



ผลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใส

Effects of Impact Modifiers and Lamination Processes on the Damage Property of Transparent Poly(Methyl Methacrylate) Cast Sheet

ชาคริต ศรีประจวบวงษ์¹ นฤมล เครือทองอาญกุล¹ และ กิติกร จามรดุสิต^{2*}

Chakrit Sriprachuabwong¹, Narumol Kreua-ongarjnuakool¹, and Kitikorn Charmondusit^{2*}

¹ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ บางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

² ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมนิวเคลียร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหิดล ศาลายา นครปฐม 73170

* Correspondent author: kitikorn.cha@mahidol.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทก และกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่เตรียมขึ้นจากสไตรีน-เมทิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอีน (Poly (S-co-MMA)/BR) และแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนโดยเกิดการเชื่อมโยงกันแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (PMMA/PU semi-IPNs) จากการทดสอบสมบัติการทนแรงกระแทกโดยการปล่อยน้ำหนักในแนวดิ่ง ซึ่งแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกใสทั้งสองชนิดเตรียมจากกระบวนการพอลิเมอร์ไรเซชันแบบบัลค์ และขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ จากการศึกษา พบว่า สมบัติการต้านทานแรงดัดและสมบัติความแข็งแรงจะลดลงเมื่อปริมาณของพอลิยูรีเทนและยางบิวทาไดอีนที่เพิ่มขึ้น แต่จะมีสมบัติดีขึ้นเมื่อนำมาลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต สมบัติการทนต่อแรงกระแทกของ PMMA/PU semi-IPNs จะมีค่าสูงกว่า Poly (S-co-MMA)/BR และการลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะให้สมบัติการทนต่อแรงกระแทกที่ดีกว่าการลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมี รูปแบบความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีลักษณะการแตกหักแบบเปราะกระจาย ในขณะที่การลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะพบการแตกหักแบบเหนียว การศึกษาฐานวิทยาศาสตร์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นถึงลักษณะของชั้นรอยต่อที่รวมเข้ากันในกรณีแผ่นขึ้นงานลามิเนต Poly (S-co-MMA)/BR และลักษณะที่ไม่รวมเข้ากันของชั้นรอยต่อในกรณีของแผ่นขึ้นงานลามิเนต PMMA/PU semi-IPN จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงผลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทกพอลิยูรีเทนที่สามารถเพิ่มสมบัติการทนแรงกระแทกได้ดีกว่ายางบิวทาไดอีน กระบวนการลามิเนตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยวิธีทางกลนอกจากจะช่วยเพิ่มสมบัติการทนแรงกระแทกแล้ว ยังสามารถช่วยลดปริมาณการใช้สารเพิ่มการทนแรงกระแทกในการผลิตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทก ซึ่งจะเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพ และการลดต้นทุนการผลิตของอุตสาหกรรมการผลิตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกได้ในอนาคต

Abstract

This research investigates the influence of impact modifiers and lamination processes on the damage properties of the impact modified transparent Poly (methyl methacrylate) (PMMA) cast sheets with butadiene rubber (Poly (S-co-MMA)/BR) and semi-interpenetrating polymer networks (semi-IPNs) with Polyurethane (PU) by the falling weight impact testing method. The impact modified transparent PMMA cast sheets were prepared by bulk polymerization via casting process. The effect of lamination processes on the damage property of transparent PMMA cast sheet was studied by chemical and mechanical lamination processes of PMMA onto the Poly (S-co-MMA)/BR cast sheets and the PMMA/PU semi-IPNs cast sheets. It was found that the hardness and flexural strength of the impact modified transparent PMMA cast sheets decreased with increasing the impact modifiers content. However, the hardness and flexural strength increased when the impact modified transparent PMMA cast sheets were laminated with PMMA. The impact strength of the PMMA/PU semi-IPNs cast sheets was higher than that of Poly (S-co-MMA)/BR cast sheets and impact strength of the laminated cast sheets by mechanical process was higher than that of chemical process. The damage type of the impact modified transparent PMMA cast sheets laminated via chemical process was brittle. While, the ductile failure was observed on the impact modified transparent PMMA cast sheets laminated via mechanical process. Scanning electron micrograph of laminated Poly (S-co-MMA)/BR cast sheets by chemical process revealed harmonious two-layers. The morphology of the laminated PMMA/PU semi-IPNs sheets showed the absolutely separation at two-layers conjunction, which affected the mechanical property of impact modified PMMA cast sheets. The impact modified transparent PMMA cast sheets with PU illustrated the superior impact property than that of BR. The mechanical lamination process with PMMA would not only improve the impact property of the impact modified transparent PMMA cast sheets but also decrease the amount of impact modifier using in the impact modified transparent PMMA cast sheets production process, which will useful for the further improvement of process efficiency and cost reduction.

คำสำคัญ: พอลิเมทิลเมทาคริเลต พอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทก การทดสอบแรงกระแทก แบบปล่อย
กระทบด้วยการตกตามแนวตั้งอิสระ ลามิเนต

Keywords: Poly (methyl methacrylate), High impact poly (methyl methacrylate), Falling weight impact, Laminate

1. บทนำ

พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Poly(Methyl Methacrylate) : PMMA) หรือที่นิยมเรียกกันโดยทั่วไปว่า อะคริลิก (Acrylic) จัดเป็นเทอร์โมพลาสติกที่สามารถเตรียมได้จากเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ (Methyl Methacrylate : MMA) ด้วยการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบลูกโซ่ฟรีแรดิคัล (Free Radical Chain Polymerization) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีความเป็นอสัณฐาน (Amorphous) จึงทำให้ มีความโปร่งใส คล้ายแก้ว และมีสมบัติแข็งแรงแต่เปราะ อะคริลิกมีข้อผลิตภัณฑ์ทางการค้าซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของเพลกซิกลาส (Plexiglas) หรือ ลูซิท์ (Lucite) มีสมบัติความโปร่งใสและสามารถย้อมสีได้ง่าย จึงทำให้มีการนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาใช้ประโยชน์ในงานหลายด้าน อาทิ ป้ายโฆษณา กรอบไฟท้ายรถยนต์ เลนส์ กระเบื้องมุงหลังคาชนิดใส และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น กระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถเตรียมได้หลายแบบ ได้แก่ แบบสารละลาย (Solution Polymerization) แบบแขวนลอย (Suspension Polymerization) แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization) และแบบบัลค์ (Bulk Polymerization) ซึ่งกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์เป็นกระบวนการที่ง่ายที่สุด ต้นทุนในการผลิตค่อนข้างต่ำ และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสิ่งเจือปนน้อย โดยทั่วไปมักใช้เตรียมพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างความเป็นอสัณฐานสูง เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene : PS) พอลิเมทิลเมทาคริเลต และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Poly(Vinyl Chloride : PVC)) (1) เป็นต้น

ในทางอุตสาหกรรมการเตรียมพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบบัลค์เพื่อให้ได้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติใส หรือโปร่งแสงเหมือนแก้ว มักจะใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อ (Casting Process) โดยส่วนหนึ่งของผลิตภัณฑ์แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการหล่อนี้จะนำไปใช้กับงานบางประเภทที่ต้องการรับแรงกระแทกสูง ๆ เช่น วัสดุกระเบื้องมุงหลังคา กันสาด ส่วนประกอบของรถยนต์ และกระจกนิรภัย เป็นต้น

แต่ด้วยสมบัติของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีความแข็งแรงแต่เปราะ การทนต่อแรงกระแทก (Impact Resistance) ก่อนข้างต่ำจึงทำให้มีข้อจำกัดในการนำไปใช้งาน (2) อย่างไรก็ตามพอลิเมทิลเมทาคริเลตสามารถปรับปรุงให้มีสมบัติการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นได้โดยที่ผ่านมา พบว่า มีการนำเอาเมทิลเมทาคริเลตมาโคพอลิเมอร์กับ สไตรีนแล้วเติมยาง (Rubber) ซึ่งมีสมบัติความเป็นอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ตัวอย่างเช่น ยางบิวทาไดเอิน (Butadiene Rubber : BR) ยางสไตรีนบิวทาไดเอิน (Styrene-Butadiene Rubber : SBR) ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) และยางธรรมชาติไฮโดรจิเนชัน (Hydrogenated Natural Rubber) (3, 4, 5) เติมนลงในโคพอลิเมอร์ดังกล่าว ส่งผลให้แผ่นโคพอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีสมบัติการทนแรงกระแทกและสมบัติความยืดหยุ่นที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังพบอีกว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน (Polyurethane : PU) ที่เกิดการเชื่อมโยงกันแบบกึ่งโครงร่างตาข่าย (Semi-Interpenetrating Polymer Networks ; semi-IPNs) สามารถเพิ่มสมบัติการทนแรงกระแทกให้กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้โดยค่าการทนแรงกระแทกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น (6, 7) และในอีกแนวทางหนึ่งของการเพิ่มสมบัติการทนแรงกระแทกของพอลิเมทิลเมทาคริเลต อาจทำได้โดยอาศัยหลักการของการลามิเนตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยวัสดุทนแรงกระแทก โดยพบว่ามีการนำเอาแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตลามิเนตซ้อนกัน เป็นชั้น ๆ หรือนำมาลามิเนตกับแผ่นกระจก แผ่นพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate : PC) แผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์แล้วสามารถลดความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกได้ (8, 9) แต่ที่ผ่านมาโดยส่วนมากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีการปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทก มัก จะนำมาทดสอบสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod-Impact Test) หรือแบบชาร์ปี (Charpy-Impact Test) ที่เป็นการทิ้งน้ำหนักลงมากระแทกกับวัตถุในลักษณะของการเหวี่ยงแบบลูกตุ้ม เพนดูลัม (Pendulum) แล้วรายงานผลออกมาในรูปของ

พลังงานที่ตัวอย่างสามารถดูดซับไว้ได้จากการกระแทก ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริงแล้ว พบว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นโดยส่วนใหญ่มักจะเกิดจากการกระแทกของวัตถุที่ทิ้งน้ำหนักลงมาในลักษณะตามแนวดิ่งอย่างอิสระ เช่น การหล่นลงมาของวัตถุจากที่สูงกระแทกกับกระเบื้องปูหลังคา ซึ่งการทดสอบแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) หรือแบบชาร์ปี (Charpy) ไม่สามารถอธิบายลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจน ด้วยเหตุนี้แนวทางในการศึกษาความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของวัตถุที่ทิ้งน้ำหนักลงมาตามแนวดิ่ง สามารถทำได้ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบปล่อยกระทบ ด้วยการตกตามแนวดิ่งแบบอิสระ (Falling Weight Impact Test)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการเสียหายที่เกิดขึ้นจากการกระแทกของวัตถุที่ปล่อยน้ำหนักลงมาตามแนวดิ่ง ด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบปล่อยกระทบด้วยการตกตามแนวดิ่งแบบอิสระกับแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่เตรียมขึ้นจากสไตรีน-เมทิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอีน และแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนโดยการเชื่อมโยกันแบบกึ่งโครงร่างคาข่าย โดยที่แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทั้งสองชนิดเตรียมขึ้นด้วยกระบวนการพอลิเมอร์เรซินแบบบิลค์ และใช้วิธีการขึ้นรูปแบบกระบวนการหล่อ จากนั้นลามิเนตแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตผ่านกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกล ลักษณะความเสียหายที่ได้จากการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบแรงกระแทกแบบปล่อยกระทบด้วยการตกตามแนวดิ่งแบบอิสระกับแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทก สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการตัดสินใจสำหรับเลือกวัสดุที่จะนำไปประยุกต์ และออกแบบเป็นอุปกรณ์ทนแรงกระแทกสูงได้ต่อไป

2. วิธีวิจัย

2.1 สารเคมี

เมทิลเมทาคริเลต (MMA) : (Thai MMA Co., Ltd), สไตรีน (S) : (Siam Styrene monomer Co., Ltd), ยางบิวทาไดอีน (BR) : (BST Elastomer Co., Ltd), อะลิฟาทิกเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยานาต (Bayer Thai Co., Ltd), ลิเนียร์โกลคอลลอติเปตพอลิเอสเตอร์ พอลิโอล (TPI POLYOL Co., Ltd), เอชบิส-2,4-ไดเมทิลวาเลโรไนไตรล์ (ABVN) : (Thai Special Chemical Co., Ltd), เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (BPO) : (Merck, Co., Ltd.), สารเชื่อมขวางเอทิลีนโกลคอลลอติเมทาคริเลต (EGDM) : (Fujimori Ltd.), ไดบิวทิลทีนลอเรต (DBTL) : (Bayer Thai Co., Ltd), อะซิโตน ปิโตรเลียมอีเธอร์ และไดคลอโรมีเทน : (Merck, Co., Ltd.)

2.2 การเตรียมแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอีน (High impact PMMA 1)

นำเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ผสมกับสไตรีนมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 80:20 %wt ให้ได้ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร เติมน้ำมันยางบิวทาไดอีนลงในสารผสม (0.5-2.0 %wt) นำไปกวนจนยางละลายเป็นเนื้อเดียวกับสารผสม ใส่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่หนึ่งเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 %wt ลงในสารผสม แล้วนำไปกวนร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10-15 นาที นำสารละลายพรีพอลิเมอร์ซึ่งมีความหนืดมากวนเย็นค่อนอุณหภูมิของสารผสมหนืดลดลงถึงอุณหภูมิห้อง แล้วเติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่สองเอชบิส-2,4-ไดเมทิลวาเลโรไนไตรล์ 0.03%wt ลงไป นำสารผสมหนือมาใส่ฟองอากาศด้วยปั๊มสูญญากาศ แล้วจึงนำเทใส่ลงในแม่พิมพ์สำหรับการหล่อพลาสติกขนาด 1 x 1 ฟุต โดยใช้ประเก็นความหนาขนาด 2 มิลลิเมตร นำแม่พิมพ์แบบหล่อที่เตรียมเสร็จแล้วไปต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง จนสารละลายหนืดภายในแม่พิมพ์เริ่มแข็งตัว แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์

2.3 การเตรียมแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน (High impact PMMA 2)

นำลิเนียไกลคอล อะดิปต พอลิเอสเตอร์ พอลิ-ออล 20.45 %wt อะลิฟา ดิกเฮกซะเมทิลีนไดไอโซไซยาเนต 4.55 %wt ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเอโซบิส-2,4-ไดเมทิลวาเลโรไนไตรล์ 0.04 %wt ตัวเร่งปฏิกิริยาไดบิวทิลทินลอเรต 0.2 %wt และสารเชื่อมขวางเอทิลีนไกลคอลไดเมทาคริเลต 0.05 %wt ผสมลงในเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ให้ได้ปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร กวนผสมให้เข้ากันประมาณ 25-30 นาที จนสารละลายผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วนำไปใส่ฟองอากาศด้วยปั๊มสูญญากาศ เทสารผสมใส่ลงในแม่พิมพ์สำหรับการหล่อพลาสติกขนาด 1 x 1 ฟุต โดยใช้ประเก็นความหนาขนาด 2 มิลลิเมตร จากนั้นทำการทดลองตามในหัวข้อ 2.2

2.4 กระบวนการลามิเนต

2.4.1 การลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical laminate ; CL)

นำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทั้งสองประเภท ได้แก่ แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.2 และแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.3 มาตัดให้ได้ขนาด 25 x 25 เซนติเมตร วางลงในแม่พิมพ์สำหรับการหล่อพลาสติกขนาด 1 x 1 ฟุต โดยใช้ประเก็นความหนาขนาด 3 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้สามารถลามิเนตสารที่จะเคลือบอยู่ด้านหน้าที่ความหนา 1 มิลลิเมตรได้ จากนั้นนำพรีพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งสามารถเตรียมได้โดยนำเมทิลเมทาคริเลตมอนอเมอร์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ผสมกับตัวเร่งปฏิกิริยาเบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ 0.1 %wt นำไปกวนร้อนที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนได้สารผสมที่มีความหนืดตามต้องการ นำสารละลายเมทิลเมทาคริเลตชนิดที่เตรียมได้เทลงในแม่พิมพ์จนทั่วทั้งแผ่นขึ้นงานแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่ประกอบไว้ในขั้นตอนแรก จากนั้นนำแม่พิมพ์แบบหล่อที่เตรียมเสร็จแล้วไปต้มในอ่างน้ำควบคุม

อุณหภูมิที่อุณหภูมิ 40-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง จนสารละลายหนืดภายในแม่พิมพ์แข็งตัว แล้วจึงนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1-2 ชั่วโมง เพื่อให้ปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์

2.4.2 การลามิเนตด้วยกระบวนการทางกล (Mechanical laminate ; ML)

แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทั้งสองประเภท ได้แก่ แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.2 และแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่เตรียมได้จากหัวข้อที่ 2.3 มาตัดให้ได้ขนาด 25 x 25 เซนติเมตร นำมาลามิเนตกับแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตขนาดความหนา 1 มิลลิเมตร โดยใช้พอลิยูรีเทนเหลวเป็นสารยึดติดจากนั้นนำแผ่นขึ้นงานลามิเนตมาอัดด้วยเครื่องอัดแบบไฮดรอลิกด้วยแรง 70 kg/cm² เป็นเวลา 5 นาที จนแผ่นขึ้นงานลามิเลตยึดติดกันอย่างสมบูรณ์

2.5 การวิเคราะห์หาร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ (Percentage of graft efficiency) ของแผ่นสไตรีน-เมทิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน

ตัดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดเล็กน้ำหนัก ประมาณ 2 กรัม แล้วนำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลาย 2 ชนิด ได้แก่ อะซิโตน (สกัด PMMA , PS และ Poly (S-co-MMA) ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ออก) และปิโตรเลียมอีเธอร์ (เพื่อสกัดยางที่ไม่เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์ออก) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักสุดท้ายที่ได้จากการสกัดในแต่ละตัวทำละลายเพื่อใช้ในการคำนวณหาร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ของตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ ดังสมการ (1) จากนั้นจึงนำเอาตัวอย่างที่เหลือจากการสกัดร้อนอย่างต่อเนื่องมาทำการการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของด้วยเครื่อง ATR-FTIR (Attenuated Total Reflection Fourier Transform Spectroscopy) Perkin Elmer รุ่น Spectrum 2000

$$(\%) \text{Graft efficiency, } (\%) \text{ IPNs} = 100 - \left(\frac{W_b - W_a}{W_b} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_a = น้ำหนักของตัวอย่างหลังการสกัดด้วย
ตัวทำละลาย
 W_b = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนการสกัดด้วย
ตัวทำละลาย

**2.6 การตรวจสอบลักษณะเฉพาะการเกิดโครง
ร่างตาข่าย (Characterization of interpenetrating
polymer network) ของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่
โคพอลิเมอร์ร่วมกับพอลิยูรีเทน**

ตัดชิ้นงานที่ต้องการทดสอบให้มีขนาดเล็ก น้ำ
หนัก ประมาณ 2 กรัม นำมาสกัดด้วยวิธีการสกัดร้อน
อย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายไดคลอโรมีเทน เพื่อสกัด
เอาพอลิเมอร์ที่ไม่เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายออก เป็นเวลา
72 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำเอาตัวอย่างที่เหลือจากการสกัด
ร้อนอย่างต่อเนื่องมาทำการการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชัน
ที่สำคัญของด้วยเครื่อง ATR-FTIR (Attenuated Total
Reflection Fourier Transform Spectroscopy) Perkin
Elmer รุ่น Spectrum 2000

**2.7 การทดสอบสมบัติเชิงกลและสมบัติความ
เสถียร**

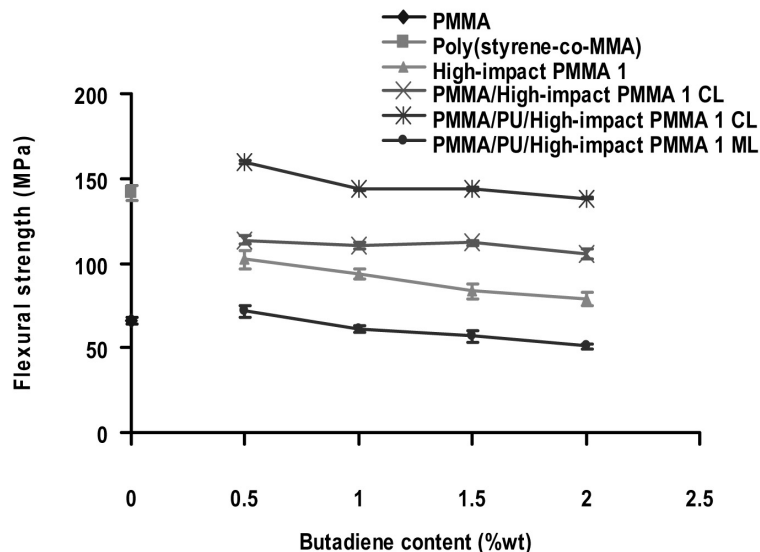
แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติ
การทนแรงกระแทก และแผ่นชิ้นงานลามิเนตที่เตรียม
ได้นำมาทดสอบสมบัติเชิงกลที่สำคัญ ได้แก่ สมบัติการ
ทนต่อแรงดัดตามมาตรฐาน ASTM D 790 (10) ด้วย
เครื่องทดสอบสมบัติการทนต่อแรงดัด Universal Tester
Machine (LLOYD Instruments รุ่น LR 10 K) ทดสอบ
สมบัติความแข็งแรงประเภท Shore D ตามมาตรฐาน ASTM
D 2240 (11) โดยเครื่องทดสอบสมบัติความแข็งแรงประเภท

Shore D (Yasuda รุ่น No.7047) และทดสอบ สมบัติการ
ทนต่อแรงกระแทกแบบตกกระทบด้วยการตกตามแนว
ดิ่งแบบอิสระ (Falling Weight Impact) ตามมาตรฐาน
ISO 6603-1 (12) เครื่องทดสอบการทนต่อแรงกระแทก
แบบปล่อยกระทบด้วยการตกตามแนวดิ่งแบบอิสระ
(Falling Weight Impact) แผ่นชิ้นงานที่เกิดการแตกหัก
จากการทดสอบสมบัติการทนต่อแรงกระแทกนำมา
ศึกษาลักษณะสันฐานวิทยาโดยวิเคราะห์จากภาพตัด
ขวางของชิ้นงานที่แตกหัก ซึ่งถูกนำมาเคลือบด้วยทอง
แล้ววิเคราะห์ลักษณะสันฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอนแบบส่องกราด JEOL รุ่น JSM-5410 LV

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

**3.1 อิทธิพลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทก
และกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการต้านทาน
แรงดัด**

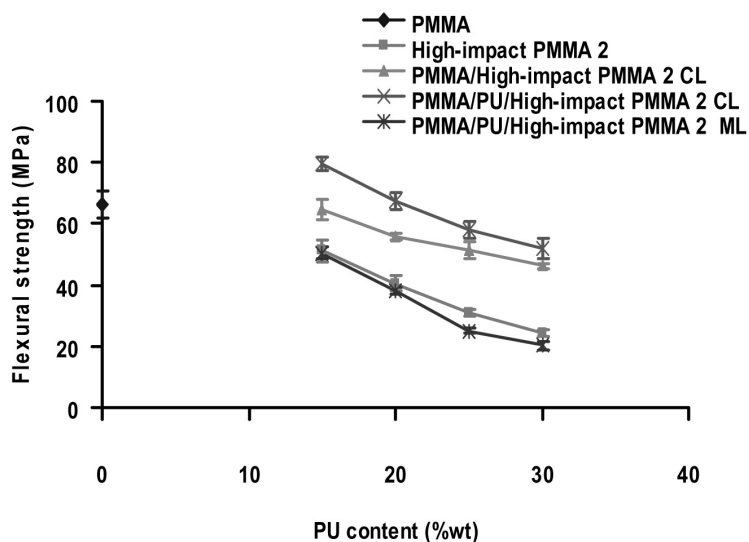
ผลของชนิด ปริมาณสารเพิ่มการทนแรง
กระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการ
ต้านทานแรงดัดของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทน
แรงกระแทกแสดงดังกราฟรูปที่ 1 และ 2 พบว่าค่าการ
ต้านทานแรงดัดของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรง
กระแทกทั้งสองประเภทมีแนวโน้มค่าการต้านทานแรง
ดัดลดลงตามปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกที่เพิ่ม
ขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากสารเพิ่มการทนแรงกระแทกที่ผสม
ลงไปทั้งยางบิวทาไดอินและ พอลิยูรีเทนซึ่งมีความเป็น
อีลาสโตเมอร์สูงส่งผลให้แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใส
มีความนุ่มและความยืดหยุ่นมากขึ้น



รูปที่ 1. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน

เมื่อนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซทนแรงกระแทกทั้งสองชนิดมาทำการลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต โดยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกล พบว่าค่าการต้านทานแรงดัดยังคงมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้น แต่ทั้งนี้ค่าการต้านทานแรงดัดของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีค่าสูงกว่า

เมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ไม่ได้ลามิเนตและแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกล ทั้งนี้กระบวนการทางกลมีค่าการต้านทานแรงดัดต่ำกว่าเนื่องจากขณะทำการทดสอบ จะเกิดการแตกหักขึ้นก่อนกับชั้นลามิเนตพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นผลให้ค่าการต้านทานแรงดัดของแผ่นชั้นงานลดลง

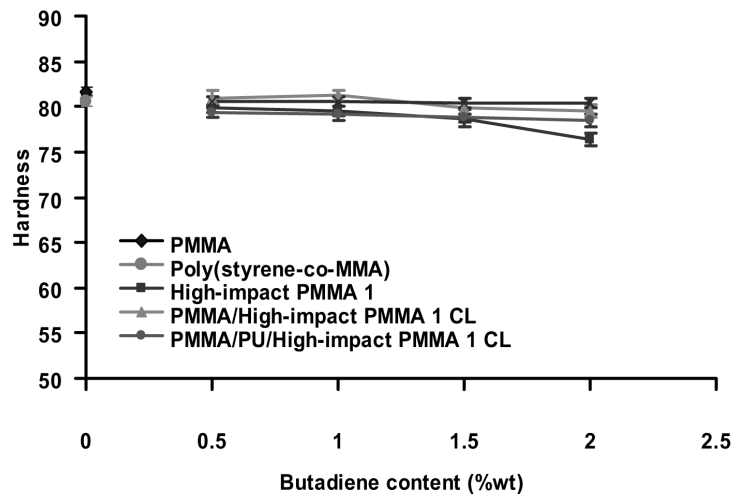


รูปที่ 2. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน

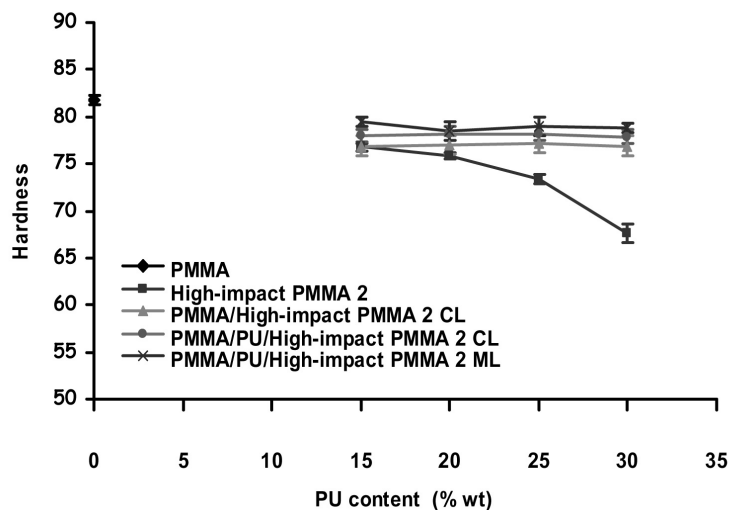
3.2 อิทธิพลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทก และกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติความแข็ง

ผลของชนิด ปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทก และกระบวนการลามิเนตที่มีต่อการสมบัติความแข็งของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกแสดงดังกราฟรูปที่ 3 และรูปที่ 4 พบว่าค่าความแข็งของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทก ยางบิวทาไดอินและพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกที่ลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยกระบวนการทางกลและกระบวนการทางเคมีมาทดสอบความแข็งพบว่า ค่าความแข็งของแผ่นชิ้นงานลามิเนตที่เตรียมได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับชิ้นงานที่ไม่ได้ลามิเนตและมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน ซึ่งค่าความแข็งของชิ้นลามิเนตบดดังกล่าวมีค่าเท่ากับค่าความแข็งของพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 3. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติความแข็งประเภท Shore D ของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน



รูปที่ 4. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติความแข็งประเภท Shore D ของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน

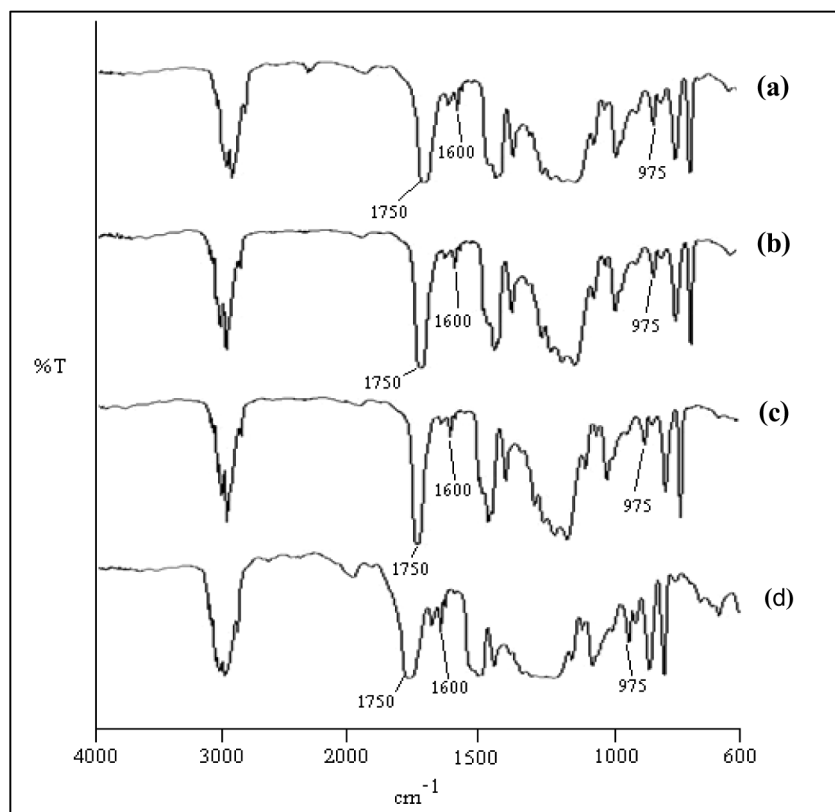
3.3 อิทธิพลของสารเพิ่มการทนแรงกระแทก และกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทกแบบปล่อยกระทบด้วยการตกตามแนวตั้งแบบอิสระ

ผลของชนิด ปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการทนต่อแรงกระแทกแบบปล่อยกระทบด้วยการตกตามแนวตั้งแบบอิสระของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอทนแรงกระแทกแสดงดังกราฟรูปที่ 5 และรูปที่ 6 พบว่าค่าการทนแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอทนแรงกระแทกจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกของยางบิวทาไดอีนและพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น โดยในกรณีของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอีนมีสมบัติการทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยากราฟต์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft Copolymerization) ของสไตรีนและเมทิลเมทาคริเลตบนยางบิวทาไดอีนขึ้นในแผ่นชิ้นงาน (3, 4) ส่งผลให้สมบัติการทนแรงกระแทกของแผ่นชิ้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางบิวทาไดอีนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้สามารถยืนยันปรากฏการณ์ดังกล่าวได้จากการนำตัวอย่างที่เหลือจากการสักร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายมาทำการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของด้วยเครื่อง

ATR-FTIR ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 5 จากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ผ่านการสักร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอีนที่ปริมาณร้อยละ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนัก ปรากฏสัญญาณพีกที่ 1600 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะ C=C (Conjugated of benzene) ของเบนซีน นอกจากนี้จากการตรวจสอบยังพบสัญญาณพีกที่ 1750 cm^{-1} ที่เป็นการยืดของพันธะ C=O เป็นลักษณะเฉพาะของหมู่คาร์บอนิลภายในโครงสร้างของเมทิลเมทาคริเลตและสัญญาณพีกที่ 975 cm^{-1} ที่เป็นการงอของพันธะ =C-H ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะภายในโครงสร้างยางบิวทาไดอีน ดังนั้นจากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของแผ่นสไตรีน-เมทิลเมทาคริเลตโคพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคการสะท้อนของอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี พบสัญญาณพีกที่แสดงหมู่ฟังก์ชันของสไตรีน เมทิลเมทาคริเลต และยางบิวทาไดอีน ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแผ่นชิ้นงานทั้งหมดที่เตรียมได้ และเมื่อทำการวิเคราะห์หาร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ด้วยวิธีการสักร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลาย ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ถึงแนวโน้มร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์ของตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณยางบิวทาไดอีนที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 1. แสดงผลการวิเคราะห์หาร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์

MMA/S/BR (%wt)	น้ำหนักของชิ้นงาน (กรัม)		ร้อยละการสักร	ร้อยละประสิทธิภาพการกราฟต์
	ก่อนสักร	หลังสักร		
80/20/0.5	2.0105	0.7192	64.23	35.77+0.47
80/20/1.0	2.0119	0.7203	64.19	35.81+0.51
80/20/1.5	2.0539	0.7486	63.55	36.45+0.54
80/20/2.0	2.0390	0.8044	60.55	39.45+0.83



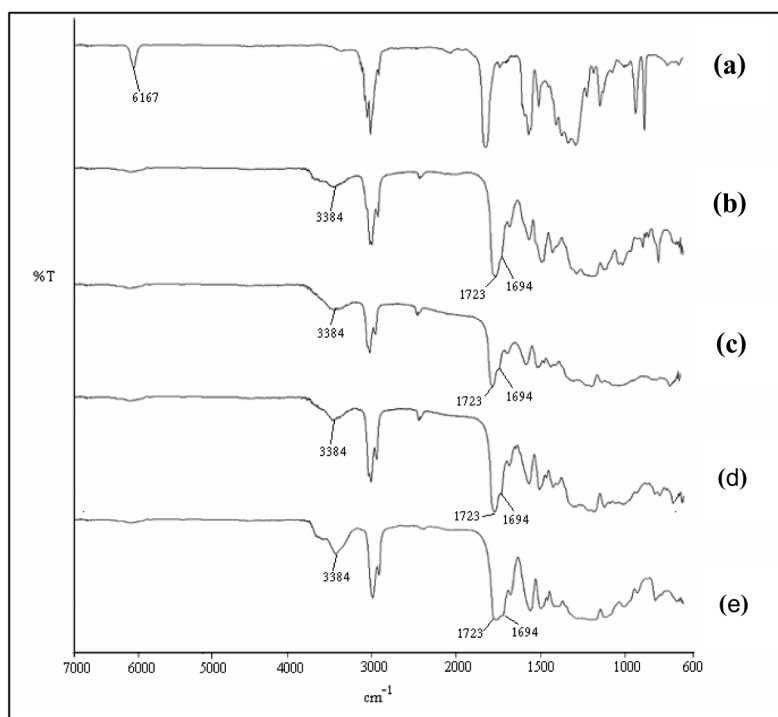
รูปที่ 5. แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวอย่างที่เหลือจากการสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน (a) BR 0.5 %wt (b) BR 1.0 %wt (c) BR 1.5 %wt (d) BR 2.0 %wt

ในกรณีของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนมีสมบัติการทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นเนื่องมาจากลักษณะของการเกิดโครงสร้างแบบกิ่งโครงร่างตาข่ายของพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีพอลิยูรีเทนซึ่งมีสมบัติความเหนียวและความยืดหยุ่นค่อนข้างสูงสอดแทรกอยู่ในโครงตาข่ายของพอลิเมทิลเมทาคริเลต (6, 7) จึงส่งผลให้แผ่นชิ้นงานมีสมบัติการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบค่าการทนแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนจะมีค่าสูงกว่าแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน ทั้งนี้สามารถยืนยันการเกิดโครงสร้างแบบกิ่งโครงร่างตาข่ายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วย

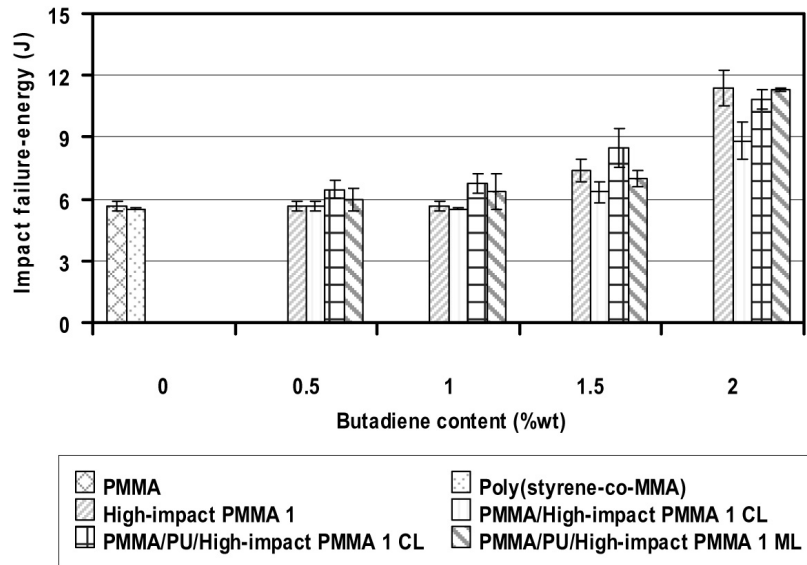
พอลิยูรีเทนได้จากการนำตัวอย่างที่เหลือจากการสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายมาทำการตรวจสอบหุ้ฟังก์ชันที่สำคัญของด้วยเครื่อง ATR-FTIR ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 6 จากการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ผ่านการสกัดอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายของแผ่นโคพอลิเมอร์ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิยูรีเทนแบบกิ่งโครงร่างตาข่ายที่อัตราส่วนพอลิยูรีเทนร้อยละ 15, 20, 25 และ 30 โดยน้ำหนัก ปรากฏสัญญาณฟีกปรากฏที่ 3384 cm^{-1} แสดงถึงการยืดของพันธะ N-H ภายในโครงสร้างพอลิยูรีเทน โดยพบว่าสัญญาณฟีกจะมีการดูดกลืนพลังงานลดลงเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตเพิ่มขึ้นสังเกตได้จากสัญญาณฟีกที่มีลักษณะ broad เพิ่มมากขึ้นเนื่องจากเกิด Intermolecular ระหว่าง C=O ภายในโครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต และ N-H ภายในโครงสร้างพอลิยูรีเทน นอกจากนี้

จากการตรวจสอบยังพบสัญญาณฟีกที่ 1723 cm^{-1} และ 1694 cm^{-1} ที่เป็นการยืดของพันธะ C=O แสดงถึงลักษณะเฉพาะของหมู่คาร์บอนิลของพอลิยูรีเทนและการงอในระนาบของพันธะ N-H ภายในโครงสร้างพอลิยูรีเทนตามลำดับ ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าสัญญาณฟีกหมู่คาร์บอนิลของพอลิยูรีเทนจะปรากฏในลักษณะ Overlap อยู่กับหมู่ N-H และเมื่อปริมาณพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งมีหมู่คาร์บอนิลเพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ลักษณะการเกิดสัญญาณฟีกแบบ overlap ของหมู่ N-H ลดลง เนื่องจากเกิด Intermolecular ระหว่าง C=O ของพอลิยูรีเทนและพอลิเมทิลเมทาคริเลต

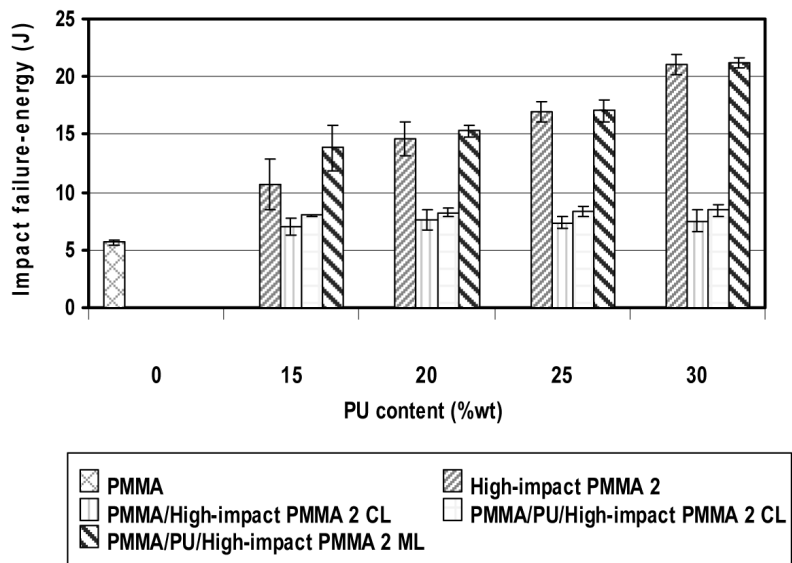
กับ N-H ของ พอลิยูรีเทน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Patricio และคณะ (13) ที่ตรวจสอบพบสัญญาณฟีกของ PU/PMMA blend ในลักษณะเช่นเดียวกันด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี นอกจากนี้จากการตรวจสอบยังพบสัญญาณฟีกที่เลขคลื่น 6167 cm^{-1} ที่แสดงหมู่ C=C-H Overtone ของตัวอย่างโคพอลิเมอร์พอลิเมทิลเมทาคริเลตและพอลิยูรีเทนแบบกึ่งโครงสร้างตาข่ายเปรียบเทียบกับตัวอย่างพอลิเมทิลเมทาคริเลต ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการลดลงของ %Transmittance อันเนื่องมาจากเกิดการเชื่อมขวางของพอลิเมทิลเมทาคริเลต



รูปที่ 6. แสดงอินฟราเรดสเปกตรัมของตัวอย่างที่เหลือจากการสกัดร้อนอย่างต่อเนื่องด้วยตัวทำละลายแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน (a) PU 0%wt (b) PU 15%wt (c) PU 20 %wt (d) PU 25 %wt (e) PU 30 %wt



รูปที่ 7. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการทนแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน



รูปที่ 8. ผลของปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกและกระบวนการลามิเนตที่มีต่อสมบัติการทนแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน

จากกราฟรูปที่ 7 และรูปที่ 8 ยังพบอีกว่า ค่าการทนแรงกระแทกของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินและลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางบิวทาไดอินที่เพิ่มขึ้น สำหรับในกรณีของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนพบว่า ค่าการทนแรงกระแทกของแผ่นชิ้นงานที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทน ซึ่งให้ผลเช่นเดียวกับแผ่นชิ้นงานที่ไม่ได้ลามิเนต ในขณะที่แผ่นชิ้นงานที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีค่าการทนแรงกระแทกที่ต่ำกว่าและไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้ผลของการลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลที่มีต่อค่าการทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นอาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีของคลื่นหน่วยแรง (Stress Wave) (8, 14) กล่าวคือเมื่อชิ้นงานลามิเนตถูกกระแทกด้วยตัวกระแทกจนทำให้เกิดรอยแตกริเริ่ม (Initiate crack) ซึ่งบริเวณที่เกิดรอยแตกริเริ่มนี้จะทำให้เกิดคลื่นแรงเค้นแบบกด (Compression stress) เคลื่อนตัวกระจายออกไปจนถึงขอบรอยต่อระหว่างชั้นลามิเนตซึ่งถูกแบ่งแยกจากกันด้วยชั้นสารยึดติด โดยคลื่นส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนกลับเปลี่ยนจากคลื่นแรงเค้นแบบกดเป็นคลื่นแรงเค้นแบบยืด (Tension stress) กลับมายังบริเวณที่เกิดรอยแตกริเริ่มทำให้อรอยแตกริเริ่มขยายออกกลายเป็นรอยแตกที่ยาวขึ้น (Radial crack) จำนวนมากทำให้ชั้นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ลามิเนตอยู่ด้านบนเกิดความเสียหาย และในขณะที่คลื่นแรงเค้นแบบกดส่วนหนึ่งจะขยายตัวต่อไปในชั้นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกแต่ด้วยแรงเค้นที่ต่ำลงจึงทำให้แผ่นทนแรงกระแทกรับแรงกระแทกไว้ได้ ในขณะที่การลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีชั้นลามิเนตจะเกิดการรวมเข้าด้วยกันจนเหมือนเป็นเนื้อเดียวกันจึงอาจส่งผลให้แรงเค้นเกิดการกระจายตัวไปได้มากในแผ่นชิ้นงานลามิเนตโดยเฉพาะกับแผ่นชิ้นงานลามิเนตของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทน ซึ่งจากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าแผ่นชิ้นงาน

ลามิเนตที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีค่าการทนแรงกระแทกค่อนข้างต่ำและไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทน แต่ในกรณีของแผ่นชิ้นงานลามิเนตของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินยังคงมีแนวโน้มของค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางบิวทาไดอินที่เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 7

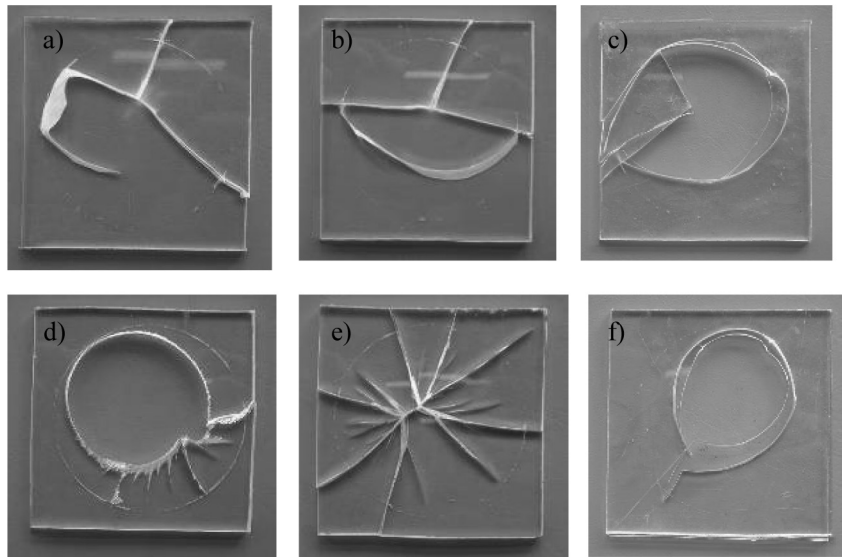
3.4 รูปแบบความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทก

ผลการศึกษารูปแบบความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินและพอลิยูรีเทนแสดงดังรูปที่ 9 พบว่ารูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบได้แก่ การแตกหักแบบเปราะกระจาย (Brittle shatter) กล่าวคือชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบจะเกิดการแตกหักออกเป็นชิ้นๆ และการแตกหักแบบเหนียว (Ductile failure) กล่าวคือชิ้นงานหลังจากผ่านการทดสอบจะถูกเจาะทะลุเป็นรูและมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างบริเวณดังกล่าวสูง ทั้งนี้จากการสังเกตแผ่นชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีความโปร่งใสค่อนข้างสูงจึงทำให้สามารถบ่งบอกรูปแบบความเสียหายได้ชัดเจน โดยแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ไม่ได้ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกจะเกิดการแตกหักแบบเปราะกระจาย ในขณะที่แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินและพอลิยูรีเทนจะเกิดการแตกหักแบบเปราะกระจายและแบบเหนียวตามลำดับ ทั้งนี้แผ่นชิ้นงานที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินซึ่งเกิดการแตกหักแบบเปราะกระจายนั้นพบว่าบริเวณที่เกิดการแตกหักของชิ้นงานจะปรากฏลักษณะของฝ้าขาว (Stress whitening) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการรับและกระจายแรงของยางในพอลิเมอร์เมทริกซ์ และการแตกหักแบบเหนียวที่เกิดขึ้นกับแผ่นชิ้นงานที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนนั้นจะเกิดลักษณะของรอยเฉือน (Shear band) เป็นจำนวนมากบริเวณขอบชิ้นงานที่ถูกเจาะทะลุ

นอกจากนี้ยังพบว่ารูปแบบความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทน

แรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินและพอลิยูรีเทนแล้วลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยกระบวนการทางเคมี จะเกิดการแตกหักแบบเปราะกระจายและแผ่นชิ้นงานที่

ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะเกิดการแตกหักแบบเหนียว

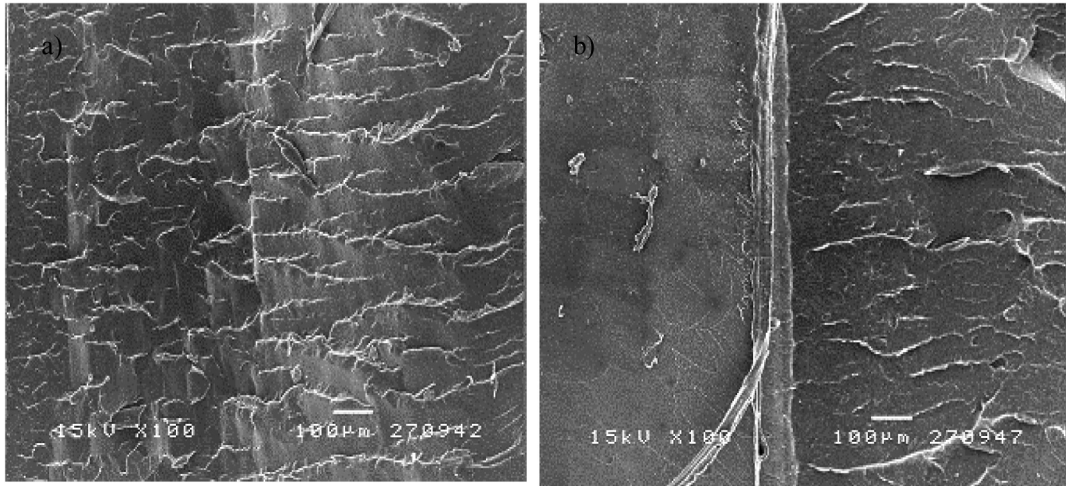


รูปที่ 9. รูปแบบความเสียหายของแผ่น (a) High impact PMMA 1 (b) PMMA/High impact PMMA 1 CL (c) PMMA/PU/High impact PMMA 1 ML (d) High impact PMMA 2 (e) PMMA/High impact PMMA 2 CL (f) PMMA/PU/High impact PMMA 2 ML

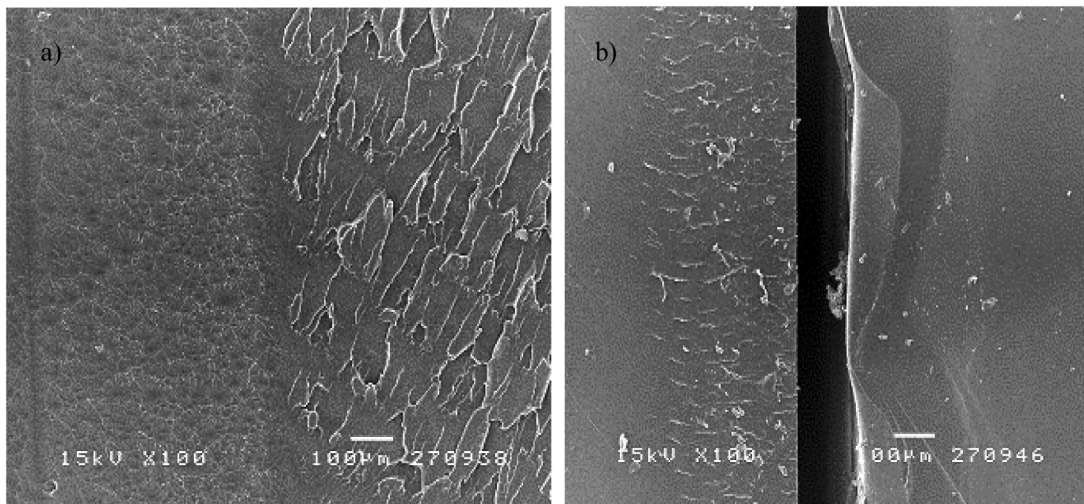
3.5 การศึกษาสัณฐานวิทยาของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตทนแรงกระแทกที่ลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกล

จากการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกที่ลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกลแสดงดังรูปที่ 10 และ 11 พบว่าแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสทนแรงกระแทกที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะสังเกตเห็นรอยต่อที่เกิดจากการลามิเนตซึ่งแยกชั้นกันอย่างชัดเจนในขณะที่แผ่นชิ้นงานที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีลักษณะของรอยต่อจะไม่เกิดขึ้นเด่นชัดโดยเฉพาะในกรณีแผ่นลามิเนตของ

แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ระหว่างชั้นลามิเนต ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดเจนที่ตรงบริเวณรอยผ่าขาวจากการรับแรงที่มีความเชื่อมโยงต่อเนื่องในระหว่างชั้นลามิเนตพอลิเมทิลเมทาคริเลตบนและชั้นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอิน แต่ในกรณีแผ่นลามิเนตของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตใสที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนจะสังเกตเห็นลักษณะสัณฐานวิทยาที่แยกออกจากกันอย่างชัดเจน เป็นลักษณะเฉพาะของทั้งสองชั้น ซึ่งไม่รวมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน



รูปที่ 10. รูปสัณฐานวิทยาของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยยางบิวทาไดอินที่ (a) ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมี และ (b) ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกล



รูปที่ 11. รูปสัณฐานวิทยาของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยพอลิยูรีเทนที่ (a) ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีและ (b) ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกล

4. สรุปผลการทดลอง

แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยการโคพอลิเมอร์ร่วมกับพอลิยูรีเทนโดยเตรียมให้เกิดการเชื่อมขวางกันแบบกิ่งโครงตาข่ายและแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่มียางบิวทาไดอินเป็นสารเพิ่มการทนแรงกระแทกจะมีสมบัติการต้านทานแรงคัดและสมบัติความแข็งแรงลดลงตามปริมาณ

สารเพิ่มการทนแรงกระแทกที่เพิ่มขึ้นและจะมีสมบัติการต้านทานแรงคัดและสมบัติความแข็งแรงเพิ่มขึ้นเมื่อนำมาลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลต

จากการศึกษาสมบัติการทนต่อแรงกระแทกพบว่าแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทกด้วยการโคพอลิเมอร์ร่วมกับพอลิยูรีเทนจะมีสมบัติการทนต่อแรงกระแทกสูงกว่าแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตไอโซที่มียางบิวทาไดอินเป็นสารเพิ่มการทน

แรงกระแทก โดยมีแนวโน้มค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารเพิ่มการทนแรงกระแทกพอลิยูรีเทน และยางบิวทาไดอีนที่เพิ่มขึ้น เมื่อนำมาลามิเนตด้วยพอลิเมทิลเมทาคริเลตพบว่า แผ่นขึ้นงานลามิเนตของแผ่นทนแรงกระแทกที่มียางบิวทาไดอีนเป็นสารเพิ่มการทนแรงกระแทกทั้งที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางกลจะให้ค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นตามปริมาณยางบิวทาไดอีน สำหรับในกรณีแผ่นขึ้นงานลามิเนตของแผ่นทนแรงกระแทกที่เกิดจากการโคพอลิเมอร์ร่วมกับพอลิยูรีเทนพบว่าขึ้นงานที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางกลจะมีค่าการทนแรงกระแทกเพิ่มตามปริมาณพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่แผ่นขึ้นงานที่ลามิเนตด้วยกระบวนการทางเคมีจะมีค่าต่ำและไม่เพิ่มขึ้นตามปริมาณพอลิยูรีเทนที่เพิ่มขึ้น

รูปแบบความเสียหายของแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่ปรับปรุงสมบัติการทนแรงกระแทก และที่ผ่านกระบวนการลามิเนต สามารถนำสู่การตัดสินใจเลือกวิธีการพัฒนาผลิตภัณฑ์พอลิเมทิลเมทาคริเลตชนิดใดที่ต้องการเพิ่มสมบัติการทนแรงกระแทก และลดปริมาณสารทนแรงกระแทกที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและฝึกอบรมนิเวศวิทยาอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยมหิดล บัณฑิตวิทยาลัย และภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Billmeyer Jr FW. Textbook of polymer science. Singapore: John Wiley & Sons Inc; 1984.
- (2) Charmondusit K, Seeluangsawat L. Recycling of Poly (Methyl Methacrylate) Scrap in the Styrene-Methyl Methacrylate Copolymer Casted Sheet Process. Resources, Conservation & Recycling 2009; 54: 97-103.
- (3) Cangialosi D, Lindsay C, McGrail PT, Spadaro G. Study of methyl methacrylate polymerization in the presence of rubbers. European Polymer Journal. 2001; 37: 535-9.
- (4) Charmondusit K, Prasertpong P. Impact modification of styrene-methyl metacrylate copolymer cast sheet by using natural rubber. Environment and Natural Resource J. 2007; 6: 101-13. Thai.
- (5) Thawornwisit S, Charmondusit K, Rempel GL, Hinchiranan N, Prasassarakich P. Poly(Methyl Methacrylate-co-Styrene) Modified with Hydrogenated Natural Rubber. Journal of Elastomers and Plastics. 2010; 42: 35-47.
- (6) Pankumnead S, Rotpradit J; The Impact Modification of Poly (methyl methacrylate) sheet by using Polyurethane. A special project submitted in partial fulfillment of the Requirement for the degree of bachelor of science, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, 2006.
- (7) Heim Ph, Wrotecki C, Avenel M, Gaillard P. High impact cast sheet of poly (methyl methacrylate) with low level of polyurethane. Polymer. 1993; 34: 1653-60.
- (8) Ichiro M, Haruhiko S, Kazufumi U. Damage produced in laminate plastic plates by small ball collision with the velocity of 50-140 m/s. Int. J. Impact Eng. 2000; 24: 673-84.
- (9) Moon-Saeng K, Hyung-Seop S, Hyeon-Chul L. The effect of back plate materials on perfect cone formation in impact-loaded soda-lime glass. Int. J. Impact Eng. 2003; 28: 281-90.
- (10) ASTM D 790. Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastic and electrical insulating materials. 2000.

- (11) ASTM D 2240. Standard test method for rubber property-durometer hardness. 2000.
- (12) ISO 6603-1. Plastic-Determination of puncture impact behavior of rigid plastics. 1997.
- (13) Patricio PSO, de Sales JA, Silva GG, Windmüller D, Machado JC. Effect of blend composition on microstructure, morphology, and gas permeability in PU/PMMA blends. *Journal of Membrane Science*. 2003; 271: 177–85.
- (14) Joshua SS, Goulbourne NC. The effect of polyacrylate microstructure on the impact response of PMMA/PC multi-laminates. *Int J. Impact Engng*. 2011; 38: 567-76.