บทที่ 2

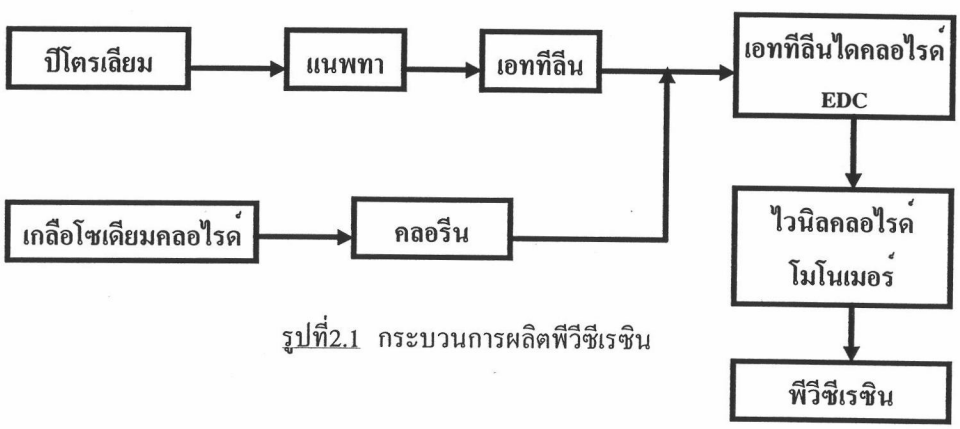
การสำรวจเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride)

โพลีไวนิลคลอไรด์ หรือ พีวีซี (Polyvinyl Chloride : PVC) เป็นพลาสติกที่สำคัญมากชนิดหนึ่ง จัดอยู่ในประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) กล่าวคือ เป็นพลาสติกที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงที่สามารถหลอมเหลวหรือผ่านแรงดันได้หลายๆครั้ง โดยไม่ทำลายโครงสร้างเดิม จึงสามารถนำมาขึ้นรูปได้หลายครั้ง พีวีซี ผลิตได้จากปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (Vinyl Chloride Monomer : VCM) โดยการที่ทำให้โมโนเมอร์ตั้งแต่ 2 โมโนเมอร์ขึ้นไปเกิดปฏิกิริยาแบบรวมกันเป็นสายโซ่ยาวๆ และมีน้ำหนักโมเลกุลเป็นหลายพันเท่าขึ้นไปของโมโนเมอร์ จึงได้คุณสมบัติต่างๆแตกต่างไปจากของโมโนเมอร์เดิม

2.1.1 กระบวนการผลิตพีวีซีเรซิน

กระบวนการผลิตพีวีซีเรซิน จะเริ่มต้นจากการผลิตสารไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ (VCM) จากการทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างเอททีลีน (ethylene) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี กับคลอรีน(chlorine) ที่ผลิตจากเกลือโซเดียมคลอไรด์(NaCl) ไวนิลคลอไรด์โมโนเมอร์ที่ผลิตได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชั่น ได้เป็นพีวีซีเรซินในที่สุด

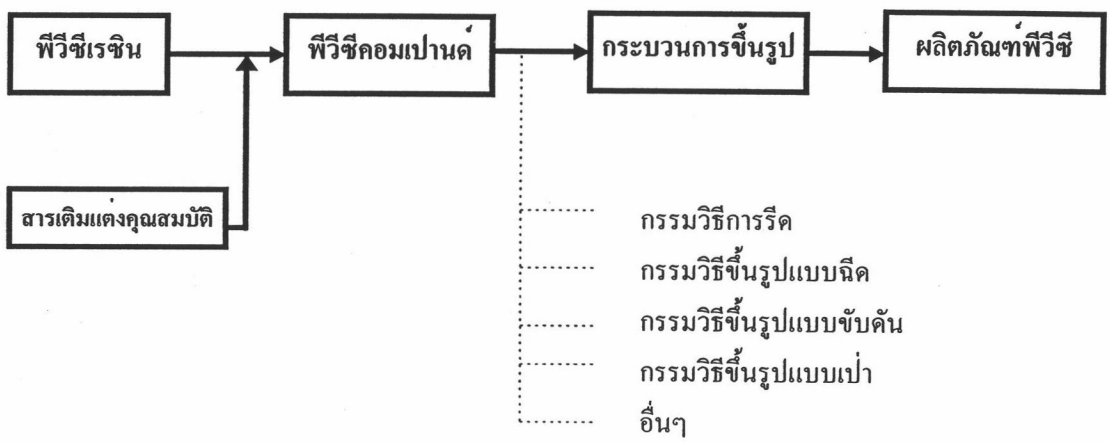


รูปที่2.1 กระบวนการผลิตพีวีซีเรซิน

2.1.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซี

ในการนำเอาพีวีซีซึ่งเป็นโพลิเมอร์มาผ่านกระบวนการขึ้นรูปประเภทต่างๆ เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปนั้น จำเป็นจะต้องมีการเติมสารเติมแต่งลงไปในโพลิเมอร์ เพื่อช่วยแก้ปัญหาการเสื่อมสภาพของโพลิเมอร์เนื่องจากความร้อนและความดันที่ใช้ในขบวนการขึ้นรูป การเปลี่ยนสี และการเหนียวติดกับเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป เป็นต้น

สารเติมแต่ง (additive) เป็นสารเคมีที่มีคุณสมบัติเฉพาะใช้เติมลงในโพลิเมอร์ เพื่อช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติและตกแต่งให้สวยงาม โพลิเมอร์ที่มีสารเติมแต่งผสมอยู่จะถูกเรียกว่าคอมเปานด์ (compound) ส่วนกระบวนการผสมสารเติมแต่งเข้าไปในโพลิเมอร์ เรียกว่า คอมเปานด์ดิ้ง (compounding)



รูปที่2.2 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พีวีซี

2.1.3 กรรมวิธีการผลิต และการตกแต่งพีวีซี

พีวีซีเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติกซึ่งเป็นพลาสติกที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก หลังจากนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์แล้ว นั่นคือเมื่อพีวีซีได้รับความร้อนก็จะเกิดการอ่อนตัวลง และจะแข็งตัวขึ้นอีกครั้งหนึ่งเมื่อพีวีซีเย็นตัวลง ปริมาณความร้อนที่ทำให้พลาสติกพีวีซีเกิดการหลอมละลายได้นั้น จะขึ้นอยู่กับเทคนิคการผลิตที่แตกต่างกันไปเพื่อผลิตให้เป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปหรือกึ่งสำเร็จรูป กรรมวิธีการผลิตที่สำคัญที่ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกพีวีซี มีดังนี้

1) การขึ้นรูปแบบขับดัน (Extrusion) เป็นกรรมวิธีที่เหมาะสมสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีขนาด ความยาวและภาคตัดขวางที่มีรูปทรงที่คงที่แน่นอน

2) การขึ้นรูปแบบฉีดเข้าแบบ (Injection moulding)ใช้สำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดแตกต่างกันมากและมีความสลับซับซ้อน

3) การอัดรีดด้วยลูกกลิ้ง (Calendering) ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์แผ่นเรียบ

4) การขึ้นรูปแบบเป่า (Blowing) ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างกลวง ผิวบาง

5) การเคลือบ(Coating) เป็นการเคลือบพลาสติกให้ติดกับวัสดุอื่นเช่น ผ้าใยสงเคราะห์ โลหะ เป็นต้น

นอกจากกรรมวิธีต่างๆเหล่านี้แล้ว เทคนิคการตกแต่งตามแบบดั้งเดิมยังสามารถนำมาใช้ได้กับพีวีซี เพื่อให้เข้ากับงานโดยเฉพาะหรือทำให้กรรมวิธีการผลิตสำเร็จสมบูรณ์ แต่ต้องมีการระมัดระวังในเรื่องของการให้ความร้อนแก่วัสดุ ไม่ร้อนจนเกินไปพอที่วัสดุนั้นจะหลอมตัวลง การเจาะ การเซาะ การบด การกลึง และการตัดก็สามารถนำมาใช้กับพีวีซีได้ตามความเหมาะสม

2.1.4 สารเติมแต่งในพีวีซี

การเติมสารเติมแต่งลงในโพลิเมอร์นั้น มีวัตถุประสงค์โดยทั่วไปดังนี้

1) เพื่อช่วยในการผลิตหรือขึ้นรูป

2) เพื่อป้องกันโพลิเมอร์เกิดการเสื่อมสภาพ

3) เพื่อทำให้พลาสติกมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น

4) เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต

5) เพื่อกำหนดคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะทำการผลิตได้

สารเติมแต่งตัวสำคัญที่ใช้กับพีวีซีมีดังต่อไปนี้

2.1.4.1) สารเสริมสภาพพลาสติก หรือ พลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยให้การไหลของโพลิเมอร์ดีขึ้น ทำให้ผลิตภัณฑ์พลาสติกมีความยืดหยุ่นและนุ่ม สารเสริมสภาพพลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) สารเสริมสภาพพลาสติกภายใน (Internal Plasticizer) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่เป็นโมโนเมอร์เมื่อเติมลงในโมโนเมอร์หลักขณะทำการผลิต ทำให้ได้โพลิเมอร์หรือพลาสติกที่มีโมโนเมอร์นี้เป็นส่วนหนึ่งของโคโพลิเมอร์ เช่น ไวนิลอะซิเตตในพีวีซี สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดที่จะไม่เคลื่อนที่หรือย้ายมาอยู่ที่ผิว ทำให้มีสภาพเสริมคงที่

2) สารเสริมสภาพพลาสติกภายนอก (External Plasticizer) เป็นสารเสริมสภาพพลาสติกที่ผสมลงไปในโพลิเมอร์ พร้อมกับสารเติมแต่งอื่นๆในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติก เช่น ไดออกทิล พาทาเลท (DOP) สารเสริมสภาพพลาสติกชนิดนี้มักเคลื่อนที่มาที่ผิวของผลิตภัณฑ์ ทำให้เกิดการเยิ้มมันที่ผิวและพลาสติกเปราะได้ง่าย

สารเสริมสภาพพลาสติกจะทำให้พีวีซีมีการอ่อนตัว และมีความยืดหยุ่นมากขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้จุดอ่อนตัวลดต่ำลงด้วย พีวีซีสามารถเป็นได้ทั้งชนิดที่มีสารเสริมสภาพพลาสติก และชนิดที่ไม่ใส่สารเสริมสภาพพลาสติก ดังนี้คือ

ก) พีวีซีชนิดที่ใส่พลาสติไซเซอร์ (Plasticized Polyvinyl Chloride : PVC) เป็นพีวีซีที่มีการเติมพลาสติไซเซอร์ลงไป มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ ยืดหยุ่นได้และนุ่ม ดังนั้นพีวีซีชนิดนี้ส่วนใหญ่จึงถูกจัดอยู่ในประเภทพีวีซีชนิดยืดหยุ่น

ข) พีวีซีชนิดไม่ใส่พลาสติไซเซอร์ (Unplasticized Polyvinyl Chloride : UPVC) เป็นพีวีซีชนิดที่ไม่ได้เติมพลาสติไซเซอร์ลงไปด้วย มีคุณสมบัติที่เด่นชัดคือ แข็งและเปราะ ดังนั้นพีวีซีชนิดนี้จึงถูกจัดอยู่ในประเภทพีวีซีชนิดแข็ง (Rigid PVC)

2.1.4.2) สารคงสภาพ (Stabilizer) เป็นสารที่ใช้ผสมในพลาสติก เพื่อรักษาคุณสมบัติเอาไว้ระหว่างการขึ้นรูปและตลอดช่วงอายุของการใช้งาน เนื่องจากพีวีซีจะเสื่อมสภาพได้ง่ายที่อุณหภูมิ และความดันสูง หรือเป็นการเสื่อมสภาพเนื่องจากรังสีอุลตราไวโอเลต โดยปกติพีวีซีจะถูกนำไปผ่านขบวนการขึ้นรูปที่อุณหภูมิประมาณ 180°C หรือมากกว่านี้ ดังนั้นการใช้สารคงตัวต่อความร้อน (heat stabilizer) จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เพราะจะช่วยป้องกันการสลายตัวด้วยความร้อนขณะที่โพลิเมอร์ขึ้นรูปหรือใช้งานที่อุณหภูมิสูง รวมทั้งเป็นการป้องกันการเสื่อมคุณภาพ (คือการเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีของพลาสติก ทำให้คุณสมบัติของพลาสติกเสื่อมลง) การเปลี่ยนสี และ การสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ของพลาสติกอีกด้วย รูปแบบของการใช้สารคงสภาพจะมีการใช้งานที่แตกต่างกันในแต่ละประเทศ เนื่องจากในแต่ละประเทศมีสภาวะอากาศที่แตกต่างกัน สารคงสภาพสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทคือ

1) สารคงตัวต่อความร้อน (Heat Stabilizer) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันการสลายตัวด้วยความร้อนขณะที่ขึ้นรูปโพลิเมอร์ หรือใช้งานที่อุณหภูมิสูง เช่น ลีดสเตียเรต (Lead Stearate) เป็นต้น

2) สารป้องกันการเกิดออกซิเดชั่น (Antioxidant)) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างออกซิเจนกับพลาสติก สารตัวนี้จะป้องกันโพลิเมอร์จากการถูกทำลายผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชั่นที่อาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากความร้อน แสง และกระบวนการทางเคมี การเกิดออกซิเดชั่นในโพลิเมอร์ จะนำไปสู่การสูญเสียน้ำหนักโมเลกุล การเพิ่มขึ้นของค่าการหลอมและไหล, ลดความเหนียวในโพลิเมอร์ และเกิดการเปลี่ยนสี

3) สารคงตัวต่อรังสีอุลตราไวโอเลต (Ultraviolet light Stabilizer) เป็นสารเติมแต่งที่ป้องกันการสลายตัวและเสื่อมสภาพของพลาสติกเนื่องจากรังสีอุลตราไวโลเลต เช่น ไทเทเนียมออกไซด์ เบนโซฟิโนน เป็นต้น การดูดกลืนแสงอุลตราไวโอเลตจะทำให้พันธะภายในของโพลิเมอร์แตกออก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอนุภาคอิสระของเปอร์ออกไซด์ หรือเกิดการถ่ายเทพลังงานในโพลิเมอร์ ทำให้เกิดความไม่คงทนในโมเลกุลของโพลิเมอร์ การเสื่อมสภาพด้วยแสงอุลตราไวโอเลตจะนำไปสู่การเปลี่ยนสีและการสูญเสียคุณสมบัติเชิงกล การใช้สารคงตัวต่อรังสีอุลตราไวโอเลตจะทำให้อายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์นานขึ้น

คุณสมบัติของสารคงสภาพที่ดีคือ

1) ป้องกันการเสื่อมสภาพของโพลิเมอร์ได้ดี
2) ป้องกันการดูดหรือกรองแสงอุลตราไวโอเลต
3) ไม่มีสี และกลิ่น
4) เข้ากันได้ดีกับสารอื่นๆ
5) ราคาถูก
6) ไม่มีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของพีวีซี

2.1.4.3) สารหล่อลื่น (Lubricant) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างโพลิเมอร์หลอมกับเครื่องจักร และแม่แบบขณะขึ้นรูป ทำให้ชิ้นงานไม่ติดกับแม่แบบและแกะออกได้ง่าย สารหล่อลื่นแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1) สารหล่อลื่นภายใน (Internal Lubricant) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงยึดระหว่างโมเลกุลของโพลิเมอร์ ทำให้ขึ้นรูปได้ง่าย

2) สารหล่อลื่นภายนอก (External Lubricant) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวผลิตภัณฑ์กับแม่แบบภาชนะขึ้นรูป ซึ่งสามารถนำไปสู่การหลุดออกจากเครื่องจักรได้ง่าย ในบางกรณีสารหล่อลื่นภายนอกอาจทำหน้าที่คล้ายกับสารช่วยขึ้นรูปไปด้วย

หน้าที่สำคัญของสารหล่อลื่น คือ
- ลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของโพลิเมอร์เองในขณะหลอม
- ลดแรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลของพลาสติกกับผิวของโลหะ
- เพิ่มอายุการใช้งานของเครื่องจักร
- ป้องกันการเกาะติดกันของเครื่องจักร

2.1.4.4) สารปรับปรุงแรงกระแทก (Impact Modifier) สารนี้จะช่วยในการปรับปรุงความแข็งแกร่งของพลาสติก กล่าวคือวัสดุสามารถทนทานต่อแรงกระแทกที่กระทำต่อวัสดุไม่ให้เกิดความเสียหายได้ดีขึ้น พีวีซีสามารถเติมสารปรับปรุงแรงกระแทกได้ผลดี ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้พีวีซีได้รับการออกแบบให้มีความแข็งแรง และไม่เกิดการแตกกระจายได้

2.1.4.5) สารเพิ่มเนื้อพลาสติก (Filler) เป็นสารที่ผสมในโพลิเมอร์เพื่อเพิ่มปริมาตร ทำให้สามารถลดปริมาณการใช้โพลิเมอร์ลงได้ รวมทั้งยังช่วยปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลบางอย่างของโพลิเมอร์อีกด้วย เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต เส้นใย หรือ โลหะ เป็นต้น

2.1.4.6) สารช่วยขึ้นรูป (Processing aid) เป็นสารเติมแต่งที่ช่วยให้การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์พลาสติกทำได้ง่ายขึ้น

2.1.4.7) สีผง (Pigment) เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในพลาสติกเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีสีสวยงาม โดยเฉพาะการผสมสีดำหรือสีทึบในพลาสติกใช้แล้วและนำกลับมาใช้ใหม่

2.1.4.8) สารชะลอการติดไฟ(Flame retardant) เป็นสารเติมแต่งที่ผสมในโพลิเมอร์เพื่อลดหรือชะลอการติดไฟของผลิตภัณฑ์ โดยจะสลายตัวเมื่อถูกความร้อนและให้ก๊าซหรือสารที่ไม่ติดไฟ เช่น พลวงไตรออกไซด์ และอลูมินัมไตรไฮเดรต

2.1.5 คุณสมบัติของพีวีซี

คุณสมบัติโดยทั่วไป แยกตามประเภทของพีวีซีได้ดังนี้

พีวีซีชนิดแข็ง (Rigid PVC)

1) ต้านทานต่อการกัดกร่อน สารเคมี น้ำมันและอากาศ
2) ผลิตง่าย
3) น้ำหนักเบา (1/5 เท่าของเหล็กหรือ 1/10 เท่าของตะกั่ว)
4) ชะลอการติดไฟ และไม่ติดไฟด้วยตัวเอง
5) เป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีมาก
6) ทาสีง่ายและพิมพ์สีต่างๆได้อย่างมากมาย
7) สามารถเลือกผลิตภัณฑ์ที่มีความใส กึ่งใส หรือทึบได้ ตามแต่การใช้งาน

พีวีซียืดหยุ่น (Flexible PVC)

1) ทนทานต่อสภาวะอากาศ
2) ป้องกันการซึมผ่านของออกซิเจน
3) นิ่มและหักงอได้
4) ทนทานต่อการฉีกขาด
5) มีความยืดหยุ่นดีเยี่ยม
6) มีความใสดีและเป็นมันวาว

2.2 พลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (Flexible PVC)

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าพลาสติกพีวีซี สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆคือ พีวีซีชนิดยืดหยุ่น (Flexible PVC) และพีวีซีชนิดแข็ง (Rigid PVC) ซึ่งการจำแนกเช่นนี้เมื่อพิจารณาในแง่ขององค์ประกอบแล้ว จะพิจารณาได้จากปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่เติมลงไปในพีวีซีเป็นหลัก คุณสมบัติของสารประกอบพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น สามารถแปรค่าได้อยู่ในช่วงกว้างๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้ โดยคำนึงถึงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ต้องการ

2.2.1 การกำหนดสูตรของพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (Formulating Flexible PVC)

ในการกำหนดสูตรของสารประกอบพลาสติกพีวีซี เพื่อไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปใด ๆ นั้น มีวัตถุประสงค์และปัจจัยต่าง ๆ ที่จะต้องคำนึงถึงดังต่อไปนี้

1) คุณสมบัติที่ได้ต้องเหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

2) สามารถนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้

3) ต้นทุนต่ำ

2.2.2 การเลือกใช้วัตถุดิบ (Choosing Raw Material)

เพื่อที่จะให้บรรลุวัตถุประสงค์ของการกำหนดสูตรของสารประกอบพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ตามที่กล่าวมาแล้วนั้น ผู้ที่ทำการกำหนดสูตรจะต้องพิจารณาเลือกวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ดังต่อไปนี้ คือ

พีวีซีเรซิน (PVC resin)	สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer)
สารคงสภาพ (stabilizer)	สารเสริม (filler)
สารหล่อลื่น (lubricant)	สี (colorant)

2.2.2.1) เรซิน (resin) ปัจจัยพื้นฐานที่จะต้องพิจารณาถึงในการเลือกเรซินสำหรับพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ก็คือ น้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) ความหนาแน่นกระเปาะ (bulk density) และ ความสามารถในการดูดซับพลาสติไซเซอร์ (plasticizer absorbtivity) สำหรับปัจจัยอื่นๆที่อาจมีความสำคัญ จะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของกระบวนการและการนำไปใช้ ซึ่งได้แก่ การกระจายขนาดของอนุภาค (particle-size distribution) คุณลักษณะทางไฟฟ้า (electrical characteristic) ความคงทนต่อความร้อน (heat stability) เป็นต้น

แต่อย่างไรก็ตามโดยส่วนใหญ่แล้ว น้ำหนักโมเลกุลของเรซิน (resin molecular weight) ได้ถูกจัดว่าเป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สุดเพียงอย่างเดียวที่จะต้องพิจารณา คุณสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่สำคัญ ๆ เช่น ความแข็งแรงภายใต้แรงดึง (tensile strength) และความแข็งแรงเนื่องจากการฉีกขาด (tear strength) ของผลิตภัณฑ์ จะสามารถทำให้มีค่าเพิ่มขึ้นได้เมื่อเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของเรซิน แต่ในทางกลับกันการเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของพีวีซีเรซินจะทำให้ความหนืดในสภาพหลอมเหลว (melt vicosities) มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้การขึ้นรูปด้วยกระบวนการต่างๆทำได้ยากขึ้น ดังนั้นในการเลือกน้ำหนักโมเลกุล จำเป็นจะต้องพิจารณาให้เกิดความเหมาะสม ทั้งในแง่ของคุณสมบัติที่ต้องการและง่ายต่อการขึ้นรูป

โดยทั่วไปแล้วเมื่อทำการเพิ่มสัดส่วนการผสมพลาสติไซเซอร์ (plasticizer) หรือลดสัดส่วนของฟิลเลอร์ (filler) ลง ก็จะต้องเพิ่มน้ำหนักโมเลกุลของเรซิน เพื่อที่จะรักษาคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปที่ต้องการ

2.2.2.2) พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) ชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใช้จะส่งผลกระทบที่สำคัญที่สุดต่อคุณสมบัติของพีวีซีคอมเปานด์และกระบวนการขึ้นรูปของพีวีซี

กลุ่มของพลาสติไซเซอร์ที่สำคัญๆ ได้แก่

1) Phthalate เป็นกลุ่มของพลาสติไซเซอร์ที่มีประโยชน์ และใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ ได้แก่ สามารถเข้ากันได้ดีกับพีวีซี (good compatibility) พฤติกรรมของการขึ้นรูปดีเยี่ยม (excellent processing behavior) การระเหยตัวต่ำ (low-volatility) คงทนต่อความร้อนและแสง (heat and light stability) และมีราคาถูก ดังนั้นพลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ มักจะถูกนำมาพิจารณาเลือกใช้ก่อนเป็นการเริ่มต้นสำหรับการกำหนดสูตร พลาสติไซเซอร์ที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ได้แก่ DOP (di-octhyl phthalate) DINP (diisononyl phthalate) DIHP (diisoheptyl phthalate) เป็นต้น

2) Aliphatic Diester เป็นกลุ่มของพลาสติไซเซอร์ที่ให้คุณสมบัติที่สำคัญแก่พีวีซี คือ สามารถยืดหยุ่นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ จึงมักถูกเลือกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าวเป็นสำคัญ เช่น ไดออกทิล อะดิเพท (dioctyl adipate) เป็นต้น

3) Phosphates เป็นกลุ่มของพลาสติไซเซอร์ที่ถูกเลือกใช้สำหรับงาน ที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติต้านทานต่อการติดไฟ (flame retardant) ได้ดี พลาสติไซเซอร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในกลุ่มนี้ได้แก่ ไตรอาริล ฟอสเฟต (triaryls phosphate) ไตรอัลคิล ฟอสเฟต (trialkyls phosphate) เป็นต้น

4) Epoxides plasticizer พลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้มักถูกนำมาใช้เพื่อประโยชน์ในด้านความคงทนต่อแสงและความร้อน โดยจะทำงานร่วมกับสารคงสภาพ (stabilizer) ชนิดที่เป็นโลหะ สำหรับพลาสติไซเซอร์ที่ใช้กันมากในกลุ่มนี้ได้แก่ อีพอกซิไดซ์ ซอยบีน ออยล์ (epoxidized soybean oil) และอีพอกซิไดซ์ ลินซีด ออยล์ (epoxidized linseed oil) เป็นต้น

5) Polymeric Plasticizers เป็นกลุ่มของพลาสติไซเซอร์ที่มีราคาค่อนข้างแพง จึงมักจะถูกนำไปใช้ในเฉพาะกรณีที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง และต้านทานต่อน้ำมันได้ดี

6) Secondary Plasticizers หรือ Extender Plasticizers เป็นกลุ่มของพลาสติไซเซอร์ ที่มีขีดจำกัดของปริมาณการใช้ เนื่องจากความสามารถในการเข้ากันได้ (compatibility) ที่จำกัดกับพีวีซี โดยจะแยกตัวออกจากพีวีซีเมื่อถูกใช้ในปริมาณมากเกินขีดจำกัด

นี้ secondary plasticizers เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ต้องใช้ควบคู่กับ primary plasticizers และมักจะส่งผลให้ความคงทนต่อความร้อนและแสงของพลาสติกมีค่าลดต่ำลง โดยทั่วไปวัตถุประสงค์ของการเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ ก็เพื่อเป็นการลดต้นทุนเนื่องจากการใช้ primary plasticizers ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ได้แก่ ซีรีคลอ (cereclor) เอสโคเฟล็ก(escoflex) และพานาเฟล็ก (panaflex) เป็นต้น

7) Plasticizer ชนิดอื่นๆ ได้แก่ พลาสติไซเซอร์ อื่นๆที่ไม่ได้ถูกระบุอยู่ในพวกใดพวกหนึ่งที่กล่าวมาแล้ว เป็นพลาสติไซเซอร์ที่ให้คุณสมบัติเฉพาะอย่างแก่ผลิตภัณฑ์พีวีซี การเลือกใช้พลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ จะต้องคำนึงถึงปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจ แหล่งตลาด และความจำเป็นของการใช้ ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไกลโคเลท เอสเตอร์ (glycolate ester) ที่ใช้สำหรับผลิตภาชนะบรรจุอาหาร และ โซลิด พลาสติไซเซอร์ (solid plasticizer) จำพวกไนไตรด์รับเบอร์ (nitride rubbers) โพลียูรีเทน (polyeurethane) และเอทธีลีนไวนิล อะซีเตท โคโพลีเมอร์ (ethylene-vinyl acetate copolymer) ซึ่งใช้เพื่อความคงทนถาวรและต้านทานต่อสารเคมีของผลิตภัณฑ์

2.2.2.3) สารคงสภาพ (stabilizer) ในการเลือกใช้สเตบิไลเซอร์นั้น นอกจากจะต้องพิจารณาถึงหน้าที่ที่เด่นชัดของสเตบิไลเซอร์ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูป ซึ่งได้แก่ การป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อนในกระบวนการ การป้องกันการเปลี่ยนสี และการระเหยของไฮโดรเจนคลอไรด์ (evolution of hydrogen chloride) แล้วยังต้องคำนึงถึงหน้าที่รองและผลกระทบอื่นๆของสเตบิไลเซอร์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างกระบวนการ และการใช้งานอีกด้วย เช่น ลักษณะในการขึ้นรูป ความคงทนในช่วงระยะเวลาของการใช้งาน ลักษณะในการหล่อลื่น ปฏิกิริยาทางเคมีกับองค์ประกอบอื่นๆในพีวีซี กลิ่น ความเป็นพิษ และความโปร่งใส เป็นต้น

สเตบิไลเซอร์ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายร้อยชนิดด้วยกัน แต่อย่างไรก็ตามสามารถแบ่งออกเป็นตระกูลต่างๆ ได้ดังนี้

1) Alkyltin Mercaptides มีคุณสมบัติในการสร้างความคงทนต่อความร้อนให้แก่ผลิตภัณฑ์ได้อย่างดีเยี่ยม รวมไปถึงสามารถให้ความโปร่งใสแก่ผลิตภัณฑ์ นิยมใช้กับพีวีซีชนิดแข็ง มากกว่าพีวีซีชนิดยืดหยุ่น เนื่องจากสเตบิไลเซอร์ชนิดนี้จะมีกลิ่น และคงทนต่อแสงได้ต่ำ ตัวอย่างของสเตบิไลเซอร์ ในกลุ่มนี้ได้แก่ organotin mercaptides

2) Alkyltin Carboxylates มีขีดจำกัดในปริมาณการใช้ สามารถให้ความโปร่งใสแก่ผลิตภัณฑ์ที่ดี แต่มีราคาแพง ตัวอย่าง ของสเตบิไลเซอร์ในกลุ่มนี้ได้แก่ organotin carboxylates

3) Barium-Cadmium Soaps เป็นสเตบิไลเซอร์ ที่ให้ความคงทนในระยะเวลายาวนานได้อย่างดีเยี่ยม สามารถควบคุมสีได้ดี และให้ความโปร่งแสงกับผลิตภัณฑ์ได้ปานกลาง

4) Barium-Cadmium Liquids เป็นสเตบิไลเซอร์ที่ใช้มากในอุตสาหกรรมการผลิตพีวีซีชนิดยืดหยุ่น เนื่องจากให้คุณสมบัติในด้านความคงทนต่อความร้อนและแสงได้อย่างดีเยี่ยม สามารถใช้ได้กับทั้งผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความโปร่งใสและทึบแสง อีกทั้งยังมีราคาค่อนข้างถูกอีกด้วย

5) Barium-Cadmium-Zince เป็นการนำ Barium-Cadmium Liquids หรือ Barium-Cadmium Soaps มารวมกับ zince organic salts เพื่อให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

6) Leads เป็นสเตบิไลเซอร์ที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมการผลิตสายไฟฟ้าและขบวนการผลิตที่ต้องการให้ผลิตภัณฑ์มีความคงทนต่อความร้อนในระยะยาว การใช้ lead เป็น สเตบิไลเซอร์นี้ โดยทั่วไปจะถูกจำกัดให้นำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความทึบแสง และข้อเสียที่สำคัญของสเตบิไลเซอร์ชนิดนี้ก็คือ ความเป็นพิษ

7) Organic Stabilizer มักใช้ร่วมกับ metalic stabilizer สำหรับสเตบิไลเซอร์ที่ใช้กันมากในกลุ่มนี้ได้แก่ organic phosphite

8) Nontoxic Stabilizer มักใช้ในกระบวนการผลิตพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ชนิดที่ใช้สำหรับการผลิตภาชนะบรรจุอาหาร และอุปกรณ์ทางด้านการแพทย์และวิทยาศาสตร์

2.2.2.4) สารเติมแต่งชนิดอื่นๆ (Other Compounding Additives) นอกจากองค์ประกอบพื้นฐานของพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ซึ่งได้แก่ พีวีซีเรซิน พลาสติไซเซอร์ และสเตบิไลเซอร์แล้ว ในการกำหนดสูตรของสารประกอบพลาสติกพีวีซี ยังต้องเกี่ยวข้องกับสารเติมแต่งตัวอื่นๆอีกด้วย เช่น สารเพิ่มเนื้อพลาสติก (filllers) สารหล่อลื่น (lubricants) และ สีผง (pigments) รวมไปถึงสารเติมแต่งเพื่อวัตถุประสงค์เฉพาะอย่าง เช่น สารฆ่าเชื้อรา (fungicide agents) สารป้องกันการติดไฟ (flame proofing agents) สารดูดซับรังสีอุลตราไวโอเลต (UV absorbters) และสารระงับการเกิดควัน (smoke suppressants) เป็นต้น

ฟิลเลอร์ (Filler) โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของสารอนินทรีย์ที่เป็นผงละเอียด เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต ดินเหนียว ขี้เถ้า หรือแบเรียมซัลเฟต ซึ่งเติมลงไปในสารประกอบพลาสติกเพื่อการลดต้นทุนหรือเพื่อให้ได้คุณสมบัติบางอย่างที่ต้องการ

เหตุผลที่สำคัญสำหรับการเลือกใช้ฟิลเลอร์ชนิดต่างๆที่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบัน มีดังนี้

แคลเซียมคาร์บอเนต	เพื่อการลดต้นทุนวัตถุดิบ (cost reduction)
ดินเหนียว	เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้า (improve electrical properties)
ขี้เถ้า	เพื่อป้องกันความชื้น (dry hand)
แบเรียมซัลเฟต	เพื่อเพิ่มความหนาแน่น (high density)
อลูมิเนียมไตรไฮเดรต	เพื่อป้องกันการติดไฟและการเกิดควัน (flame and smoke suppression)

สำหรับการเลือกใช้สารหล่อลื่นนั้น สามารถพิจารณาได้จากสารเติมแต่งชนิดอื่นในสารประกอบพลาสติก กระบวนการที่ใช้ และคุณสมบัติที่ต้องการจากผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

สำหรับการเลือกใช้สีผง (pigment) จะพิจารณาจากสีที่ต้องการ ความคงทนต่อความร้อนและแสง รวมไปถึงการแยกตัวออกจากสารประกอบของสีผงนั้นๆด้วย

สารเติมแต่งชนิดอื่นๆที่เติมลงไปในสารประกอบพลาสติก เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเฉพาะอย่างของสารประกอบพลาสติก อาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูตรที่ใช้อยู่เพื่อชดเชยกับสารเติมแต่งชนิดอื่นๆ หรือคุณสมบัติอื่นที่ต้องสูญเสียไปด้วย

2.2.3 การกำหนดสูตรของพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการ (Formulating Flexible PVC For Desired Properties)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า พีวีซีเป็นพลาสติกที่มีประโยชน์และใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องมาจากว่าคุณสมบัติของพีวีซีสามารถที่จะแปรค่าได้อยู่ในช่วงกว้างๆ ขึ้นอยู่กับการกำหนดสูตรของการผสม คุณสมบัติที่สามารถควบคุมได้และจะต้องให้ความสนใจในการกำหนดสูตรของสารประกอบพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ได้แก่

ความแข็ง (hardness)

ความแข็งแรงของวัสดุภายใต้แรงดึง (tensile strength)

โมดูลัสของความยืดหยุ่น (modulus of elasticity)

ความยืดหยุ่น (elongation)

ความคงทนต่อความร้อน (heat stability)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอย เป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ชนิดคือ ตัวแปรตาม (dependent variable) หรือที่บางครั้งเรียกว่าตัวแปรตอบสนอง(response variable) หนึ่งตัว กับตัวแปรอิสระ (independent variable) หรือ อาจเรียกว่าเป็นตัวแปรถดถอย (regressor variable) อีกหนึ่งตัวหรือมากกว่า โดยความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้จะอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (mathematical model) และมีชื่อเรียกเฉพาะว่าสมการถดถอย (regression equation)

สมการถดถอยถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลของกลุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่ง ซึ่งบ่อยครั้งที่แหล่งที่มาของข้อมูลเหล่านี้ได้มาจากการทดลองที่ไม่ได้มีการวางแผนเอาไว้ก่อน (unplanned experiment) เช่น เป็นข้อมูลที่ได้มาจากการสังเกตุปรากฏการณ์ต่างๆที่อยู่นอกเหนือการควบคุม หรือเป็นข้อมูลบันทึกในอดีต แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์การถดถอยจะมีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อนำมาใช้วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองที่มีการออกแบบการทดลองไว้ก่อนล่วงหน้า (designed experiment) เพราะโดยทั่วไปแล้ว การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลจะเป็นเทคนิคที่ช่วย ให้ผู้วิเคราะห์เห็นว่าปัจจัยใดบ้างที่มีความสำคัญหรือส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองของการทดลอง ในขณะที่การวิเคราะห์การถดถอยจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองเชิงปริมาณที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยเหล่านั้นกับตัวแปรตอบสนอง

สำหรับตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวิเคราะห์การถดถอย เช่น ในกรณีของกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องกับกรรมวิธีทางเคมี ซึ่งพบว่าคุณภาพของผลิตภัณฑ์มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต การได้มาซึ่งรูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ดังกล่าวเป็นเรื่องที่น่าสนใจ เพราะจะสามารถนำมาใช้ประโยชน์ต่อเนื่องได้อีกมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ใช้ในการทำนาย (prediction) แนวโน้มทางด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ใช้ในการหาจุดที่เหมาะสมของกระบวนการผลิต (process optimization) หรือนำมาใช้เพื่อควบคุมกระบวนการ (process control) เป็นต้น

การนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้อย่างผิดๆเกิดขึ้นเสมอ ทั้งนี้เนื่องจากความเข้าใจที่ผิดพลาดในเรื่องของการวิเคราะห์การถดถอย ดังนั้นเพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้ ผู้วิเคราะห์จะต้องคำนึงถึงสิ่งสำคัญ ดังต่อไปนี้

1) การนำการวิเคราะห์การถดถอยไปใช้เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างสิ่งต่างๆ ซึ่งในความเป็นจริงแล้วไม่น่าจะมีความสัมพันธ์กันเลย ถึงแม้ว่ารูปแบบของความสัมพันธ์ที่ได้จะมีความเหมาะสมกับข้อมูลมากเพียงไรก็ตาม แต่ความสัมพันธ์นั้นก็จะไม่มีความหมายใดๆเลย และไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ ทั้งนี้เนื่องจากรูปแบบของความสัมพันธ์ที่ได้นั้นไม่ตั้งอยู่บนเหตุและผลจึงไม่สามารถเชื่อถือได้

2) ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยนั้น จะเป็นจริงและถูกต้องเฉพาะเมื่อตัวแปรถดถอยมีค่าอยู่ในช่วงของข้อมูลที่นำมาทำการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์เท่านั้น การที่จะทำนายค่าของตัวแปรตามจากค่าของตัวแปรถดถอยที่อยู่ภายนอกช่วงดังกล่าว จะทำให้ค่าของตัวแปรตามที่ได้มีความน่าเชื่อถือน้อยลง เนื่องจากข้อสมมติเกี่ยวกับรูปแบบของความสัมพันธ์ที่อยู่นอกช่วงดังกล่าวมีความไม่แน่นอน

ในการทดลองบางอย่าง รูปแบบที่แน่นอนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆอาจจะเป็นที่ทราบอย่างแน่ชัดแล้ว แต่ในการทดลองส่วนใหญ่ ผู้ทดลองจะไม่ทราบรูปแบบของความสัมพันธ์นั้นอย่างแน่ชัด ดังนั้นจึงเป็นหน้าที่ของผู้วิเคราะห์ที่ต้องหารูปแบบที่จะใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสมที่สุด จากกลุ่มของข้อมูลที่นำมาทำการวิเคราะห์

รูปแบบของสมการถดถอย แบ่งได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.3.1) Simple Linear Regression ได้แก่ สมการถดถอยที่แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างตัวแปรอิสระหนึ่งตัว กับตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว ซึ่งมีแบบจำลองของความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \in$$

2.3.2) Multiple Linear Regression ได้แก่สมการถดถอยที่แสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงระหว่างตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวกับตัวแปรตอบสนองหนึ่งตัว โดยมีแบบจำลองของความสัมพันธ์เป็นดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + _____ + \beta_k x_k + \in$$

2.3.3) Other Regression Models ได้แก่ สมการถดถอยที่มีรูปแบบของความสัมพันธ์เป็นแบบอื่น เช่น ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียล ดีกรี k ของตัวแปรอิสระเพียงตัวเดียว ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + _____ + \beta_k x^k + \in$$

หรือ ความสัมพันธ์แบบโพลีโนเมียลดีกรี 2 ของตัวแปรอิสระ 2 ตัว ดังนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x^2 + \beta_{22} x^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \in$$

ซึ่งวิธีการที่จะใช้ในการหารูปแบบของความสัมพันธ์เหล่านี้ จะใช้วิธีการเปลี่ยนรูปแบบของความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปของความสัมพันธ์แบบเส้นตรงก่อน แล้วจึงใช้วิธีการของการหาความสัมพันธ์แบบเส้นตรงเพื่อหาสมการถดถอยอีกทีหนึ่ง

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Wartman (1955) อ้างถึงโดย Bohl, A. H. (1987) ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าคุณสมบัติของสารประกอบพีวีซีที่มีพลาสติไซเซอร์หลายชนิดผสมอยู่ สามารถที่จะคำนวณหาได้จากสัดส่วนการใช้พลาสติไซเซอร์แต่ละชนิดในสารประกอบนั้น โดยการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของสารประกอบ กับสัดส่วนการผสมพลาสติไซเซอร์

McBroom (1966) ได้นำแนวความคิดเกี่ยวกับสมการของ Wartman มาพัฒนาต่อเพื่อที่จะนำมาใช้สำหรับการหาสูตรของสารประกอบพีวีซีที่มีพลาสติไซเซอร์ผสมอยู่ 2 ชนิด ที่เหมาะสมที่สุด นั่นคือต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุด โดยการนำความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของสารประกอบ สัดส่วนการใช้พลาสติไซเซอร์แต่ละชนิด และต้นทุนที่เกิดขึ้นจากสูตรของสารประกอบนั้น มาสร้างเป็นแผนภูมิรวมอยู่ในแผนภูมิเดียวกัน และเรียกแผนภูมินี้ว่า แผนภูมิหลัก (master chart) ซึ่งแผนภูมิหลักที่สร้างขึ้นนี้ จะช่วยให้นักออกแบบสามารถทำนายคุณสมบัติของสารประกอบพีวีซีที่มีพลาสติไซเซอร์ 2 ชนิดผสมอยู่ในสัดส่วนต่างๆกันได้ หรือ ในทางกลับกันก็สามารถใช้เพื่อการหาค่าสัดส่วนของพลาสติไซเซอร์แต่ละชนิดที่จะต้องใช้ในสารประกอบ เพื่อให้ได้ต้นทุนวัตถุดิบต่ำสุด เมื่อทราบคุณสมบัติบางอย่างของสารประกอบ

Tang, Y. P. and Harris, E. B. (1967) ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับวิธีกำหนดสัดส่วนการผสมที่เหมาะสมของพลาสติไซเซอร์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ในสารประกอบไวนิล เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่ต้องการภายใต้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด โดยวิจารณ์ถึงข้อเสียของการใช้แผนภูมิหลักของ McBroom ว่ามีข้อจำกัดอยู่ที่สามารถใช้ได้เฉพาะกับระบบซึ่งมีพลาสติไซเซอร์เพียง 2 ชนิดเท่านั้น อีกทั้งจะต้องใช้แผนภูมิจำนวนมากในการที่จะนำเสนอเพื่อให้คลอบคลุมถึงพลาสติไซเซอร์ที่มีอยู่ทุกชนิด นั่นคือ เป็นจำนวนถึง 435 แผนภูมิ สำหรับพลาสติไซเซอร์ที่มีใช้อยู่ จำนวน 30 ชนิด และได้เสนอวิธีการใช้การแปลงรูปแบบของปัญหาดังกล่าวให้อยู่ในรูปของชุดสมการเชิงเส้นทางคณิตศาสตร์ (linear programming problem) ที่มีสมการเป้าหมายคือ ต้นทุนวัตถุดิบต่อปริมาตรผลิตภัณฑ์ และสมการเงื่อนไขคือคุณสมบัติของสารประกอบ แล้วทำการแก้ปัญหาดังกล่าวด้วยวิธี simplex method

Schwartz, J. B., Flamholz, J. R. and Press, R. H. (1973) ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำคอมพิวเตอร์มาใช้เพื่อการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด ในกระบวน การผลิตยา ซึ่งได้แก่ สูตรที่ใช้ และกระบวนการที่ใช้ เพื่อให้ได้ยาที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุด โดยเริ่มจากการวางแผนการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลตามหลักการออกแบบการทดลองซึ่งมีปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงทั้งสิ้น 5 ปัจจัย ทดลองและเก็บข้อมูลของตัวแปรตามที่ได้จากการทดลอง เช่น ช่วงเวลาในการแตกตัว ความแข็งของเม็ดยา น้ำหนัก ความหนา ความพรุน และขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนในเม็ดยา แล้วนำข้อมูลที่ได้มาทำการวิเคราะห์การถดถอย (regression analysis) เพื่อหาสมการของความสัมพันธ์ระหว่างเงื่อนไขในการผลิตกับคุณสมบัติด้านต่างๆของเม็ดยา ซึ่งได้สมการออกมาในรูปของสมการโพลีโนเมียลดีกรี2 จากนั้นจึงนำสมการดังกล่าวไปทำการวิเคราะห์หาเงื่อนไขการของผลิตที่เหมาะสมที่สุด ด้วยวิธี lagrangian method ผลการวิจัยพบว่าคุณสมบัติที่ได้จากการทำนายโดยใช้สมการ กับค่าที่ได้จากการทดลองให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก

Bohl, A. H. (1987) ได้นำเสนอผลงาน ที่แสดงถึงการนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลอง(experimental design technique) มาใช้ร่วมกับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อช่วยในการหาสูตรสารประกอบพลาสติกที่เหมาะสมที่สุด ทั้งในด้านคุณสมบัติที่ต้องการ และต้นทุนการผลิต โดยยกตัวอย่างการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาสร้างเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การผสมไฟเบอร์กลาส (glass fiber) และเม็ดแก้ว (glass microsphere) ในสูตรของสารประกอบพลาสติก Polybutylene tetraterepthalate หรือ PBT กับคุณสมบัติทางกลดังนี้ แรงดึงที่จุดขาด ความแข็งแรงภายใต้แรงดัด โมดูลัสภายใต้แรงดึงและแรงดัด และ ความแข็งแรงในการรับแรงกระแทก ซึ่งได้สมการที่เหมาะสมอยู่ในรูปโพลีโนเมียล ดีกรี 2 (second-order polynomial) แล้วนำสมการที่ได้เหล่านี้ไปใช้เป็นสมการเงื่อนไข(constraint) ในการหาจุดการผสมที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปชื่อ GINO เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหา optimization ของสมการที่ไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear equation)

Brofman, C., Caillault, J. and Krauskopf, L. (1989) ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการกำหนดสูตรของสารประกอบพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (flexible PVC) ขึ้นโดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นนี้ประกอบไปด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลอง มาสร้างเป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติต่างๆของสารประกอบ กับอัตราส่วนการผสมของพลาสติไซเซอร์ ชนิดต่างๆทั้งสิ้น 34 ชนิด ซึ่งสมการดังกล่าวนี้จะถูกนำไปใช้ในการทำนายคุณสมบัติของสารประกอบพีวีซีชนิดยืดหยุ่น รวมไปถึงใช้ใน

การเลือกชนิด และอัตราส่วนการผสมของพลาสติไซเซอร์ ที่ทำให้ได้ต้นทุนที่ต่ำที่สุดภายใต้คุณสมบัติที่ต้องการ

ส่วนที่สองคือ ส่วนของการแสดงผลกระทบอันเนื่องมาจากการเติมฟิลเลอร์ ชนิดแคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) ลงไปในสูตรของสารประกอบบนคุณสมบัติทางด้านต่างๆ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการมาหาความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติด้านต่างๆ กับอัตราส่วนการผสมพลาสติไซเซอร์ ชนิด Di(isononyl) phthalate หรือ DINP กับ $CaCO_3$ ซึ่งได้สมการที่เหมาะสมอยู่ในรูปของสมการโพลีโนเมียล ดีกรี 2 แล้วนำผลของสมการที่ได้เหล่านี้มานำเสนอในรูปของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของพลาสติไซเซอร์ กับคุณสมบัติด้านต่างๆ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติ กับ คุณสมบัติ และกราฟ 3 มิติ ระหว่างสัดส่วนของ DINP และ $CaCO_3$ กับ ต้นทุนวัตถุดิบ ซึ่งกราฟความสัมพันธ์เหล่านี้ มีประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในการกำหนดสูตรของสารประกอบพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น

Borden, K. A., Weil, R. C. and Manganaro, C. R. (1993) ได้นำเสนอผลงานการนำเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงสถิติมาใช้ในการวางแผนการทดลอง และเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเป็นสมการสำหรับทำนายคุณสมบัติของสารประกอบโพลีโพรพีลีน (polypropylene) เมื่อมีการนำมาเลอิค แอนไฮไดรด์ (maleic anhidride) มาใช้เป็นสารปรับปรุงคุณสมบัติ สมการดังกล่าวจะช่วยให้ผู้กำหนดสูตรของสารประกอบโพลีโพรพีลีนสามารถที่จะทำนายคุณสมบัติของสารประกอบได้ รวมไปถึงสามารถกำหนดสูตรที่เหมาะสมเพื่อให้ได้สารประกอบที่มีคุณสมบัติที่ต้องการ โดยใช้ประโยชน์จากกราฟและแผนภูมิช่วยอีกด้วย

Krauskopf, L. G. (1995) ได้นำเสนอบทความ ที่เกี่ยวกับการกำหนดสูตรของสารประกอบพีวีซีชนิดยืดหยุ่น (flexible PVC) โดยสรุปว่าในการกำหนดสูตรของสารประกอบนี้ มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 อย่างคือ พีวีซีเรซิน, สารเสริมสภาพพลาสติก (plasticizer) และสารเพิ่มเนื้อพลาสติก (filler) ซึ่งเป็นส่วนผสมที่ต้องใช้ในปริมาณมาก ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าส่วนผสมชนิดอื่นๆซึ่งเติมลงไปในปริมาณน้อย เช่น สารคงสภาพ (stabilizer) สารหล่อลื่น (lubricant) และสีผง (pigment) และอื่นๆ ไม่ส่งผลต่อต้นทุนโดยรวมของสารประกอบอย่างมีนัยสำคัญ รวมทั้งได้สรุปผลการวิจัยที่เกี่ยวกับพลาสติไซเซอร์เอ็กเทนเดอร์ (plasticizer extender) ซึ่งจัดเป็น secondary plasticizer ว่าสามารถนำมาใช้ควบคู่กับ primary plasticizer ได้ โดยมีวัตถุประสงค์หลักในการนำไปใช้คือ เพื่อลดต้นทุนในส่วนของ primary plasticizer แต่มีขีดจำกัดในการนำไปใช้ เนื่องจากจะส่งผลให้คุณสมบัติทางด้านต่างๆของสารประกอบแย่ลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติทางด้าน

ความคงทน ความทนทานต่อความร้อนและแสง รวมไปถึงยังมีความสามารถในการเข้ากันได้กับพีวีซีเรซินในปริมาณที่จำกัดอีกด้วย ตัวอย่างเช่น พลาสติไซเซอร์เอ็กเทนเดอร์ ที่ชื่อว่า ซีรีคลอ (cereclor) ซึ่งเป็นที่นิยมนำมาใช้กันมาก จะสามารถนำมาใช้แทน primary plasticizer ชนิดไดออกทิล พาทาเลท (DOP) ได้ ในปริมาณเพียง 30-35% ของปริมาณ DOP ที่ใช้เท่านั้น

นอกจากนี้ Krauskopf ยังได้นำเสนอตารางสรุปคุณสมบัติทางกายภาพ และเชิงกลโดยประมาณของพลาสติกพีวีซี ที่ใช้ DINP เป็นพลาสติไซเซอร์ และไม่มีการใช้ฟิลเลอร์เป็นสารเติมแต่ง ไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดยทั่วไปของพลาสติกพีวีซีชนิดยืดหยุ่น ที่ใช้ DINP เป็นพลาสติไซเซอร์ (30-70 phr.) และ ไม่มีการใช้ฟิลเลอร์เป็นสารเติมแต่ง

คุณสมบัติ	ปริมาณDINP		
	30 (phr.)	50 (phr.)	70 (phr.)
ความถ่วงจำเพาะ	1.271	1.221	1.185
แรงดึงที่จุดขาด (กก./ตร.ซม.)	372	216	176
เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น (%)	279	331	377
100% โมดูลัสความยืดหยุ่น (กก.ตร.ซม.)	222	132	76
ความแข็ง (ชอร์ A)	96	84	72

ที่มา : G. D. Harvey, et al., unpublished works, Exxon Chemical Co., Baton Rouge, La.

ภูษิต วงศ์หล่อสายชล และวัชรพล ธรรมอารี (1993) นำเสนอผลงานการนำเทคนิคและวิธีการแก้ปัญหาเชิงเส้น (linear programming problem) มาใช้กับปัญหาการเลือกแหล่งวัตถุดิบและกำหนดสัดส่วนการใช้วัตถุดิบชนิดต่างๆที่เหมาะสมที่สุด ในการผลิตผลิตภัณฑ์ประเภทเซรามิกส์ โดยยกกรณีศึกษาการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์ประเภท Vitreious Ware การวิจัยเริ่มจากการสร้างสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะที่สำคัญๆของผลิตภัณฑ์ทางด้านองค์ประกอบทางเคมี กับสัดส่วนของวัตถุดิบที่ใช้แต่ละชนิด แล้วกำหนดเป็นชุดสมการเงื่อนไข และใช้สมการที่แสดงถึงต้นทุนของวัตถุดิบเป็นสมการเป้าหมายของปัญหาการหาสัดส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบ จากผลการวิจัยทำให้ได้สูตรการผลิตเครื่องสุขภัณฑ์เซรามิกส์ที่แตกต่างกัน 4 สูตร ตามแหล่งของวัตถุดิบที่แตกต่างกัน

สมศักดิ์ แซ่จึง และ สมบูรณ์ โลเกศกระวี (1988) ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่เกี่ยวกับการนำเมล็ดยางพารามาทำอีพอกซิเดชั่น เพื่อใช้เป็น secondary plasticizer สำหรับสารประกอบพีวีซี เปรียบเทียบกับอีพอกซิไดซ์ออยล์ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง โดยทดลองนำอีพอกซิไดซ์ออยล์ที่เตรียมได้จากเมล็ดยางพารามาทำการเตรียมชิ้นงาน โดยการลดปริมาณของ DOP ซึ่งใช้เป็น primary plasticizer ลงครั้งละ 0.2 กรัม พร้อมกับเพิ่มปริมาณของอีพอกซิไดซ์ออยล์จากเมล็ดยางพาราขึ้นครั้งละ 0.2 กรัมเท่ากัน ทำการทดสอบคุณสมบัติ ซึ่งได้แก่ แรงดึงที่จุดขาด เปอร์เซ็นต์ความยืดหยุ่น และการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน แล้วนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการแบบเดียวกัน แต่ทำโดยใช้อีพอกซิไดซ์ออยล์ที่ได้จากน้ำมันถั่วเหลือง ผลการทดลองที่ได้พบว่า คุณสมบัติในการเป็นพลาสติไซเซอร์ของอีพอกซิไดซ์ออยล์จากเมล็ดยางพาราไม่ค่อยดีนัก เมื่อเปรียบเทียบกับอีพอกซิไดซ์ออยล์จากน้ำมันถั่วเหลือง