

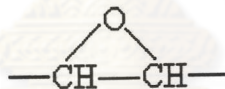
บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 อีพอกซีเรซิน (Epoxy resins)

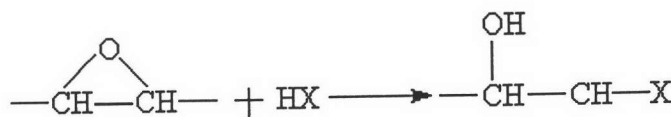
2.1.1 การเตรียมอีพอกซีเรซิน

อีพอกซีเรซิน คือ พอลิอีเทอร์เรซินที่ประกอบด้วยหมู่อีพอกซี (epoxy group) มากกว่า 1 หมู่ ในโมเลกุล ซึ่งหมู่นี้อาจอยู่ส่วนในของโมเลกุล แต่ปกติอยู่ที่ส่วนปลายของโมเลกุล บางครั้งอาจเรียกหมู่อีพอกซีว่าเป็นออกไซด์ เช่น อีพอกซีอีเทน (epoxy ethane) หรือ 1,2-อีพอกไซด์ (1,2-epoxide) และหมู่อีพอกซียังรู้จักในชื่อว่าหมู่ออกซิเรน (oxirane) หรือหมู่เอทอกซิลีน (ethoxyline group) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นวงแหวนสามเหลี่ยม (3-membered ring) ที่ประกอบด้วยอะตอมของออกซิเจนเชื่อมกับคาร์บอน 2 อะตอม ดังแสดงในรูปที่ 2.1



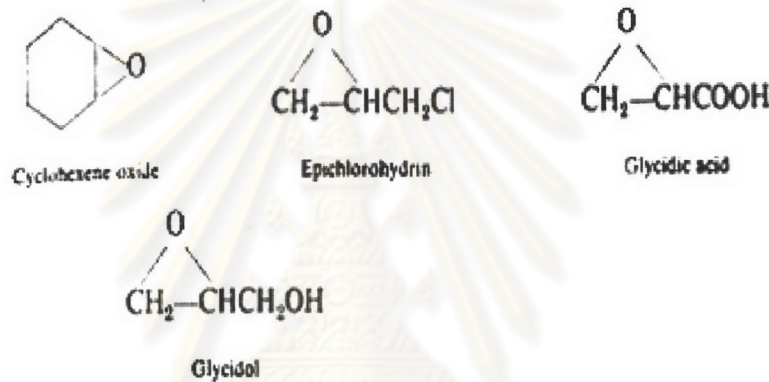
รูปที่ 2.1 หมู่อีพอกซี

เนื่องจากวงแหวนสามเหลี่ยมของอีพอกซีมีความเครียดสูงจึงไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆ มากมาย โดยเฉพาะกับสารที่ให้โปรตอน (proton donors) จึงสามารถเกิดปฏิกิริยาดังแสดงในรูปที่ 2.2 ซึ่งปฏิกิริยานี้มีผลทำให้สายโซ่โมเลกุลขยายขนาดยาวขึ้นและ/หรือเกิดการเชื่อมขวางโมเลกุลโดยไม่ปลดปล่อยสารโมเลกุลเล็กๆ เช่น น้ำ ออกมา ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการบ่มมีการหดตัวต่ำกว่าเทอร์โมเซตพลาสติกอื่นๆ [1]

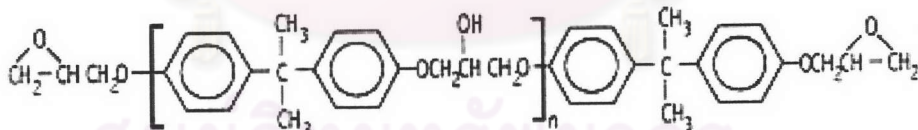


รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกซีกับสารที่ให้โปรตอน

อีพอกซีเรซินสามารถจำแนกได้หลายประเภทโดยพิจารณาจากชนิดของสารตั้งต้นที่ใช้ในการสังเคราะห์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ โครงสร้างทางเคมีภายในโมเลกุลอาจเป็นอะลิฟาติก (aliphatic) ไชโคลอะลิฟาติก (cycloaliphatic) หรืออะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (aromatic hydrocarbon) หรืออาจไม่ใช่ไฮโดรคาร์บอน (non-hydrocarbon) และมีขั้วได้ และยังอาจมีส่วนที่ไม่อิ่มตัวอยู่ด้วย จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ภายหลังการบ่มมีสมบัติหลากหลาย อย่างไรก็ตาม อีพอกซีเรซินในทางการค้า 80-90 เปอร์เซ็นต์ จะได้จากปฏิกิริยาระหว่างบิสฟีนอลเอ (bisphenol A) และอีพิคลอโรไฮดริน (epichlorohydrin) ได้เป็นไดโกลซิไดลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ (diglycidyl ether of bisphenol A, DGEBA) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



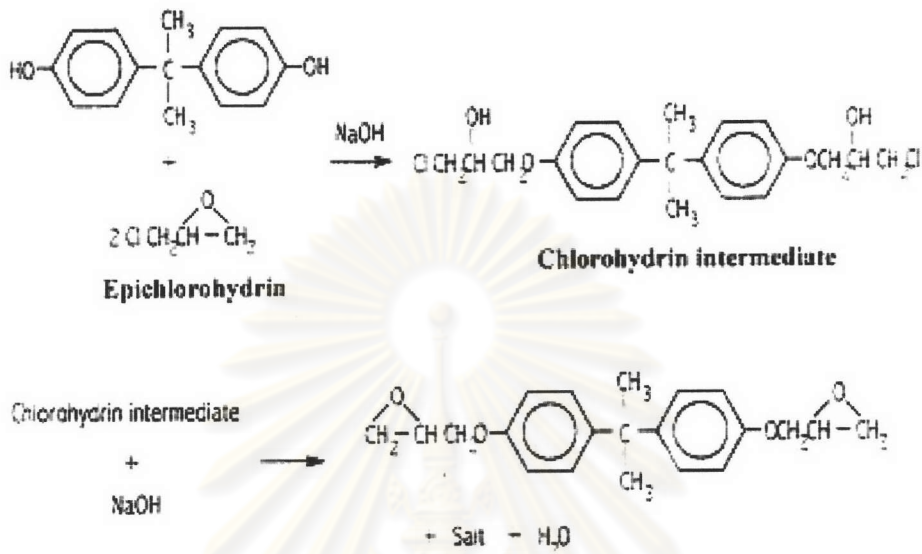
รูปที่ 2.3 ชนิดของสารตั้งต้นที่มีหมู่อีพอกซี [2]



รูปที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของ DGEBA

n มีค่าจาก 0 ถึง 25 ซึ่งค่านี้สามารถบอกถึงการใช้งานของเรซินได้ ถ้า $n = 0$ ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไดโกลซิไดลอีเทอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 340 เรซินที่มีค่า n ประมาณ 1 หรือต่ำกว่าจะเป็นของเหลวที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แต่ถ้า n มีค่ามากกว่า 1 จะมีลักษณะเป็นของแข็งเปราะ ดังนั้นอีพอกซีที่ยังไม่ได้บ่มจะเป็นพอลิเมอร์ที่มีระดับพอลิเมอร์เรซินต่ำ โดยเรซินเหลวทางการค้าส่วนใหญ่ประกอบด้วย DGEBA ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำอยู่รวมกับพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงที่มีอยู่เพียงเล็กน้อย

การสังเคราะห์หมอนอเมอริก DGEBA ทำได้โดยนำอิพิคลอโรไฮดรินมาทำปฏิกิริยากับบิสฟีนอลเอภายใต้ภาวะที่มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังสมการในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การสังเคราะห์หมอนอเมอริก DGEBA [2]

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าปฏิกิริยาเกิดเป็นสองขั้นตอน ดังนี้

ขั้นที่ 1 เกิดคลอโรไฮดริน intermediate ขึ้นก่อน

ขั้นที่ 2 คลอโรไฮดริน intermediate ถูกดึงน้ำและหมู่ฮาโลเจนออก (dehydrohalogenation) ได้เป็นไกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ นอกจากนี้ กรดเกลือที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับ NaOH ได้เป็นเกลือโซเดียมคลอไรด์

จากสมการในรูปที่ 2.5 จะได้ว่าบิสฟีนอลเอ 1 โมล เข้าทำปฏิกิริยากับอิพิคลอโรไฮดริน 2 โมล ซึ่งในความเป็นจริงพบว่าได้ได้ไกลซิดิลอีเทอร์ออกมาปริมาณน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องใช้อิพิคลอโรไฮดรินมากเกินไป (2-10 เท่า) จึงจะได้หมอนอเมอริก DGEBA จำนวนมาก ทั้งนี้ฟอกซีเรซินเหลวในทางการค้ามักมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยประมาณ 300-400 กรัมต่อโมล [1]

ถ้าต้องการได้ผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงขึ้นอาจทำได้โดยลดปริมาณอิพอกซีไฮดรินที่มากเกินไป และให้ปฏิกิริยาดำเนินไปภายใต้ภาวะที่เป็นต่างเข้มข้นมากกว่าเดิม ซึ่งจะช่วยให้หมู่อิพอกซีทำปฏิกิริยากับบิสฟีนอลเอได้มากขึ้น และที่สำคัญ คือ ต้องระมัดระวังในการกำจัดไฮเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหลือ และสิ่งปนเปื้อนอื่นๆ เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาการล้างเรซินที่มีความหนืดสูงมากนี้ อาจทำได้โดยใช้กระบวนการเตรียมเรซินแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมพอลิเมอร์ที่มีระดับพอลิเมอร์เชนประมาณ 3 เสียก่อน แล้วจึงให้ทำปฏิกิริยาต่อกับบิสฟีนอลเอภายใต้ภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม โดยไม่มีการปลดปล่อยผลพลอยได้ (by product) ใดๆ ออกมา

อิพอกซีเรซินเหลว (Liquid epoxy resins)

การเตรียมอิพอกซีเรซินเหลวทำโดยป้อนอิพอกซีไฮดรินและบิสฟีนอลเอเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ในอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 10:1 แล้วเติมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 20-40 เปอร์เซ็นต์ เข้าไปในภาชนะอย่างช้าๆ ขณะที่ให้ความร้อนแก่สารละลายจนถึงจุดเดือด และให้สารละลายเดือดต่อไปจนไฮเดียมไฮดรอกไซด์ 2 โมล ต่อบิสฟีนอลเอ 1 โมล ถูกเติมเข้าไปจนครบ โดยสารละลายจะแยกเป็น 2 ชั้น และอิพอกซีไฮดรินที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกกำจัดออกด้วยการกลั่นแบบสุญญากาศ แล้วให้เติมตัวทำละลายเฉื่อยเข้าไปในเรซิน ซึ่งปฏิกิริยาจะเสร็จสมบูรณ์ภายใต้ภาวะที่มีสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไป เรซินจะแยกอยู่ในน้ำเกลือ และทำการล้างด้วยน้ำจนได้เรซินใส ส่วนตัวทำละลายจะถูกกำจัดออกด้วยการกลั่นแบบสุญญากาศต่อไป

อิพอกซีเรซินแข็ง (Solid epoxy resins)

การเตรียมอิพอกซีเรซินแข็งทำโดยป้อนอิพอกซีไฮดรินและบิสฟีนอลเอเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ในอัตราส่วนตามทฤษฎี โดยมีอิพอกซีไฮดรินมากเกินไปเล็กน้อย แล้วผสมสารละลายไฮเดียมไฮดรอกไซด์เข้าไปให้เข้ากันอย่างดี ปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์ภายหลังจากปฏิกิริยาดำเนินไป 1 ชั่วโมง ผลที่ได้เป็นก้อนคล้ายทอฟฟี่ ซึ่งทำให้เกิดการแยกเฟสด้วยการเติมตัวทำละลายเฉื่อย โดยน้ำเกลือจะถูกแยกออกมา และล้างสารละลายเรซินด้วยน้ำเพื่อกำจัดเกลือที่เหลือค้างอยู่ ซึ่งเมื่อกำจัดตัวทำละลายด้วยการกลั่นแบบสุญญากาศ จะได้อิพอกซีเรซินแข็งออกมา [3]

2.1.2 การบ่มอีพอกซีเรซิน

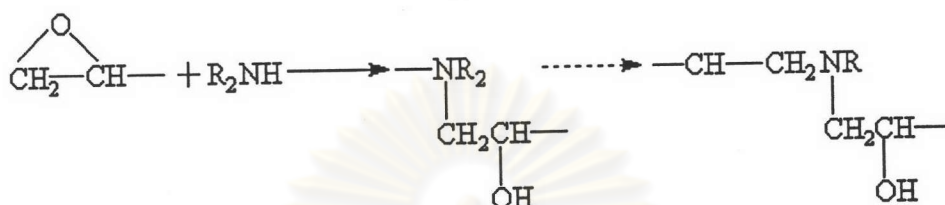
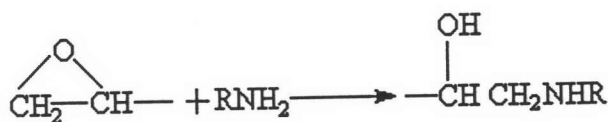
การบ่มอีพอกซีเรซินเพื่อเปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซตพลาสติกซึ่งมีโครงสร้างเป็นร่างแห 3 มิติ ที่ไม่ละลายหรือหลอมเหลว สามารถเกิดได้ที่หมู่ฟังก์ชันซึ่งว่องไวต่อปฏิกิริยาที่อยู่ในโมเลกุล จากการศึกษา กลไกการบ่มของอีพอกซีเรซินชนิดไดโกลซิไดลอีเทอร์พบว่า การเชื่อมขวางอาจเกิดได้ทั้งที่หมู่อีพอกซี หรือหมู่ไฮดรอกซิลของ DGEBA อีพอกซีเรซิน นอกจากนี้ การเชื่อมขวางยังสามารถเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของอีพอกซีด้วยกันเอง หรือโดยปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกซีกับโมเลกุลอื่นที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาทั้งที่ใช้และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

สารบ่ม (curing agent) จะมีหมู่ที่ว่องไวต่อปฏิกิริยาในโมเลกุลตั้งแต่ 2 หมู่ ขึ้นไปที่สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่อีพอกซีได้ โดยสมบัติของผลิตภัณฑ์นอกจากจะขึ้นกับชนิดของอีพอกซีฟิรพอลิเมอร์แล้วยังขึ้นกับประเภทของสารบ่มที่ใช้อีกด้วย ซึ่งสารบ่มที่นิยมใช้ในปัจจุบัน ได้แก่ สารประกอบเอมีน ทั้งที่เป็นอะลิฟาติกและอะโรมาติก [4] นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบอื่นซึ่งมีไฮโดรเจนอะตอมที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา เช่น แอลกอฮอล์ ยูเรีย ยูรีเทน และไอโซไซยาเนต เป็นต้น

ปฏิกิริยาการบ่มด้วยสารประกอบเอมีน

การบ่มอีพอกซีเรซินส่วนใหญ่นิยมใช้สารประกอบเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ (primary and secondary amines) เป็นสารบ่ม (curing agent) แต่เอมีนปฐมภูมิมีความว่องไวต่อปฏิกิริยามากกว่าเอมีนทุติยภูมิ [3] สำหรับเอมีนตติยภูมิ (tertiary amines) จะไม่ใช่เป็นสารบ่มเพราะไม่มีไฮโดรเจนที่ว่องไวต่อปฏิกิริยา ดังนั้น จึงไม่เกิดปฏิกิริยาแบบรวมตัวระหว่างเอมีนตติยภูมิและหมู่อีพอกซี หากแต่จะใช้เอมีนตติยภูมิเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบ่มอีพอกซีเรซิน

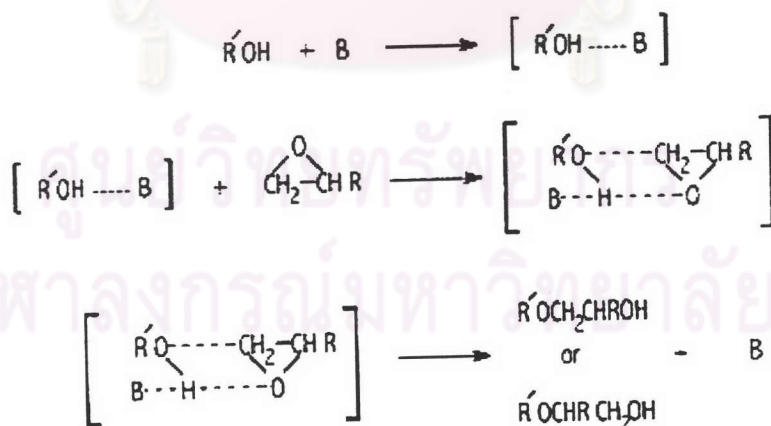
เอมีนปฐมภูมิเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่อีพอกซีเกิดเป็นหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่เอมีนทุติยภูมิ ซึ่งหมู่เอมีนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยาต่อกับหมู่อีพอกซีเกิดเป็นหมู่เอมีนตติยภูมิและหมู่ไฮดรอกซิล เพราะฉะนั้น สารบ่มประเภทเอมีนปฐมภูมิทำให้เกิดเอมีนตติยภูมิ 1 หมู่ และไฮดรอกซิล 2 หมู่ ต่ออะมิโน 1 หมู่ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ขณะที่สารบ่มประเภทเอมีนทุติยภูมิทำให้เกิดเอมีนตติยภูมิ 1 หมู่ และไฮดรอกซิล 1 หมู่ ต่ออะมิโน 1 หมู่



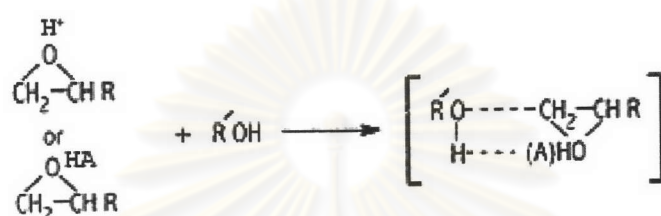
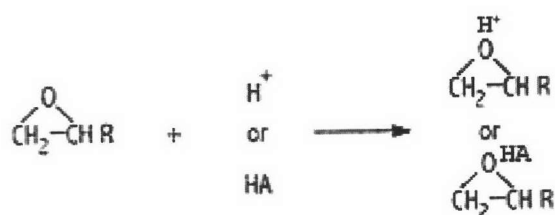
รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการบ่มอีพอกซีเรซินด้วยเอมีนปฐมภูมิและทุติยภูมิ [3]

ปฏิกิริยาการบ่มด้วยสารประกอบแอลกอฮอล์

หมู่เอพอกซีสามารถเกิดปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ได้ทั้งแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ ($\text{R}'\text{CHRCH}_2\text{OH}$) และทุติยภูมิ ($\text{R}'\text{CH}_2\text{CH}_2\text{ROH}$) ภายใต้สภาวะต่างๆ กรดและด่างทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอพอกซีและแอลกอฮอล์ ถ้าในภาวะที่ปราศจากตัวเร่งปฏิกิริยาจะสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิสูง ปฏิกิริยาที่ถูกเร่งปฏิกิริยาโดยด่างและกรดแสดงไว้ในรูปที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ



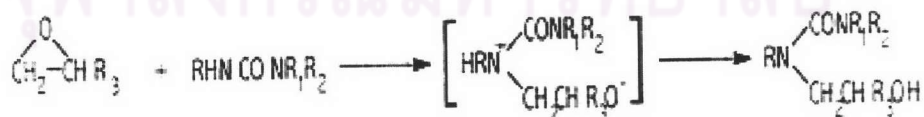
รูปที่ 2.7 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอพอกซีและแอลกอฮอล์ภายใต้ภาวะที่เป็นด่าง [4]



รูปที่ 2.8 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟอกซีและแอลกอฮอล์ภายใต้ภาวะที่เป็นกรด [4]

ปฏิกิริยาการบ่มด้วยสารประกอบยูเรีย

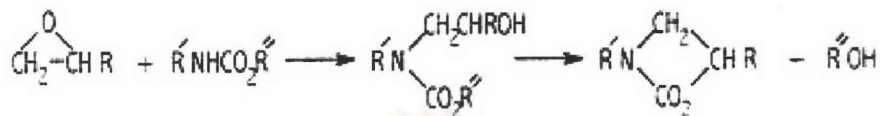
ยูเรียและอนุพันธ์สามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ฟอกซีได้ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งกลไกของปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่ฟอกซีและยูเรีย [4]

ปฏิกิริยาการบ่มด้วยสารประกอบยูรีเทน

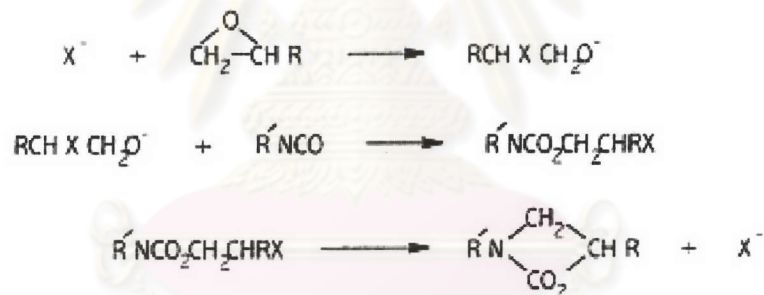
ผลที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างยูรีเทนและหมู่อีพอกซี คือ 2-ไฮดรอกซีเอทิลยูรีเทน (2-hydroxyethyl-urethane) และออกซะโซลิโดน (oxazolidone) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาระหว่างหมู่อีพอกซีและยูรีเทน [4]

ปฏิกิริยาการบ่มด้วยสารประกอบไอโซไซยานต

ไอโซไซยานตสามารถเป็นสารบ่มของอีพอกซีเรซินได้ในภาวะที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น ควอเทอร์นารีแอมโมเนียมเฮไลด์ (quaternary ammonium halides) เอมีนตติยภูมิ (tertiary amines) และเฮไลด์ของสารอนินทรีย์ (inorganic halides) เป็นต้น ซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาแสดงไว้ในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 กลไกของปฏิกิริยาการบ่มอีพอกซีเรซินด้วยสารไอโซไซยานต [4]

2.1.3 สมบัติและการใช้งานของอีพอกซีเรซิน

อีพอกซีเรซินมีน้ำหนักปานกลาง มีความถ่วงจำเพาะ 1.11-1.18 สามารถรับแรงดึงได้ดีมาก รับแรงอัดได้ดี และรับแรงกระแทกได้ดีพอสมควร เมื่ออยู่ในรูปของผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาส สามารถรับแรงดึงได้ถึง 65,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยมากกว่าเหล็กโครงสร้าง (structural steel) ซึ่งรับได้เพียง 60,000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว สมบัติพิเศษของอีพอกซีเรซิน คือ สามารถติดแนบได้ดีกับวัสดุอื่นๆ เช่น โลหะ แก้ว พลาสติก เซรามิก และยาง เป็นต้น โดยไม่คำนึงว่าผิวจะมีลักษณะเรียบหรือขรุขระ นอกจากนี้ ยังมีสมบัติอ่อนตัว (flexible) จึงเหมาะสำหรับทำกาบเป็นอย่างยิ่ง อีพอกซีเรซินมีการหดตัวน้อยมาก เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี สามารถทนไฟอาร์กได้ดีอีกด้วย ทนความร้อนได้ถึง 600 องศาฟาเรนไฮด์

และในสภาพการใช้งานปกติจะทนความร้อนได้ในอุณหภูมิ 200-300 องศาฟาเรนไฮต์ อีพอกซีติดไฟได้แต่เกิดช้าและดับได้เอง มีความทนกรด ต่าง และสารละลายได้ดี มีการดูดซึมน้ำในอัตราต่ำ

ได้มีการนำอีพอกซีเรซินมาใช้งานในทางการค้าอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถขึ้นรูปได้ง่าย ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปของเหลวใช้ทำกาวยึดวัสดุต่างๆ ติดโครงสร้างผึ้งอะลูมิเนียม (aluminium honeycomb) ในเครื่องบิน วัสดุเคลือบผิว เช่น พลาสติกเคลือบพื้นถนน โรงงาน และโรงยิมเนเซียม เคลือบกรอบหน้าเครื่องรับโทรทัศน์ ซึ่งทนและถูกกว่าการชุบเคลือบผิวด้วยไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังนิยมนำไปหล่อทำแม่แบบระดับงานทดลอง หรือมีปริมาณการผลิตต่ำในอุตสาหกรรมพลาสติก และแม่แบบปั๊มแผ่นโลหะ

ในรูปผลิตภัณฑ์ อีพอกซีนี้นำไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ไฟเบอร์กลาสที่ต้องการใช้งานสมรรถนะสูง ใช้ทำชิ้นส่วนเครื่องบิน เฮลิคอปเตอร์ และรถยนต์ เป็นต้น

ในรูปของโฟม ใช้ทำเป็นไส้หรือแกนกลาง (core) เพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มความแข็งแรงในโครงสร้างแบบแซนด์วิช (sandwich construction)

2.2 พีวีซีพลาสติกซอล (PVC plastisols)

พีวีซีเป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีความสำคัญและมีประโยชน์มาก มีการผลิตมากเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน สามารถนำไปทำผลิตภัณฑ์ที่ใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้มากมาย และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งทางด้านอุตสาหกรรม งานอาคารและการก่อสร้าง งานไฟฟ้า งานบรรจุภัณฑ์ และงานด้านเกษตรกรรม งานทางการแพทย์และอนามัย ของใช้ในบ้าน ระบบการขนส่ง และระบบรักษาความปลอดภัย พีวีซีที่ยังไม่ได้ใส่สารเติมแต่งใดๆ จะมีสมบัติ ดังนี้ :

- แข็ง เปราะ แตกง่าย เป็นพลาสติกอสัณฐาน
- ไม่มีสี ไส
- มีความหนาแน่นประมาณ 1.4 กรัมต่อซม.³
- เมื่อติดไฟสามารถดับด้วยตัวเองได้
- สลายตัวได้ง่ายเมื่อได้รับความร้อนและแสงแดด จึงจำเป็นต้องใส่สารเพิ่มเสถียรภาพ

พีวีซีที่ใช้ทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ท่อ ขวด ผนวนหุ้มสายไฟ และหนังเทียม ไม่ได้ทำจากผงพีวีซีเท่านั้น แต่จะผสมสารเติมแต่งอีกหลายชนิดเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสมบัติตามต้องการ เช่น พลาสติกไซเซออร์ (plasticizers) สารเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizers) สารหล่อลื่น (lubricants) และ

ฟิลเลอร์ (fillers) เป็นต้น พีวีซีโดยทั่วไปมี 2 เกรด คือ พีวีซีแข็ง (rigid PVC) และพีวีซียืดหยุ่น (flexible PVC) โดยนำพีวีซีแข็งมาทำเป็นแผ่น ท่อ กรอบประตูหน้าต่าง และชิ้นส่วนต่างๆ ส่วนพีวีซียืดหยุ่นซึ่งได้จากการใส่พลาสติกไซเซออร์เข้าไปในพีวีซี หรือที่เรียกว่า “พลาสติกไซซ์พีวีซี” (plasticized PVC) ใช้ทำ ฉนวนหุ้มสายไฟ หนังสือหุ้มเบาะเก้าอี้ ทำกระเป๋า กระเบื้องยางปูพื้น ฟิล์ม กระดาษปิดผนัง และ สายยาง เป็นต้น

พีวีซีพลาสติกซอลเป็นของไหลหนืดที่ได้จากการกระจายตัวของผงพีวีซีที่มีขนาดอนุภาคละเอียด (ประมาณ 1 ไมโครเมตร) อย่างเสถียรในพลาสติกไซเซออร์จนเข้าเป็นของเหลวเนื้อเดียวกัน หรือบางครั้งเรียกว่า “paste” โดยการให้ความร้อนที่ 180-250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2-3 นาที พลาสติกไซเซออร์จะถูกดูดซับเข้าไปในอนุภาคของพีวีซีเกิดเป็นเจลที่เรียกว่า “เจลชัน” (gelation) โดยพีวีซีพลาสติกซอลอาจมีพฤติกรรมการไหล (rheology) เป็น ซูดอพลาสติก (Pseudoplastic) หรือ ไดลาแทนท์ (Dilatant) ก็ได้ ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นกับขนาดอนุภาค การกระจายขนาด และรูปร่างของอนุภาค และนอกจากนั้นยังขึ้นกับ ชนิดของพลาสติกไซเซออร์ และสารเติมแต่งอื่นๆ อีกด้วย

พีวีซีที่ใช้เตรียมพีวีซีพลาสติกซอลผลิตจากกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) ซึ่งจะให้พีวีซีที่มีขนาดอนุภาคละเอียดกว่าการเตรียมด้วยกระบวนการแบบแขวนลอย (suspension polymerization) จึงเหมาะกับการเคลือบ (coating) เช่น การทำหนังสือ เป็นต้น ซึ่งมี ขั้นตอนการผลิต [5] ดังนี้ :

1. การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ในระบบประกอบด้วยมอนอเมอร์ ตัวกลาง สำหรับการกระจาย (dispersing medium) อิมัลซิฟายเออร์ (emulsifier) และตัวริเริ่ม (initiator) ที่ละลายน้ำได้ ตัวกลางสำหรับการกระจายเป็นของเหลวที่ทำให้ส่วนประกอบอื่นๆ กระจายอยู่ใน ลักษณะที่เป็นอิมัลชันโดยการใช้อิมัลซิฟายเออร์ ซึ่งตัวกลางที่ใช้มักเป็นน้ำ อิมัลซิฟายเออร์เป็นสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโครงสร้างของโมเลกุลมีทั้งส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) เมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดจะได้ลาเท็กซ์ที่ประกอบด้วยอนุภาคเล็กๆ ของพอลิเมอร์กระจายอยู่ในน้ำ ที่เรียกว่า “primary particle” และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05-1.5 ไมโครเมตร

2. การทำให้แห้ง เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อโครงสร้างและสมบัติของ emulsion PVC ซึ่งในการทำให้แห้งส่วนใหญ่จะใช้ spray dryer พ่นลาเท็กซ์ออกมาเป็นหยดเล็กๆ (ภายในมี primary particle อยู่มากมาย) หยดเหล่านี้จะสัมผัสกับลมร้อน เพื่อทำให้น้ำระเหยออกไป และจะเปลี่ยนเป็นทรงกลมกลวงที่เรียกว่า "secondary particle" หรือ "cenosphere" ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15-150 ไมโครเมตร

3. การบด (grinding) secondary particle อาจถูกนำไปบดในกรณีที่จะเอาไปใช้ทำพลาสติกขอล และผงพีวีซีที่ได้จะมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2-1.5 ไมโครเมตร ซึ่งถ้าจับดูจะคล้ายกับแป้งเด็กที่ละเอียดมากๆ และพลาสติกขอลที่ได้มีลักษณะขุ่น เนื่องจากมีตัวทำละลายเหลือตกค้างอยู่ ปริมาณสารตกค้างต่างๆ ที่ยังคงอยู่ในพอลิเมอร์จะทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติด้านการเป็นฉนวนไฟฟ้าลดลง

การผลิต emulsion PVC ทุกขั้นตอน (พอลิเมอร์ไรเซชัน การทำให้แห้ง และการบด) จะมีผลต่อสมบัติของพีวีซีทั้งสิ้น วิธีการผลิตแบบนี้มีการนำไปใช้งานน้อยกว่าพอลิเมอร์ไรเซชันแบบแขวนลอย (suspension polymerization) ทั้งนี้เพราะใช้เทคนิคที่ยุงยากซับซ้อนกว่า ราคาแพง และพีวีซีที่ได้มีความบริสุทธิ์น้อยกว่า แต่จะมีขนาดอนุภาคที่ละเอียดกว่ามาก โดยพีวีซีที่ได้จากกระบวนการแบบแขวนลอยจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ (40-150 ไมโครเมตร) ถ้าจับดูจะมีลักษณะเป็นเม็ดที่ไม่ละเอียดมากนัก ใช้ในการขึ้นรูปโดยวิธีการรีดด้วยลูกกลิ้ง (calendering process) และพีวีซีที่ได้จากกระบวนการแบบอิมัลชันจะเรียกว่า "E-PVC" เหมาะกับการทำหนังเทียม กระเบื้องยาง ผ้าใบ ถุงมือ เสื้อกันฝน และ ส้นรองเท้า เป็นต้น

โดยปกติทั่วไปจะมีการแบ่งชนิดของพีวีซี เป็น 2 ประเภท คือ

1. **พีวีซีเรซิน (PVC resin)** คือ พีวีซีบริสุทธิ์ซึ่งมีลักษณะเป็นผงที่ยังไม่มีการใส่สารเติมแต่งใดๆ เข้าไปเพื่อปรับปรุงสมบัติ ดังนั้น ในการใช้งานจึงต้องนำพีวีซีนี้ไปผสมสารเติมแต่งเสียก่อนเพื่อปรับปรุงสมบัติให้ดีขึ้น แล้วจึงจะสามารถนำไปขึ้นรูปได้

2. **พีวีซีคอมพาวนด์ (PVC compound)** คือ พีวีซีที่มีลักษณะเป็นเม็ด และมีสารเติมแต่งเติมลงไปเรียบร้อยแล้ว สามารถนำไปขึ้นรูปได้เลย

การผสมพีวีซีและสารเติมแต่งเพื่อความสะดวกในการใช้งานมืออยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ

1. คอมปาวนด์ (compound) มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกระบอกเล็กๆ หรือลูกบาศก์เล็กๆ ที่ได้จากการผสมพีวีซีและสารเติมแต่ง แล้วป้อนเข้าเครื่องอัดรีด (extrusion) และถูกตัดเป็นเม็ดเล็กๆ
2. พรีเมิกซ์ (premix) เป็นของผสมที่มีลักษณะเป็นผงขึ้น เกิดจากการผสมเรซินและสารเติมแต่งโดยใช้เครื่องผสม (mixer) กวนด้วยความเร็วสูง
3. พลาสติซอล (plastisol) หรือเพส (paste) มีลักษณะเป็นของเหลวหนืด พีวีซีที่ใช้เป็นประเภท E-PVC ผสมกับพลาสติกไซเซออร์ และสารเติมแต่งอื่นๆ เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน

การแบ่งเกรดของพีวีซีจะแบ่งตามความหนืดเมื่อละลายในตัวทำละลาย ซึ่งส่วนมากจะใช้ไซโคลเฮกซาโนน (cyclohexanone) แล้ววัดความหนืดโดยมีมาตรฐานกำหนดค่าแทนความหนืดเรียกว่า "ค่า K" (K value) ซึ่งเป็นตัวเลขที่ไม่มีหน่วย ค่า K เป็นค่าที่ชี้ให้เห็นถึงน้ำหนักโมเลกุล และสามารถคำนวณได้จากสูตรซึ่งมีความสัมพันธ์กับความหนืดสัมพัทธ์ (relative viscosity) ดังนี้ :

$$(\log_{10} \eta_{rel})/C = 75K^2/(1 + 1.5KC) + K$$

โดย η_{rel} = ความหนืดสัมพัทธ์

C = ความเข้มข้นของสารละลาย

ถ้าพีวีซีเรซินมีค่า K สูง แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลสูง ถ้าค่า K ต่ำ แสดงว่ามีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ นอกจากนี้ค่า K ยังแสดงถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์อีกด้วย คือ ถ้ามีค่า K สูง จะต้องใช้อุณหภูมิสูงในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ และค่า K นี้ยังบอกถึงความอ่อนนิ่ม และความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์ด้วย คือถ้ามีค่า K สูง ผลิตภัณฑ์จะมีความแข็งแรงสูงและมีความนิ่มน้อย ถ้ามีค่า K ต่ำ จะมีความแข็งแรงต่ำ และมีความนิ่มมาก ซึ่งสามารถแบ่งพีวีซีเรซินตามค่า K ได้ดังนี้ :

พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่ำ คือ ต่ำกว่า 60

พีวีซีเรซินที่มีค่า K ปานกลาง คือ 60-70

พีวีซีเรซินที่มีค่า K สูง คือ ตั้งแต่ 70 ขึ้นไป

ทั้งนี้ในการขึ้นรูปพีวีซีเรซินนั้น ต้องพิจารณาค่า K ประกอบไปด้วย กล่าวคือ ถ้าผลิตภัณฑ์เป็นพวกพีวีซีชนิดแข็ง จะเลือกใช้พีวีซีที่มีค่า K 59-60 เพราะต้องการค่า K สูงพอที่ทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งแรง แต่ถ้าค่า K สูงมากไปกว่านี้ จะขึ้นรูปไม่ได้ เนื่องจากพีวีซีชนิดแข็งจะไม่มีส่วนผสมพลาสติกไซเซออร์ หรือถ้าผสมก็อยู่ในปริมาณที่น้อยมาก ซึ่งทำให้ต้องใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง และเกิดแรงเค้นขึ้นมาก ส่งผลให้พีวีซีเรซินเกิดการแตกสลาย (decompose) เสียก่อน ส่วนพีวีซีชนิดยืดหยุ่น จะมีการใช้พีวีซีเรซินที่มีค่า K แตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นกับว่าต้องการนำพีวีซีเรซินชนิดนั้นไปทำผลิตภัณฑ์ประเภทใด ถ้าต้องการนำไปทำชั้นฟองน้ำ ต้องใช้พีวีซีเรซินที่มีค่า K ต่ำ คือ ประมาณ 60 เพราะในชั้นฟองน้ำจะไม่ต้องการความแข็งแรงมากนัก แต่ต้องการความนิ่มมากและต้องการให้พีวีซีเรซินหลอมตัวพอดี ส่วนพีวีซีเรซิน ที่มีค่า K อยู่ระหว่าง 55-70 จะนิยมใช้งานกันมาก เนื่องจากมีความแข็งแรงพอเหมาะและสามารถขึ้นรูปได้ง่าย

พลาสติกไซเซออร์ (Plasticizers) [6-8]

ปกติพีวีซีเป็นพลาสติกที่แข็ง เปราะ ไม่อ่อนตัว และแตกได้ง่ายเมื่อได้รับแรงกระแทก จึงไม่เหมาะกับการใช้งานบางอย่างจนกว่าจะทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวเสียก่อน การใส่พลาสติกไซเซออร์เข้าไปจะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้น เป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ ยังทำให้อุณหภูมิกลาสทรานซิชันของพีวีซีลดต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จึงทำให้พอลิเมอร์ที่มีสมบัติแข็ง เปราะ เปลี่ยนเป็นอ่อนตัว มีความสามารถในการหักงอได้ และยืดตัวได้มากขึ้น พลาสติกไซเซออร์เป็นสารเคมีที่เป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันประมาณหรือใกล้เคียง -50 องศาเซลเซียส ไม่มีสีและกลิ่นที่น่ารังเกียจ ไม่มีความเป็นพิษ ซึ่งพลาสติกไซเซออร์จะคล้ายกับ ตัวทำละลายมาก แต่ที่ต่างจากตัวทำละลาย คือ พลาสติกไซเซออร์มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าตัวทำละลายมาก เช่น อะซิโตน (acetone) ซึ่งเป็นตัวทำละลายมีน้ำหนักโมเลกุล 58 ในขณะที่พลาสติกไซเซออร์ เช่น ไดออกทิล-ฟทาเลต (dioctyl phthalate, DOP) มีน้ำหนักโมเลกุล 390

พลาสติกไซเซออร์แบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1. **พลาสติกไซเซออร์ปฐมภูมิ (primary plasticizer)** เป็นพลาสติกไซเซออร์ที่สามารถเติมลงในพอลิเมอร์ได้มากถึง 150 phr และเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่แยกออกมาจากพอลิเมอร์ ได้แก่ ไดออกทิลฟทาเลต (dioctyl phthalate, DOP) และ ไดไอโซนิลฟทาเลต (diisononyl phthalate, DINP) เป็นต้น

2. พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (secondary plasticizer) เป็นพลาสติไซเซอร์ที่สามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้คู่กับเป็นพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ และช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ โดยจะใช้ในปริมาณ 1 ใน 4 หรือ 1 ใน 2 ของพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ เช่น ไดออกทิลซีบาเคต (dioctyl sebacate, DOS) และน้ำมันถั่วเหลืองที่ถูกอ็อกซิไดซ์ (epoxidized soya bean oil, EPO) เป็นต้น นอกจากนี้ พลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

ทั้งนี้สามารถแบ่งพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมได้เป็นกลุ่มๆ ดังนี้ :

1. ฟทาเลตเอสเทอร์ (phthalate esters) นิยมใช้มากที่สุดในการบรรดาพลาสติไซเซอร์ทั้งหลาย โดยใช้มากกว่าครึ่งหนึ่งของพลาสติไซเซอร์ทั้งหมดรวมกัน ได้แก่ DOP ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ไป และ DINP ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิเช่นกัน จะใช้ในผลิตภัณฑ์พิเศษบางตัว เพื่อไม่ต้องการให้พลาสติไซเซอร์ระเหยออกไปได้ โดย DINP มีจุดเดือดสูงกว่า DOP ทำให้ระเหยออกจากผลิตภัณฑ์ได้ยากกว่า จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนสูง โดยพลาสติไซเซอร์ทั้งสองชนิดนี้เป็นอะโรมาติกเอสเทอร์

2. ฟอสเฟตเอสเทอร์ (phosphate esters) ที่สำคัญ ได้แก่ ไตรครีซิลฟอสเฟต (tricresyl phosphate) พลาสติไซเซอร์พวกนี้นอกจากช่วยทำให้เกิดความยืดหยุ่นแล้ว ยังช่วยป้องกันการติดไฟได้ด้วย ทำให้พอลิเมอร์มีสมบัติไม่ติดไฟ

3. สารประกอบพวกอะดิเพต (adipates), อะซีเลต (azelates) โอลีเอต (oleates) และซีบาเคต (sebacates) ซึ่งมักใช้มากในไวนิลเรซิน ทำให้ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำๆ เช่น ไดออกทิลอะดิเพต (dioctyl adipate, DOA) ซึ่งเป็นพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิที่มีสมบัติพิเศษ คือ ทำให้พีวีซีมีความอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำได้ถึง -20 องศาเซลเซียส

4. อนุพันธ์ของไกลคอล (glycol derivatives) กลุ่มนี้นิยมใช้เป็นตัวหล่อลื่น และตัวลดการติดแบบ (mold released agent) ซึ่งนิยมใช้กับพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

5. สารประกอบซัลโฟนาไมด์ (sulfonamides) นิยมใช้เป็นพลาสติไซเซอร์กับเซลลูโลสเอสเทอร์ ฟีนอลิกเรซิน อะมิโนเรซิน และพลาสติกพวกเอไมด์ เป็นต้น

6. เอสเทอร์จากกรดไขมันธรรมชาติ (natural fatty acids) พวกนี้จะใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิต เพราะราคาไม่แพง แต่คุณภาพไม่ค่อยดีนัก ต้องใช้ร่วมกับพลาสติไซเซอร์ชนิดอื่น

7. พลาสติกไซเซอร์พวกอีพอกซี (epoxy plasticizers) ซึ่งได้มาจากปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับน้ำมันพืชที่ไม่อิ่มตัว และกรดไขมัน ซึ่งมีสมบัติพิเศษ คือ ทำให้พลาสติก พีวีซีมีความคงทนต่อความร้อนและแสง

8. สารประกอบไฮโดรคาร์บอนและอนุพันธ์ของไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbons) นิยมใช้ผสมกับพลาสติกไซเซอร์ชนิดอื่น จัดเป็นพลาสติกไซเซอร์ทุติยภูมิ

9. พอลิเมอร์พลาสติกไซเซอร์ (polymeric plasticizers) เช่น พอลิเอสเทอร์แบบเส้นเชิงซ้อน (complex linear polyester) ได้แก่ พอลิเอทิลีนไกลคอลฟทาเลต (polyethylene glycol phthalate) ทำให้มีความทนทานต่อตัวทำละลายหรือผงซักฟอก แต่ต้องใช้ในปริมาณเล็กน้อย เพราะจะทำให้มีความหนืดสูง และยากต่อการขึ้นรูป

ขอบเขตของพลาสติกไซเซอร์ที่ใช้ในการทำพลาสติกขอลค่อนข้างกว้าง โดยอาจใช้พลาสติกไซเซอร์ตั้งแต่ 25 ส่วน จนถึงมากกว่า 50 ส่วน ต่อพีวีซีเรซิน 100 ส่วน การเลือกใช้พลาสติกขอลสำหรับการใช้งานที่เฉพาะจะขึ้นอยู่กับความต้องการในด้านความเหนียว การเจลตัว และการหลอมตัวของพลาสติกขอล ความเข้ากันได้ ความต้านทานต่อการระเหย การหน่วงไฟ ความเครียด ความต้านทานต่อการเคลื่อนย้ายตัว และต้นทุน

สตาบิไลเซอร์ (Stabilizers) [9]

เนื่องจากพีวีซีเป็นพอลิเมอร์ที่ไม่ทนต่อความร้อนมากนัก เพราะพันธะระหว่างคาร์บอนกับคลอรีน (C-Cl) มีพลังงานที่ใช้ในการสลายพันธะต่ำ และยังเป็นตำแหน่งที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ง่ายอีกด้วย ดังนั้น แสงหรือความร้อนสามารถทำให้พีวีซีเกิดการสลายตัว กล่าวคือ ไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) หลุดออกไปจากโมเลกุล ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เหลืออยู่มีสีคล้ำกว่าเดิม ลักษณะเฉพาะของพีวีซี คือ เมื่อโมเลกุลหนึ่งของไฮโดรเจนคลอไรด์หลุดออกมา โมเลกุลดังกล่าวจะเร่งปฏิกิริยาให้ไฮโดรเจนคลอไรด์โมเลกุลอื่นหลุดออกมาจากของพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ (autocatalytic) ทำให้ความไม่อิ่มตัวเพิ่มขึ้นสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์เสียไป และความสามารถในการใช้งานของพลาสติกน้อยลงไปอาจถึงขั้นไม่เกิดประโยชน์เลยก็เป็นได้ ปัญหาดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขโดยการเติมสตาบิไลเซอร์เข้าไปเพื่อรับไฮโดรเจนคลอไรด์ที่หลุดออกจากพีวีซี สตาบิไลเซอร์เป็นสารซึ่งทำหน้าที่ป้องกันการสลายตัวของพลาสติกทั้งในระหว่างกระบวนการผลิตและระหว่างการใช้งาน โดยเฉพาะป้องกันการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และป้องกันการสลายตัวเนื่องจากสภาพดินฟ้าอากาศ รวมทั้งรังสีอัลตราไวโอเล็ตที่มีในแสงแดด ซึ่งสตาบิไลเซอร์มีหลายชนิดขึ้นกับชนิดของพลาสติก การเติมสตาบิไลเซอร์นั้นมีขีดจำกัด

เช่นกัน ถึงแม้จะเติมให้มากเกินไป แต่บางครั้งก็อาจไม่ช่วยอะไรได้มากนัก อีกทั้งยังเป็นการสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุอีกด้วย

เนื่องจากสเตบิลไอเซอร์ทำให้พีวีซีสามารถทนความร้อนได้สูงขึ้น ดังนั้น จึงขาดไม่ได้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ทุกชนิด เพราะถ้าไม่มีจะทำให้ไม่ทนความร้อน โดยเฉพาะในการขึ้นรูปแบบรีดด้วยลูกกลิ้ง ถ้าไม่มีจะทำให้เกิดการไหม้ติดลูกกลิ้ง ทั้งนี้สามารถแบ่งประเภทของสเตบิลไอเซอร์ได้ดังนี้ :

1. ตะกั่วขาว (white lead) ใช้ในพวงงานอัดรีดพีวีซีชนิดแข็ง (rigid PVC extrusion)
2. ไดเบสิกเลดฟอสไฟต์ (dibasic lead phosphite) ใช้ในผลิตภัณฑ์พวงที่อยู่ภายนอกอาคาร เช่น ขอบหน้าต่าง แต่ไม่ค่อยนิยมใช้กันมากนักเพราะมีพิษภัยต่อธรรมชาติ
3. สบู่โลหะ (metal soap) เป็นสเตบิลไอเซอร์ที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลายมาก โดยมากเป็นเกลือของพวกโลหะ เช่น แบเรียมสเตียเรต (Ba-stearate) ซิงก์สเตียเรต (Zn-stearate) แคดเมียมสเตียเรต (Cd-stearate) หรืออาจเป็นการผสมของเกลือแบเรียม/ซิงก์/แคดเมียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพก็ได้
4. แคลเซียมสเตียเรต (calcium stearate) เป็นสเตบิลไอเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสำหรับกระบวนการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่ใช้อุณหภูมิต่ำๆ และไม่มีความเป็นพิษ แต่ถ้าเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูงก็ใช้ไม่ได้
5. เกลือและเอสเทอร์ของไทโอทิน (thio-tin salts and esters) จะทำให้มีสีคงทนและทนทานอุณหภูมิสูงได้ดีในระยะเวลายาวๆ
6. ฟอสไฟต์อินทรีย์ (organic phosphite) จะช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์มีสีคงทน
7. อนุพันธ์ของน้ำมันพืชอ็อกซิไดซ์ (epoxidized vegetable oil derivatives) เป็นพลาสติกไอเซอร์ ถ้าใช้ 5-10 เปอร์เซ็นต์ของพลาสติกไอเซอร์ปฐมภูมิ จะแสดงสมบัติการเป็นสเตบิลไอเซอร์ด้วย

โดยมากในการใช้เป็นสเตบิลไอเซอร์มักใช้หลายๆ ชนิดผสมกันไปเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการคงทนต่างๆ และสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร ต้องคำนึงถึงความเป็นพิษของพวกโลหะต่างๆ ที่ใช้เป็นสเตบิลไอเซอร์ด้วย สำหรับเกลือของแคดเมียมจะไม่นิยมใช้เป็นสเตบิลไอเซอร์ในการทำผลิตภัณฑ์ที่มีชั้นฟองน้ำอยู่ด้วยเพราะจะทำให้การฟูของชั้นฟองน้ำไม่สม่ำเสมอ

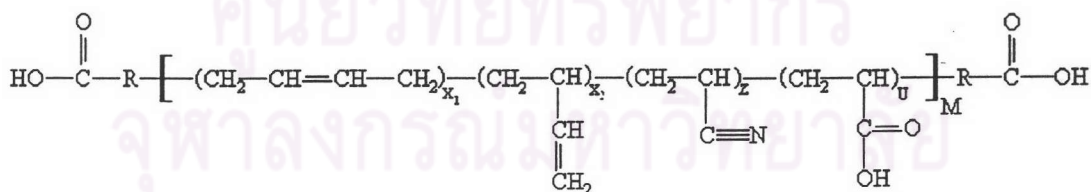
สูตรของพลาสติกซอลที่ใช้กันทั่วไป แสดงในตารางที่ 2.1 โดยสามารถปรับเปลี่ยนได้ ขึ้นกับความหนืดที่ต้องการและการใช้งาน

ตารางที่ 2.1 ส่วนผสมของพลาสติกซอลที่ใช้งานกันทั่วไป [10]

Additive	phr
Dispersion (paste) polymer	60-100
Extender (filler) polymer	0-40
Plasticizer	40-110
Heat and light stabilizers	1-5
Inorganic filler	0-100
Pigment	1-5
Volatile diluent	0-10
Other additives	0-5

2.3 โคพอลิเมอร์ของบิวตะไดอินและอะคริโลไนไตรล์ที่มีหมู่สุดท้ายเป็นหมู่คาร์บอกซิล (CTBN)

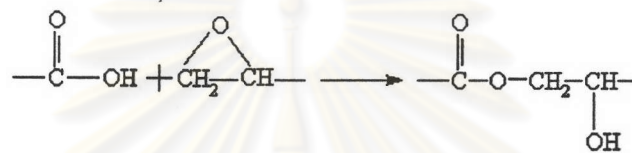
CTBN เป็นยางเหลวที่ใช้ตัดแปรรubberเพื่อเพิ่มความเหนียวของผลิตภัณฑ์ โดยมีสูตรโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.12 เนื่องจาก CTBN เป็นของเหลวจึงสามารถผสมเข้ากับอีพอกซีเรซินโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลาย



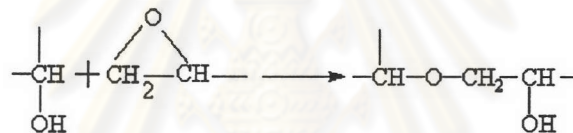
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของ CTBN

ใน CTBN จะมีปริมาณอะคริโลไนไตรล์อยู่ในช่วง 0-26 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าพารามิเตอร์การละลายอยู่ในช่วง 8.04-9.14 และมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยโดยจำนวน (number average molecular weight) อยู่ในช่วง 3400-40,000 หมู่คาร์บอกซิลที่อยู่ในอีลาสโตเมอร์นี้สามารถทำให้เกิดการเชื่อมขวางได้กับหมู่คาร์บอกซิลอื่นหรือกับส่วนประกอบอื่นที่อยู่ในสารผสม เช่น อีพอกซี โดยหมู่คาร์บอกซิลของ CTBN จะสามารถทำปฏิกิริยากับอีพอกซีได้ 3 ทาง ดังนี้ :

Esterification



Etherication



Esterification with dehydration



ปฏิกิริยาแรกส่วนใหญ่ทำให้เกิดการขยายขนาดของสายโซ่โมเลกุล ปฏิกิริยาที่ 2 ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง และปฏิกิริยาที่ 3 เกิดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ส่วนในกรณีที่ใช้เอมีนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หมู่คาร์บอกซิลจะเกิดเป็นเกลือคาร์บอกซีเอมีน (carboxy amine salt) ขึ้นก่อน แล้วจึงทำปฏิกิริยากับอีพอกซี ซึ่งเมื่อใช้ CTBN อีลาสโตเมอร์เป็นสารเพิ่มความเหนียว (toughening agent) จะมีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ใน CTBN ทำปฏิกิริยากับอีพอกซีประมาณ 100 หมู่ และการดัดแปรอีพอกซีเรซินโดยใช้ปริมาณที่มากถึง 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามี fracture toughness เพิ่มขึ้น โดยอนุภาคของยางขนาด 0.5-5 ไมโครเมตร จะกระจายอยู่ในเมทริกซ์ของอีพอกซีในระหว่างการบ่ม [11-12]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

โดยทั่วไปมีการนำอีพอกซีเรซินส่วนใหญ่มาใช้เป็นสารเคลือบ นอกจากนี้ นำไปประยุกต์เป็นเมทริกซ์ในอุตสาหกรรมวัสดุเชิงประกอบ เนื่องจากสามารถบ่มตัวได้ง่าย แต่อีพอกซีเรซินมีข้อเสียด้านความเปราะ และมีพลังงานในการแตกหักต่ำ คือ อยู่ในช่วง 80-200 จูลต่ออม.² วัสดุต่างๆ ที่ถูกเติมเข้าไปในอีพอกซีเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความเหนียวเป็นได้ทั้งวัสดุที่มีอนุภาคแข็ง (hard particulate materials) เช่น อนุภาคของแก้วอนินทรีย์ (inorganic glass particles) รวมทั้งอีลาสโตเมอร์ และเทอร์โมพลาสติก เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นต้น

Ozturk และผู้ร่วมงาน [13] ได้ศึกษาพฤติกรรมของอีพอกซีเรซินที่ถูกดัดแปรด้วยยางเหลว คือ hydroxy terminated polybutadiene (HTPB) ในปริมาณ 1 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และใช้สารคู่ควบไซเลน (silane coupling agent, SCA) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเข้ารวมตัวระหว่าง HTPB และ อีพอกซีเมทริกซ์ โดยทำการทดสอบสมบัติด้านความทนแรงดึงและความทนแรงกระแทก เพื่อศึกษาผลของสารดัดแปร การใช้สารคู่ควบ และกระบวนการผสมต่อสมบัติเชิงกลเหล่านี้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความทนแรงดึง และความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้น เมื่อขึ้นทดสอบประกอบด้วย HTPB 1 เปอร์เซ็นต์ และ SCA 2 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ ยังพบว่าการใช้ยางเหลวดัดแปรทำให้ความเครียดพลาสติก (plastic strain) ที่จุดขาดเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เนื่องจากเป็นไปได้ว่าความหนาแน่นของการเชื่อมขวางลดลง และจากการศึกษาสมบัติเชิงกลไดนามิกส์และสมบัติทางความร้อนพบว่ามอดุลัส อุณหภูมิกลาสทรานซิชัน และเสถียรภาพทางความร้อนของผลิตภัณฑ์ลดลงอย่างมาก การใช้ SCA และขั้นตอนการผสมแตกต่างกันสามารถปรับปรุงความเข้ากันได้ระหว่าง HTPB และอีพอกซีเมทริกซ์ ซึ่งช่วยให้อีพอกซีเรซินมีความเหนียวเพิ่มขึ้น

Chikhi และผู้ร่วมงาน [14] ได้กล่าวถึงความพยายามที่จะเพิ่มความเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่มแล้วด้วยการเติมอนุภาคที่แข็ง ยาง interpenetrating polymer networks และเทอร์โมพลาสติกวิศวกรรมเข้าไปในเมทริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยเขาได้ใช้โคพอลิเมอร์เหลวของ amine-terminated Poly(butadiene-co-acrylonitrile) (ATBN) ที่ประกอบด้วยอะคริโลไนไตรล์ 16 เปอร์เซ็นต์ ใสเข้าไปในปริมาณต่างๆ กัน เพื่อปรับปรุงความเหนียวของอีพอกซีเรซินชนิดไดโกลซิไดลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอ โดยใช้ พอลิอะมิโนอิมิดาโซลีน (polyaminoimidazoline) เป็นสารบ่ม ซึ่งหลังการดัดแปรอีพอกซี

เรซินด้วย ยางเหลว (ATBN) แล้วพบว่าพารามิเตอร์การบ่ม (cure parameters) ทั้งหมดลดลง ซึ่งได้แก่ เวลาและอุณหภูมิการเกิดเจล เวลาการบ่ม และฟีกการคายความร้อน นอกจากนี้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างอีพอกซีและ ATBN ซึ่งมีผลช่วยเพิ่มความสามารถในการเข้ารวมตัวกัน และลดอุณหภูมิกลาสทรานซิชันลง การเติม ATBN ทำให้ความทนแรงดึงลดลง และการยืดตัว ณ จุดขาด มีค่าเพิ่มขึ้น และมอดุลัสลดลงเล็กน้อยจาก 1.85 เหลือประมาณ 1.34 GPa เมื่อปริมาณ ATBN เพิ่มขึ้น ขณะที่ความทนแรงกระแทกแบบ Izod เพิ่มขึ้น 3 เท่า เมื่อเติม ATBN เข้าไป 12.5 phr โดยเปรียบเทียบกับเรซินที่ไม่ได้เติมยางเหลว โดยความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นจาก 0.85 ถึง 2.86 กิโลจูลต่อม.² และจาก 4.19 ถึง 14.26 กิโลจูลต่อม.² สำหรับชิ้นทดสอบที่มีรอยบากและไม่มีรอยบาก ตามลำดับ

Mimura และผู้ร่วมงาน [15] ได้ศึกษาผลของการใช้เทอร์โมพลาสติกเป็นสารดัดแปรเพื่อเพิ่มความต้านทานความร้อนและความเหนียวของอีพอกซีเรซินที่ผ่านการบ่มแล้ว โดยจะเกิดเทอร์โมพลาสติกขึ้นในระหว่างการบ่มตัวของอีพอกซีเรซิน ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความหนืดที่จะเพิ่มสูงขึ้นในเวลาทำการผสม โดยเทอร์โมพลาสติกได้จากการใช้ phenylmaleimide/benzyl methacrylate/styrene monomer (PMI/BzMA/St monomers) ในอัตราส่วน 5/5/3 โดยโมล เติมเข้าไปในอีพอกซีเรซินปริมาณ 24 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าความหนืดของเรซินขณะผสมลดลงประมาณ 1/8 ของเรซินที่ไม่ได้ถูกดัดแปร และในระหว่างการบ่มของอีพอกซีเรซินจะเกิดเทอร์โมพลาสติกโดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบฟรีเรดิคัล (radical polymerization) ของไวนิลมอนอเมอร์ที่เติมเข้าไป ซึ่งอีพอกซีที่ถูกดัดแปรมีอุณหภูมิกลาสทรานซิชันสูงขึ้นประมาณ 10 องศาเซลเซียส และมีความเหนียวเพิ่มขึ้นประมาณ 2.5 เท่าของเรซินที่ไม่ได้ถูกดัดแปร ซึ่งเป็นผลจากการเกิด semi-interpenetrating polymer network (semi-IPN) ที่ประกอบด้วยโครงสร้างตาข่ายของอีพอกซีเมทริกซ์ และโครงสร้างแบบเชิงเส้นของเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์

Harañi และผู้ร่วมงาน [16] ได้ทดลองใช้ hydroxy-terminated polyester resins ซึ่งเป็นพอลิเอสเตอร์ ที่มีชื่อทางการค้าว่า Desmophen (800 และ 1200) เป็นสารดัดแปรอีพอกซีเรซินเพื่อให้ความเหนียวเพิ่มขึ้น จากการวิจัยพบว่าความทนแรงกระแทกของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นตามปริมาณ Desmophen ที่เพิ่มขึ้น โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 7.65 จูลต่อเมตร เมื่อใช้ Desmophen 800 ปริมาณ 10 phr และมีค่าสูงสุดเท่ากับ 9.36 จูลต่อเมตร เมื่อใช้ Desmophen 1200 ปริมาณ 7.5 phr ซึ่งสรุปได้ว่าทั้งชนิดและปริมาณของ Desmophen มีผลต่อสมบัติความทนแรงกระแทกของอีพอกซีเรซิน โดย

Desmophen 1200 มีน้ำหนักโมเลกุลและความยาวของสายโซ่โมเลกุลมากกว่า และมีกิ่งก้านสาขาน้อยกว่า ทำให้มีพันธะไฮโดรเจนระหว่างอิพอกซีและ Desmophen มากกว่า จากการยืนยันด้วย FT-IR สเปกโทรสโกปี

Qian และผู้ร่วมงาน [17] ได้ทดลองใช้ลาเท็กซ์ซึ่งประกอบด้วยอนุภาคที่มีโครงสร้างเป็น core-shell ในการดัดแปรอิพอกซีเรซินเพื่อเพิ่มความเหนียว โดยมีบิวตะไดอิน/สไตรีนโคพอลิเมอร์ [P(B-S)] เป็นส่วน core และพอลิเมทิลเมทาคริเลต (PMMA) เป็นส่วน shell ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลขององค์ประกอบในส่วน shell ที่ได้เติมอะคริโลไนไตรล์ (AN) เข้าไปใน PMMA shell ที่ปริมาณต่างๆ กัน โดยความสามารถในการกระจายตัวของอนุภาคเหล่านี้ในอิพอกซีเมทริกซ์มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในการเพิ่มความเหนียวของอิพอกซี และเพื่อที่จะทำให้มีความเหนียวมากที่สุดจำเป็นต้องเกิด micro-segregation อย่างต่อเนื่องในอิพอกซีเมทริกซ์ ซึ่งการใส่ AN เข้าไปใน PMMA shell จะช่วยปรับปรุงความเข้ากันได้ของ shell polymer และอิพอกซีเมทริกซ์ นอกจากนี้ ระดับการกระจายของอนุภาคยังสามารถควบคุมได้อย่างมีระบบโดยการเปลี่ยนแปลงปริมาณของ AN ใน shell ซึ่งจุดเปลี่ยนของการรวมกันเป็นกลุ่มกับการกระจายอย่างสม่ำเสมอของอนุภาค คือ ที่ปริมาณ AN ประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ การเชื่อมขวางภายใน shell จะลดปริมาณการแพร่ของสายโซ่พอลิเมอร์ระหว่าง shell กับ อิพอกซีเมทริกซ์ และจะเพิ่มความแข็งแกร่ง (rigidity) ที่บริเวณพื้นผิวรอยต่อ ซึ่งมีผลทำให้ลดการจับตัวเป็นกลุ่มก้อน

Lopez และผู้ร่วมงาน [18] ได้ทดลองดัดแปรอิพอกซีเรซินด้วยพลาสติกอลที่เตรียมจากพีวีซีเรซิน และไดเอทิลเฮกซิลฟทาเลต (DOP) ปริมาณต่างๆ กัน ซึ่งภายหลังจากบ่มอิพอกซีเรซินพบว่าจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสมบัติแข็งแกร่งของเทอร์โมเซตพลาสติกไปจนถึงยืดหยุ่นของพลาสติกอล นอกจากนี้ยังสามารถเตรียมชิ้นงานที่มีสมบัติใกล้เคียงกับเทอร์โมพลาสติกทั่วไป (PP, ABS หรือ SB) ทั้งนี้ขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างอิพอกซี/พลาสติกอล จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อเพิ่มความเหนียวของอิพอกซีเรซิน โดยพิจารณาจากสมบัติเชิงกล เช่น ความทนแรงดึง ยังสัมมอดูลัส การยืดตัว ความทนแรงกระแทก และความแข็ง ซึ่งจากการทดลองพบว่าการเติมพลาสติกอลมีผลทำให้สมบัติด้านความทนแรงดึง และยังสัมมอดูลัสลดลง แต่การยืดตัวและความทนแรงกระแทกเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด โดยการเลือกอัตราส่วนระหว่างอิพอกซีต่อพลาสติกอลขึ้นกับลักษณะของการใช้งาน

Shih Lin และผู้ร่วมงาน [19] ได้ทดลองเตรียม interpenetrating polymer networks (IPNs) ระหว่างอีพอกซีชนิดไดโกลซิดิลอีเทอร์ของบิสฟีนอลเอและพอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว (DGEBA/UP) เพื่อเพิ่มความเหนียวของเทอร์โมเซตพอลิเมอร์ โดยใช้เมตาไซลีนไดเอมีน (*m*-xylenediamine) และ เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (benzoyl peroxide) เป็นสารบ่ม และจากการศึกษาด้วยเทคนิค DSC พบว่า แต่ละ IPN แสดงอุณหภูมิกลาสทรานซิชันเพียงค่าเดียว เนื่องจากอีพอกซีสามารถเข้ารวมตัวได้ดีกับ พอลิเอสเตอร์ชนิดไม่อิ่มตัว อย่างไรก็ตาม หมู่ไฮดรอกซิลที่สลายไปของ UP สามารถเร่ง ปฏิกิริยาการบ่มของอีพอกซีเรซิน ดังนั้น ใน IPNs ที่มีปริมาณหมู่ไฮดรอกซิลมาก ๆ จะทำให้ความเหนียว เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ การมีโครงสร้างร่างแห 2 แบบ ประสานกันมีผลทำให้ความเหนียวของ ผลิตภัณฑ์เพิ่มมากขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย