0.233333
20	140.8266	4.33E+08	36535941	628.5322	0.084441	6586.728	0.333333
10	140.8119	4.21E+08	31909426	628.5322	0.07574	6208.914	0.450000
5	140.7981	4.11E+08	28887903	627.8378	0.070246	5878.668	0.566667
2	140.765	3.99E+08	26167203	626.4489	0.065597	5527.138	0.716667
1	140.7435	3.9E+08	25023145	625.7545	0.064111	5310.419	0.900000
0.5	140.725	3.82E+08	24225781	625.06	0.063341	5125.988	1.116667
0.2	140.701	3.72E+08	23883655	624.3655	0.064143	4920.024	1.533333
0.1	140.7147	3.65E+08	24058466	624.3655	0.06596	4913.906	2.283333
0.05	140.8116	3.58E+08	24062261	624.3655	0.067303	4744.387	3.366667
0.02	141.1393	3.48E+08	24082127	624.3655	0.069152	4528.979	5.950000
0.01	141.5033	3.42E+08	23601749	625.06	0.068939	4393.244	11.03333

ตารางที่ C.26 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	160.5002	4.12E+08	26792133	244.5069	0.065098	6065.798	0.116667
50	160.4391	4.08E+08	24371648	236.868	0.059744	4292.32	0.233333
20	160.3686	4.01E+08	22042495	234.7847	0.054989	4015.556	0.333333
10	160.2965	3.94E+08	21008374	235.4792	0.053365	4299.357	0.450000
5	160.2193	3.87E+08	20217043	235.4792	0.052302	4227.502	0.566667
2	160.1288	3.77E+08	19849318	235.4792	0.05261	4130.894	0.700000
1	160.0393	3.7E+08	19791961	235.4792	0.053432	4056.834	0.883333
0.5	159.927	3.57E+08	22049118	243.8124	0.061707	6200.000	1.100000
0.2	159.7986	3.47E+08	23252248	245.8958	0.066984	6200.000	1.533333
0.1	159.7201	3.4E+08	23310850	246.5902	0.068638	5842.711	2.283333
0.05	159.9267	3.32E+08	23973785	248.6735	0.072207	5842.711	3.366667
0.02	161.0155	3.21E+08	24204982	250.0624	0.075486	5573.512	5.950000
0.01	161.5773	3.13E+08	24222927	254.229	0.077465	5573.512	11.03333

ตารางที่ C.27 DMA data of sPS1 blended with PBMA for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	180.3842	3.52E+08	19466337	268.8123	0.055278	4082.757	0.133333
50	180.373	3.46E+08	19222508	271.59	0.055587	4258.343	0.233333
20	180.3609	3.39E+08	18453924	272.9789	0.054436	4292.207	0.350000
10	180.3558	3.33E+08	18176556	272.9789	0.054621	4232.135	0.450000
5	180.346	3.26E+08	18175068	272.9789	0.055674	4199.316	0.566667
2	180.3266	3.18E+08	18261629	272.9789	0.057411	4110.425	0.700000
1	180.304	3.12E+08	18407822	272.9789	0.059052	4046.258	0.883333
0.5	180.2995	3.06E+08	18556454	272.9789	0.06072	3924.034	1.100000
0.2	180.3008	2.97E+08	18816519	272.9789	0.063327	3828.279	1.516667
0.1	180.3402	2.91E+08	18914651	272.9789	0.065015	3755.312	2.266667
0.05	180.4319	2.84E+08	18867701	272.9789	0.066333	3681.251	3.350000
0.02	180.6343	2.76E+08	18453125	272.2845	0.066744	3576.718	5.933333
0.01	180.7282	2.71E+08	18275192	272.2845	0.06733	3503.815	11.01667

ตารางที่ C.28 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	63.90271	3.14E+09	1.14E+08	18.11944	0.036407	6200	0.133333
50	63.84655	3.23E+09	1.38E+08	20.20276	0.042608	6200	0.233333
20	63.78145	3.23E+09	1.27E+08	20.20276	0.039256	6174.71	0.333333
10	63.71389	3.19E+09	1.28E+08	20.20276	0.04019	6174.71	0.450000
5	63.65218	3.13E+09	1.36E+08	20.20276	0.043419	6174.71	0.566667
2	63.56055	3.04E+09	1.44E+08	20.8972	0.047418	6174.71	0.700000
1	63.45503	2.97E+09	1.51E+08	20.8972	0.050834	6174.71	0.883333
0.5	63.32915	2.89E+09	1.59E+08	20.8972	0.054934	6174.71	1.100000
0.2	63.07461	2.78E+09	1.74E+08	21.59164	0.062628	6174.71	1.516667
0.1	62.62231	2.69E+09	1.88E+08	22.28608	0.069883	6174.71	2.266667
0.05	61.936	2.61E+09	1.98E+08	22.98052	0.075704	6174.71	3.350000
0.02	60.21609	2.49E+09	2.13E+08	23.67496	0.085421	6174.71	5.950000
0.01	57.37067	2.49E+09	1.94E+08	25.06384	0.078122	6174.71	11.03333

ตารางที่ C.29 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 70 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	70.53992	2.66E+09	1.43E+08	40.34152	0.053762	9806.65	0.133333
50	70.55833	2.8E+09	1.91E+08	41.03596	0.06819	9806.65	0.233333
20	70.56876	2.79E+09	1.9E+08	41.7304	0.068082	9806.65	0.350000
10	70.57797	2.73E+09	1.95E+08	42.42484	0.071451	9806.65	0.450000
5	70.58749	2.64E+09	2.06E+08	43.11928	0.077802	9806.65	0.566667
2	70.57521	2.51E+09	2.18E+08	43.81372	0.086756	9806.65	0.716667
1	70.55526	2.41E+09	2.29E+08	44.50816	0.095057	9806.65	0.900000
0.5	70.53593	2.3E+09	2.4E+08	45.2026	0.104389	9806.65	1.116667
0.2	70.43158	2.14E+09	2.6E+08	46.59148	0.121238	9806.65	1.533333
0.1	70.1551	2.02E+09	2.71E+08	47.98036	0.134368	9806.65	2.300000
0.05	69.67313	1.9E+09	2.92E+08	51.45256	0.153376	9806.65	3.383333
0.02	68.40575	1.76E+09	3.15E+08	54.23032	0.179088	9806.65	5.966667
0.01	67.54305	1.74E+09	3.09E+08	60.48028	0.177398	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.30 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 81.95 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	79.65697	1.93E+09	1.94E+08	113.2577	0.100801	6200	0.133333
50	79.78677	1.92E+09	2.24E+08	115.341	0.116452	6200	0.233333
20	79.90705	1.83E+09	2.32E+08	116.0355	0.127112	6001.315	0.333333
10	80.03532	1.72E+09	2.34E+08	116.7299	0.135871	6001.315	0.450000
5	80.16603	1.62E+09	2.37E+08	117.4244	0.146612	6001.315	0.566667
2	80.30872	1.47E+09	2.34E+08	118.1188	0.158798	6001.315	0.716667
1	80.4781	1.37E+09	2.32E+08	118.8132	0.170126	6001.315	0.900000
0.5	80.64931	1.26E+09	2.29E+08	119.5077	0.181599	6001.315	1.116667
0.2	80.91781	1.13E+09	2.23E+08	120.2021	0.198236	6001.315	1.533333
0.1	81.18538	1.03E+09	2.17E+08	121.591	0.21122	6001.315	2.283333
0.05	81.22036	9.39E+08	2.12E+08	123.6743	0.225441	6001.315	3.366667
0.02	80.34953	8.42E+08	2.04E+08	125.7576	0.242472	5966.188	5.966667
0.01	78.50906	8.18E+08	2.04E+08	127.841	0.249103	5906.429	11.05000

ตารางที่ C.31 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 90 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	90.9715	1.78E+09	1.97E+08	300.0621	0.110923	9806.65	0.133333
50	90.91599	1.77E+09	2.25E+08	302.1454	0.127214	9806.65	0.233333
20	90.86047	1.65E+09	2.28E+08	304.2287	0.138597	9806.65	0.333333
10	90.8074	1.54E+09	2.27E+08	305.6176	0.147568	9806.65	0.450000
5	90.74361	1.42E+09	2.26E+08	307.0065	0.159196	9806.65	0.566667
2	90.67491	1.27E+09	2.25E+08	308.3954	0.176424	9806.65	0.716667
1	90.57124	1.16E+09	2.24E+08	310.4787	0.192121	9806.65	0.900000
0.5	90.46665	1.06E+09	2.23E+08	313.9509	0.210693	9806.65	1.116667
0.2	90.26392	9.25E+08	2.29E+08	317.4231	0.247439	9806.65	1.533333
0.1	89.90384	8.21E+08	2.44E+08	325.0619	0.296511	9806.65	2.300000
0.05	89.51218	7.09E+08	2.66E+08	343.1174	0.375657	9806.65	3.383333
0.02	89.13339	5.52E+08	2.87E+08	366.0339	0.519566	9806.65	5.966667
0.01	89.85876	5.07E+08	2.34E+08	418.8113	0.462106	9806.65	11.05000



ตารางที่ C.32 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	100.0786	1.15E+09	2.19E+08	470.8943	0.190269	9806.65	0.133333
50	100.0369	1.09E+09	2.27E+08	476.4498	0.208697	9806.65	0.233333
20	99.99764	9.66E+08	2.14E+08	482.0054	0.221428	9806.65	0.333333
10	99.96789	8.74E+08	2.01E+08	486.172	0.230567	9806.65	0.450000
5	99.94121	7.89E+08	1.89E+08	489.6442	0.240078	9806.65	0.566667
2	99.90225	6.88E+08	1.75E+08	493.8109	0.253885	9806.65	0.716667
1	99.8587	6.29E+08	1.63E+08	500.0608	0.25887	9806.65	0.900000
0.5	99.8038	5.66E+08	1.57E+08	507.6996	0.277015	9806.65	1.116667
0.2	99.75227	5.07E+08	1.48E+08	517.4218	0.290787	9701.603	1.533333
0.1	99.67314	4.75E+08	1.35E+08	530.6161	0.284965	9001.76	2.283333
0.05	99.64861	4.48E+08	1.21E+08	541.7272	0.269899	7970.24	3.383333
0.02	99.96513	4.14E+08	1.07E+08	545.1994	0.257564	7042.031	5.966667
0.01	100.3065	3.92E+08	96604667	549.366	0.246156	6615.459	11.05000

ตารางที่ C.33 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	120.8634	5.38E+08	1.3E+08	595.8935	0.2422	9806.65	0.133333
50	120.8683	4.97E+08	1.18E+08	636.171	0.237023	9806.65	0.233333
20	120.8714	4.47E+08	1.02E+08	670.8931	0.227539	9806.65	0.350000
10	120.8742	4.17E+08	91982667	696.5873	0.220687	9258.49	0.466667
5	120.8668	3.91E+08	84164318	713.9483	0.215217	8667.262	0.583333
2	120.8615	3.64E+08	76372276	725.0594	0.210069	7773.847	0.716667
1	120.8662	3.46E+08	72352307	732.6982	0.209383	7296.789	0.900000
0.5	120.8557	3.31E+08	68880786	739.6426	0.208242	6778.24	1.133333
0.2	120.8541	3.12E+08	66591479	742.4203	0.213513	5980.827	1.550000
0.1	120.8476	3E+08	64481505	744.5037	0.215063	5307.886	2.300000
0.05	120.8637	2.91E+08	62847891	747.9759	0.215942	5407.641	3.383333
0.02	121.0615	2.77E+08	61224380	750.0592	0.221214	4814.517	5.966667
0.01	121.4721	2.72E+08	60054995	753.5314	0.22056	4820.601	11.05000

ตารางที่ C.34 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	140.5051	3.77E+08	57949521	782.0034	0.153546	6319.144	0.133333
50	140.4779	3.64E+08	50129958	786.8645	0.137789	6027.768	0.233333
20	140.4629	3.48E+08	43729661	786.8645	0.12575	5313.033	0.333333
10	140.4507	3.36E+08	40853414	786.8645	0.121529	5002.919	0.450000
5	140.4404	3.25E+08	39535057	786.1701	0.121553	4732.019	0.566667
2	140.4142	3.11E+08	39776977	784.7812	0.127984	4440.07	0.700000
1	140.3732	3E+08	41052708	784.7812	0.136916	4247.374	0.883333
0.5	140.3514	2.89E+08	42387721	784.0867	0.146658	4089.008	1.100000
0.2	140.3151	2.74E+08	44944859	783.3923	0.163993	3895.689	1.533333
0.1	140.3329	2.64E+08	46038146	783.3923	0.174691	3767.143	2.266667
0.05	140.5092	2.54E+08	46318552	784.0867	0.182494	3669.586	3.366667
0.02	141.1793	2.44E+08	45317177	784.7812	0.185941	3521.654	5.950000
0.01	141.3929	2.37E+08	44446276	786.8645	0.187214	3475.735	11.03333

ตารางที่ C.35 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	159.7173	3.15E+08	31725615	805.6144	0.100788	4326.937	0.133333
50	159.6841	3.06E+08	31563005	811.1699	0.103019	4372.605	0.233333
20	159.6565	2.96E+08	31557141	813.9477	0.106525	4395.87	0.333333
10	159.6341	2.87E+08	32765201	814.6421	0.114143	4247.353	0.450000
5	159.6154	2.76E+08	34757422	815.3365	0.125799	4137.473	0.566667
2	159.5879	2.62E+08	38071112	816.031	0.145078	3984.933	0.716667
1	159.5692	2.51E+08	40601833	816.7255	0.162059	3872.043	0.900000
0.5	159.579	2.41E+08	41472365	817.4199	0.172384	3666.17	1.116667
0.2	159.6341	2.28E+08	42049328	818.1143	0.184218	3507.763	1.533333
0.1	159.8504	2.2E+08	41547268	819.5032	0.188469	3397.856	2.283333
0.05	160.2778	2.14E+08	40431380	821.5865	0.188777	3293.325	3.383333
0.02	161.1436	2.07E+08	38363471	822.9754	0.185125	3091.543	5.966667
0.01	161.3464	2.04E+08	36706552	825.0587	0.179962	3030.753	11.05000

ตารางที่ C.36 DMA data of sPS1 blended with PEMA for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	178.9824	2.71E+08	27516586	839.642	0.101508	3573.835	0.133333
50	178.9904	2.63E+08	28838107	845.8919	0.109552	3697.583	0.233333
20	178.9987	2.52E+08	31362948	849.3641	0.124507	3826.134	0.333333
10	179.0069	2.42E+08	33265003	850.753	0.137725	3466.988	0.450000
5	179.0187	2.31E+08	34910943	850.753	0.150947	3376.3	0.566667
2	179.0483	2.17E+08	36133680	851.4474	0.166153	3246.614	0.716667
1	179.1018	2.08E+08	36499651	852.1419	0.175499	3141.782	0.900000
0.5	179.1658	2.01E+08	35558849	852.1419	0.176701	2948.293	1.116667
0.2	179.3106	1.94E+08	34055581	852.1419	0.175916	2822.615	1.533333
0.1	179.655	1.89E+08	32745469	852.8363	0.17328	2743.836	2.283333
0.05	180.177	1.85E+08	31460435	854.2252	0.169948	2678.403	3.366667
0.02	180.9918	1.81E+08	29697799	854.2252	0.164024	2607.981	5.950000
0.01	180.8126	1.79E+08	28720328	855.6141	0.160451	2569.294	11.03333

ตารางที่ C.37 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	60.52285	2.81E+09	1.06E+08	93.11896	0.033701	9806.65	0.133333
50	60.54353	2.85E+09	1.45E+08	93.11896	0.040512	9806.65	0.233333
20	60.5639	2.85E+09	1.3E+08	93.11896	0.035004	9806.65	0.333333
10	60.59384	2.84E+09	1.27E+08	93.11896	0.034282	9806.65	0.450000
5	60.6105	2.8E+09	1.31E+08	93.11896	0.036112	9806.65	0.566667
2	60.6392	2.74E+09	1.34E+08	93.11896	0.037717	9806.65	0.700000
1	60.67531	2.69E+09	1.38E+08	93.11896	0.039512	9806.65	0.883333
0.5	60.70895	2.64E+09	1.44E+08	93.11896	0.041962	9806.65	1.100000
0.2	60.78548	2.56E+09	1.5E+08	93.11896	0.045104	9806.65	1.516667
0.1	60.84443	2.51E+09	1.71E+08	93.8134	0.052521	9806.65	2.266667
0.05	60.81357	2.47E+09	1.8E+08	94.50784	0.056323	9806.65	3.350000
0.02	60.10005	2.39E+09	1.95E+08	95.20228	0.062865	9806.65	5.933333
0.01	57.69687	2.33E+09	1.07E+08	96.59116	0.032413	9806.65	11.01667

ตารางที่ C.38 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 70 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	72.12812	2.54E+09	1.22E+08	101.4522	0.041274	9806.65	0.133333
50	72.12812	2.53E+09	1.69E+08	101.4522	0.051604	9806.65	0.233333
20	72.12351	2.56E+09	1.58E+08	101.4522	0.04755	9806.65	0.333333
10	72.10694	2.52E+09	1.56E+08	101.4522	0.047487	9806.65	0.450000
5	72.1097	2.46E+09	1.63E+08	101.4522	0.050962	9806.65	0.566667
2	72.0919	2.42E+09	1.73E+08	101.4522	0.056406	9806.65	0.700000
1	72.06981	2.36E+09	1.78E+08	101.4522	0.060143	9806.65	0.883333
0.5	72.05201	2.27E+09	1.84E+08	101.4522	0.064239	9806.65	1.100000
0.2	71.96423	2.17E+09	1.97E+08	102.1467	0.072269	9806.65	1.516667
0.1	71.75033	2.11E+09	2.07E+08	102.1467	0.078778	9806.65	2.266667
0.05	71.24793	2.03E+09	2.15E+08	102.8411	0.08418	9806.65	3.350000
0.02	69.66698	1.89E+09	2.29E+08	104.23	0.093339	9806.65	5.933333
0.01	67.32368	1.82E+09	1.8E+08	104.9244	0.067839	9806.65	11.01667



ตารางที่ C.39 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 79.22 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	80.25379	2.27E+09	1.68E+08	109.0911	0.061527	6200	0.133333
50	80.26729	2.26E+09	2.06E+08	110.48	0.070482	6200	0.233333
20	80.28969	2.21E+09	2.06E+08	110.48	0.071843	6200	0.333333
10	80.30687	2.13E+09	2.11E+08	110.48	0.076296	6200	0.450000
5	80.33511	2.03E+09	2.13E+08	110.48	0.080942	6200	0.566667
2	80.35259	1.89E+09	2.15E+08	110.48	0.087711	6200	0.700000
1	80.38113	1.78E+09	2.16E+08	110.48	0.093349	6200	0.883333
0.5	80.38727	1.69E+09	2.2E+08	110.48	0.100591	6200	1.100000
0.2	80.398	1.56E+09	2.24E+08	110.48	0.110689	6200	1.516667
0.1	80.35382	1.38E+09	2.31E+08	110.48	0.120268	6200	2.266667
0.05	80.12522	1.28E+09	2.4E+08	110.48	0.13116	6200	3.350000
0.02	79.27679	1.11E+09	2.51E+08	110.48	0.142853	6200	5.916667
0.01	78.60049	9.28E+08	2.42E+08	110.48	0.136571	6200	11.00000

ตารางที่ C.40 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 90 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	92.28544	1.62E+09	2.35E+08	120.2021	0.120547	6200	0.133333
50	92.11644	1.55E+09	2.68E+08	120.8966	0.134437	6200	0.233333
20	91.94622	1.45E+09	2.62E+08	121.591	0.139249	6200	0.350000
10	91.77385	1.36E+09	2.59E+08	122.2854	0.146631	6200	0.450000
5	91.59166	1.26E+09	2.54E+08	122.2854	0.154697	6200	0.566667
2	91.38004	1.14E+09	2.46E+08	122.9799	0.16578	6200	0.716667
1	91.11473	1.05E+09	2.37E+08	122.9799	0.174111	6200	0.900000
0.5	90.79422	9.71E+08	2.3E+08	122.9799	0.182333	6200	1.116667
0.2	90.18141	8.71E+08	2.21E+08	123.6743	0.195742	6200	1.533333
0.1	89.21651	8.07E+08	2.17E+08	123.6743	0.206893	6200	2.283333
0.05	88.18535	7.48E+08	2.11E+08	124.3688	0.217225	6200	3.366667
0.02	87.49403	6.65E+08	1.96E+08	125.0632	0.227141	6200	5.950000
0.01	89.83667	5.57E+08	1.79E+08	126.4521	0.247596	6200	11.03333

ตารางที่ C.41 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	99.59861	1.4E+09	2.22E+08	125.0632	0.121577	6200	0.133333
50	99.65566	1.3E+09	2.58E+08	125.7576	0.141808	6200	0.233333
20	99.70136	1.18E+09	2.47E+08	126.4521	0.147366	6200	0.350000
10	99.7578	1.07E+09	2.36E+08	127.1465	0.15468	6200	0.450000
5	99.80318	9.87E+08	2.26E+08	127.841	0.162143	6200	0.566667
2	99.86514	8.82E+08	2.11E+08	127.841	0.172558	6200	0.716667
1	99.9455	7.79E+08	1.99E+08	128.5354	0.181175	6200	0.900000
0.5	100.0295	7.15E+08	1.86E+08	129.2298	0.188944	6200	1.116667
0.2	100.1666	6.32E+08	1.68E+08	129.9243	0.197441	6200	1.533333
0.1	100.3902	5.64E+08	1.52E+08	131.3132	0.202893	6200	2.283333
0.05	100.6193	4.98E+08	1.35E+08	133.3965	0.204043	6200	3.366667
0.02	100.6905	4.35E+08	1.12E+08	135.4798	0.198938	6032.912	5.950000
0.01	100.2286	3.91E+08	92373125	138.2576	0.181749	5889.426	11.05000

ตารางที่ C.42 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	119.1145	7.23E+08	1.88E+08	177.8406	0.200144	9806.65	0.133333
50	119.1231	6.07E+08	1.88E+08	178.5351	0.217132	9806.65	0.233333
20	119.1225	5.23E+08	1.67E+08	179.924	0.221569	9806.65	0.350000
10	119.132	4.74E+08	1.5E+08	180.6184	0.223527	9806.65	0.450000
5	119.1385	4.24E+08	1.32E+08	181.3128	0.221201	9806.65	0.583333
2	119.1345	3.83E+08	1.09E+08	182.0073	0.210543	9806.65	0.716667
1	119.1524	3.51E+08	91202305	182.7017	0.196059	9806.65	0.900000
0.5	119.1817	3.27E+08	75115664	184.0906	0.177011	9806.65	1.116667
0.2	119.286	2.97E+08	57337273	185.4795	0.148885	9806.65	1.533333
0.1	119.5394	2.76E+08	46562496	186.8684	0.129738	9806.65	2.300000
0.05	120.0681	2.62E+08	38479211	190.3406	0.113074	9611.993	3.383333
0.02	121.0853	2.49E+08	31711475	190.3406	0.098135	8254.192	5.966667
0.01	121.1238	2.41E+08	27937373	192.4239	0.089242	7552.869	11.05000

ตารางที่ C.43 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	139.5047	3.53E+08	99239141	220.8959	0.216582	9806.65	0.133333
50	139.4841	3.26E+08	85428797	224.3681	0.201819	9806.65	0.233333
20	139.4694	2.96E+08	63867059	224.3681	0.165981	9127.108	0.333333
10	139.4553	2.8E+08	50692246	222.2848	0.139272	8359.732	0.450000
5	139.4325	2.68E+08	40866055	220.2015	0.117202	7682.435	0.566667
2	139.4178	2.57E+08	32541064	218.1182	0.097571	6950.035	0.716667
1	139.4003	2.5E+08	28453141	216.7293	0.087755	6524.73	0.900000
0.5	139.3875	2.43E+08	25940246	215.3404	0.082124	6194.39	1.116667
0.2	139.4253	2.35E+08	24111898	214.646	0.078977	5875.273	1.533333
0.1	139.5622	2.29E+08	23136861	214.646	0.077846	5744.742	2.283333
0.05	139.9374	2.23E+08	22840684	214.646	0.079034	5487.676	3.366667
0.02	141.019	2.14E+08	22568658	215.3404	0.081255	5249.987	5.950000
0.01	141.3499	2.08E+08	21625898	218.1182	0.080187	5107.258	11.03333

ตารางที่ C.44 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	159.8261	2.47E+08	36309625	246.5902	0.112981	6192.858	0.133333
50	159.9087	2.43E+08	31332885	249.368	0.099243	6156.934	0.233333
20	159.8068	2.35E+08	25567219	249.368	0.083668	5802.035	0.333333
10	159.7919	2.3E+08	23172473	248.6735	0.077722	5597.144	0.450000
5	159.7821	2.24E+08	21608916	248.6735	0.074281	5425.007	0.566667
2	159.7748	2.17E+08	20471713	247.9791	0.072631	5242.914	0.716667
1	159.772	2.12E+08	19897029	247.9791	0.072345	5125.323	0.883333
0.5	159.7761	2.07E+08	19855914	247.2846	0.074037	5019.155	1.116667
0.2	159.7922	1.99E+08	19363373	247.2846	0.074935	4907.201	1.533333
0.1	159.934	1.94E+08	19174879	247.2846	0.076246	4792.051	2.283333
0.05	160.2845	1.88E+08	19074619	247.9791	0.077939	4678.815	3.366667
0.02	161.1471	1.81E+08	18874912	249.368	0.080219	4528.5	5.950000
0.01	161.6852	1.76E+08	18697541	251.4513	0.08193	4428.071	11.03333

ตารางที่ C.45 DMA data of sPS1 blended with PHMA for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	180.0961	2.05E+08	24026281	278.5345	0.090283	4512.982	0.133333
50	180.027	2.01E+08	20942902	281.3122	0.080404	4671.375	0.233333
20	179.9456	1.94E+08	19397414	283.3955	0.077097	4798.578	0.350000
10	179.8568	1.89E+08	18653463	283.3955	0.076042	4661.766	0.450000
5	179.767	1.84E+08	18141418	283.3955	0.075883	4566.053	0.566667
2	179.6652	1.78E+08	17620604	283.3955	0.07624	4443.001	0.700000
1	179.5394	1.73E+08	17297203	283.3955	0.076834	4349.539	0.883333
0.5	179.422	1.69E+08	16980066	283.3955	0.077431	4250.541	1.100000
0.2	179.2574	1.63E+08	16705322	282.7011	0.078814	4120.921	1.516667
0.1	179.1511	1.59E+08	16317265	282.7011	0.079088	4026.346	2.266667
0.05	179.3946	1.54E+08	15892819	282.7011	0.079272	3930.483	3.35000
0.02	180.5519	1.48E+08	16031247	283.3955	0.083364	3804.941	5.95000
0.01	181.1012	1.43E+08	14709004	286.1733	0.078961	3732.179	11.03333



ตารางที่ C.46 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	55.30696	2.6E+09	1.66E+08	1969.496	0.063762	9806.65	0.133333
50	55.2474	2.68E+09	1.21E+08	1969.496	0.045294	9806.65	0.233333
20	56.17641	2.71E+09	1.08E+08	1969.496	0.039656	9806.65	0.333333
10	56.11099	2.7E+09	1.02E+08	1969.496	0.037714	9806.65	0.450000
5	56.04742	2.68E+09	1E+08	1969.496	0.03748	9806.65	0.566667
2	58.97736	2.65E+09	99503438	1969.496	0.037614	9806.65	0.716667
1	59.89002	2.62E+09	99886626	1969.496	0.038107	9806.65	0.900000
0.5	59.80453	2.6E+09	98774773	1969.496	0.037932	9806.65	1.116667
0.2	60.67091	2.58E+09	99323374	1969.496	0.038527	9806.65	1.533333
0.1	60.50888	2.56E+09	1.01E+08	1969.496	0.039569	9806.65	2.283333
0.05	62.57678	2.55E+09	1.08E+08	1970.19	0.042373	9806.65	3.383333
0.02	63.86017	2.53E+09	1.17E+08	1970.885	0.046361	9806.65	5.966667
0.01	64.2746	2.55E+09	37202869	1979.218	0.01461	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.47 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 70 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	72.01549	2.46E+09	1.48E+08	1977.829	0.060279	9806.65	0.116667
50	71.9492	2.54E+09	1.19E+08	1977.829	0.046714	9806.65	0.233333
20	71.88014	2.57E+09	1.09E+08	1977.829	0.042427	9806.65	0.333333
10	71.816	2.56E+09	1.04E+08	1977.829	0.040692	9806.65	0.433333
5	71.73406	2.53E+09	1.01E+08	1977.829	0.040015	9806.65	0.550000
2	71.62695	2.51E+09	1.01E+08	1977.829	0.040404	9806.65	0.700000
1	71.47411	2.48E+09	1.01E+08	1977.829	0.040824	9806.65	0.883333
0.5	71.27463	2.47E+09	1.02E+08	1977.829	0.04149	9806.65	1.100000
0.2	70.87198	2.44E+09	1.05E+08	1977.829	0.042936	9806.65	1.500000
0.1	70.07717	2.42E+09	1.07E+08	1977.829	0.044401	9806.65	2.250000
0.05	68.86594	2.4E+09	1.13E+08	1977.829	0.046803	9806.65	3.333333
0.02	70.37849	2.43E+09	1.07E+08	1977.829	0.044079	9806.65	5.916667
0.01	69.9747	2.42E+09	74244510	1982.69	0.030713	9806.65	11.00000

ตารางที่ C.48 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 80 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	79.95246	2.2E+09	1E+08	1924.357	0.045554	9806.65	0.133333
50	80.08379	2.3E+09	1.01E+08	1924.357	0.044056	9806.65	0.233333
20	80.21359	2.31E+09	93660838	1924.357	0.040611	9806.65	0.333333
10	80.30272	2.29E+09	93430192	1925.052	0.040815	9806.65	0.450000
5	80.50264	2.26E+09	94607216	1925.746	0.0418	9806.65	0.566667
2	80.68184	2.23E+09	99863679	1926.441	0.044855	9806.65	0.716667
1	80.87454	2.2E+09	1.04E+08	1926.441	0.047517	9806.65	0.883333
0.5	81.08688	2.16E+09	1.11E+08	1927.135	0.051235	9806.65	1.116667
0.2	81.38912	2.11E+09	1.25E+08	1927.829	0.059078	9806.65	1.533333
0.1	81.63215	2.07E+09	1.37E+08	1928.524	0.066202	9806.65	2.283333
0.05	81.58919	2.01E+09	1.56E+08	1929.913	0.077358	9806.65	3.366667
0.02	80.04145	1.94E+09	1.74E+08	1931.996	0.088033	9806.65	5.950000
0.01	77.2875	1.84E+09	1.51E+08	1933.385	0.073652	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.49 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 90.24 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	89.76276	2.1E+09	1.14E+08	1940.329	0.054432	9806.65	0.133333
50	89.92531	2.18E+09	1.2E+08	1943.107	0.055085	9806.65	0.233333
20	90.09584	2.16E+09	1.22E+08	1945.19	0.056722	9806.65	0.333333
10	90.26913	2.11E+09	1.28E+08	1946.579	0.060547	9806.65	0.450000
5	90.46358	2.05E+09	1.38E+08	1947.968	0.06741	9806.65	0.566667
2	90.68503	1.97E+09	1.57E+08	1948.663	0.079633	9806.65	0.716667
1	90.9718	1.89E+09	1.74E+08	1950.052	0.092464	9806.65	0.900000
0.5	91.25766	1.8E+09	1.95E+08	1951.44	0.108559	9806.65	1.116667
0.2	91.74502	1.66E+09	2.26E+08	1953.524	0.136221	9806.65	1.533333
0.1	92.5489	1.54E+09	2.47E+08	1955.607	0.159908	9806.65	2.283333
0.05	94.02877	1.4E+09	2.62E+08	1963.94	0.178842	9806.65	3.383333
0.02	86.13071	1.2E+09	3.05E+08	1968.801	0.18656	9806.65	5.966667
0.01	92.71667	1.07E+09	2.99E+08	1964.635	0.223376	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.50 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	99.63081	1.79E+09	1.7E+08	1977.829	0.094944	9806.65	0.133333
50	99.76914	1.8E+09	1.95E+08	1981.996	0.108754	9806.65	0.233333
20	99.91391	1.69E+09	2.17E+08	1986.162	0.128488	9806.65	0.333333
10	100.063	1.58E+09	2.35E+08	1989.635	0.14861	9806.65	0.450000
5	100.2209	1.45E+09	2.52E+08	1991.718	0.173637	9806.65	0.566667
2	100.3755	1.27E+09	2.69E+08	1994.496	0.211714	9806.65	0.716667
1	100.5733	1.12E+09	2.72E+08	1997.273	0.243688	9806.65	0.900000
0.5	100.777	9.68E+08	2.66E+08	2000.051	0.274874	9806.65	1.116667
0.2	101.1184	7.81E+08	2.43E+08	2003.523	0.311906	9806.65	1.533333
0.1	101.4784	6.5E+08	2.18E+08	2008.385	0.335367	9806.65	2.283333
0.05	100.9469	5.16E+08	2.08E+08	2018.107	0.340775	9806.65	3.383333
0.02	99.06187	4.27E+08	1.76E+08	2025.745	0.340885	9806.65	5.966667
0.01	99.45415	3.34E+08	1.37E+08	2032.69	0.333406	8384.123	11.05000

ตารางที่ C.51 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	119.6129	7.24E+08	2.31E+08	2076.44	0.357528	9806.65	0.133333
50	119.666	5.72E+08	2.11E+08	2097.967	0.367997	9806.65	0.233333
20	119.7089	4.56E+08	1.71E+08	2110.467	0.37417	9806.65	0.333333
10	119.7589	3.85E+08	1.4E+08	2118.801	0.364754	9806.65	0.450000
5	119.8079	3.29E+08	1.13E+08	2126.439	0.343586	9806.65	0.566667
2	119.8804	2.74E+08	83591932	2131.995	0.304537	9714.622	0.716667
1	119.9786	2.43E+08	65645192	2131.3	0.269828	8915.535	0.900000
0.5	120.1082	2.19E+08	51469950	2125.05	0.234874	7985.162	1.116667
0.2	120.3792	1.96E+08	36767543	2113.245	0.187977	6787.148	1.533333
0.1	120.7686	1.81E+08	27819790	2103.523	0.153593	5856.619	2.283333
0.05	121.1075	1.7E+08	21888141	2102.134	0.128403	5633.82	3.383333
0.02	119.9332	1.61E+08	17319073	2095.884	0.107683	4851.828	5.966667
0.01	120.7081	1.61E+08	14280587	2083.384	0.088699	3933.281	11.05000

ตารางที่ C.52 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	138.6777	2.21E+08	56593107	2098.662	0.255605	4207.258	0.15
50	138.7024	2.03E+08	43175114	2114.634	0.213198	5213.479	0.283333
20	138.7421	1.87E+08	31117543	2108.384	0.166162	4287.301	0.416667
10	138.7896	1.79E+08	24734638	2101.439	0.138567	3690.847	0.566667
5	138.833	1.69E+08	20596385	2094.495	0.121604	3170.167	0.683333
2	138.8908	1.65E+08	16894476	2088.939	0.102557	2721.08	0.816667
1	138.9836	1.62E+08	15148256	2085.467	0.093353	2444.697	1.000000
0.5	139.0845	1.6E+08	14074954	2083.384	0.087946	2236.073	1.216667
0.2	139.3347	1.57E+08	13442651	2080.606	0.085594	2023.441	1.650000
0.1	139.8177	1.55E+08	13240970	2078.523	0.085437	1849.678	2.40000
0.05	140.5157	1.51E+08	13076266	2079.217	0.086434	1839.152	3.483333
0.02	140.8297	1.46E+08	12426098	2079.217	0.084875	1756.785	6.066667
0.01	138.0791	1.43E+08	13274077	2078.523	0.092933	1811.542	11.15000



ตารางที่ C.53 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	158.2346	1.73E+08	19698269	2100.051	0.113904	2015.078	0.133333
50	158.2767	1.67E+08	16225140	2104.912	0.097255	2126.519	0.233333
20	158.3162	1.65E+08	13440577	2104.912	0.081478	1981.803	0.333333
10	158.3618	1.62E+08	12243358	2104.217	0.075576	1923.302	0.450000
5	158.4035	1.61E+08	11630519	2102.134	0.072375	1745.168	0.566667
2	158.4599	1.57E+08	11345487	2102.134	0.072445	1702.764	0.716667
1	158.5475	1.53E+08	11302891	2102.134	0.073747	1680.569	0.883333
0.5	158.6664	1.5E+08	11405324	2102.134	0.076141	1660.672	1.100000
0.2	158.9087	1.45E+08	11664917	2102.134	0.080488	1634.535	1.516667
0.1	159.4032	1.41E+08	11838608	2102.828	0.084044	1617.135	2.283333
0.05	160.1298	1.37E+08	12107980	2104.217	0.088614	1585.957	3.366667
0.02	161.1477	1.31E+08	12392369	2106.301	0.094618	1577.803	5.95000
0.01	160.9402	1.28E+08	12555312	2106.995	0.098343	1486.476	11.03333

ตารางที่ C.54 DMA data of sPS1 blended with PaMS for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	179.4153	1.53E+08	11110538	2128.523	0.072814	1458.113	0.133333
50	179.5127	1.45E+08	12260625	2134.078	0.084461	1650.223	0.233333
20	179.6111	1.44E+08	10136020	2136.161	0.070486	1704.916	0.35000
10	179.7104	1.41E+08	9991551	2137.55	0.071077	1713.407	0.45000
5	179.7998	1.38E+08	9984397	2137.55	0.072547	1686.378	0.566667
2	179.9153	1.34E+08	10023461	2137.55	0.075077	1664.823	0.716667
1	180.0465	1.3E+08	10131908	2137.55	0.077699	1635.087	0.900000
0.5	180.2148	1.27E+08	10278509	2137.55	0.080731	1604.814	1.116667
0.2	180.4886	1.23E+08	10533049	2137.55	0.085556	1562.037	1.533333
0.1	180.832	1.2E+08	10728351	2137.55	0.089511	1525.526	2.283333
0.05	181.0491	1.17E+08	10863055	2137.55	0.093042	1489.526	3.350000
0.02	180.7079	1.13E+08	10900380	2137.55	0.096385	1443.013	5.933333
0.01	180.2037	1.1E+08	10801473	2136.856	0.097955	1410.854	11.03333

ตารางที่ C.55 DMA data of sPS2 for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	60.42996	3108875964	1.55E+08	120.2021	0.055825	9806.65	0.133333
50	60.53026	3101962918	1.85E+08	122.2854	0.060961	9806.65	0.233333
20	60.63087	3076428889	1.85E+08	122.9799	0.059548	9806.65	0.333333
10	60.73827	3064791793	1.8E+08	122.9799	0.058005	9806.65	0.450000
5	60.84813	3043721057	1.8E+08	122.9799	0.058506	9806.65	0.566667
2	60.96819	3014616471	1.87E+08	123.6743	0.061375	9806.65	0.700000
1	61.11755	2991088414	1.87E+08	123.6743	0.061821	9806.65	0.883333
0.5	61.29161	2964772800	1.89E+08	123.6743	0.063049	9806.65	1.100000
0.2	61.57276	2936464811	1.97E+08	124.3688	0.06635	9806.65	1.516667
0.1	61.93168	2911415513	2E+08	125.0632	0.068024	9806.65	2.283333
0.05	62.20758	2897793820	2.06E+08	125.7576	0.070349	9806.65	3.366667
0.02	62.02488	2846049894	2.13E+08	127.1465	0.07296	9806.65	5.950000
0.01	60.01889	2762119790	1.27E+08	129.2298	0.041047	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.56 DMA data of sPS2 for temperature 80°C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	80.83894	2909957152	1.52E+08	140.3409	0.056016	9806.65	0.133333
50	80.89449	2819957152	1.9E+08	141.0353	0.064352	9806.65	0.233333
20	80.97457	2794103629	1.87E+08	141.0353	0.062331	9806.65	0.333333
10	80.97028	2762119790	1.87E+08	141.7298	0.062777	9806.65	0.450000
5	81.01354	2686844357	1.89E+08	141.7298	0.063947	9806.65	0.566667
2	81.07767	2610311625	1.93E+08	141.7298	0.066624	9806.65	0.700000
1	81.02029	2576879196	1.99E+08	141.7298	0.069519	9806.65	0.883333
0.5	81.0209	2543105732	2.1E+08	142.4242	0.07447	9806.65	1.100000
0.2	80.9356	2487730821	2.21E+08	142.4242	0.08007	9806.65	1.516667
0.1	80.69626	2446784196	2.32E+08	143.1186	0.085496	9806.65	2.283333
0.05	80.18874	2392005857	2.5E+08	144.5075	0.093916	9806.65	3.366667
0.02	78.9951	2350120339	2.58E+08	145.8964	0.098849	9806.65	5.950000
0.01	78.4526	2326368197	2.26E+08	147.9797	0.08532	9806.65	11.03333

ตารางที่ C.57 DMA data of sPS2 for temperature 90°C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	91.10522	2536153550	1.96E+08	155.6186	0.079947	9806.65	0.133333
50	91.12608	2518585887	2.35E+08	158.3963	0.088796	9806.65	0.233333
20	91.13589	2499297996	2.32E+08	159.0908	0.087395	9806.65	0.333333
10	91.14264	2460367604	2.33E+08	159.7852	0.089166	9806.65	0.450000
5	91.1451	2387811283	2.37E+08	159.7852	0.092417	9806.65	0.566667
2	91.15061	2322736796	2.49E+08	160.4796	0.100069	9806.65	0.716667
1	91.15154	2296148648	2.58E+08	161.1741	0.106784	9806.65	0.900000
0.5	91.13866	2213094710	2.7E+08	161.8685	0.115077	9806.65	1.116667
0.2	91.0586	2147830474	2.9E+08	163.2574	0.129844	9806.65	1.533333
0.1	90.84145	2065380156	3.11E+08	164.6463	0.14542	9806.65	2.283333
0.05	90.46328	2029037500	3.37E+08	166.7296	0.165898	9806.65	3.366667
0.02	89.62106	1786487575	3.59E+08	169.5074	0.188057	9806.65	5.950000
0.01	89.42139	1531087462	3.56E+08	174.3684	0.191497	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.58 DMA data of sPS2 for temperature 100.25 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	99.406	2187761624	2.03E+08	176.4518	0.098616	9806.65	0.133333
50	99.51059	2108628150	2.49E+08	179.924	0.116961	9806.65	0.233333
20	99.62223	2027682720	2.61E+08	183.3962	0.127011	9806.65	0.333333
10	99.74461	1950020000	2.7E+08	186.1739	0.13832	9806.65	0.450000
5	99.87281	1833053036	2.81E+08	187.5628	0.153414	9806.65	0.566667
2	100.0179	1663024107	2.96E+08	189.6461	0.177806	9806.65	0.716667
1	100.1792	1521158214	3.05E+08	191.7294	0.200328	9806.65	0.900000
0.5	100.3859	1373311339	3.09E+08	195.2016	0.224934	9806.65	1.116667
0.2	100.7632	1173890625	3.08E+08	197.9794	0.262013	9806.65	1.533333
0.1	101.2993	990831945	2.99E+08	202.8405	0.292867	9806.65	2.283333
0.05	101.7526	831763771	2.88E+08	210.4793	0.328806	9806.65	3.383333
0.02	101.6134	647142616	2.7E+08	219.507	0.361723	9806.65	5.966667
0.01	100.0734	517606832	2.66E+08	233.3958	0.355373	9806.65	11.05000

ตารางที่ C.59 DMA data of sPS2 for temperature 110 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	109.3462	1753880502	2.62E+08	368.1172	0.165708	9806.65	0.133333
50	109.3391	1472312502	3.05E+08	372.2838	0.198425	9806.65	0.233333
20	109.3366	1312199899	3.14E+08	374.3672	0.227909	9806.65	0.333333
10	109.3379	1177605974	3.11E+08	375.756	0.252747	9806.65	0.450000
5	109.3477	1049542429	3.03E+08	377.1449	0.27725	9806.65	0.566667
2	109.3597	921631875	2.81E+08	378.5338	0.305176	9806.65	0.716667
1	109.3667	805332143	2.59E+08	377.1449	0.321381	8873.134	0.900000
0.5	109.3892	701541205	2.32E+08	374.3672	0.33135	8071.686	1.116667
0.2	109.5047	592888438	2E+08	368.1172	0.33698	6394.382	1.533333
0.1	109.7051	465091786	1.78E+08	375.756	0.383329	9806.65	2.300000
0.05	110.1088	409937321	1.44E+08	393.117	0.350593	9164.952	3.383333
0.02	110.7794	346842500	1.09E+08	397.9781	0.315497	7997.814	5.966667
0.01	110.7093	310455959	93267578	401.4503	0.273823	7883.295	11.05000



ตารางที่ C.60 DMA data of sPS2 for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	119.1033	1111731727	3.04E+08	414.6447	0.330896	9806.65	0.133333
50	119.3308	799259821	2.86E+08	419.5058	0.357225	9806.65	0.233333
20	119.5724	642140223	2.34E+08	423.6724	0.36503	9806.65	0.333333
10	119.8298	543885804	1.95E+08	426.4502	0.359233	9806.65	0.450000
5	120.0928	469068259	1.63E+08	429.9224	0.346705	9806.65	0.566667
2	120.4171	397943348	1.28E+08	429.9224	0.32142	9333.693	0.716667
1	120.8378	357671451	1.07E+08	427.1446	0.297825	8405.752	0.900000
0.5	121.2899	327879598	89461797	422.978	0.27285	7527.023	1.116667
0.2	122.0394	300083013	72638259	419.5058	0.242061	6775.671	1.533333
0.1	122.7564	290550826	65019905	413.2558	0.223782	5491.895	2.283333
0.05	122.721	283274978	59346066	409.7836	0.2095	5025.253	3.366667
0.02	119.9505	273526873	57073711	404.2281	0.201074	4243.777	5.950000
0.01	118.267	268534445	62837288	397.9781	0.214077	4113.61	11.05000

ตารางที่ C.61 DMA data of sPS2 for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G'')	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	140.75	322106879	1.39E+08	459.7833	0.328776	9806.65	0.130000
50	140.6073	301300602	1.14E+08	520.1996	0.296963	8265.301	0.283333
20	140.5016	298538262	80992227	518.8107	0.263401	7132.285	0.400000
10	140.3982	294091875	69448326	513.9496	0.236145	6197.861	0.500000
5	140.2854	285104799	60987254	508.3941	0.213912	5445.42	0.633333
2	140.1646	277021250	53167266	502.8386	0.191925	4646.088	0.766667
1	140.0343	272961696	48938644	500.7552	0.179288	4290.987	0.950000
0.5	139.8924	269394866	45834079	498.6719	0.170137	4038.714	1.166667
0.2	139.685	264202656	42841381	496.5886	0.162153	3727.963	1.600000
0.1	139.52	258853973	40877874	495.1997	0.157919	3514.341	2.350000
0.05	139.6672	253142344	39110257	494.5053	0.154499	3435.523	3.433333
0.02	140.8272	243125022	37114729	495.1997	0.152657	3447.958	6.016667
0.01	141.6793	236342679	35323253	497.2831	0.149458	3427.501	11.10000

ตารางที่ C.62 DMA data of sPS2 for temperature 160 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	159.5161	278567522	56875558	521.5884	0.204172	4114.84	0.133333
50	159.4974	268786071	50083845	525.7551	0.186333	4420.147	0.233333
20	159.487	260615355	45061850	523.6718	0.166923	3633.831	0.333333
10	159.4826	258226019	41532762	523.6718	0.15712	3489.012	0.450000
5	159.4689	250610925	38923549	522.9773	0.150515	3379.584	0.566667
2	159.4623	246036760	36399258	521.5884	0.144972	3284.185	0.716667
1	159.4582	243781082	35045307	520.894	0.142893	3235.819	0.900000
0.5	159.4718	239946629	33971540	520.894	0.14158	3195.042	1.116667
0.2	159.5455	232880536	33060084	520.894	0.141962	3135.065	1.533333
0.1	159.7771	227406652	32549389	520.894	0.143133	3078.565	2.283333
0.05	160.3657	221603705	32180285	521.5884	0.145215	3019.789	3.366667
0.02	161.4603	214491384	31919654	523.6718	0.148816	2917.709	5.950000
0.01	161.3306	209880848	31977600	526.4495	0.152361	2856.769	11.03333

ตารางที่ C.63 DMA data of sPS2 for temperature 180 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	179.4777	238781128	16723697	724.3649	0.05004	3723.911	0.133333
50	179.5366	231206921	15413254	727.8371	0.046665	3986.767	0.233333
20	179.5919	227685365	14522580	727.8371	0.044648	3849.994	0.333333
10	179.6489	224663856	14179599	728.5316	0.04418	3807.708	0.450000
5	179.704	221508724	14086659	728.5316	0.044516	3736.679	0.566667
2	179.7705	217211548	14380658	728.5316	0.046344	3676.599	0.700000
1	179.8523	213832803	14777162	728.5316	0.048374	3628.592	0.883333
0.5	179.9484	210397452	15197153	728.5316	0.050561	3580.442	1.100000
0.2	180.1228	205684702	15937390	728.5316	0.054239	3515.749	1.516667
0.1	180.381	201949546	16546418	728.5316	0.057353	3464.076	2.266667
0.05	180.6789	198108060	17268154	729.226	0.061016	3413.519	3.350000
0.02	180.8428	193586010	17876310	729.9204	0.06464	3310.581	5.933333
0.01	180.6324	190778034	17598663	729.9204	0.064573	3288.044	11.01667

ตารางที่ C.64 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 60 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E''(G'')	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	µm		mN	min
100	61.7138	2168642201	65123872	77.14684	0.055555	6200	0.133333
50	61.69991	2159050722	64567509	82.70236	0.055325	5945.729	0.233333
20	61.68294	2126173781	63000773	84.09124	0.054817	5932.133	0.350000
10	61.66164	2108383184	62644423	84.78568	0.055229	5932.133	0.466667
5	61.63356	2097443733	62271172	84.78568	0.055722	5932.133	0.566667
2	61.61504	2076040861	63485660	85.48012	0.057969	5932.133	0.716667
1	61.57183	2054940563	63714831	85.48012	0.059086	5932.133	0.900000
0.5	61.51567	2043780653	64634306	86.17456	0.060889	5932.133	1.116667
0.2	61.39006	2031489910	65690738	86.17456	0.063247	5932.133	1.533333
0.1	61.13823	2010836309	67753103	86.869	0.06629	5932.133	2.283333
0.05	60.7537	2000093934	69332300	87.56344	0.068956	5932.133	3.366667
0.02	59.52016	2026787382	71499271	88.25788	0.072408	5932.133	5.950000
0.01	56.98521	2015918267	66630022	88.95232	0.067509	5932.133	11.03333

ตารางที่ C.65 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 65 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	65.92203	2020914368	61200495	96.59116	0.055021	7738.775	0.133333
50	65.85137	1986510542	66807378	111.1744	0.060202	7848.938	0.283333
20	65.81096	1951176292	65583537	111.1744	0.059904	7399.854	0.400000
10	65.76468	1934668688	64699219	111.1744	0.05995	7314.645	0.500000
5	65.7184	1926807458	64812917	111.1744	0.060982	7231.104	0.616667
2	65.66749	1908281208	65459440	111.1744	0.062932	7115.243	0.766667
1	65.59468	1860032521	65983247	111.1744	0.064465	7021.73	0.950000
0.5	65.49503	1831205361	66673928	111.1744	0.066237	6934.815	1.150000
0.2	65.31608	1815769963	67659475	111.1744	0.068743	6815.752	1.566667
0.1	64.95417	1760645635	68820764	111.1744	0.071067	6723.604	2.316667
0.05	64.38062	1721248039	71261801	111.1744	0.074681	6636.604	3.400000
0.02	62.93423	1652387010	70589214	111.1744	0.075348	6549.897	5.983333
0.01	61.71009	1604052754	69787079	111.1744	0.074678	6558.659	11.06667

ตารางที่ C.66 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 70.71 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	72.06889	1831979333	65731962	116.7299	0.061076	7080.453	0.133333
50	72.02531	1826553025	67970486	118.8132	0.063101	7248.469	0.233333
20	71.97498	1795548756	67558403	120.2021	0.063636	7400.099	0.350000
10	71.93078	1735879147	67490234	120.2021	0.06463	7314.49	0.450000
5	71.87708	1702387010	68345911	120.8966	0.066571	7220.961	0.566667
2	71.81969	1680080154	69025807	120.8966	0.068911	7094.653	0.716667
1	71.7227	1649684836	69561602	120.8966	0.070799	7000.518	0.900000
0.5	71.59749	1593141966	70353737	120.8966	0.073035	6906.685	1.100000
0.2	71.37806	1562187899	71795208	120.8966	0.07659	6783.207	1.516667
0.1	70.93858	1484583137	73217413	121.591	0.079724	6689.724	2.266667
0.05	70.23486	1402199899	76440920	121.591	0.084895	6609.764	3.350000
0.02	68.45791	1191242008	76180877	122.2854	0.086763	6524.745	5.933333
0.01	67.25159	1042317429	76073108	122.2854	0.087001	6472.134	11.01667



ตารางที่ C.67 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 85 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	86.13285	1430384265	1.76E+08	-1041.6	0.196064	7463.163	0.133333
50	86.16291	1261827535	1.54E+08	-1032.57	0.17324	7577.371	0.233333
20	86.18254	1172195366	1.51E+08	-1029.1	0.171579	7565.739	0.333333
10	86.20647	1061695557	1.48E+08	-1027.01	0.171192	7377.884	0.450000
5	86.23131	1000000000	1.48E+08	-1025.62	0.173926	7552.187	0.566667
2	86.24848	959400632	1.48E+08	-1024.23	0.179535	7479.226	0.716667
1	86.27179	933254301	1.49E+08	-1022.85	0.184387	7420.018	0.900000
0.5	86.28805	893305484	1.49E+08	-1021.46	0.189932	7362.896	1.116667
0.2	86.24449	837529282	1.5E+08	-1020.76	0.199354	7266.386	1.533333
0.1	86.15463	765596607	1.51E+08	-1019.37	0.206905	7180.866	2.300000
0.05	85.84105	717794291	1.52E+08	-1017.29	0.215893	7106.901	3.383333
0.02	84.30402	673795750	1.52E+08	-1015.9	0.225126	6780.962	5.966667
0.01	87.88937	591221375	1.38E+08	-1013.82	0.234127	6914.046	11.05000

ตารางที่ C.68 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 100 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	99.79521	699841996	1.96E+08	-1004.1	0.320168	6563.106	0.133333
50	99.79736	644169266	1.71E+08	-986.735	0.283733	6622.348	0.233333
20	99.79981	608135001	1.64E+08	-979.096	0.283408	6591.178	0.333333
10	99.80503	555303750	1.59E+08	-974.235	0.28587	6637.148	0.450000
5	99.80625	531476500	1.53E+08	-970.763	0.288701	6530.714	0.566667
2	99.80227	496856156	1.47E+08	-968.68	0.296145	6457.583	0.716667
1	99.80227	470539844	1.42E+08	-965.902	0.30225	6467.85	0.900000
0.5	99.813	440974563	1.36E+08	-965.208	0.309341	6073.717	1.116667
0.2	99.80043	407086375	1.29E+08	-965.208	0.315812	5886.209	1.533333
0.1	99.80074	367282300	1.22E+08	-964.513	0.317781	5734.304	2.283333
0.05	99.75105	336511569	1.15E+08	-963.124	0.319626	5567.592	3.366667
0.02	99.72068	299226464	1.07E+08	-961.735	0.322343	5410.458	5.950000
0.01	101.9079	271019163	98737094	-961.735	0.322339	4925.402	11.03333

ตารางที่ C.69 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 120 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	119.053	363915036	1.54E+08	-949.235	0.388934	5311.709	0.133333
50	119.0811	332659553	1.32E+08	-929.097	0.349528	5249.455	0.233333
20	119.1052	311171634	1.18E+08	-924.236	0.339806	5087.215	0.350000
10	119.129	301995172	1.08E+08	-923.541	0.334777	4904.956	0.450000
5	119.1567	290402265	1E+08	-926.319	0.331766	4413.234	0.566667
2	119.2006	274728906	87812797	-929.791	0.319634	4168.966	0.716667
1	119.2592	256292484	78985273	-931.874	0.308184	3982.856	0.900000
0.5	119.3376	240373094	70833055	-933.263	0.29468	3902.689	1.116667
0.2	119.495	222820969	61869277	-935.347	0.277664	3652.35	1.533333
0.1	119.8159	210641344	55076836	-936.736	0.261472	3536.18	2.283333
0.05	120.26	200282703	49118809	-938.124	0.245247	3356.29	3.383333
0.02	121.0174	189646766	42852117	-939.513	0.225958	3125.537	5.966667
0.01	120.1088	190563953	40334617	-942.291	0.211659	2809.483	11.05000

ตารางที่ C.70 DMA data of sPS2 blended with PIP for temperature 140 °C

Freq.	Temp.	E'(G')	E"(G")	dL	tanD	Ft	Time
Hz	°C	Pa	Pa	μm		mN	min
100	139.5334	252348077	78100539	-936.041	0.318765	3706.336	0.133333
50	139.5275	234963282	63053121	-924.93	0.282346	3490.638	0.233333
20	139.5334	222711188	53833984	-925.625	0.241721	3213.196	0.350000
10	139.5322	218358813	47442109	-929.097	0.217267	2887.849	0.450000
5	139.5163	211965984	42166277	-931.874	0.198929	2732.691	0.566667
2	139.5013	205495609	37113352	-935.347	0.180604	2462.215	0.716667
1	139.5028	200793641	34132441	-937.43	0.169988	2363.315	0.900000
0.5	139.5166	196695375	31850809	-938.819	0.16193	2246.708	1.116667
0.2	139.575	191469234	29963607	-940.902	0.156493	2096.015	1.533333
0.1	139.7968	187747000	28351520	-940.902	0.151009	2063.795	2.283333
0.05	140.1898	184183453	27307305	-941.597	0.148261	1972.126	3.383333
0.02	141.0559	179299172	26312359	-942.291	0.146751	1878.211	5.966667
0.01	139.7562	177326750	26617379	-942.291	0.150104	1863.242	11.05000