

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและวิจารณ์ของการศึกษาระบบพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต 3 ระบบ คือ HDPE/TiO₂, PP/TiO₂ และ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต และการศึกษาผลสารเสริมสภาพเข้ากันได้ ในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตของ HDPE/TiO₂ และ PP/ZnO

4.1 การศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO₂

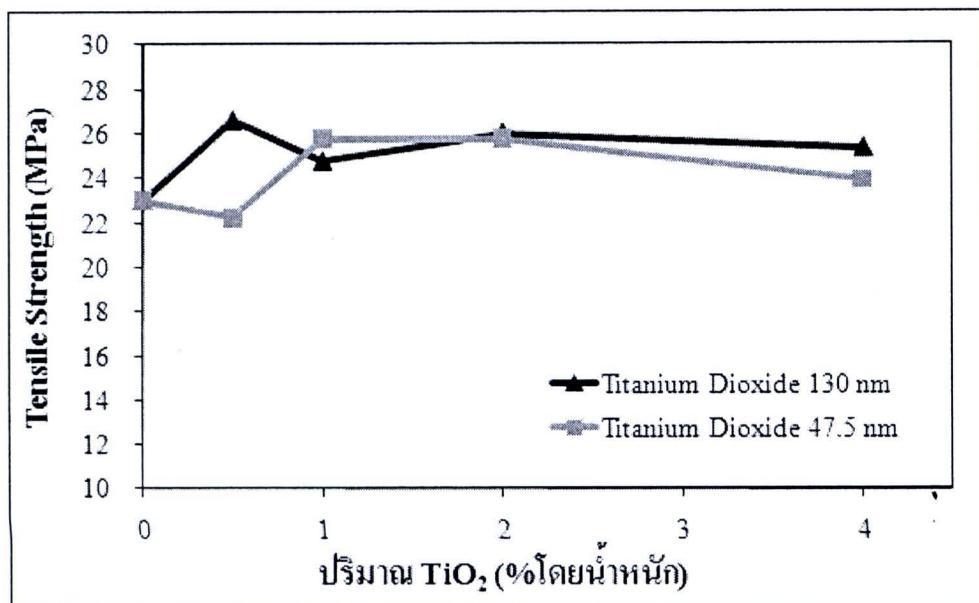
4.1.1 สมบัติทางกล

ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบโครงสร้างและสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นที่ทราบกันว่า สมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตนั้นจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างของพอลิเมอร์ ลักษณะการผสมเข้ากันได้ของพอลิเมอร์ ชนิดและสมบัติต่างๆ ของสารที่ใช้ผสม และเทคนิคการผสม เป็นต้น ดังนั้นการศึกษสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะได้เลือกใช้สารประกอบเพื่อปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ได้อย่างเหมาะสม

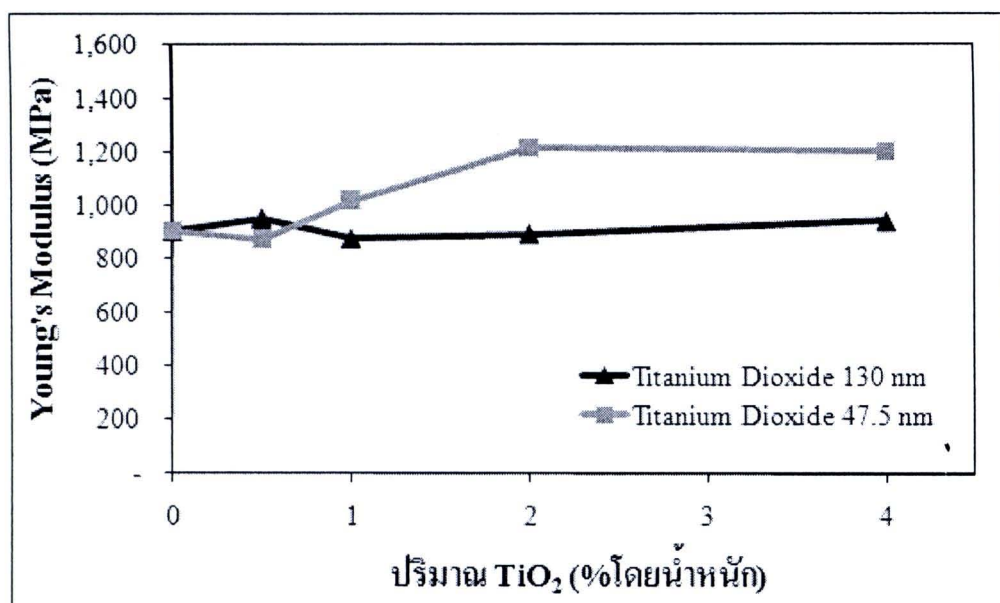
4.1.1.1 การทดสอบแรงดึง

จากการเปรียบเทียบขนาดของอนุภาค TiO₂ ที่ใช้เติมลงในพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด พบว่า ค่า tensile strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมอนุภาค TiO₂ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งสาเหตุที่ค่า tensile strength มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเติม TiO₂ ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อนุภาค TiO₂ จะเกิดการแทรกภายในเนื้อพอลิเมอร์ HDPE ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถรับแรงดึงได้เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคพบว่า เมื่อเติม TiO₂ ขนาด 47.5 และ 130 nm ค่า tensile strength จะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน

รูปที่ 4.2 แสดงค่า Young's modulus ของการทดสอบชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดพบว่า เมื่อเติมอนุภาค TiO₂ ทั้งที่มีขนาด 47.5 nm แนวโน้มของค่า Young's Modulus นั้นจะมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของ TiO₂ ขนาด 47.5 nm ที่ผสม ในขณะที่เมื่อผสมด้วย TiO₂ ขนาด 130 nm ค่า Young's modulus ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และเมื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาค TiO₂ ที่เติมลงไปพบว่า เมื่อเติมอนุภาค TiO₂ ที่มีขนาด 47.5 nm จะมีค่า Young's Modulus สูงกว่าที่เติมอนุภาค TiO₂ ขนาด 130 nm เนื่องจากอนุภาค TiO₂ ขนาด 47.5 nm ที่ถูกเติมลงในเนื้อพอลิเมอร์นั้นช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับพอลิเมอร์ HDPE



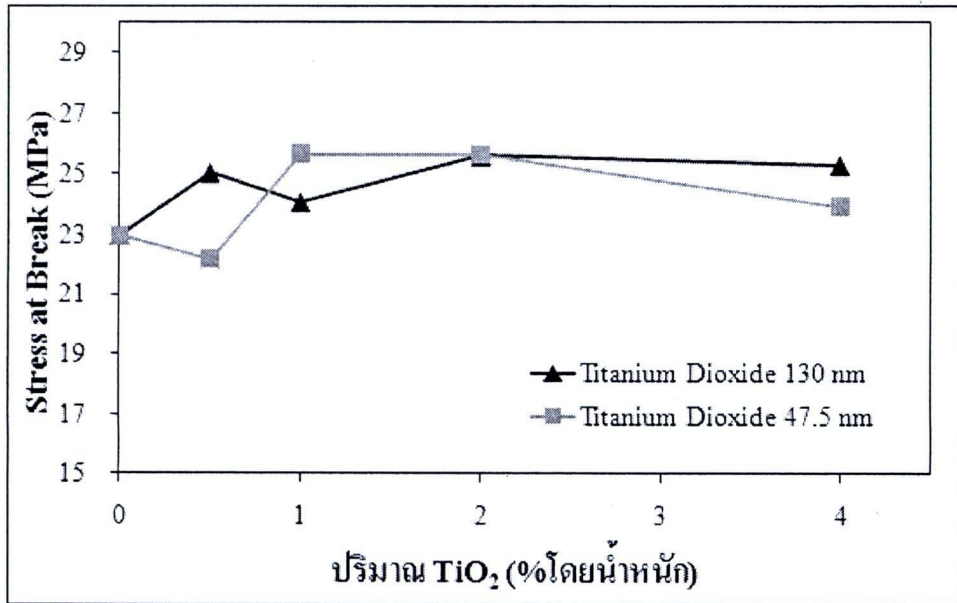
รูปที่ 4.1 Tensile strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.2 Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ

รูปที่ 4.3 แสดงค่า stress at break ของการทดสอบชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตซึ่งขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด พบว่า ค่า stress at break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเติมอนุภาค TiO_2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสาเหตุที่ค่า stress at break มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น อนุภาค TiO_2 จะเกิดการแทรกภายในเนื้อพอลิเมอร์ HDPE ส่งผลให้ชิ้นงานสามารถรับแรงได้

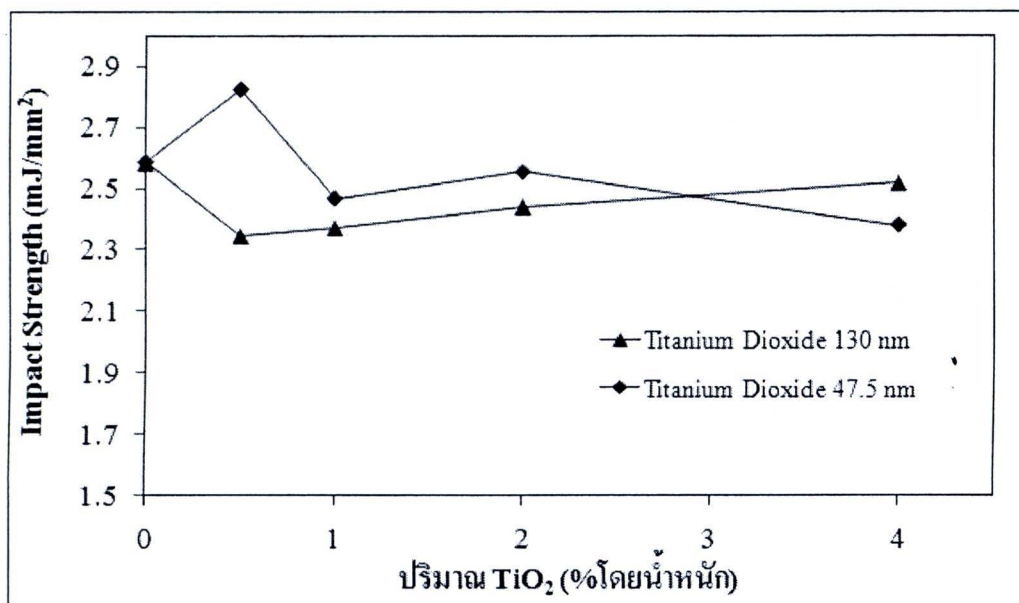
เพิ่มขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาค พบว่า เมื่อเติม TiO_2 ขนาด 47.5 และ 130 nm ค่า stress at break จะเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.3 Stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.1.1.2 การทดสอบแรงกระแทก

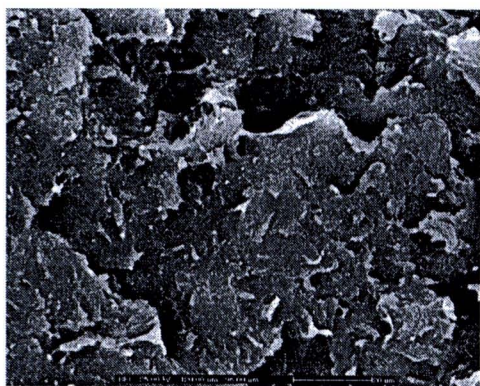
จากการทดลองพบว่าเมื่อเติมอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm ลงไปในเนื้อ HDPE ในปริมาณเล็กน้อย จะส่งผลให้ค่า impact strength มีค่าสูง แต่เมื่อปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นค่า impact strength จะลดลง ในขณะที่ผสม HDPE ด้วย TiO_2 ขนาด 130 nm จะทำให้ค่า impact strength มีค่าลดลงตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เนื่องจากเมื่อเติมอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm ลงไปในปริมาณน้อย จะกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นเมื่อชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตได้รับแรงกระแทกจากลูกตุ้ม จึงสามารถส่งถ่ายแรงไปยังตัวอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm ที่กระจายอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์ได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งตัวอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm จะสามารถดูดซับแรงได้มากกว่า [32] ทำให้ชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตสามารถรับแรงได้มากขึ้น แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาค TiO_2 ที่เติมเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดการเกาะกลุ่มของ TiO_2 ขนาด 47.5 nm ภายในชิ้นงาน ทำให้เมื่อได้รับแรงกระแทกจากลูกตุ้มแล้วไม่สามารถกระจายแรงได้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งส่งผลให้ชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตแตกหักได้ง่ายขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาค TiO_2 ที่เติมลงไปพบว่าเมื่อเติมอนุภาค TiO_2 ที่มีขนาด 47.5 nm จะมีค่า impact strength สูงกว่าที่เติมอนุภาค TiO_2 ขนาด 130 nm เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm ที่ถูกเติมลงในเนื้อพอลิเมอร์นั้นช่วยรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ HDPE ได้ดีกว่า



รูปที่ 4.4 Impact strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.1.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)

จากรูปที่ 4.5 แสดงลักษณะพื้นผิวรอยแตกจากการทดสอบการทดสอบแรงกระแทกของ HDPE บริสุทธิ์ ซึ่งจะเห็นว่ารอยแตกไม่เรียบมีลักษณะของความเหนียวของเนื้อพอลิเมอร์ และรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ TiO_2 ขนาด 47.5 nm มีการกระจายตัวที่ดีพอสมควร แต่อนุภาค TiO_2 บางส่วนจะเกิดการรวมกลุ่มเป็นก้อนฝังตัวอยู่ในเนื้อพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต ซึ่งกลุ่มก้อน TiO_2 จะมีขนาดใหญ่และจำนวนมากขึ้น ตามปริมาณของอนุภาค TiO_2 ที่เติมมากขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นเนื่องจาก เมื่อเติม TiO_2 ในปริมาณที่มาก อนุภาค TiO_2 มีโอกาสที่จะจับตัวกันเป็นก้อนได้ง่ายขึ้น เนื่องจากอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm จะมีแรงดึงดูดค่อนข้างสูงทำให้การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 เป็นไปได้ยาก



รูปที่ 4.5 ภาพ SEM ของ HDPE บริสุทธิ์

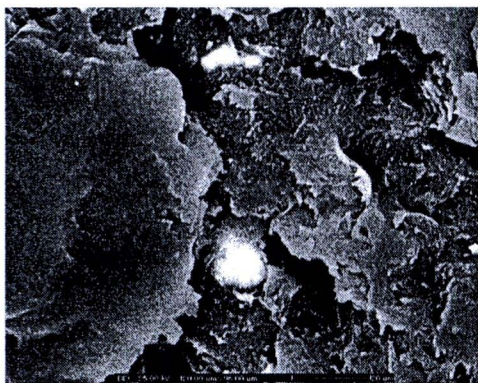
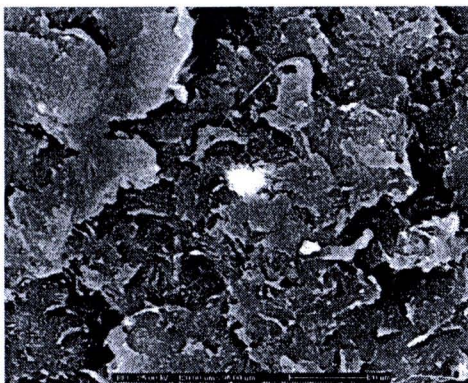
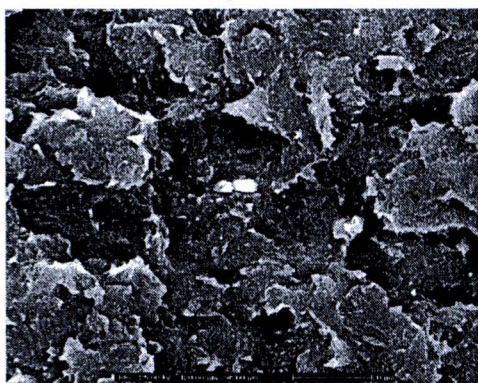
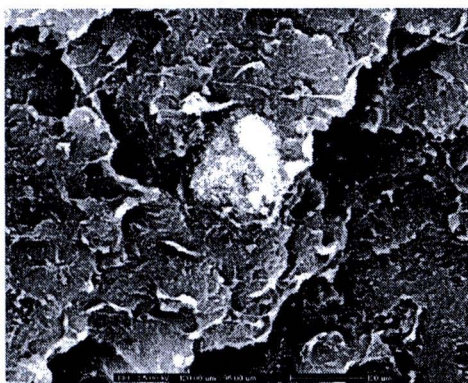
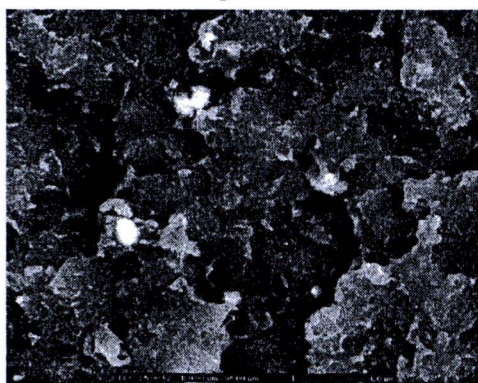
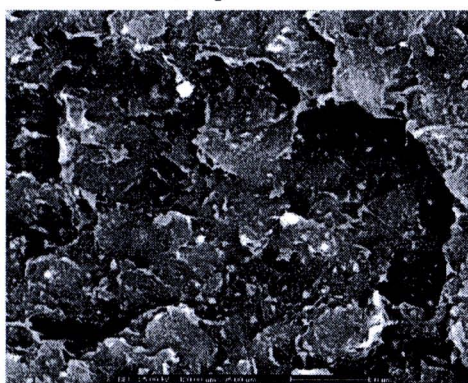
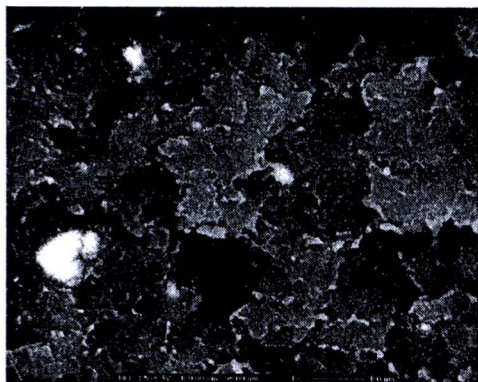
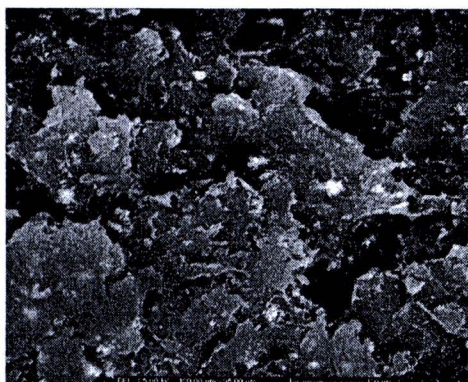


จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ TiO_2 ขนาด 130 nm จะมีการกระจายตัวของอนุภาคได้ดี แต่จะเกิดกลุ่มก้อนของอนุภาค TiO_2 ในจำนวนมากขึ้นเล็กน้อยตามของปริมาณของอนุภาค TiO_2 ที่เติมมากขึ้น จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของ TiO_2 ขนาด 130 nm ที่ขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด จะมีการกระจายตัวของอนุภาคได้ดีกว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบกับ การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากอนุภาค TiO_2 ขนาด 130 nm มีแรงดึงดูดกันระหว่างอนุภาคน้อย เพราะพื้นที่ต่อน้ำหนักของ TiO_2 มีค่าน้อยกว่า ส่งผลให้เกิดการรวมกลุ่มกันได้ยากกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของ TiO_2 พบว่า การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ขนาด 130 nm เกิดการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 มากกว่า

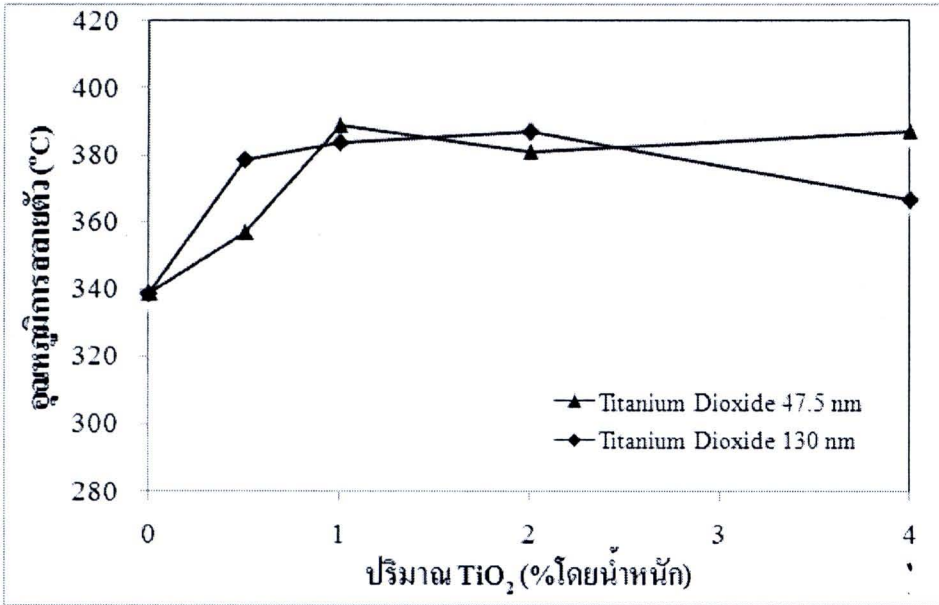
4.1.3 สมบัติทางความร้อน

4.1.3.1 อุณหภูมิการสลายตัว

เพื่อศึกษาความทนต่อความร้อนของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 โดยใช้การวิเคราะห์ผลจาก TGA ซึ่งเป็นการหาค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่น้ำหนักของตัวอย่างหายไป 5% ของน้ำหนักตัวอย่างพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตเริ่มต้น ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.7 ซึ่งพบว่าอุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE/ TiO_2 นาโนคอมโพสิตมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงความเข้มข้น 0.5-1.0% โดยน้ำหนัก หลังจากนั้นจะเริ่มไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเทียบกับ HDPE บริสุทธิ์ อุณหภูมิการสลายตัวของ HDPE มีค่าสูงขึ้นเมื่อผสมกับ TiO_2 แสดงว่า HDPE มีความเสถียรภาพทางความร้อนสูงขึ้นหลังจากเติม TiO_2 เนื่องจาก TiO_2 เป็นอนุภาคที่มีความแข็งแรงและมีจุดหลอมเหลวสูงจึงทำให้ช่วยรับความร้อนจาก HDPE ได้ทำให้ HDPE สามารถทนความร้อนได้มากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิการสลายตัวระหว่าง TiO_2 ขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm พบว่าอุณหภูมิการสลายตัวมีค่าสูงแตกต่างกันไม่มากนัก

ก. 0.5% TiO_2 47.5 nm/HDPEข. 0.5% TiO_2 130 nm/HDPEค. 1.0% TiO_2 47.5 nm/HDPEง. 1.0% TiO_2 130 nm/HDPEจ. 2.0% TiO_2 47.5 nm/HDPEฉ. 2.0% TiO_2 130 nm/HDPEช. 4.0% TiO_2 47.5 nm/HDPEซ. 4.0% TiO_2 130 nm/HDPE

รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ขนาด 47.5 nm และ 130 nm ภายในชิ้นงานพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิต



รูปที่ 4.7 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่มีขนาดอนุภาค 47.5 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2 การศึกษาผลของสภาวะการผสมที่มีต่อสมบัติของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต

4.2.1 ผลของขนาดอนุภาคของ TiO_2

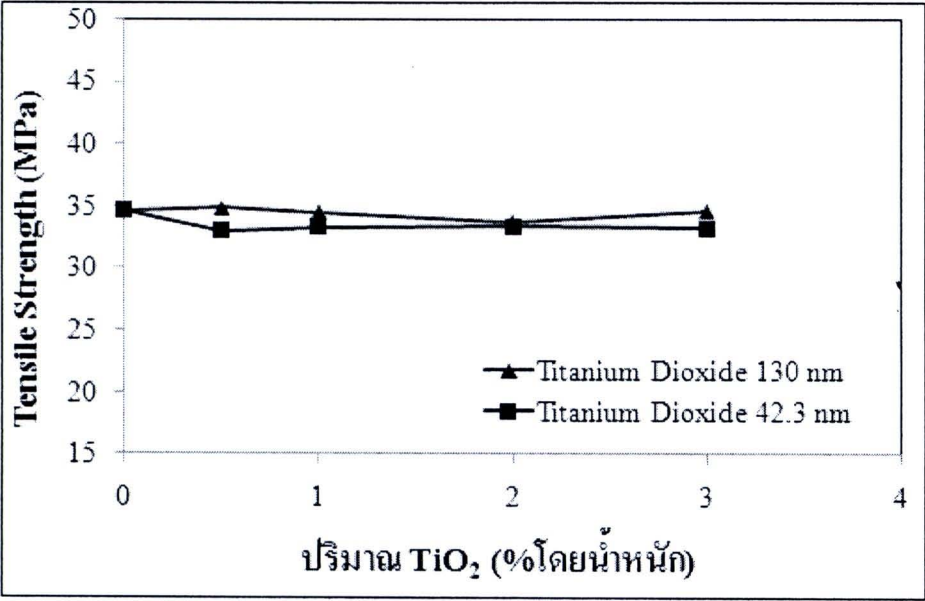
4.2.1.1 การทดสอบแรงดึง

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength ของนาโนคอมโพสิต PP และ TiO_2 ขนาดอนุภาค 42.3 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นของ TiO_2 ต่างๆ พบว่า ค่าของ tensile strength ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 ขนาดอนุภาค 42.3 nm และ 130 nm มีแตกต่างกันน้อย และค่า tensile strength มีค่าลดลงเล็กน้อยตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น TiO_2 ไม่สามารถปรับปรุงค่า tensile strength ของ PP ที่เตรียมโดยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด ซึ่งเป็นที่ทราบกันว่า ค่า tensile strength ของคอมโพสิตปกติก็จะมีค่าลดลงตามปริมาณของสารเติมแต่ง ซึ่งในการศึกษาคือ TiO_2 ที่ใช้เติมลงใน PP โดยมีความเปลี่ยนแปลงตาม power law ในกรณีที่พันธะระหว่างสารเติมแต่งและพอลิเมอร์ไม่แข็งแรงหรือไม่ดี ซึ่งจะหมายถึงว่า ความแข็งแรงของนาโนคอมโพสิตไม่สามารถมีค่ามากกว่าพอลิเมอร์บริสุทธิ์ที่ยังไม่ผสมสารเติมแต่งซึ่งในที่นี้คือ TiO_2 เนื่องจากอนุภาคสารเติมแต่งไม่ได้ช่วยรับแรงจากแรงภายนอก [33] ซึ่งเห็นได้จากการผสม TiO_2 ทำให้ค่า tensile strength ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิตลดลง

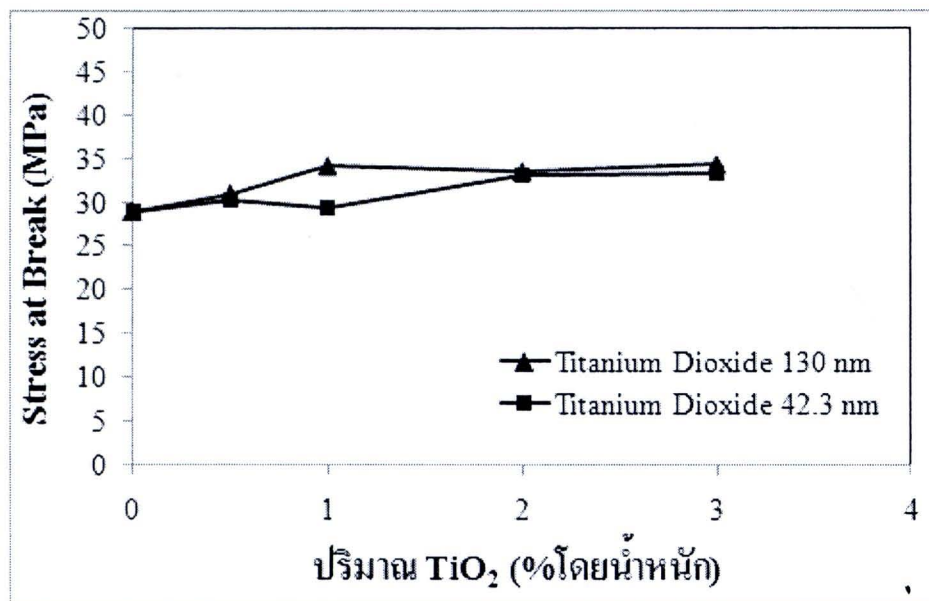
รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า stress at break ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 ขนาดอนุภาค 42.3 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นของ TiO_2 ต่างๆ พบว่า ค่า stress at break ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้น และนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm มีค่า stress at break สูงกว่า นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 42.3 nm

รูปที่ 4.10 แสดงค่า Young's modulus ของ PP/TiO₂ นาโนคอมโพสิต พบว่า ค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นเมื่อผสม TiO₂ 130 nm ในปริมาณน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สัมผัสระหว่างเฟส (interfacial area) ของนาโนคอมโพสิตที่มีสารเติมแต่ง ทำให้ช่วยเสริมประสิทธิภาพการถ่ายเทความเค้นภายในช่วงความเครียดที่มีค่าน้อย [34] ยิ่งกว่านั้น อาจมีสาเหตุมาจากลักษณะเปราะของสารเติมแต่ง ลักษณะการเพิ่มขึ้นของค่า Young's modulus ตามปริมาณของสารเติมแต่งที่สูงขึ้นที่เกิดขึ้นในนาโนคอมโพสิต ยังพบได้จากการศึกษานาโนคอมโพสิตของ PP และสารเติมแต่งชนิดอื่น [35-38]

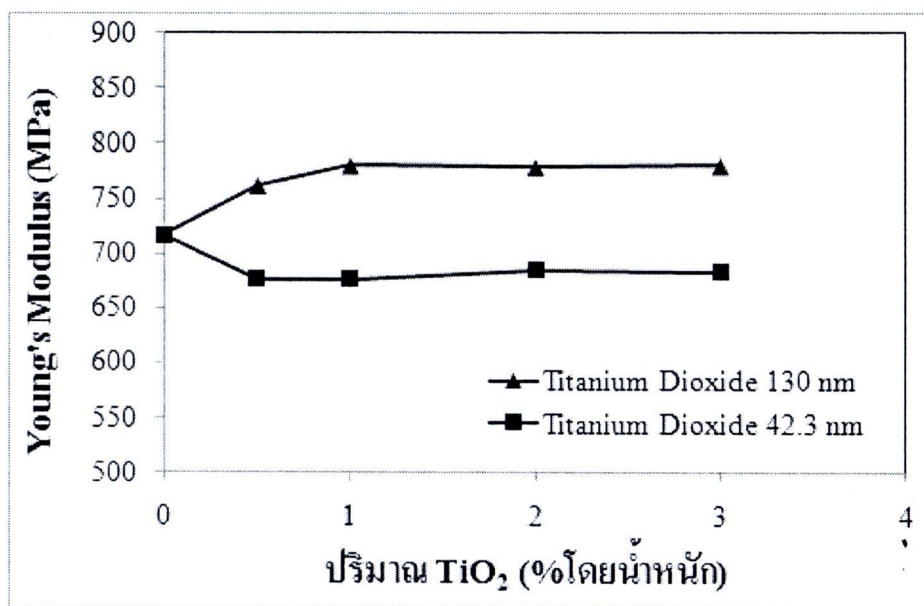
นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO₂ 130 nm มีค่า stress at break และ Young's modulus สูงกว่า นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO₂ 42.3 nm ซึ่งอาจเกิดจากความแตกต่างกันของความเป็นขั้วของสารเติมแต่งและเนื้อพอลิเมอร์ เนื่องจาก TiO₂ 42.3 nm มีพื้นที่ผิวมากกว่า TiO₂ 130 nm ซึ่งจะทำให้เกิดการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO₂ 42.3 nm และทำให้การยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค TiO₂ 42.3 nm และเนื้อพอลิเมอร์ไม่ดี ส่งผลให้ค่า Young's modulus ลดลง จากผลข้างต้นพบว่า TiO₂ 130 nm สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้ดีกว่า TiO₂ 42.3 nm ดังนั้นจึงเลือก TiO₂ 130 nm ในการศึกษาผลของสภาวะการผสม



รูปที่ 4.8 Tensile strength ของ PP/TiO₂ นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO₂ ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.9 Stress at break ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ

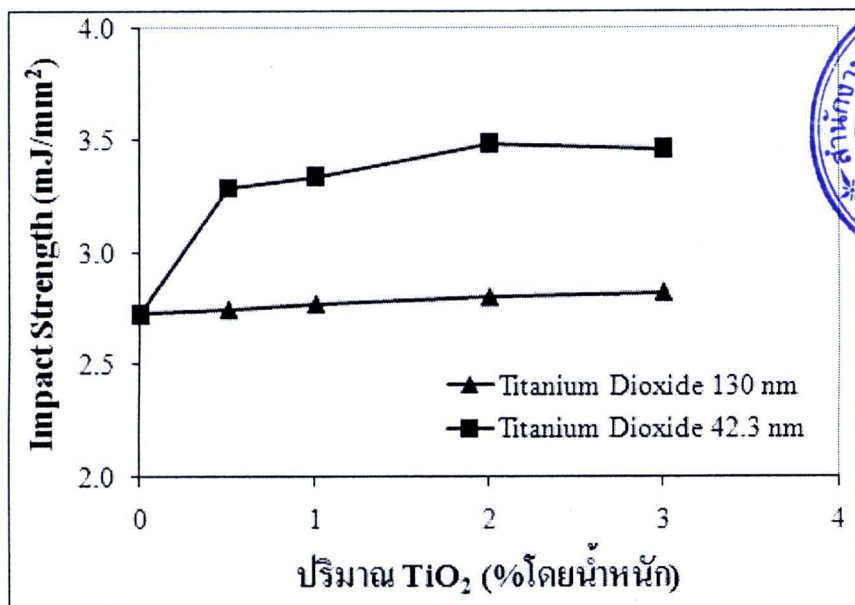


รูปที่ 4.10 Young's modulus ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.2.1.2 การทดสอบแรงกระแทก

รูปที่ 4.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า impact strength ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 ขนาดอนุภาค 42.3 nm และ 130 nm ที่ความเข้มข้นของ TiO_2 ต่างๆ พบว่า ค่า impact strength ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้น และนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ

TiO₂ 42.3 nm มีค่า impact strength สูงกว่า นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO₂ 130 nm เนื่องจาก TiO₂ 42.3 nm สามารถถ่ายเทแรงและช่วยดูดซับแรงกระแทกจากพอลิเมอร์ได้ดี [32]

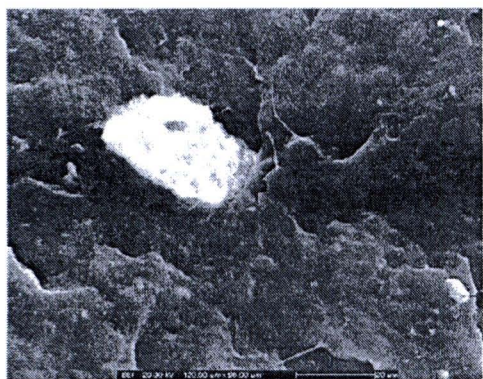


รูปที่ 4.11 Impact strength ของ PP/TiO₂ นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO₂ ขนาดอนุภาคแตกต่างกันที่ความเข้มข้นต่างๆ

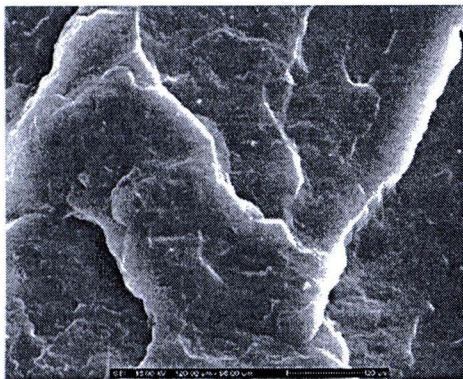
4.2.1.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)

รูปแบบโครงสร้างของนาโนคอมโพสิตจะศึกษาจากรอยแตกของตัวอย่างที่ทดสอบแรงกระแทกโดยใช้ SEM รูปที่ 4.12 แสดงภาพฝักรอยแตกจากแรงกระแทกของ PP ที่ผสม TiO₂ ความเข้มข้น 0.5, 1.0 และ 3.0% โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สังเกตพบว่า การกระจายตัวของ TiO₂ 42.3 nm ในพื้นผิวพอลิเมอร์ไม่สม่ำเสมอในลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน การกระจายตัวที่ไม่เข้าเป็นเนื้อเดียวกันนำไปสู่การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO₂ 42.3 nm ภายในเนื้อพอลิเมอร์ ยิ่งกว่านั้น การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO₂ 42.3 nm ในเนื้อพอลิเมอร์มีเพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TiO₂ 42.3 nm ที่มากขึ้น ซึ่งการกระจายตัวของ TiO₂ 42.3 nm สามารถมีอิทธิพลต่อสมบัติทางกลของ PP นาโนคอมโพสิต ผลการทดลองยังพบว่า นาโนคอมโพสิตของ PP และ TiO₂ 42.3 nm มีการเกาะกลุ่มกันมากกว่านาโนคอมโพสิตของ PP และ TiO₂ 130 nm

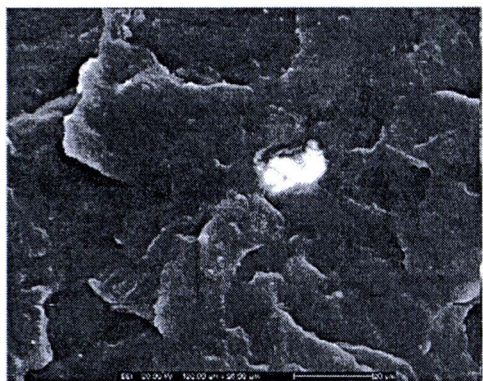
ภาพ SEM แสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวของอนุภาค TiO₂ 130 nm ในเนื้อพอลิเมอร์ค่อนข้างดี มีการเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค TiO₂ 130 nm เพียงเล็กน้อยดังแสดงในรูปที่ 4.12 ซึ่งผลการทดลองนี้สนับสนุนผลของการทดสอบแรงดึงที่พบว่า นาโนคอมโพสิตของ PP และ TiO₂ 130 nm มีค่า stress at break และ Young's modulus สูงกว่า PP บริสุทธิ์และนาโนคอมโพสิตของ PP และ TiO₂ 42.3 nm



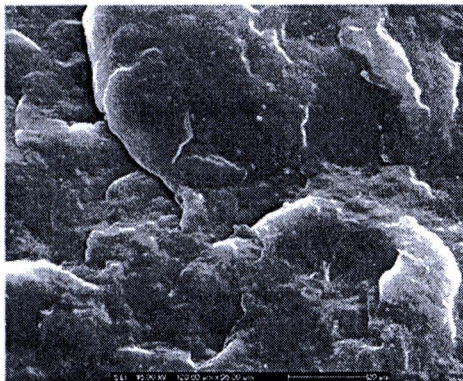
ก.



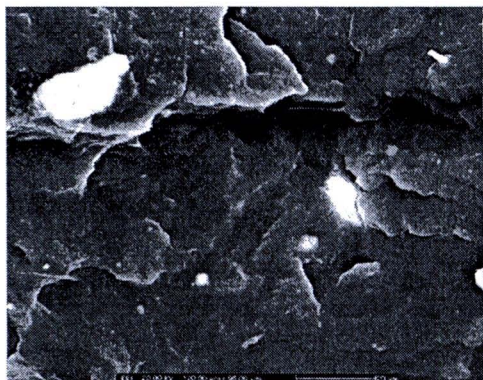
ข.



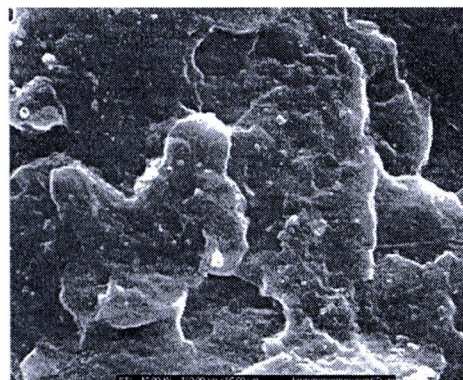
ค.



ง.



จ.



ฉ.

รูปที่ 4.12 ภาพ SEM ของ PP/TiO₂ นาโนคอมโพสิต ก. PP หลังจากผสม TiO₂ 42.3 nm 0.5% โดย น้ำหนัก, ข. PP หลังจากผสม TiO₂ 130 nm 0.5% โดยน้ำหนัก, ค. PP หลังจากผสม TiO₂ 42.3 nm 1.0% โดยน้ำหนัก, ง. PP หลังจากผสม TiO₂ 130 nm 1.0% โดยน้ำหนัก, จ. PP หลังจากผสม TiO₂ 42.3 nm 3.0% โดยน้ำหนัก และ ฉ. PP หลังจากผสม TiO₂ 130 nm 3.0% โดยน้ำหนัก

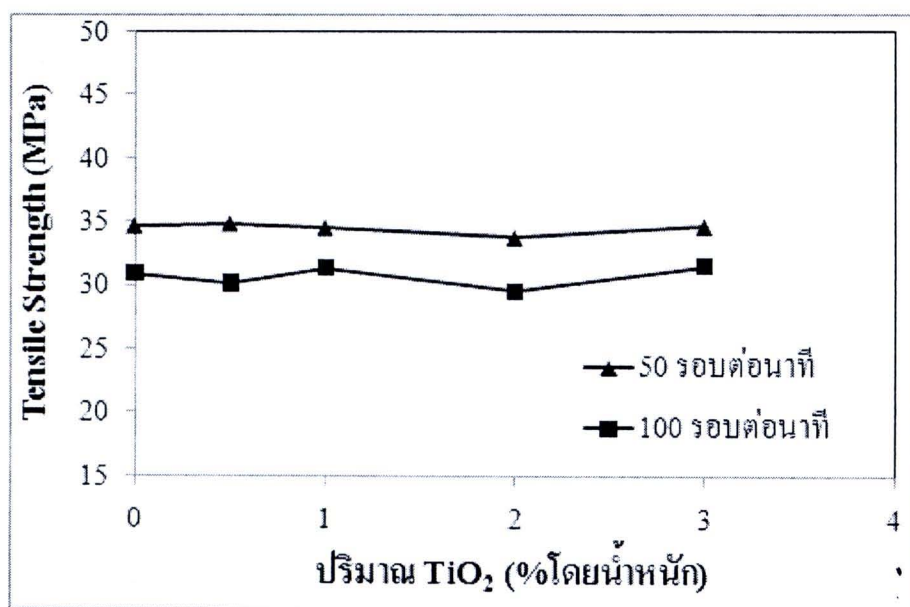
4.2.2 ผลของความเร็วของสกรู

4.2.2.1 การทดสอบแรงดึง

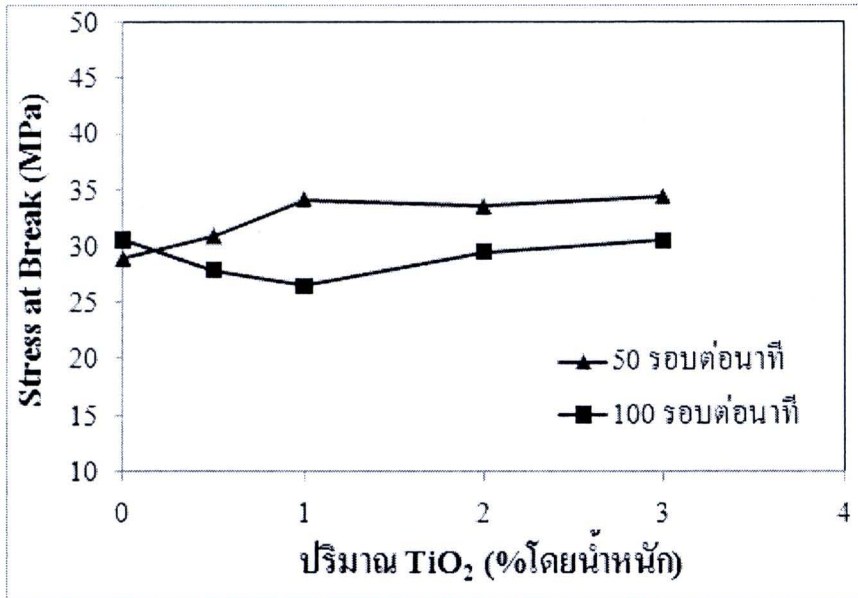
รูปที่ 4.13 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO₂ 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที พบว่า นาโนคอมโพสิตที่ผสมจากความเร็ว

ของสกรู 50 รอบต่อนาที มีค่า tensile strength สูงกว่าเมื่อผสมที่ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที ส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่า stress at break และ Young's modulus ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ที่ความเร็วของสกรูต่างๆ แสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15

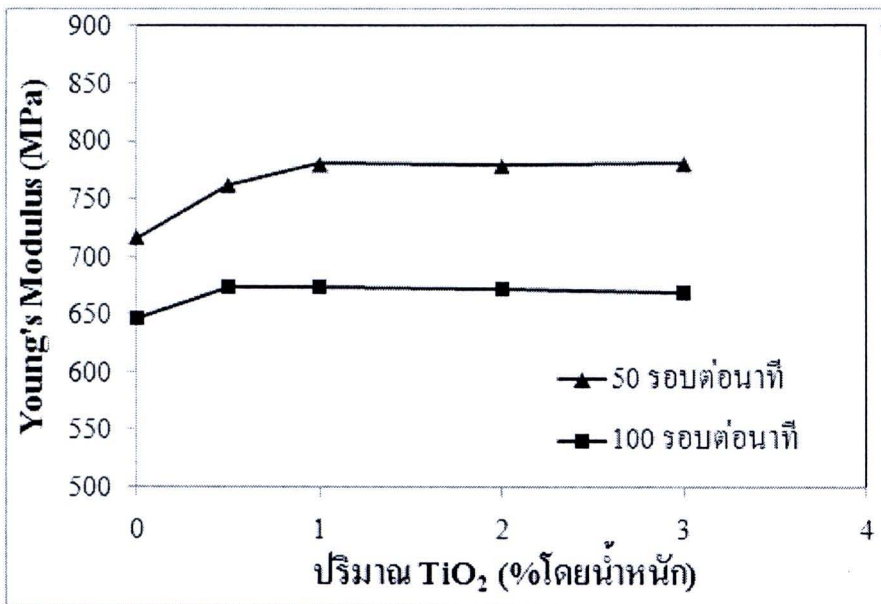
ค่า Young's modulus ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้นทุกความเร็วของสกรู และยังพบว่า นาโนคอมโพสิตของ PP และ TiO_2 130 nm ผสมที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาที มีค่า stress at break และ Young's modulus สูงกว่าเมื่อผสมที่ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.14 และ 4.15 ซึ่งผลเป็นไปตามข้อมูลของ tensile strength, Young's modulus และ stress at break ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ที่แสดงให้เห็นว่า การผสมที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาที สามารถปรับปรุงสมบัติเหล่านี้ได้ และผลนี้อาจเกิดจากการผสมที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาที ทำให้ PP และ TiO_2 130 nm มีเวลาในการผสมกันหรือเวลาผสมอยู่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนน้อยกว่าการผสมที่ความเร็วของสกรู 100 รอบต่อนาที ดังนั้นการกระจายตัวของ TiO_2 130 nm จึงเพิ่มขึ้นที่ความเร็วของสกรู 50 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.13 Tensile strength ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.14 Stress at break ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที



รูปที่ 4.15 Young's modulus ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่ความเร็วของสกรู 50 และ 100 รอบต่อนาที

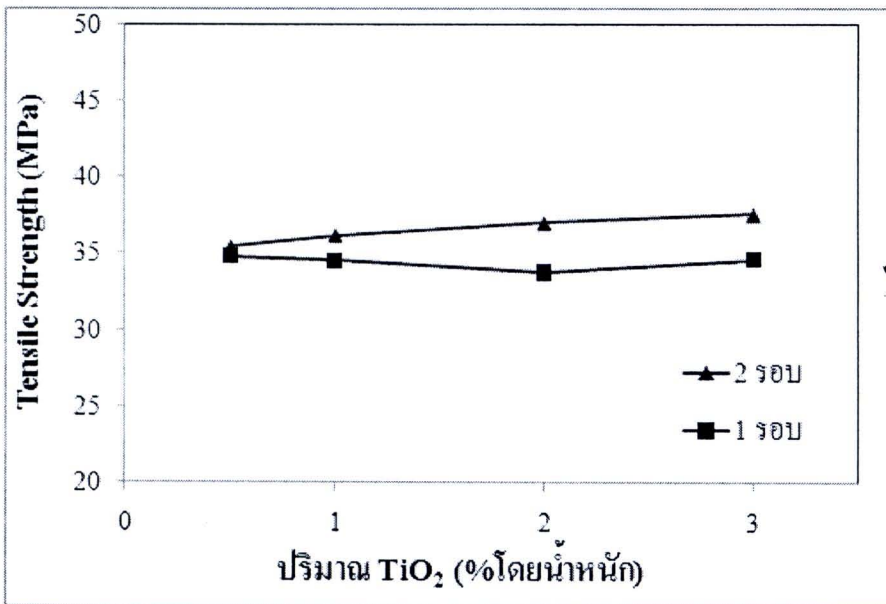
4.2.3 ผลของจำนวนรอบของการผสม

4.2.3.1 การทดสอบแรงดึง

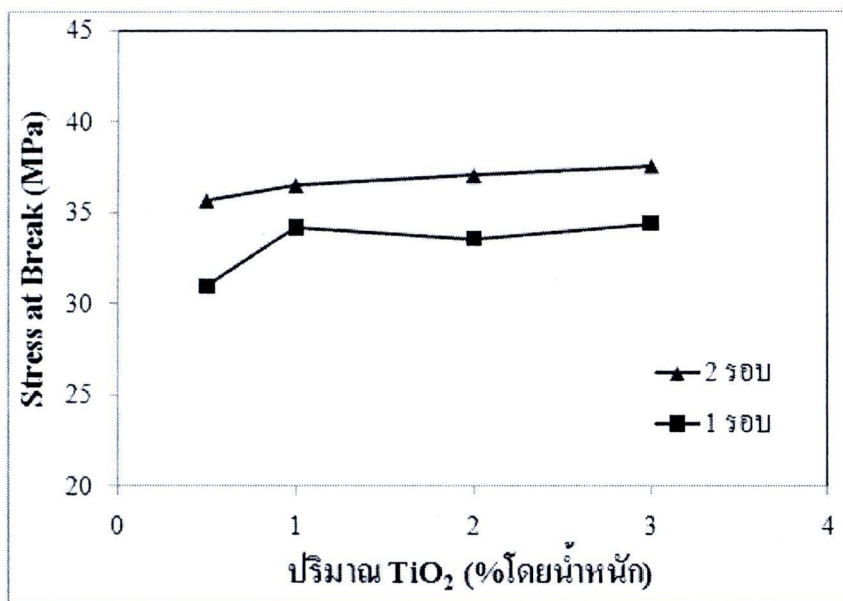
รูปที่ 4.16 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ พบว่า การเตรียมนาโนคอมโพสิตที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ มีค่า tensile strength สูงกว่าเมื่อจำนวนรอบของการผสม 1 รอบ นาโนคอมโพสิต

ของ PP และ TiO_2 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ มีค่า tensile strength สูงกว่า PP บริสุทธิ์ และค่า tensile strength มีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณ TiO_2 ที่สูงขึ้น สิ่งที่น่าสนใจที่พบคือ การผสมตัวอย่างที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ สามารถเพิ่มค่า tensile strength ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ค่า tensile strength ของนาโนคอมโพสิตยังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนตามปริมาณของ TiO_2 ที่มากขึ้นด้วย ซึ่งเป็นไปได้ว่าการผสมตัวอย่างที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบช่วยเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 130 nm ในเนื้อพอลิเมอร์ ประสิทธิภาพของการกระจายตัวของอนุภาคนาโนเป็นสิ่งสำคัญในการปรับปรุงความแข็งแรงและความเหนียว ซึ่งแสดงให้เห็นจากการที่อนุภาค TiO_2 130 nm มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในระบบนี้ [39]

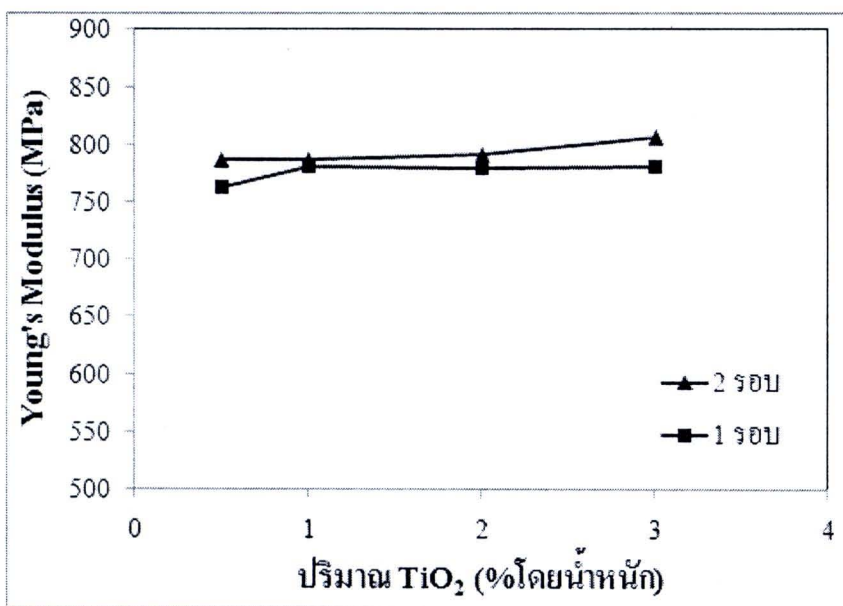
ค่า stress at break และ Young's modulus ของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ มีค่าสูงกว่าจำนวนรอบของการผสม 1 รอบ ดังแสดงในรูปที่ 4.17 และ 4.18 ซึ่งอาจเกิดจากการผสมที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ มีการผสมที่ดีกว่าการผสมที่จำนวนรอบของการผสม 1 รอบ ดังนั้นจำนวนรอบของการผสม 2 รอบ ช่วยเพิ่มการกระจายตัวของ TiO_2 130 nm



รูปที่ 4.16 Tensile strength ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ



รูปที่ 4.17 Stress at break ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ

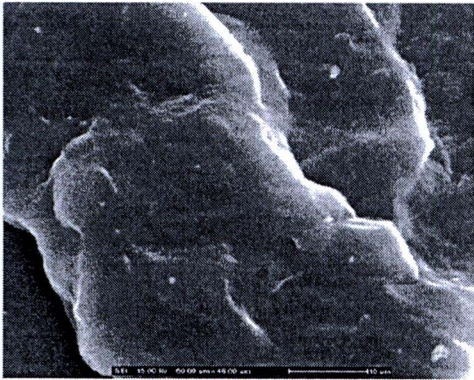


รูปที่ 4.18 Young's modulus ของ PP/ TiO_2 นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ

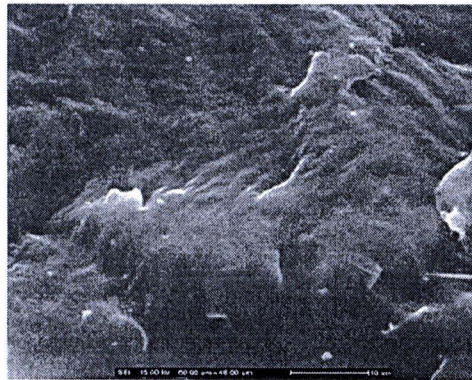
4.2.3.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)

รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบภาพพื้นผิวที่มีรอยแตกจากแรงกระทำของนาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ TiO_2 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ รูปที่ 4.19 แสดงภาพพื้นผิวรอยแตกจากแรงกระทำของ PP นาโนคอมโพสิตที่เติม TiO_2 130 nm ความเข้มข้น 0.5% โดยน้ำหนัก ที่จำนวนรอบของการผสม 1 และ 2 รอบ ตามลำดับ พบว่า นาโนคอมโพสิตซึ่งผสมที่จำนวนรอบของการ

ผสม 1 รอบ มีการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO_2 มากกว่านาโนคอมโพสิตซึ่งผสมที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ จากภาพสังเกตเห็นว่าที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 130 nm บนพื้นผิวพอลิเมอร์มีความสม่ำเสมอ ดังนั้นการผสมที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ สามารถช่วยเพิ่มการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 130 nm การเกาะกลุ่มกันของอนุภาค TiO_2 130 nm ลดลงตามจำนวนรอบของการผสมที่เพิ่มขึ้นและการกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 130 nm มีผลต่อสมบัติทางกลของ PP นาโนคอมโพสิต



ก.



ข.



รูปที่ 4.19 ภาพ SEM ของ PP หลังจากผสม TiO_2 ขนาดอนุภาค 130 nm ที่จำนวนรอบของการผสมต่างๆ ก. TiO_2 0.5% โดยน้ำหนัก ที่จำนวนรอบของการผสม 1 รอบ และ ข. TiO_2 0.5% โดยน้ำหนัก ที่จำนวนรอบของการผสม 2 รอบ

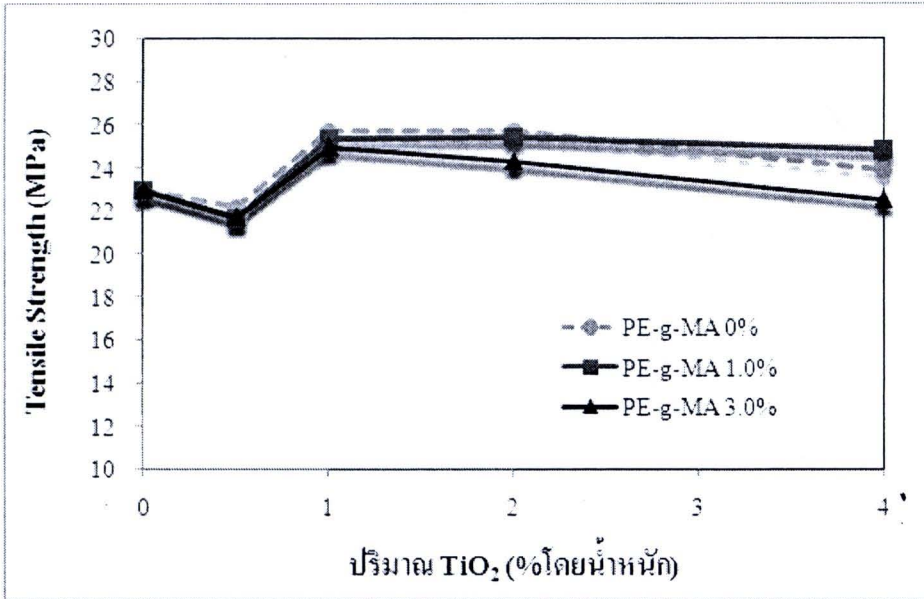
4.3 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ขนาดอนุภาค 47.5 nm

4.3.1 สมบัติทางกล

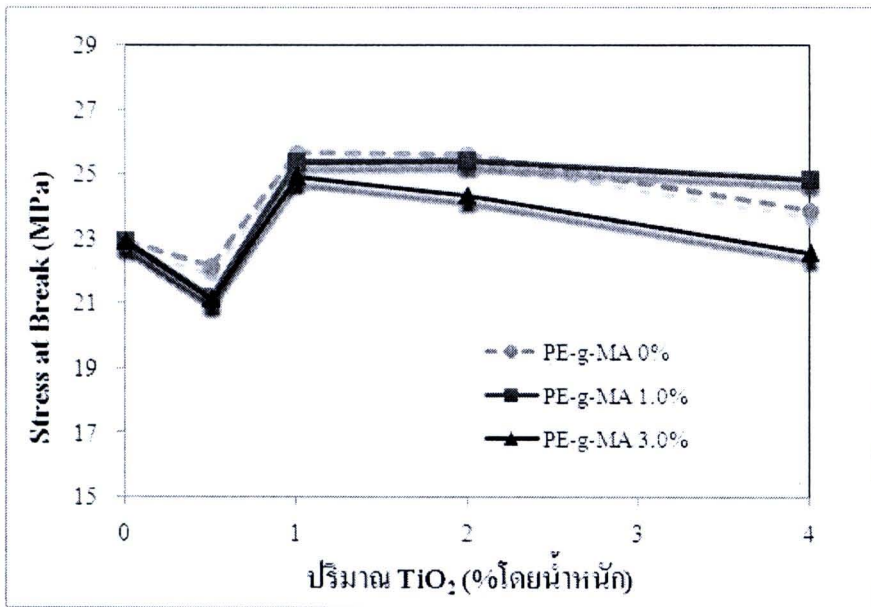
4.3.1.1 การทดสอบแรงดึง

รูปที่ 4.20-4.22 แสดงค่า tensile strength, stress at break และ Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ หลังจากการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ในปริมาณต่างๆ เพื่อช่วยในการผสม HDPE และ TiO_2 โดยจุดแรกในรูปกราฟจะเป็นค่าของ HDPE บริสุทธิ์ พบว่า ค่า Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นและค่า Young's modulus เพิ่มขึ้นเมื่อผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ความเข้มข้น 3.0% โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ความเข้มข้น 3.0% โดยน้ำหนักช่วยปรับปรุงการผสมเข้ากันได้ของ HDPE และ TiO_2 อีกทั้งช่วยการกระจายอนุภาค TiO_2 ขนาดนาโนเมตรในเนื้อ HDPE ซึ่งสามารถเห็นได้จากภาพ SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ในขณะที่ค่า tensile strength และ stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ

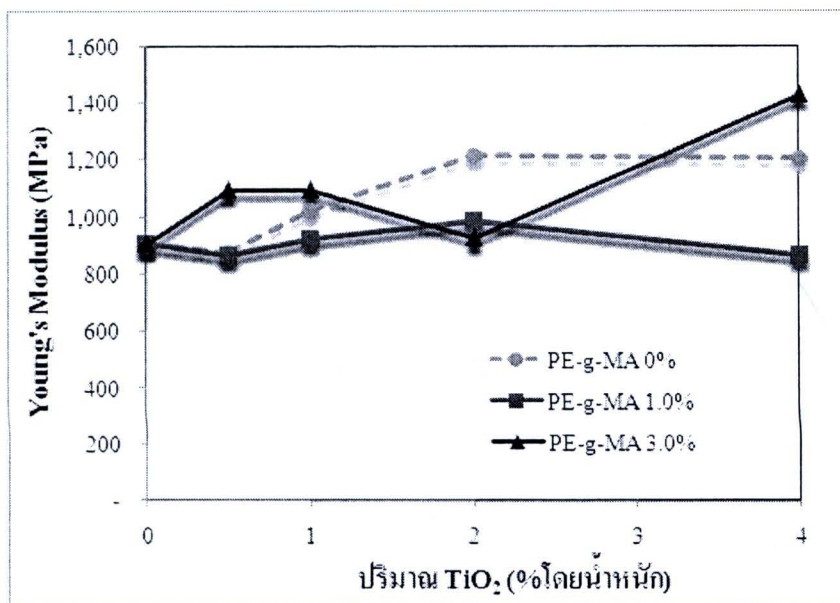
TiO_2 เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้น และการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ไม่มีผลต่อค่า tensile strength และ stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2



รูปที่ 4.20 Tensile strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA



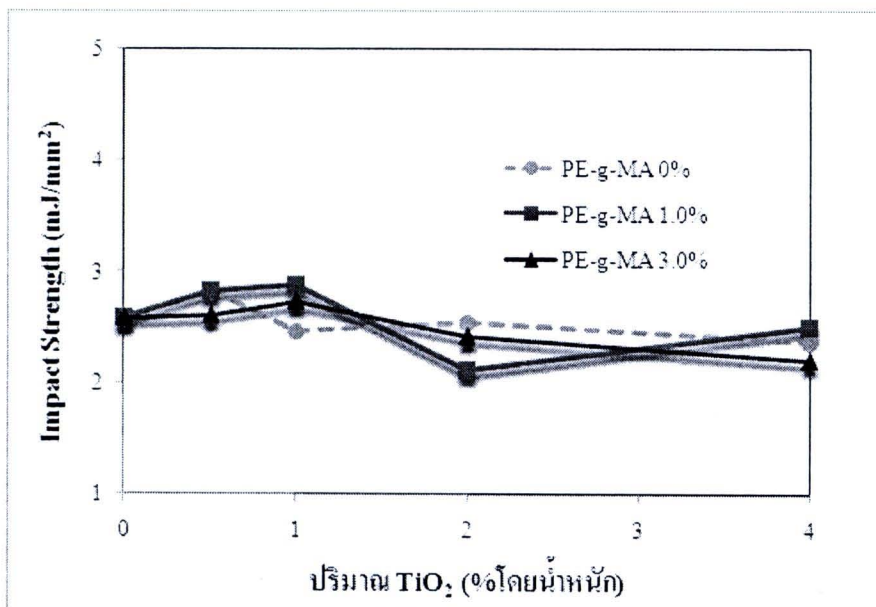
รูปที่ 4.21 Stress at break ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA



รูปที่ 4.22 Young's modulus ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA

4.3.1.2 การทดสอบแรงกระแทก

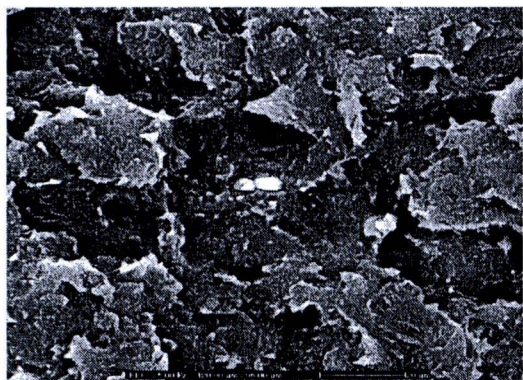
ผลการทดลองรูปที่ 4.23 แสดงค่า Charpy unnotched impact strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 หลังจากผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA พบว่า ค่า impact strength ไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผสม TiO_2 และ สารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA



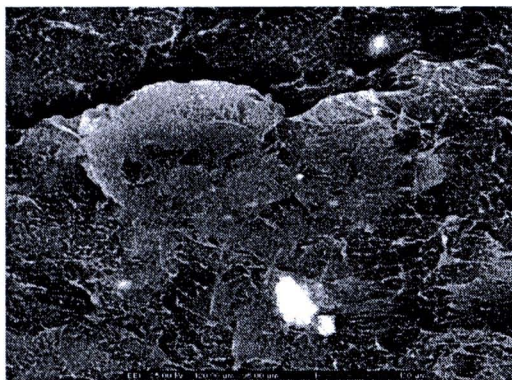
รูปที่ 4.23 Impact strength ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA

4.3.2 รูปแบบโครงสร้าง (Morphology)

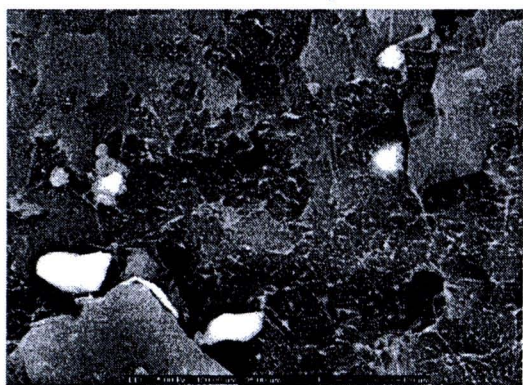
รูปที่ 4.24 แสดงภาพ SEM ซึ่งพบว่า การกระจายตัวของอนุภาค TiO_2 ในเนื้อ HDPE ที่มีสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ก่อนข้างดีและแต่ยังมีเกิดการเกาะกลุ่มของอนุภาค TiO_2 อยู่บ้าง



ก. HDPE/ TiO_2



ข. PE-g-MA 1.0% โดยน้ำหนัก



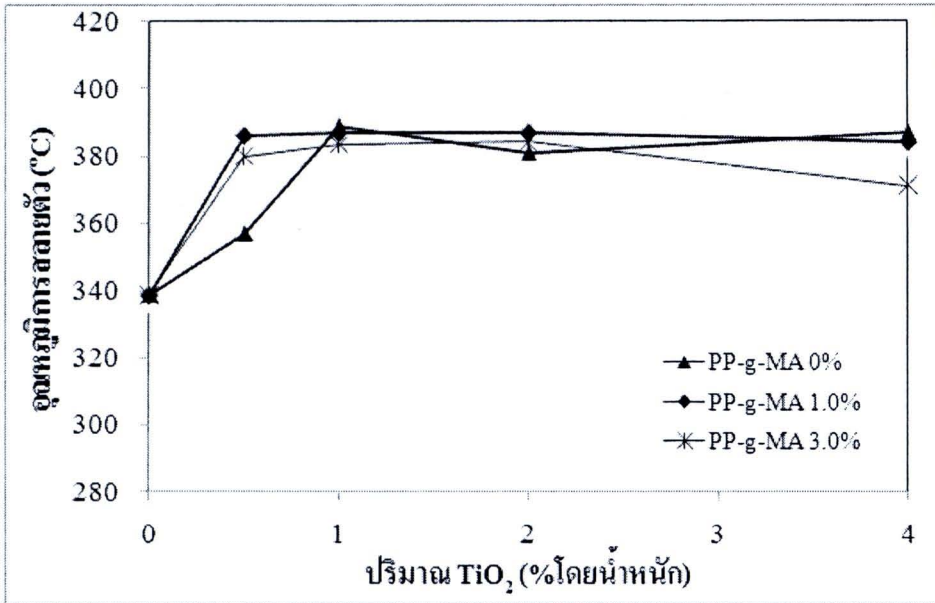
ค. PE-g-MA 3.0% โดยน้ำหนัก

รูปที่ 4.24 ภาพ SEM ของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ก่อนและหลังการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ก. HDPE/ TiO_2 ข. PE-g-MA 1.0% โดยน้ำหนัก และ ค. PE-g-MA 3.0% โดยน้ำหนัก

4.3.3 สมบัติทางความร้อน

4.3.3.1 อุณหภูมิการสลายตัว

รูปที่ 4.25 แสดงค่าอุณหภูมิการสลายตัวที่น้ำหนักหายไป 5% โดยน้ำหนักของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 หลังการผสมด้วยสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA โดยจุดแรกในรูปกราฟจะเป็นค่าของ HDPE บริสุทธิ์พบว่า ค่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 มีค่ามากกว่า HDPE บริสุทธิ์ และค่าอุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ก่อนและหลังการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ TiO_2 ที่เพิ่มขึ้นและการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA ไม่มีผลต่อค่าอุณหภูมิการสลายตัว



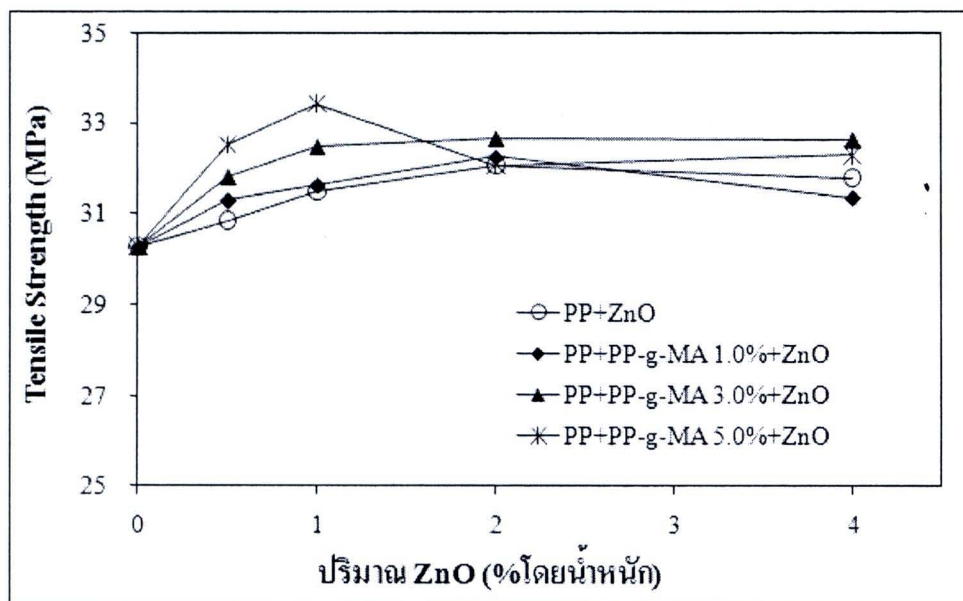
รูปที่ 4.25 อุณหภูมิการสลายตัวของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง HDPE และ TiO_2 ที่ความเข้มข้นต่างๆ เมื่อมีการผสมสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PE-g-MA

4.4 การศึกษาผลของสารเสริมสภาพเข้ากันได้ PP-g-MA ที่มีต่อสมบัติของพอลิเมอร์นาโนคอมโพสิตระหว่าง PP และ ZnO ขนาดอนุภาค 71 nm

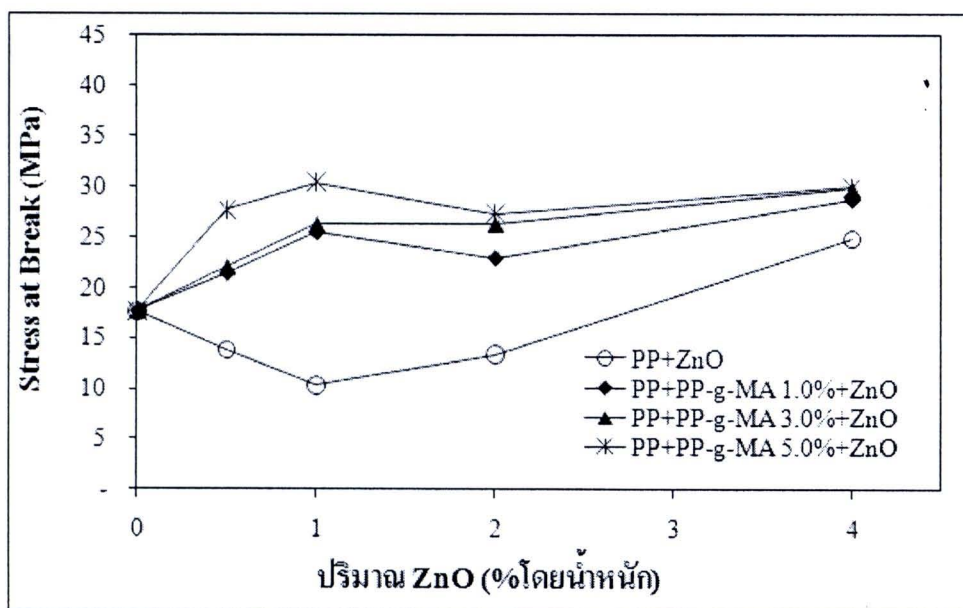
4.4.1 สมบัติทางกล

4.4.1.1 การทดสอบแรงดึง

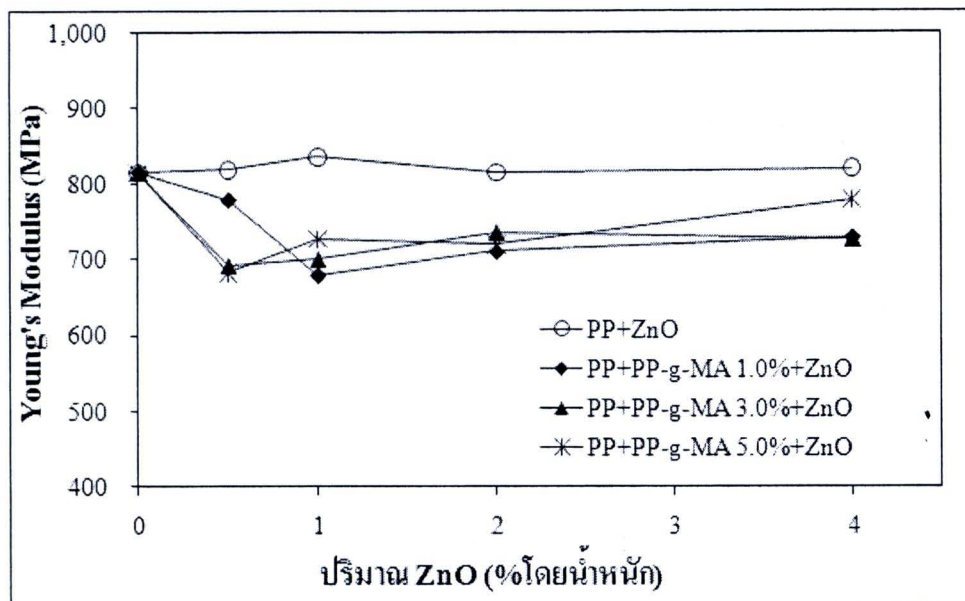
รูปที่ 4.26 และ 4.27 แสดงการเปลี่ยนแปลงค่า tensile strength และ stress at break โดยจุดแรกในรูปกราฟจะเป็นค่าของ PP บริสุทธิ์ พบว่าค่า tensile strength และ stress at break ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต เพิ่มขึ้นตามปริมาณของ ZnO และ PP-g-MA ที่ผสมมากขึ้น ค่า Young's modulus ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต แสดงในรูปที่ 4.28 พบว่าค่า Young's modulus ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิตลดลงตามปริมาณการผสม PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้น นอกจากนั้น PP/ZnO นาโนคอมโพสิตหลังจากการเติม PP-g-MA มีค่า stress at break สูงกว่า PP/ZnO นาโนคอมโพสิตที่ไม่มีการเติม PP-g-MA เนื่องจาก PP-g-MA สามารถปรับปรุงความสามารถการผสมเข้ากันได้และ interfacial area ของอนุภาค ZnO ขนาดนาโนเมตรและพอลิเมอร์ PP



รูปที่ 4.26 Tensile strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ



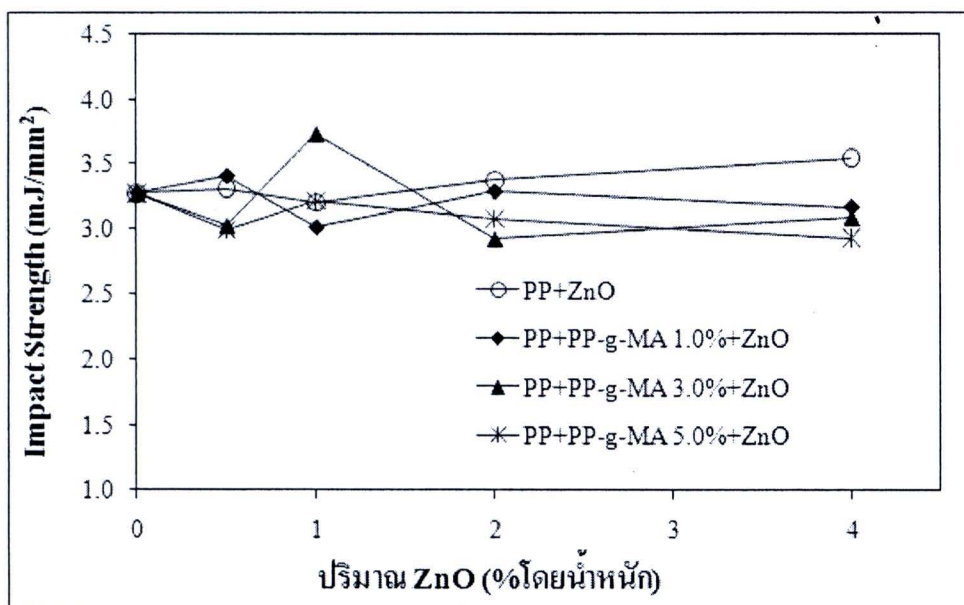
รูปที่ 4.27 Stress at break ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.28 Young's modulus ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ

4.4.1.2 การทดสอบแรงกระแทก

รูปที่ 4.29 แสดงค่า impact strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังการผสม PP-g-MA ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่า impact strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิตไม่มีการเปลี่ยนแปลงหลังจากการเติม ZnO และค่า impact strength ลดลงตามปริมาณการผสม PP-g-MA ที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นที่ความเข้มข้น ZnO 1.0% โดยน้ำหนัก และปริมาณ PP-g-MA เท่ากับ 3.0% โดยน้ำหนัก



รูปที่ 4.29 Impact strength ของ PP/ZnO นาโนคอมโพสิต ก่อนและหลังจากผสม ZnO และ PP-g-MA ที่ความเข้มข้นต่างๆ