

การวิเคราะห์ปัจจัยสำหรับการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ระหว่างวัลคาไนเซชันอย่างด้วยการออกแบบการ
ทดลองเชิงแฟกทอเรียล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม ไม่สังกัดภาควิชา/เทียบเท่า
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factor Analysis for Stain Formation on Mold during Rubber Vulcanization via Factorial
Experimental Design



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Science for Industry

Common Course

FACULTY OF SCIENCE

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ปัจจัยสำหรับการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ ระหว่างวัลคาไนเซชันอย่างด้วยการออกแบบการทดลองเชิง แฟกทอเรียล
โดย	น.ส.สิริธร อุดมโชติ
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สุวดี ก้องพารากุล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วหนึ่งของ
การศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิทยาศาสตร์ (ศาสตราจารย์ ดร.พลกฤษณ์ แสงวณิช)
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.จิรรัตน์ อนันตกุล)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก (ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์)
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม (รองศาสตราจารย์ ดร.สุวดี ก้องพารากุล)
.....	กรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.กนกทิพย์ บุญเกิด)
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย (รองศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล แจ่มชัด)

สิริธร อุตมโชติ : การวิเคราะห์ปัจจัยสำหรับการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ระหว่างวัลคาไนเซชันอย่างด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล. (Factor Analysis for Stain Formation on Mold during Rubber Vulcanization via Factorial Experimental Design) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.นพิตา วิทยุธีระนันท์, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร.สุวดี ก้องพารากุล

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยางพบปัญหาจากการเกิดชิ้นงานที่มีจุดบกพร่อง เช่น พอง ฉีกขาด แผล และคราบ โดยชิ้นงานที่เป็นคราบ คือ ชิ้นงานที่ผิวที่ไม่เรียบและต้องหยุดการผลิตเพื่อนำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาด ทำให้ต้นทุนการผลิตเพิ่มขึ้น สาเหตุของการเกิดคราบถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อหาความสำคัญทางสถิติของแต่ละตัวแปร โดยตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน จากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล พบว่าเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปและอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน คือ ตัวแปรสำคัญที่ทำให้ชิ้นงานเกิดคราบ เนื่องจากการใช้เวลาในการขึ้นรูปที่นานขึ้น ทำให้ยางเกิดระดับการวัลคาไนเซชันเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้แรงยึดติดระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ลดลง ส่งผลให้ทำให้มีคราบที่เกิดขึ้นลดลง และเมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนที่ 1:100 พบว่ามีชิ้นงานที่เป็นคราบลดลง เนื่องจากน้ำยาถอดแบบทำให้ผิวของแม่พิมพ์มีความลื่น จึงทำให้ไม่มีสิ่งตกค้างหลงเหลืออยู่ที่สามารถนำไปสู่การเกิดคราบบนผิวของแม่พิมพ์ได้ โดยแนวโน้มของการเกิดคราบต่อการปรับเปลี่ยนเวลาในการขึ้นรูปและอัตราส่วนของน้ำยาถอดแบบได้มาจากการทดลองเชิงเดียว พบว่าเมื่อเวลาการขึ้นรูปมากขึ้นจาก 350 ไปเป็น 450 วินาที และอัตราส่วนโดนน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนจาก 1:450 ไปเป็น 1:250 ทำให้มีชิ้นงานที่เป็นคราบลดลง

สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์เพื่ออุตสาหกรรม	ลายมือชื่อนิสิต
ปีการศึกษา	2564	ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก
		ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม

6370211623 : MAJOR SCIENCE FOR INDUSTRY

KEYWORD: stain rubber, rubber vulcanization, mold release, factorial
experiment design, univariate experiment

Sireethon Utamachote : Factor Analysis for Stain Formation on Mold during Rubber Vulcanization via Factorial Experimental Design. Advisor: Prof. NAPIDA HINCHIRANAN, Ph.D. Co-advisor: Assoc. Prof. Suwadee Kongparakul, Ph.D.

There are many defective products such as swell, weld line, tear and stain occurred during manufacture in rubber industry. Mold stain can cause a rough surface of finishing rubber products and the mold should be cleaned up. This problem is counted as the production cost. To evaluate the significant factors affecting the stain formation during the rubber vulcanization, the 2^k factorial experimental design was applied. Four factors such as curing time, ZnO content, calcium carbonate content and mold release : DI water wt. ratio were selected for this research. The results indicated that the curing time and the wt. ratio of mold release : DI water were the significant factor to induce the stain formation. The longer curing time induced the higher degree of vulcanization to reduce the adhesion between rubber compound and mold surface resulting in the reduction of stain formation. Moreover, the use of mold release : DI water at the wt. ratio of 1:100 could decrease the stain defect on the rubber products. The residue could not be stuck on the mold surface. The trend of the stain formation occurred by varying curing times and wt. ratio of mold release : DI water were analyzed by the univariate experiment. The results showed that the curing times from 350 to 450 s and the wt. ratio of mold release : DI water from 1:450 to 1:250 decreased the stain formation during rubber vulcanization.

Field of Study: Science for Industry

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

Co-advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด และ หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนา สถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บคพ.) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.) ที่ทำให้งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นพิตา ธิญะธีระนันท์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.สุวดี ก้องพารากุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่คอยให้คำแนะนำ คำปรึกษา แนวทางการดำเนินการ และคอยปรับปรุงข้อบกพร่องต่างๆ ในงานวิจัยให้มีความสมบูรณ์ ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ คุณสุชาวดี ปรานจโรจน์ ผู้จัดการส่วนประกันคุณภาพ เพื่อนร่วมงาน และเจ้าหน้าที่ที่เกี่ยวข้องทุกท่านของบริษัท เอส.เค. โพลีเมอร์ จำกัด ที่ในการสนับสนุนด้านสถานที่ เครื่องมืออุปกรณ์ และคำปรึกษาในการทำงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากนี้ยังได้ให้คำแนะนำต่างๆ สำหรับการทำงานในอุตสาหกรรมยาง ตลอดจนจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนเรื่องเครื่องมืออุปกรณ์ เพื่อให้งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องและสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณโครงการแพลตฟอร์มการศึกษาครบวงจรเพื่อการพัฒนา นักศึกษาปริญญาโท และการวิจัยพัฒนานวัตกรรมของภาคอุตสาหกรรม (Triple helix master degree integrated platform for research, development and innovation in industry) และเจ้าหน้าที่ในโครงการทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยที่สามารถนำไปพัฒนาและเพิ่มศักยภาพให้กับอุตสาหกรรมในประเทศไทย เพื่อให้มีความสามารถที่ทัดเทียมกับอุตสาหกรรมโลกได้

ผู้วิจัยหวังว่าการศึกษางานวิจัยฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อการผลิตชิ้นงานยางในอุตสาหกรรมที่สามารถลดการเกิดคราบในระหว่างกระบวนการผลิต และผู้สนใจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเกิดคราบยางบนแม่พิมพ์ไม่มากนัก

สิริธร อุตม์โชติ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญภาพ	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตยาง.....	3
2.1.1 ความหมายของยาง	3
2.1.2 ประเภทของยาง	3
2.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง.....	9
2.1.4 ยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	13
2.1.5 การผสมยาง.....	16
2.1.6 การขึ้นรูปยาง	21
2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล.....	25

2.2.1 กลยุทธ์การทดลอง (strategy of experimentation).....	26
2.2.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง	27
2.2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	28
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	29
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	46
3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (materials)	46
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (Machine & Instrument)	46
3.3 แผนการทดลอง	47
3.4 ขั้นตอนการทดลอง	47
บทที่ 4 ผลการศึกษาและวิเคราะห์.....	50
4.1 การเก็บข้อมูลการเกิดคราบบนชิ้นงานต่างๆ ในโรงงานผลิตและการเลือกตัวแปรสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	50
4.2 การทดลองเชิงแฟกทอเรียล	61
4.3 การทดลองเชิงเดี่ยว	71
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการศึกษา	75
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม.....	76
ประวัติผู้เขียน.....	81
ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	82

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ	4
รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยางไอโซพรีน	4
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของยางสไตรีน-บิวทาไดอีน	5
รูปที่ 2.4 มอนอเมอร์และพอลิเมอร์ของยางไนไตรล์	5
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของยางคลอโรพรีน	6
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางบิวทิล	7
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของยางบิวทาไดอีน	7
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์	8
รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกลุ่มต่างๆ ที่สามารถเป็นยางซิลิโคน	8
รูปที่ 2.10 โครงสร้างของยางคลอริเนตพอลิเอทิลีน	13
รูปที่ 2.11 โครงสร้างและการสลายตัวของ DCP	15
รูปที่ 2.12 ลักษณะภายนอกของแคลเซียมคาร์บอเนต	15
รูปที่ 2.13 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์	16
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน	16
รูปที่ 2.15 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill)	17
รูปที่ 2.16 เครื่องผสมระบบปิดแบบบุนารี (banbury internal mixer)	18
รูปที่ 2.17 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (intermix internal mixer)	19
รูปที่ 2.18 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer)	19
รูปที่ 2.19 เครื่องนวดยาง (kneader)	20
รูปที่ 2.20 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer)	20
รูปที่ 2.21 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press)	22

รูปที่ 2.22 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer molding machine)	23
รูปที่ 2.23 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบฉีด (injection molding machine)	23
รูปที่ 2.24 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder)	24
รูปที่ 2.25 เครื่องคาลเอนเดอร์ (calender)	25
รูปที่ 2.26 รูปแบบกระบวนการทั่วไป	26
รูปที่ 2.27 (a) ภาพของคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ (GO) ที่ต่างกัน, (b) ภาพสเปกตรัมของพื้นผิวก่อนและหลังการเก็บคอมพอสิตที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์เป็นเวลา 7 วัน, (c) และ (d) ฮิสโตแกรมของซัลเฟอร์ และ ซิงค์ออกไซด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ก่อนและหลังการเก็บคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ต่างกันเป็นเวลา 7 วัน	30
รูปที่ 2.28 แรงที่ใช้ในการแยกชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ที่มีความหยาบต่างกันด้วยวิธีต่างๆ	31
รูปที่ 2.29 ความหนาของชั้นฟิล์มที่ขึ้นกับเวลา	34
รูปที่ 2.30 แรงยึดเหนี่ยวที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารหน่วง	34
รูปที่ 2.31 ผลการทดสอบแรงยึดติดบนพื้นผิวที่ใช้น้ำยาเคลือบผิว 3 ชนิด	35
รูปที่ 2.32 รูปโครงสร้างอย่างง่ายของ (a) PHPS และ (b) HTTS โดยกลุ่มสีแดงจะเป็นกลุ่มที่เกิดการเชื่อมขวาง	37
รูปที่ 2.33 ค่าความหยาบเฉลี่ย (R_a) ของพื้นผิวที่ไม่เคลือบและเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ	37
รูปที่ 2.34 ค่าแรงดึงออกเฉลี่ยของเรซินบนพื้นผิวของอลูมิเนียมที่มีการเคลือบและไม่เคลือบที่ การเชื่อมขวางที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส	38
รูปที่ 2.35 การเกิดการเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน	38
รูปที่ 2.36 ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิต	39
รูปที่ 2.37 โครงร่างสามมิติของคอมพอสิต	39
รูปที่ 2.38 กราฟ XRD ของสารตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ	40
รูปที่ 2.39 สัดส่วนน้ำหนักของ CaO , $CaCl_2$, $CaCO_3$ และสายระเหยอื่นๆ	40
รูปที่ 2.40 กลไกการเกิด $CaCl_2$, CaO และ CO_2	41

รูปที่ 2.41	กราฟ DSC ของคอมโพลีเมอร์ PVC/CPE ที่ (a) ไม่เสถียร และ (b) เสถียร ในปริมาณต่างๆ (ซ้าย) อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (ขวา) อัตราความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที 42
รูปที่ 2.42	กราฟการสลายตัวของคอมพอสิต PVC/CPE ที่ (a) ไม่เสถียร และ (b) เสถียร ในปริมาณต่างๆ 43
รูปที่ 2.43	กราฟ (a) DSC และ (b) TGA ของ CPE คอมพอสิตที่อุณหภูมิต่างๆ 44
รูปที่ 2.44	ผลของการอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ต่อค่าความแข็งแรงการดึงยืด ความแข็ง และความยาวยืด ณ จุดขาด ของ CPE/RM/CB คอมพอสิตที่ปริมาณต่างๆ 45
รูปที่ 2.45	กราฟ DTG และ TG ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ของ CPE/RM/CB คอมพอสิต 45
รูปที่ 3.1	ภาพเขียนแบบของแม่พิมพ์จำลอง 47
รูปที่ 3.2	แม่พิมพ์จำลองที่ใช้ในการทำการขึ้นรูปชิ้นงาน 48
รูปที่ 4.1	ลักษณะคราบที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ 50
รูปที่ 4.2	ลักษณะการคงรูปของยาง CP/P ที่ 160 องศาเซลเซียส 53
รูปที่ 4.3	พื้นผิวจากคราบของ E/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX..... 54
รูปที่ 4.4	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ E/P 54
รูปที่ 4.5	พื้นผิวจากคราบของ E/S ด้วยเทคนิค SEM-EDX..... 55
รูปที่ 4.6	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ E/S 55
รูปที่ 4.7	พื้นผิวจากคราบของ C/M ด้วยเทคนิค SEM-EDX 56
รูปที่ 4.8	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ C/M..... 56
รูปที่ 4.9	พื้นผิวจากคราบของ CP/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX 57
รูปที่ 4.10	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ CP/P 57
รูปที่ 4.11	พื้นผิวจากคราบของ NB/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX 58
รูปที่ 4.12	ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ NB/P 58
รูปที่ 4.13	ลักษณะการคงรูปของยางที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที 62

รูปที่ 4.14 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ก) แผล, ข) พอง, ค) ยางไม่เต็ม, ง) คราบ และ จ) ฉีกขาด 64

รูปที่ 4.15 กราฟ Normal probability ของชิ้นงานที่เป็นคราบ..... 69

รูปที่ 4.16 กราฟ Normal probability ของชิ้นงานอาการต่างๆ 71

รูปที่ 4.17 ปริมาณชิ้นงานที่มีตำหนิที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ กับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 73

รูปที่ 4.18 ปริมาณชิ้นงานที่มีตำหนิที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน..... 74



สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งในระบบการวัลคาไนซ์	9
ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบมุมสัมผัส (contact angle) และพลังงานพื้นผิว (surface free energy) บนพื้นผิวที่มีการเคลือบด้วยน้ำยาต่างๆ	35
ตารางที่ 2.3 ค่าแรงดึงผิวของน้ำยาบริสุทธิ์ (100%wt.) และที่เจือจาง (25%wt., 50%wt.)	36
ตารางที่ 2.4 ค่ามุมสัมผัสและค่าพลังงานพื้นผิวของสารละลายบนพื้นผิวที่มีการเคลือบด้วยวิธีต่างๆ	36
ตารางที่ 2.5 ค่ามุมสัมผัสและค่าพลังงานพื้นผิวของพื้นผิวต่างๆ ด้วยน้ำและไดไอโอดิเมเทนที่เกิดการเชื่อมขวางที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส	37
ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการผสมสูตรยางทั้ง 4 สูตร	48
ตารางที่ 4.1 รหัสและค่าเสียโอกาสของชิ้นงานที่เกิดคราบ	51
ตารางที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดคราบ.....	52
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบและอัตราส่วนในการผสมของน้ำยาถอดแบบ.....	53
ตารางที่ 4.4 ธาตุที่พบในคราบทั้ง 5 ชิ้นงาน.....	59
ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่จะนำมาศึกษาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล	60
ตารางที่ 4.6 ภาวะสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและค่าของตัวแปรต่างๆ ในแต่ละภาวะ	60
ตารางที่ 4.7 ปริมาณสารเคมีของสูตรยางต่างๆ	61
ตารางที่ 4.8 ค่าลักษณะการคงรูปของยางในสูตรต่างๆ.....	62
ตารางที่ 4.9 ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ของสูตรยาง 4 สูตร	63
ตารางที่ 4.10 ผลของการขึ้นรูปชิ้นงานตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลทั้ง 16 ภาวะ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นในอาการต่างๆ	65
ตารางที่ 4.11 ผลของการคำนวณด้วย ANOVA ของชิ้นงานที่เกิดคราบจากการทดลอง	68
ตารางที่ 4.12 ผลของการคำนวณด้วย ANOVA ของชิ้นงานอาการต่างๆ.....	70

ตารางที่ 4.13 ผลของการทดลองเชิงเดี่ยว	72
ตารางที่ ก.1 ค่า contrast, effect of parameter และ sum of square ของแต่ละตัวแปร	83



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในประเทศไทยมีการผลิตชิ้นส่วนยางเพื่อใช้อุตสาหกรรมประเภทต่างๆ ได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์ เครื่องใช้ไฟฟ้า อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เวชภัณฑ์ อุตสาหกรรมทางการแพทย์และอุตสาหกรรมอื่นๆ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ถูกผลิตเพื่อใช้ในประเทศและส่งออกสู่ต่างประเทศ การทำผลิตภัณฑ์ยางจะเริ่มต้นตั้งแต่การผสมยางกับสารเคมีต่างๆ ในเครื่องผสม เพื่อให้เป็นยางคอมพาวนด์ หลังจากนั้นยางคอมพาวนด์จะถูกนำมาถูกขึ้นรูปด้วยกระบวนการแม่พิมพ์แบบกดอัดความดัน (compression molding) หรือแม่พิมพ์แบบฉีด (injection molding) แล้วจึงตกแต่งชิ้นงาน บรรจุลงกล่องและส่งมอบให้ลูกค้าต่อไป

อย่างไรก็ตามการผลิตชิ้นงานยางอาจเกิดปัญหาเกิดขึ้นมากในระหว่างการผลิต ทำให้ชิ้นงานมีจุดบกพร่อง เช่น พอง (swell) แผล (weld line) ฉีกขาด (tear) ยางไม่เต็ม (short shot) คราบ (stain) หรืออื่นๆ โดยของเสียที่เกิดขึ้นในปี 2021 มีจำนวน 3.36 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นมูลค่าทั้งหมด 8,379,170 บาท ซึ่งการเกิดคราบเป็นปัญหาอย่างมากในการผลิตชิ้นงานยาง เนื่องจากการเกิดคราบที่แม่พิมพ์โลหะ มักเกิดขึ้นเมื่อมีการผลิตชิ้นงานไปในระยะหนึ่ง โดยลักษณะของคราบจะเป็นของแข็งขนาดเล็ก มีสีดำอมน้ำตาลติดอยู่ที่ผิวแม่พิมพ์ ทำให้ผิวชิ้นงานยางหลังการขึ้นรูปมีผิวไม่เรียบ ไม่สวยงาม จึงไม่สามารถส่งมอบงานให้กับลูกค้าได้ และทำให้ต้องเสียเวลาในการทำความสะดวกแม่พิมพ์ด้วยการลดความเข้มข้นสูงเป็นเวลาอย่างน้อย 7 – 8 ชั่วโมงต่อครั้ง และยังทำให้อายุการใช้งานของแม่พิมพ์สั้นลง ส่งผลให้อัตราการผลิตลดลง ซึ่งในปี 2021 เวลาที่นำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาดทั้งปีสามารถผลิตชิ้นงานได้คิดเป็นมูลค่า 1,964,469 บาท จะเห็นว่าหากสามารถลดการเกิดคราบได้ จะช่วยลดมูลค่าที่เสียไปจากการผลิตของเสียลดลงได้

ดังนั้นจึงต้องการหาสาเหตุของการเกิดคราบยาง เพื่อใช้ในการแก้ไขหรือบรรเทาปัญหาในการเกิดคราบบนผิวของชิ้นงาน และสามารถลดต้นทุนการผลิต โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (factorial experimental design) เข้ามาใช้ในการวิจัย เพื่อวิเคราะห์หาความสำคัญของปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดคราบ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1. วิเคราะห์ตัวแปรที่ทำให้เกิดคราบบนแม่พิมพ์ระหว่างการวัลคาไนเซชันของยางด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

1.2.2. วิเคราะห์ผลของตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดคราบบนแม่พิมพ์ด้วยการทดลองเชิงเดี่ยว

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1.3.1 ศึกษาลักษณะการเกิดคราบบนแม่พิมพ์จากการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัดและเครื่องขึ้นรูปแบบฉีด
- 1.3.2 วิเคราะห์ตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบสาเหตุและความสำคัญเชิงสถิติของตัวแปรต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการทำผลิตภัณฑ์ยางต่อการเกิดคราบบนพื้นผิวของชิ้นงานด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการงานวิจัย

- 1.5.1 รวบรวมข้อมูลการเกิดคราบในอุตสาหกรรม
- 1.5.2 เลือกและกำหนดขอบเขตสูงและต่ำของตัวแปรสำหรับการนำไปวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดคราบด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- 1.5.3 ทำการทดลองและสรุปผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียล
- 1.5.4 กำหนดช่วงที่เหมาะสมของตัวแปรสำหรับการทดลองเชิงเดี่ยว
- 1.5.5 ทำการทดลองและสรุปผลการทดลองเชิงเดี่ยว
- 1.5.6 สรุปผลการทดลองและเขียนเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับอุตสาหกรรมการผลิตยาง

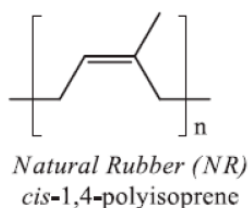
2.1.1 ความหมายของยาง

ยาง คือ วัสดุพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยไฮโดรเจนและคาร์บอน เป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง มีต้นกำเนิดจากธรรมชาติ มาจากของเหลวของพืชมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาว คล้ายน้ำมัน มีสมบัติเป็นคอลลอยด์ มีอนุภาคเล็กและมีตัวกลางเป็นน้ำ ยางในสภาพของเหลวเรียกว่าน้ำยาง ยางที่เกิดจากพืชนี้เรียกว่ายางธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันมนุษย์สามารถสร้างยางสังเคราะห์ได้จากปิโตรเลียม (McKeen, 2020)

2.1.2 ประเภทของยาง

ยางมีมากมายหลายชนิด ทั้งยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ การเลือกใช้ชนิดของยางให้เหมาะสมถือเป็นเรื่องที่ต้องพิจารณาออกสูตรยาง เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ยางที่ได้มีสมบัติตามที่ต้องการ สามารถแบ่งยางออกได้ดังนี้ (สถาบันพลาสติก, 2011)

2.1.2.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber; NR) ยางธรรมชาติมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.1 มีสมบัติเด่น คือ มีความยืดหยุ่น (elasticity) สูง ทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิต่ำ มีความเหนียวติดกัน (tack) ในสภาพที่ยังไม่คงรูปดีเยี่ยม มีความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) สูงมากโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความทนทานต่อการฉีกขาด (tear strength) สูงมากทั้งที่อุณหภูมิห้องและที่อุณหภูมิสูง มีสมบัติเชิงพลวัต (dynamic properties) ที่ดี มีการสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนต่ำระหว่างการใช้งาน มีความต้านทานต่อการล้าตัว (fatigue resistance) ที่สูงมาก มีความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง ยาง NR จัดเป็นยางเอนกประสงค์ที่สามารถนำไปใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น ถุงมือยาง ถุงยางอนามัย ลูกโป่ง ยางรัดของ ท่อยาง สายพานลำเลียง ยางกระเปาะน้ำร้อน ยางล้อรถบรรทุก ยางล้อรถยก ยางล้อเครื่องบิน หรือใช้ผสมกับยางสังเคราะห์ในการผลิตยางล้อรถยนต์ เป็นต้น สำหรับข้อดีของยางธรรมชาติ ได้แก่ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน (ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน เฮกเซน โทลูอีน) และสารเคมีอื่นๆ

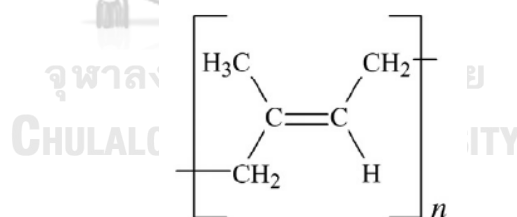


รูปที่ 2.1 โครงสร้างของยางธรรมชาติ (Fazli & Rodrigue, 2020)

2.1.2.2 ยางสังเคราะห์ (synthetic rubber; SR) ยางสังเคราะห์ผลิตขึ้นมาเพื่อแทนที่ยาง NR ที่มีข้อด้อยหลัก คือ ไม่ทนต่อโอโซน ความร้อน แสงแดด น้ำมัน และสารเคมี สามารถแบ่งออกได้หลายชนิดตามมอนอเมอร์ที่เข้ามาทำปฏิกิริยา

2.1.2.2.1 ยางไอโซพรีน (isopolyisoprene; IR)

ยาง IR เป็นยางที่มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2 และมีสมบัติเหมือนกับยางธรรมชาติ ดังนั้นจึงสามารถใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับยาง NR แล้ว ยาง IR มีสมบัติเชิงกล เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำกว่าเล็กน้อย และมีราคาสูงกว่ายางธรรมชาติ แต่ยาง IR ก็มีข้อดีที่เหนือกว่ายาง NR คือ ยางมีคุณภาพสม่ำเสมอ มีสิ่งเจือปนน้อยกว่า และมีสีขาวสวย บางครั้งจึงนิยมใช้ยาง IR แทนยางธรรมชาติในการผลิตจุกนมยางและอุปกรณ์การแพทย์บางชนิด

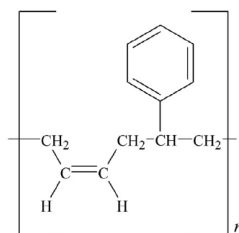


รูปที่ 2.2 โครงสร้างของยางไอโซพรีน (McKeen, 2020)

2.1.2.2.2 ยางสไตรีน-บิวทาไดอีน (styrene-butadiene rubber; SBR)

ยาง SBR เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของสไตรีนและบิวทาไดอีน จัดมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 เป็นยางสังเคราะห์อเนกประสงค์ที่สำคัญและใช้กันมากที่สุดในโรงงานอุตสาหกรรมเพราะเป็นยางที่ใช้งานได้ทั่วไปเช่นเดียวกับยางธรรมชาติและยาง IR สามารถทำผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้ โดยมีคุณภาพสม่ำเสมอ และราคาค่อนข้างคงที่ นอกจากนั้นข้อดีของยาง SBR ที่

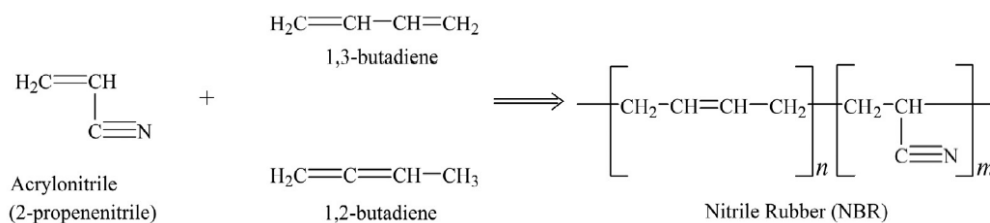
เหนือกว่ายาง NR คือ มีกระบวนการแปรรูปที่ง่ายกว่า ประหยัดทั้งกำลังงานและเวลาตลอดจนต้นทุนการผลิต ยาง SBR มีความต้านทานต่อการขีดถูสูงกว่ายาง NR เล็กน้อย ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากยาง SBR ได้แก่ สายพาน พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ท่อยาง ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ บรรจุภัณฑ์อาหาร รวมถึงดอกยางล้อรถยนต์โดยสาร เป็นต้น



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของยางสไตรีน-บิวทาไดอิน (McKeen, 2020)

2.1.2.2.3 ยางไนไตรล์ (nitrile หรือ acrylonitrile-butadiene rubber; NBR)

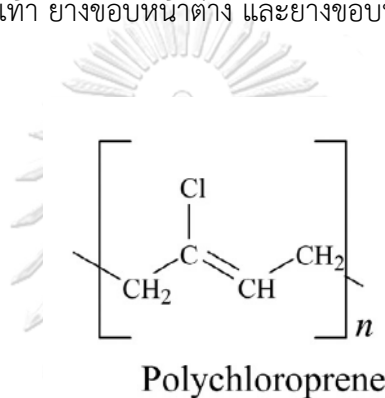
ยาง NBR เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของอะคริโลไนไตรล์และบิวทาไดอิน ดังรูปที่ 2.4 ยาง NBR มีสมบัติเด่น คือ ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียมและตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วต่างๆ ได้ดี ทนต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงกว่ายาง NR และ SBR และเป็นยางที่มีความต้านทานต่อการขีดถูที่สูงมาก ข้อดีของยาง NBR คือ เป็นยางที่มีความเหนียวต่ำ เมื่อผ่านการวัลคาไนเซชัน ยางจะมีความยืดหยุ่น มีความแข็งแรงต่อแรงดึง และความทนทานต่อการฉีกขาดค่อนข้างต่ำ ถ้าต้องการนำไปใช้งานในทางวิศวกรรมจำเป็นต้องเติมสารเสริมแรง นิยมนำยาง NBR ไปใช้ทำผลิตภัณฑ์ยางที่ทนน้ำมัน เช่น ปะเก็นน้ำมัน ยางโอริง ยางซีล ยางเชื่อมข้อต่อสายพานลำเลียง ท่อดูดหรือส่งน้ำมัน ท่อยางเสริมแรง ยางบุภาชนะ ยางเคลือบลูกกอล์ฟ รองเท้าบูทพื้นและเส้นรองเท้า เป็นต้น



รูปที่ 2.4 มอนอเมอร์และพอลิเมอร์ของยางไนไตรล์ (McKeen, 2020)

2.1.2.2.4 ยางคลอโรพรีน (chloroprene rubber; CR)

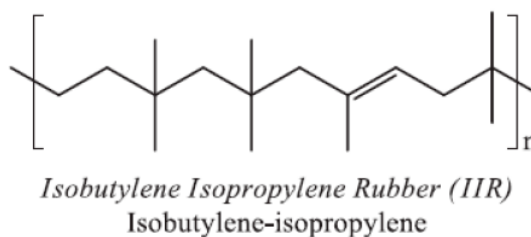
ยาง CR เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของคลอโรพรีน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.5 มีสมบัติความเหนียวติดที่ดี ยางคลอโรพรีนที่ผ่านการคงรูปแล้วมีความแข็งแรงต่อแรงดึงและความทนทานต่อการฉีกขาดสูงโดยไม่ต้องเติมสารเสริมแรง มีความต้านทานการขูดถูสูง สามารถทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ในระดับปานกลางถึงดี มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงกว่ายางไดอินทั่วๆ ไป และมีสมบัติต้านทานการลามไฟ แม้ว่ายาง CR เป็นยางที่มีสมบัติโดยรวมอยู่ในเกณฑ์ที่ดี แต่มีราคาค่อนข้างแพง นิยมนำไปใช้ในการทำแผ่นยางรองรางรถไฟ ยางซีล ท่อยางเสริมแรง สายพานลำเลียงในเหมืองแร่ สายพานรูปตัววี ยางรองคอคสะพาน ยางบุผนัง พื้นรองเท้า ยางขอบหน้าต่าง และยางขอบหลังคา



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของยางคลอโรพรีน (McKeen, 2020)

2.1.2.2.5 ยางบิวทิล (butyl rubber; IIR)

ยาง IIR เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของไอโซพรีนและไอโซบิวทิลีน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.6 สมบัติเด่นของยางชนิดนี้ คือ มีความสามารถในการเก็บกักก๊าซได้ดีเยี่ยม (มีอัตราการซึมผ่านของก๊าซต่ำกว่ายาง NR ประมาณ 8-10 เท่า) มีความแข็งแรงต่อแรงดึงและความต้านทานต่อการขูดถูอยู่ในเกณฑ์ที่ดี มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากสารเคมี ออกซิเจน โอโซน ไอน้ำ ความร้อน และสภาพอากาศได้อย่างดีเยี่ยม แต่ยาง IIR มีข้อด้อย คือ ความยืดหยุ่นค่อนข้างต่ำ ยาง IIR นิยมใช้ในการทำยางโอริงหรือปะเก็นยางชนิดที่ต้องทนต่อสารเคมี ท่อไอน้ำ ยางในรถบรรทุก ยางบุด้านในของยางล้อแบบไม่มียางใน สายพาน ยางบุต่างๆ รวมถึงจุกปิดขวดยา เป็นต้น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของยางบิวทิล (Fazli & Rodrigue, 2020)

2.1.2.2.6 ยางบิวทาไดอีน (butadiene rubber; BR)

ยางบิวทาไดอีนมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7 มีสมบัติเด่น คือ เมื่อผ่านการคงรูปแล้ว ยางจะมีความยืดหยุ่นและมีความต้านทานต่อการขีดถูสูงที่สุดในบรรดายางทั้งหมด มีความเป็นฉนวนสูงและมีสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำดีมาก อย่างไรก็ตามยางชนิดนี้มีความแข็งแรงต่อแรงดึงต่ำ ไม่ทนต่อน้ำมันหรือตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วเช่นเดียวกับยาง NR รวมทั้งยังเสื่อมสภาพได้เร็วเหมือนยางที่ไม่อิมัตวชนิดอื่นๆ และยางยังมีสมบัติเหนียวติดต่ำ (ในสภาพที่ยังไม่คงรูป) อีกด้วย ส่วนใหญ่นิยมนำยางบิวทาไดอีนไปใช้ในการผลิตดอกยางล้อรถยนต์ ใส้ในลูกกอล์ฟ ลูกฟุตบอล ยางพื้นรองเท้า สายพานลำเลียง ยางกันกระแทก สายพานส่งกำลัง และยางกันสะเทือน เป็นต้น

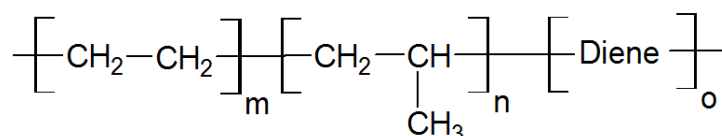


รูปที่ 2.7 โครงสร้างของยางบิวทาไดอีน (Fazli & Rodrigue, 2020)

2.1.2.2.7 ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (ethylene propylene diene rubber; EPDM)

ยาง EPDM เป็นยางที่สังเคราะห์จากมอนอเมอร์ของเอทิลีน โพรพิลีน และไดอีน มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 มีสมบัติดีเยี่ยมในด้านความทนทานต่อการเสื่อมสภาพอันเนื่องมาจากความร้อน ออกซิเจน โอโซน และสารเคมี เป็นยางที่มีความยืดหยุ่น มีความเป็นฉนวน และมีความต้านทานต่อการล้าตัวค่อนข้างสูง สามารถนำไปใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 150°C จึงนิยมใช้ในการทำ

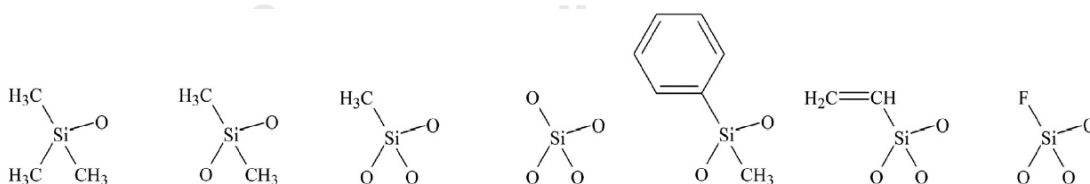
ตัวอย่างเครื่องซักผ้า ยางหุ้มท่อแอร์ สายพานลำเลียง แผ่นยางกันน้ำ แผ่นยางมุงหลังคา ฉนวนหุ้มสายเคเบิล รวมถึงชิ้นส่วนรถยนต์ เช่น ยางขอบหน้าต่าง ยางขอบประตู แก้มยาง ท่อยางหม้อน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีนมอนอเมอร์ (McKeen, 2020)

2.1.2.2.8 ยางซิลิโคน (silicone rubber; Q)

ยางซิลิโคนสามารถมีโครงสร้างของกลุ่มได้หลายแบบดังรูปที่ 2.9 จัดเป็นยางชนิดพิเศษที่มีสมบัติเด่น คือ มีความทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากความร้อน ออกซิเจน และโอโซนสูงมาก จึงสามารถใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมากๆ ได้ ยางซิลิโคนมีแรงดึงดูระหว่างโมเลกุลต่ำ ส่วนใหญ่จึงอยู่ในรูปของเหลวที่มีความหนืดสูงหรืออยู่ในรูปของแข็งที่มีความหนืดต่ำ สามารถอัดตัวได้มาก (highly compressible) และยอมให้ก๊าซซึมผ่านได้ง่าย นอกจากนี้ยางชนิดนี้ต้องมีการคงรูปด้วยระบบเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้ยางมีความแข็งแรงต่อแรงดึง ความทนทานต่อการฉีกขาด และความต้านทานการขีดถูต่ำมาก หน้ำมันได้ในระดับปานกลาง ส่วนใหญ่นิยมใช้ในการทำยางที่เป็นชิ้นส่วนของยานอวกาศ เครื่องบิน และรถยนต์ ใช้ทำฉนวนหุ้มสายเคเบิล ยางโอริง หน้ากาก ออกซิเจน และใช้ในงานทางการแพทย์และเภสัชกรรม รวมถึงผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับอาหาร



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของกลุ่มต่างๆ ที่สามารถเป็นยางซิลิโคน (McKeen, 2020)

2.1.3 สารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปยาง

ในการผลิตยางจำเป็นที่ต้องมีการใช้สารเติมแต่งเพื่อ (ภันฑิตลา, 2013)

- ทำให้ยางดิบที่มีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) คือ ยางจะอ่อนตัวและไหลได้ง่ายเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และยางจะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำลง เปลี่ยนเป็นเทอร์โมเซต (thermoset) โดยยางสามารถคงรูปได้แม้อุณหภูมิเปลี่ยนไป
- ทำให้ยางขึ้นรูปและแปรรูปได้ เนื่องจากยางดิบมีความเหนียว หากนำไปรีดด้วยเครื่อง calendering หรือเครื่องอัดฉีด (extruder) จะทำให้ยางเกิดการพองตัวได้
- ทำให้ยางสามารถใช้งานได้ที่หลายภาวะ เช่น ภาวะที่เป็นกรดหรือเบส ภาวะที่ต้องมีการรับแรงกดทับตลอดเวลา เป็นต้น
- ลดต้นทุนการผลิต เนื่องจากการใช้ยางเพียงอย่างเดียวในการทำผลิตภัณฑ์มีต้นทุนการผลิตที่สูง

สารเคมีที่เกี่ยวข้องกับการวัลคาไนเซชันของยาง แบ่งตามประเภทการใช้งานได้ดังนี้

2.1.3.1 สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent) เป็นสารที่ทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) ระหว่างโมเลกุลของยางตรงตำแหน่งที่ไวต่อปฏิกิริยาการวัลคาไนเซชันโดยสามารถแบ่งตามชนิดของสารวัลคาไนเซชันได้ดังนี้

2.1.3.1.1 ระบบวัลคาไนเซชันด้วยกำมะถัน เป็นระบบวัลคาไนเซชันที่ได้รับคามนิยมมากที่สุด ใช้กับยางที่มีพันธะคู่ เช่น ยางธรรมชาติ ยางสไตรีนบิวทาไดอีน และยางบิวทาไดอีน แบ่งออกเป็น 3 ประเภทดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณของกำมะถันและสารตัวเร่งในระบบการวัลคาไนซ์ (นิธินาถ, 2015)

ระบบการวัลคาไนเซชัน	กำมะถัน (phr*)	สารตัวเร่งปฏิกิริยา (phr)
แบบปกติ (conventional vulcanized system, C.V.)	0 – 3.5	0.4 – 1.0
แบบกึ่งประสิทธิภาพ (semi-efficiently vulcanized system, semi-E.V.)	1.0 – 1.7	1.0 – 2.5
แบบมีประสิทธิภาพ (efficiently vulcanized system, E.V.)	0.3 – 0.8	2.5 – 6.0

*phr = หน่วยการผสมยางโดยคิดสัดส่วนปริมาณสารต่างๆ เมื่อเทียบกับยาง 100 ส่วน (parts per hundred)

- ระบบการวัลคาไนเซชันแบบปกติ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางแบบพอลิซัลฟิดิก (polysulphidic) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี เช่น ความแข็งแรงต่อแรงดึง และความต้านทานต่อการฉีกขาดสูง
- ระบบการวัลคาไนเซชันแบบกึ่งประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางแบบไดซัลฟิดิก (disulphidic) โดยยังคงรูปมีสมบัติเชิงกลอยู่ระหว่างระบบการวัลคาไนเซชันแบบปกติและแบบประสิทธิภาพ
- ระบบการวัลคาไนเซชันแบบประสิทธิภาพ ทำให้เกิดการเชื่อมขวางแบบมอนอซัลฟิดิก (monosulphidic) ซึ่งจะช่วยให้ยางมีสมบัติด้านการต้านทานความร้อน (heat ageing) ความต้านทานการเสื่อมสภาพ (thermal/ozone degradation) และค่าการเสียรูปถาวรหลังกดอัด (compression set) สูง

2.1.3.1.2 ระบบวัลคาไนเซชันยางด้วยเปอร์ออกไซด์ เป็นระบบที่ใช้กับยางที่ไม่มีพันธะคู่ เช่น ยางแอคริลิก (acrylic rubber) ยางซิลิโคน ยางโบรโมบิวทิล (bromobutyl rubber) หรือยางที่ต้องการให้ทนความร้อนได้ดี โดยเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้มากที่สุด คือ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) แต่ทำให้ยางมีกลิ่น ปริมาณการใช้ คือ 2.5 – 3 phr ยางที่คงรูปด้วยเปอร์ออกไซด์มีค่าการเสียรูปถาวรหลังกดอัด และความทนทานต่อความร้อนดีมาก แต่ให้ผลิตภัณฑ์ยางที่มีสมบัติเชิงกลต่ำ ให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีใส ไม่เกิดปัญหาการบลูม (bloom) และสามารถทำให้ยางสุกพร้อมกันได้เมื่อมีการใช้หลายชนิด แต่ต้นทุนของเปอร์ออกไซด์สูง

2.1.3.1.3 ระบบการวัลคาไนเซชันด้วยโลหะออกไซด์ เป็นระบบที่ใช้กับยางคลอโรพรีน เนื่องจากอะตอมคลอรีนในยางคลอโรพรีน ทำให้พันธะคู่หมดความว่องไว จึงไม่สามารถใช้กำมะถันในการคงรูป ต้องใช้สารอื่นแทน คือ ซิงค์ออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์

2.1.3.1.4 ระบบการวัลคาไนเซชันด้วยยูรีเทน ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี และทนความร้อนสูง แต่มีต้นทุนสูงไม่เสถียรต่อความชื้น เกิดการเสียสภาพได้ง่าย จึงยังไม่ได้รับความนิยม

2.1.3.1.5 ระบบการวัลคาไนเซชันด้วยซิลิเนียมและเทลลูเรียม เป็นธาตุที่อยู่เดียวกับกำมะถัน สามารถใช้แทนกำมะถันได้ แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากมีราคาแพง และมีความเป็นพิษสูง

2.1.3.2 สารเร่งปฏิกิริยา (accelerator) เป็นสารที่ใส่ลงไปเพื่อลดเวลาการเกิดวัลคาไนเซชันของยาง โดยเพิ่มอัตราเร็วของการวัลคาไนเซชัน ซึ่งสมบัติทั่วไปของสารเร่งปฏิกิริยามีดังนี้

- เร่งอัตราการเกิดวัลคาไนเซชัน
- สามารถละลายในยางได้และมีการกระจายตัวได้ดี

- สามารถเก็บรักษาได้นานโดยไม่เสื่อมสภาพ
 - ไม่ก่อให้เกิดรีเวอร์ชัน (reversion) คือ ยางจะมีสมบัติด้อยลงเมื่อใช้เวลานาน
- การคงรูปที่นาน
- ไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้
 - ใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิกว้าง
 - เข้ากันได้ดีกับสารเคมีอื่นๆ ที่ใส่ลงไปในยาง

2.1.3.3 สารกระตุ้น (activator) เป็นสารที่ช่วยเสริมให้สารตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสารกระตุ้นจะทำปฏิกิริยากับสารเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ส่งผลให้มีอัตราเร็วในการคงรูปเพิ่มขึ้น

2.1.3.4 สารตัวเติม (filler) คือ สารที่เติมลงไปเพื่อลดต้นทุน หรือเพื่อเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกลของยาง เช่น ทำให้โมดูลัสหรือความแข็งของยางสูงขึ้น เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า หรือเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง ซึ่งสารตัวเติมถูกแบ่งเป็น 2 ชนิด (สถาบันพลาสติก, 2539) คือ

2.1.3.4.1 สารตัวเติมชนิดเสริมแรง (reinforcing filler) คือ สารตัวเติมที่มีผลต่อสมบัติความต้านทานต่อแรงดึงโมดูลัส ความต้านทานการฉีกขาด และความต้านทานต่อการสึกหรอ ได้แก่

- ผงเขม่าดำ (carbon black) มีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็กตั้งแต่ 170 – 900 Å ซึ่งขนาดอนุภาคที่เล็กจะช่วยทำให้สมบัติเชิงกลของยางดีขึ้นมาก ยางที่ใช้เขม่าดำจะเป็นสีดำทั้งหมด ไม่เหมาะกับยางที่ต้องการสีอื่น

- ซิลิกา (silica) มีสูตรโครงสร้าง คือ $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ มีสีขาว เบา ร่วน มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 100 – 400 Å เป็นสารตัวเติมชนิดเสริมแรงเช่นเดียวกับผงเขม่าดำ แต่สามารถใช้ในยางที่ต้องการสีอื่นได้ และทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลที่ดี แต่พื้นผิวของซิลิกามีความเป็นขั้ว ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาสูง จึงมีการดูดซับสารเคมีต่างๆ ที่ผิวได้ดี จึงต้องแก้ไขโดยการใส่ไซเลน (silane) เพื่อทำหน้าที่เป็นสารคู่ควบ (coupling agents)

2.1.3.4.2 สารตัวเติมชนิดไม่เสริมแรง (non-reinforcing filler) เป็นสารที่มีขนาดอนุภาคค่อนข้างใหญ่และมีราคาถูก ได้แก่

- แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) มีลักษณะเป็นผงสีขาวหม่น มีสูตรโครงสร้าง คือ CaCO_3

- ดินขาว (China clay) มีสีขาวหรือสีซีดจางมีขนาดต่ำกว่า 2 ไมครอน มีส่วนประกอบคือ แร่ Kaolinite มีสูตรทางเคมี คือ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

2.1.3.5 พลาสติไซเซอร์ (plasticizer) คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นและเพิ่มความสามารถในการใช้งาน ซึ่งชื่อเรียกจะต่างกันตามปริมาณและหน้าที่ที่ใช้ เช่น ถ้าใส่ 1 -5 phr จะเรียกว่า processing aid คือ ช่วยให้สารเคมีเข้ากับยางได้ง่ายขึ้น ถ้าใส่ 5 - 15 phr จะเรียกว่า softener ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งก่อนและหลังการขึ้นรูป ถ้าใส่มากกว่า 15 phr จะเรียกว่า extender คือ ใส่เพื่อลดต้นทุน การเลือกใช้สารเหล่านี้ให้เหมาะสมจะเลือกจากพารามิเตอร์การละลาย (solubility parameter) ซึ่งควรต้องมีค่าใกล้เคียงกับยางให้มากที่สุด จากนั้นจึงพิจารณาถึงราคา การระเหย ความเป็นพิษ สี และการตกสี เป็นต้น โดยพลาสติไซเซอร์มีดังนี้

2.1.3.5.1 สารทำให้ยางนิ่ม หมายถึง สารเคมีที่เติมลงไปในยางแล้วทำให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ดียิ่งขึ้นหรือมีความหนืดต่ำลง ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น นอกจากนี้จะช่วยลดความหนืดของยางคอมพาวด์แล้ว สารทำให้ยางนิ่มยังช่วยปรับปรุงสมบัติความเหนียวติด ทำให้สารตัวเติมกระจายตัวในยางได้ดีขึ้น และช่วยปรับปรุงสมบัติการหักงอที่อุณหภูมิต่ำของยางได้ด้วย การเลือกใช้ชนิดของสารทำให้ยางนิ่มจำเป็นต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างประกอบกัน เช่น ความเข้ากันได้กับยาง ประสิทธิภาพ การตกสี และราคา

2.1.3.5.2 สารช่วยในกระบวนการผลิต (processing aids) คือ สารเคมีที่เติมเข้าไปในยางเพื่อช่วยให้การผสมหรือการขึ้นรูปเป็นไปได้อย่างดีขึ้น เนื่องจากสารเคมีในกลุ่มนี้จะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการผลิต สารทำให้ยางนิ่มที่กล่าวถึงข้างต้นจึงถือเป็นส่วนหนึ่งของสารช่วยในกระบวนการผลิตด้วย แต่นอกจากสารทำให้ยางนิ่มแล้ว ยังมีสารช่วยในกระบวนการผลิตอื่นๆ ที่เติมลงไปในยางเพื่อจุดประสงค์เฉพาะบางอย่างที่ทำให้กระบวนการผลิตเป็นไปได้อย่างดีขึ้น

2.1.3.6 สารป้องกันการเสื่อมสภาพ (protective agent) เนื่องจากยางเป็นสารอินทรีย์ที่เสื่อมสลายได้เมื่อตั้งทิ้งไว้หรือขณะใช้งาน โดยการเสื่อมสลายของยางแบ่งได้เป็น 6 แบบ

- 1) เสื่อมสภาพเองตามธรรมชาติ
- 2) เสื่อมสภาพจากการมีโลหะหนักปนในยาง
- 3) เสื่อมสภาพเนื่องจากการใช้ในภาวะที่ร้อน
- 4) เสื่อมสภาพเนื่องจากแสง
- 5) เสื่อมสภาพเนื่องจากการหักโค้งงอไปมา
- 6) เสื่อมสภาพเนื่องจากการเกิดรอยแตกเนื่องจากการกระทำของโอโซน

สารที่ถูกเติมลงไปเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพข้อ 1) - 5) คือ สารแอนติออกซิเดนต์ (antioxidant) ส่วนสารที่เติมลงไปเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพข้อ 6) คือ สารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant)

2.1.3.6.1 สารแอนติออกซิเดนต์ เป็นสารเคมีที่เติมลงไปในยางเพื่อจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ของออกซิเจนในอากาศกับยาง (ที่มีพันธะคู่) ทำให้ยางมีอายุการใช้งานนานขึ้น ได้แก่ สารประกอบเอมีน (amine) หรืออนุพันธ์ของเอมีน เป็นสารที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสีคล้ำ เปลี่ยนสีหรือตกสี นิยมใช้กับยางที่มีสีดำ เช่น อัลคิเลทเตด ไดฟีนิลเอมีน (alkylated diphenylamines), อัลคิเลทเตดพาราไดฟีนิลเอมีน (alkylated p-phenylenediamines) และสารประกอบฟีนอล (phenol) หรืออนุพันธ์ของฟีนอล (substituted phenols) ส่วนสารที่สามารถใช้กับยางสีทั่วไปที่ไม่ใช่สีดำ ไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ยางตกสี และไม่เปลี่ยนสียาง เช่น อนุพันธ์ของฟีนอล, บิสฟีนอล (bisphenol)

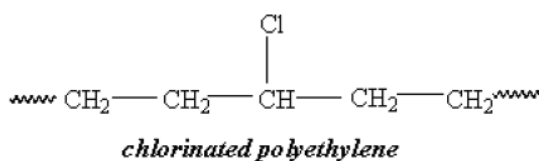
2.1.3.6.2 สารแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) เป็นสารป้องกันการเสื่อมสภาพของยางเนื่องจากโอโซน (ozone, O₃) ได้แก่ พาราฟิไนลีนไดเอมีน (p-phenylenediamine) และซีผึ้งพาราฟิน (paraffin wax)

2.1.3.7 สารประเภทอื่นๆ ถือว่าเป็นสิ่งที่ไม่จำเป็นต้องใช้สำหรับยางทั่วไป แต่บางครั้งจะใส่ลงไปในยางเมื่อมีความต้องการให้ผลิตภัณฑ์ยางมีสมบัติพิเศษบางประการ เช่น สารที่ทำให้เกิดสี (coloring material) สารที่ทำให้เกิดฟอง (blowing agent) สารหน่วงปฏิกิริยายางคงรูป (retarder) เป็นต้น (ภิญชิตา 2013)

2.1.4 ยางและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

2.1.4.1 ยางคลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated polyethylene, CPE)

เป็นยางสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นโดยการควบคุมการเกิดคลอรีนของพอลิเอทิลีน และมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ช่วงปลายทศวรรษ 1960 โดยโครงสร้างของของยาง CPE แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 โครงสร้างของยางคลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Manaila et al., 2012)

โดยทั่วไปยาง CPE มีปริมาณของคลอรีนอยู่ 25 – 42% ข้อดีของการใช้ยางชนิดนี้ คือ ทนทานต่อโอโซน ออกซิเดชัน การเสียดสี และการงอได้ดี และยังทนทานต่อแอลกอฮอล์ ทรายและต่างได้ดีอีกด้วย สำหรับข้อจำกัดของยางประเภทนี้ คือ มีความต้านทานต่อตัวทำละลายอะโรมาติกต่ำ สำหรับการวัลคาไนเซชันที่ใช้สำหรับยาง CPE ได้แก่

- ระบบเปอร์ออกไซด์ ที่ใช้ร่วมกับโคเอเจนต์
- สารเคมีประเภทไทอะไดอะโซล (thiadiazole-based)
- การเชื่อมขวางด้วยเทคนิคการฉายรังสี

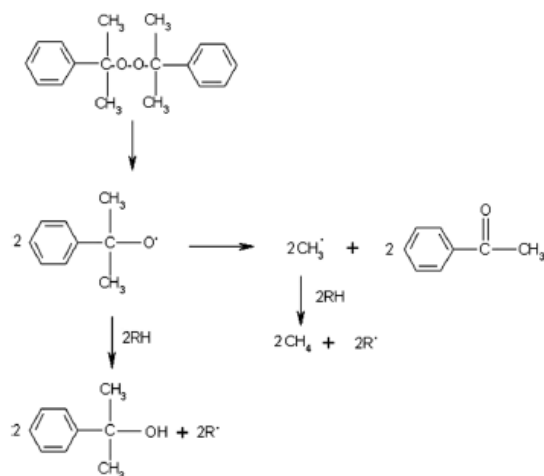
ซึ่งการเลือกใช้ระบบการวัลคาไนเซชันต่างๆ ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สารเคมี ต้นทุน อุปกรณ์ เป็นต้น แต่การใช้ระบบเปอร์ออกไซด์ทำให้มีเวลาสกรอซที่เพิ่มขึ้น ช่วยรักษาอายุการใช้งาน ค่าการเปลี่ยนรูปถาวรต่ำ (permanent set) และสามารถใช้ได้ที่อุณหภูมิสูง (Manaila et al., 2012)

ยาง CPE มีอุณหภูมิที่เปลี่ยนจากสถานะแก้วเป็นยาง (glass transition temperature) ที่ -10 ถึง 55 องศาเซลเซียส อุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature) ที่ 108.9 – 123.3 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิการสลายตัว (decomposition temperature) ที่ 215 – 239 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ ยาง CPE มีค่าความแข็งแรงของการดึงยึดอยู่ที่ 6.0 – 16.8 MPa มีค่าความยาวยืด 550 – 1,000% ค่าความแข็ง 47 – 70 shore A และมีค่าความหนืดมูนนี่ 64 – 115 (POLYMERS, 2016)

ยาง CPE นิยมใช้ในงานไฟฟ้าและสารเคลือบที่ป้องกันต่อสภาพแวดล้อมการใช้งานทั่วไป ได้แก่ ฉนวนสายไฟและสายเคเบิล สายไฟสำหรับการขนส่ง นอกจากนี้ยังใช้เป็นฟิล์มและวัสดุแผ่น (sheeting material) ช่วงอุณหภูมิการทำงานทั่วไปอยู่ระหว่าง -10 ถึง 150 องศาเซลเซียส (Manaila et al., 2012)

2.1.4.2 ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP)

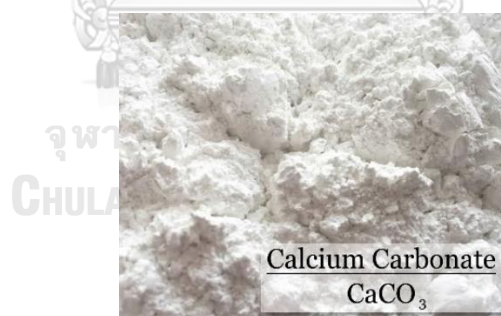
DCP เป็นเปอร์ออกไซด์ที่นิยมใช้เป็นสารวัลคาไนเซชันในปริมาณ 2 – 5 phr และมักใช้ร่วมกับโคเอเจนต์ (co-agent) เพื่อเพิ่มการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน DCP มีโครงสร้างและการสลายตัวดังรูปที่ 2.11 โดยมีครึ่งชีวิต (half-life) เมื่อใช้อุณหภูมิ 117 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 ชั่วโมง และ 137 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง (Palys, 2020)



รูปที่ 2.11 โครงสร้างและการสลายตัวของ DCP (Kruželák et al., 2014)

2.1.4.3 แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate)

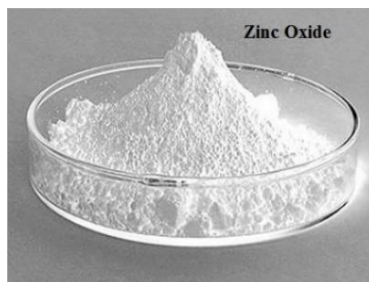
แคลเซียมคาร์บอเนตถูกใช้มากในอุตสาหกรรมยาง เนื่องจากเป็นสารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง มีอนุภาคค่อนข้างใหญ่และราคาถูก ถูกใส่ไปเพื่อลดราคาต้นทุนการผลิต มีสีขาวหม่นแสดงดังรูปที่ 2.12 (ภัณชิตลา, 2013)



รูปที่ 2.12 ลักษณะภายนอกของแคลเซียมคาร์บอเนต (ภัณชิตลา, 2013)

2.1.4.4 ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)

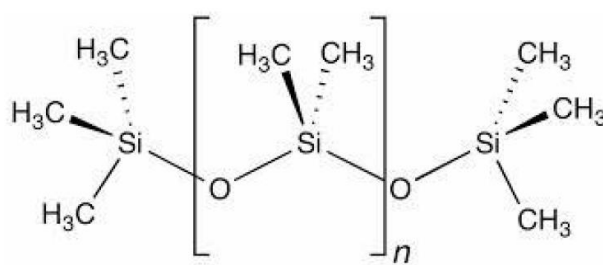
ซิงค์ออกไซด์เป็นสารกระตุ้น (activator) เพื่อเร่งการทำงานสารวัลคาไนเซชัน ใช้ปริมาณ 3 – 5 phr ทำให้ยางมีโมดูลัสสูงขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยรักษาเสถียรภาพทางความร้อนของยางคอมพาวนด์ได้ด้วย ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์มีสีขาวขุ่น และอนุภาคขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 2.13 (ภัณชิตลา, 2013)



รูปที่ 2.13 ลักษณะทางกายภาพของซิงค์ออกไซด์ (ภิญฑิลา, 2013)

2.1.4.5 น้ำยาถอดแบบ DC-235E

น้ำยาถอดแบบ (mold release) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อใช้สำหรับการปลดชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น เนื่องจากทำให้ผิวของแม่พิมพ์ลื่นขึ้น น้ำยาถอดแบบ DC-235E มีส่วนประกอบของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (polydimethyl siloxane) 35wt.% ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.14 (Guevara et al., 2020)



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2.14 โครงสร้างของพอลิไดเมทิลซิลอกเซน (Guevara et al., 2020)

2.1.5 การผสมยาง

เมื่อออกสูตรเคมียางแล้ว ถัดมาคือการผสมยางกับสารเคมียางเข้าด้วยกันโดยใช้เครื่องผสมยางที่ผ่านการผสมสารเคมีแล้วจะเรียกว่า ยางคอมพาวนด์ (rubber compound) การผสมยางเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญ เนื่องจากถ้าสารเคมีที่เติมลงไปในการกระจายตัว (distribution) หรือแตกตัว (dispersion) ได้ไม่ดี จะส่งผลต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการใช้กระบวนการผสมที่แตกต่างกัน เช่น การใช้เครื่องผสมคนละชนิด การใช้สภาวะการผสมที่แตกต่างกัน หรือการจัดลำดับการเติมสารเคมีลงไปในการผสมที่แตกต่างกัน จะส่งผลทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสมบัติที่แตกต่างกัน แม้ว่าจะเป็นยางสูตรเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณภาพของการผสมโดยนำยางคอมพาวนด์ที่ได้

จากการผสมแต่ละครั้ง (batch) ไปทดสอบความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) และสมบัติการคงรูปของยาง (cure characteristics) เพื่อควบคุมคุณภาพให้คงที่ (สถาบันพลาสติก, 2011)

เนื่องจากเทคโนโลยีการผสมยางให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพคงที่ตามที่ต้องการ มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา ได้แก่ การเข้าไปในเนื้อยางของสารตัวเติม (incorporation) การกระจายตัวของสารตัวเติมในยาง (distribution) และการแตกตัวของสารตัวเติม (dispersion) รวมถึงปัจจัยต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ปริมาณที่ผสม และลำดับการใส่สารเคมี ที่มีต่อการใช้เครื่องผสมยางต่างชนิดกัน โดยเครื่องผสมยางแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

2.1.5.1 เครื่องผสมยางแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์ (batch mixer) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ระบบ ได้แก่

2.1.5.1.1 ระบบเปิด ได้แก่ เครื่องผสมยางแบบ 2 ลูกกลิ้ง (two-roll mill) ประกอบด้วยลูกกลิ้ง 2 ลูก เรียงตัวในแนวขนานกัน แสดงดังรูปที่ 2.15 ลูกกลิ้งหมุนเข้าหากันด้วยความเร็วต่างกัน ทำให้เกิดแรงเฉือนที่ใช้ในการบดผสมยางกับสารเคมี ในการผสมยางกับสารเคมีจะใส่ยางลงช่องระหว่างลูกกลิ้ง ยางถูกรีดออกมาเป็นแผ่นรอบลูกกลิ้งด้านหน้า จากนั้นจึงเติมสารเคมียาง โดยผู้ผสมต้องทำการกรีดยางแผ่นและพับไปมาในขณะที่เติมสารเคมีลงไป ในยาง ซึ่งยางที่ถูกตัดพับจะถูกใส่กลับไปยังช่องระหว่างลูกกลิ้ง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะช่วยให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวเข้ากับเนื้อยางได้ดี



รูปที่ 2.15 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง (two-roll mill) (สถาบันพลาสติก, 2011)

2.1.5.1.2 ระบบปิด แบ่งตามลักษณะของโรเตอร์ ออกเป็น 4 แบบ ได้แก่

- เครื่องผสมระบบปิดแบบบูรี (banbury internal mixer) แสดงดังรูปที่ 2.16 โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดมีองค์ประกอบ 4 ส่วนได้แก่ ห้องผสม (chamber) ตัวบดผสมหรือโรเตอร์ (rotor) แท่งกดหรือแรม (ram) และระบบหล่อเย็น (cooling system) เครื่องผสม

ระบบปิดให้ประสิทธิภาพและความรวดเร็วในการผสมมากกว่าการใช้เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง เพราะสารเคมีไม่ฟุ้งกระจายระหว่างการผสม ลดการสูญเสียสารเคมีขณะผสม และลดการผิดพลาด เนื่องจากการใช้แรงงานคนในการผสม สามารถผสมยางกับสารเคมีได้ในปริมาณสูง เช่น 50-100 กิโลกรัม โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมระบบปิดแบบบุนูรีจะเป็นแบบไม่คาบเกี่ยวกัน หมุนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน การทำงานของเครื่องผสมเพื่อให้เกิดการผสมคลุกเคล้าของยางกับสารเคมีส่วนใหญ่จะมาจากแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ยางและสารเคมีจะถูกบีบนวดผสมกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมอย่างเหมาะสม ทำให้สารเคมีต่างๆ กระจายตัวในยางได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.16 เครื่องผสมระบบปิดแบบบุนูรี (banbury internal mixer) (สถาบันพลาสติก, 2011)

- เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (intermix internal mixer) แสดงดังรูปที่ 2.17 มีองค์ประกอบสำคัญเหมือนกับเครื่องผสมระบบปิดแบบบุนูรี แต่โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมจะเป็นแบบคาบเกี่ยวกัน (intermeshing) หมุนด้วยอัตราเร็วที่เท่ากัน แรงเฉือนจะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ ยางและสารเคมีจะถูกบีบนวดผสมคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันในสภาวะที่ควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบบุนูรี จึงมีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายตัวในยางได้ดี แต่อย่างไรก็ตามโรเตอร์มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ทำให้ยางคอมพาวนด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อย จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยม



รูปที่ 2.17 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ (intermix internal mixer) (สถาบันพลาสติก, 2011)

- เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer) เครื่องผสมแบบนี้มีโรเตอร์เหมือนเครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์มิกซ์ แสดงดังรูปที่ 2.18 แต่สามารถปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโรเตอร์ระหว่างการผสมได้ เช่น ในช่วงแรกของการผสมตั้งระยะห่างระหว่างโรเตอร์ไว้ให้มาก จะทำให้ป้อนยางและสารเคมีเข้าไปในเครื่องได้ง่าย จากนั้นปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์เพื่อให้มีแรงเฉือนสูงขึ้น จะทำให้สารตัวเติมแตกตัวได้ดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONG



รูปที่ 2.18 เครื่องผสมยางระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (variable intermeshing clearance internal mixer) (สถาบันพลาสติก, 2011)

- เครื่องผสมระบบปิดอื่นๆ ได้แก่ เครื่องนวดยาง (kneader) เครื่องผสมแบบนี้มีการจำหน่ายในเชิงการค้าและมีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่รูปแบบของโรเตอร์แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก อย่างไรก็ตามเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก จึงเป็นที่นิยมสำหรับผู้ประกอบการไทยปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 เครื่องนวดยาง (kneader) (สถาบันพลาสติก, 2011)

2.1.5.2 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer) ได้แก่ เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนเดี่ยว (single screw) เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (twin screw) แสดงดังรูปที่ 2.20 ตัวเครื่องสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 บริเวณใหญ่ๆ ได้แก่

- บริเวณที่ป้อนสาร (feed zone) ซึ่งจะประกอบด้วยถังป้อนสารที่มีลักษณะคล้ายกรวย (hopper)
- บริเวณที่เกิดการผสม (mixing zone) คล้ายห้องผสมในเครื่องผสมระบบปิด
- บริเวณที่ปล่อยยางออกจากเครื่อง (discharge zone)



รูปที่ 2.20 เครื่องผสมยางแบบต่อเนื่อง (continuous mixer) (สถาบันพลาสติก, 2011)

ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณ คุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น อัตรากำลังการผลิตซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการผลิตที่ขึ้นอยู่ โดยตรงกับอัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าไปในเครื่อง การเพิ่มอัตราการป้อนวัตถุดิบจะทำให้ระยะเวลาที่ ยางคอมพาวนด์อยู่ในเครื่องผสมสั้นลง ทำให้ประสิทธิภาพในการผสมลดลง ยางคอมพาวนด์ที่ได้จะมี ระดับการกระจายตัวและการแตกตัวของสารตัวเติมที่ต่ำลง ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

2.1.6 การขึ้นรูปยาง

หลังจากการผสมยางกับสารเคมีให้เข้ากันแล้ว ต่อมาคือการนำยางคอมพาวนด์มาขึ้นรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ ก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป หรือในบางกรณีการขึ้นรูปและการ คงรูปอาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนเดียวกันได้ เช่น กรณีที่ขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ (molding) การขึ้นรูป สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ๆ ได้แก่ การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (molding) การขึ้นรูปด้วย วิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) และการขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเอนเดอร์ (calendering) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.1.6.1 การขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์ (molding) เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดทั้งการขึ้น รูป (forming) และคงรูป (vulcanizing) ผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนเดียวกัน โดยอาศัยความร้อนและ แรงอัด เริ่มจากการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ก่อน จากนั้นจึงนำยางคอมพาวนด์ไปใส่ลงในแม่พิมพ์ เมื่อ ยางไหลเต็มแม่พิมพ์แล้ว ความร้อนจากแม่พิมพ์จะทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาการคงรูปต่อไป แม่พิมพ์ที่ใช้ใน อุตสาหกรรมสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 แบบ ได้แก่

2.1.6.1.1 แม่พิมพ์แบบกดอัด (compression mold) เป็นวิธีที่ใช้กันมาก ที่สุดในอุตสาหกรรมเมื่อเทียบกับการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอื่น เพราะเป็นวิธีที่ง่ายและเครื่องจักร ที่ใช้มีราคาไม่สูงมากนัก เครื่องจักรที่ใช้ ได้แก่ เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) ดังรูป ที่ 2.21 ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกดอัด (plate) จำนวน 2 แผ่น หรือมากกว่า 2 แผ่น ขึ้นกับการออกแบบ แผ่นกดอัดจะเลื่อนขึ้นลงด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่ออัดและส่งผ่านแรงดันไปสู่แม่พิมพ์ที่อยู่ตรงกลาง ระหว่างแผ่นกดอัด เครื่องจะสามารถตั้งอุณหภูมิและควบคุมความร้อนให้คงที่ระหว่างการผลิต

แม่พิมพ์แบบกดอัดประกอบด้วยแม่พิมพ์ 2 ส่วน คือ แม่พิมพ์ส่วนบน (lid) และแม่พิมพ์ส่วนล่าง (base) โดยแม่พิมพ์ส่วนล่างจะมีช่องเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ เรียกว่า แม่พิมพ์ (cavity) สำหรับใส่ยางคอมพาวนด์ที่จะขึ้นรูป จากนั้นนำแม่พิมพ์ส่วนบนมาปิดทับ สลัก (pin) ที่ติด อยู่กับแม่พิมพ์ส่วนบนจะช่วย ล็อกไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวในแนวระนาบขณะที่ได้รับแรงกดอัด เมื่อให้ แรงดันแก่แม่พิมพ์ ยางคอมพาวนด์จะถูกบังคับให้ไหลจนเต็มแม่พิมพ์ และความร้อนจากแม่พิมพ์จะ ทำให้ยางเกิดการคงรูป ผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น ยางล้อ ยางโอริง ยางรองแท่น เครื่อง พั่นรองเท้า เป็นต้น



รูปที่ 2.21 เครื่องกดอัดระบบไฮดรอลิก (hydraulic press) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.1.6.1.2 แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer mold) แม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด ประกอบด้วย 3 ส่วน ได้แก่

- 1) แม่พิมพ์ส่วนบน ซึ่งออกแบบมาให้มีลักษณะคล้ายแท่งกด
- 2) แม่พิมพ์ส่วนล่าง เป็นส่วนเข้าพิมพ์ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามต้องการ
- 3) แม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง เป็นส่วนที่มีแฉ่งหรือช่องว่างสำหรับใส่ยางคอมพาวนด์ เรียกว่า พอต (pot) และที่บริเวณด้านล่างของพอต จะมีหัวฉีด (injection nozzle) เพื่อเป็นช่องให้ยางไหลลงไปสู่เข้าพิมพ์ส่วนล่าง

การขึ้นรูปยางด้วยวิธีนี้เริ่มจากให้ความร้อนกับแม่พิมพ์ นำยางคอมพาวนด์ใส่ลงไปในช่องใส่ยางของแม่พิมพ์ส่วนตรงกลาง ปิดแม่พิมพ์ แท่งกด (ram) ของแม่พิมพ์ส่วนบนจะดันยางให้ไหลผ่านหัวฉีดเข้าสู่เข้าพิมพ์จนเต็ม เทคนิคนี้มีข้อดีคือสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างซับซ้อนกว่าที่จะใช้แม่พิมพ์แบบกดอัดได้ แต่ก็มีข้อเสียคือ ต้องเสียเวลานานในการขึ้นรูปแต่ละครั้ง เนื่องจากหลังการขึ้นรูป ต้องนำแม่พิมพ์ส่วนตรงกลางมาทำความสะอาดโดยกำจัดเศษยางคงรูป (scrap) ที่ติดอยู่บริเวณหัวฉีดหรือบริเวณฐานของช่องใส่ยางออกให้หมดก่อนที่จะทำการขึ้นรูปครั้งต่อไปได้ ลักษณะของเครื่องจักรแม่พิมพ์กึ่งฉีดแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบกึ่งฉีด (transfer molding machine) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.1.6.1.3 แม่พิมพ์แบบฉีด (injection mold) เป็นการพัฒนามาจาก 2 แบบแรก มีอัตราเร็วในการผลิตสูงและผลิตภัณฑ์ที่ได้มีขนาดที่ถูกต้องมากกว่าการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์แบบอื่นๆ จึงเหมาะกับการผลิตชิ้นส่วนที่มีความซับซ้อน เครื่องฉีดยังมีทั้งแบบเกลียวหนอน (screw-type injection molding machine) หรือแบบผสมระหว่างเกลียวหนอนกับแท่งกด (plunger screw injection molding machine) หลักการ คือ ให้อย่างไหลได้ก่อนที่จะฉีดเข้าสู่วัสดุแม่พิมพ์ โดยเกลียวหนอนจะหมุนทำให้ยางถูกป้อนเข้าสู่บารเรลของเครื่องฉีดอย่างต่อเนื่อง ยางจะไหลไปทางด้านหน้าของเกลียวหนอน เมื่อมีปริมาณและอุณหภูมิสูงเพียงพอแล้ว เกลียวหนอนก็จะหยุดหมุนและถูกดันไปข้างหน้าเพื่อฉีดยางคอมพาวนด์ให้ไหลเข้าสู่แม่พิมพ์ที่ร้อน หลังจากนั้นจะเกิดปฏิกิริยา คงรูปจนสมบูรณ์และแม่พิมพ์จะเปิดออก นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แม่พิมพ์จะปิด เกลียวหนอนก็จะเริ่มหมุนพร้อมทั้งเคลื่อนตัวไปทางด้านหลังเพื่อให้ยางคอมพาวนด์ชุดใหม่ไหลลงมาสำหรับการฉีดในรอบถัดไป เครื่องจักรของแม่พิมพ์แบบฉีดแสดงดังรูปที่ 2.23

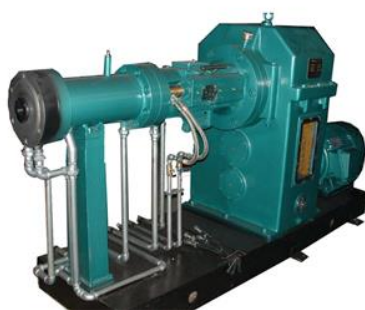


รูปที่ 2.23 เครื่องจักรแม่พิมพ์แบบฉีด (injection molding machine) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.1.6.2 การขึ้นรูปด้วยวิธีอัดผ่านตายโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูด (extrusion) การขึ้นรูปด้วยการอัดผ่านตาย (die) นิยมใช้กับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกันตลอดแนวความยาว เช่น ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล ยางขอบกระจก ยางรัดของ เป็นต้น เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปโดยทั่วไปเรียกว่า เครื่องเอ็กซ์ทรูด (extruder) ทั้งนี้เครื่องเอ็กซ์ทรูดนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่

2.1.6.2.1 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (ram extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากการทำงานของเครื่องเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ยางคอมพาวนด์ที่ร้อนจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอัด หลังจากนั้นแท่งอัดหรือแรมก็จะอัดยางให้ไหลผ่านหัวตายด้วยระบบไฮดรอลิก ยางที่ผ่านหัวตายออกมาจะเรียกว่าเอ็กซ์ทรูดเตต (extrudate) ข้อดีของเครื่องเอ็กซ์ทรูดเดอร์ชนิดนี้คือ เอ็กซ์ทรูดเตตที่ได้จะมีความเสถียรทางรูปร่างสูง เครื่องชนิดนี้จึงนิยมใช้สำหรับขึ้นรูปยางคอมพาวนด์ให้เป็นพรีฟอร์ม คือ การเตรียมยางคอมพาวนด์ให้มีรูปร่างที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ต่อไป

2.1.6.2.2 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder) เป็นเครื่องเอ็กซ์ทรูดชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน แสดงดังรูปที่ 2.24 ประกอบด้วยเกลียวหนอนซึ่งหมุนอยู่ในบาริล ซึ่งทั้งเกลียวหนอนและบาริลสามารถตั้งอุณหภูมิตามต้องการ ที่ปลายด้านหนึ่งของบาริลเป็นที่ตั้งของหัวตายและปลายอีกด้านหนึ่งเป็นช่องสำหรับป้อนยางคอมพาวนด์เข้าสู่เครื่อง การหมุนของเกลียวหนอนจะทำให้ยางคอมพาวนด์ไหลเข้าไปในบาริลอย่างต่อเนื่องและเกิดแรงดันสำหรับดันยางคอมพาวนด์ให้ไหลผ่านหัวตายที่อยู่ทางด้านหน้าเกิดเป็นรูปร่างของผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นต้องนำยางที่ขึ้นรูปแล้ว ไปผ่านขั้นตอนการคงรูปต่อไปโดยอาจใช้เทคนิคการคงรูปแบบไม่ต่อเนื่อง เช่น การคงรูปในหม้ออบไอน้ำความดันสูง หรือเทคนิคการคงรูปแบบต่อเนื่อง เช่น การคงรูปในถังของเหลว (liquid bath) เป็นต้น



รูปที่ 2.24 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (screw extruder) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.1.6.3 การขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเ็นเดอร์ (calendering) นิยมใช้ในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบที่มีความหนาและความกว้างสม่ำเสมอ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีนี้ เช่น สายพานลำเลียง ยางแผ่นปูพื้น ยางแผ่นปูบ่อน้ำ เป็นต้น เครื่องคาลเ็นเดอร์ประกอบด้วยลูกกลิ้งที่ทำจากเหล็กหล่ออย่างดี ผิวหน้าขัดเรียบ ตั้งแต่ 2 ถึง 4 ลูกกลิ้ง วางเรียงตัวกันในลักษณะต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.25 ด้านในของลูกกลิ้งมีลักษณะกลวงเพื่อติดตั้งระบบทำความร้อนและหล่อเย็น ช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งสามารถปรับให้กว้างหรือแคบได้ตามต้องการ ขั้นตอนการรีดยางเป็นแผ่นเรียบทำได้โดยยางจะถูกป้อนเข้าระหว่างลูกกลิ้งคู่บน ยางจะพันตามลูกกลิ้งกลาง ผ่านไประหว่างลูกกลิ้งคู่ล่าง พันตามลูกกลิ้งล่างและม้วนออกมา และมีการเป่าด้วยแป้ง หรือสารป้องกันยางติดกันอื่นๆ และพันหรือม้วนโดยมีผ้ากั้นระหว่างชั้นยางเพื่อป้องกันการเหนียวติดในการนำไปสู่ขั้นตอนการผลิตต่อไป

อย่างไรก็ตามหลังจากยางแผ่นผ่านเครื่องคาลเ็นเดอร์ออกมาแล้ว จะต้องไปผ่านขั้นตอนการคงรูปต่อไป เช่น การคงรูปด้วยอากาศร้อน (hot air vulcanization) หรือการคงรูปแบบหมุน (rotational vulcanization) เป็นต้น



รูปที่ 2.25 เครื่องคาลเ็นเดอร์ (calender) (สถาบันพลาสติก, 2013)

2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

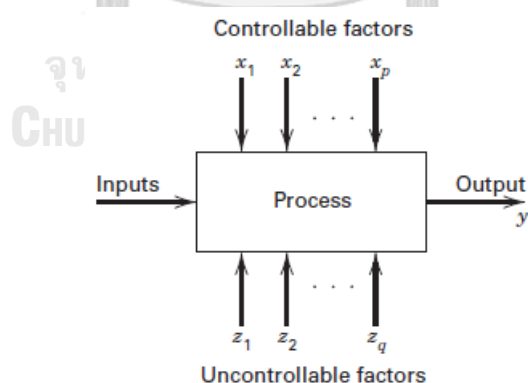
การทดลองให้เกิดประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลต้องนำวิธีการทางวิทยาศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนการทดลอง การออกแบบการทดลอง (Design and analysis of experiment, DOE) หมายถึงกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อว่าจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีการทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ โดยสามารถระบุออกมาเป็นค่าตัวเลขทางสถิติแสดงถึงค่าระดับความสำคัญของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ ซึ่งแตกต่างกับวิธีการโดยทั่วไปที่วิธีการการทดลองแบบทั่วไปเป็นการลองผิดลองถูก หรือใช้การ

ทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการทีละค่า ทำให้สิ้นเปลืองทรัพยากรในการทดลอง เนื่องจากการทดลองแบบนี้จะให้ผลที่ต้องการช้า (Montgomery, 2013)

2.2.1 กลยุทธ์การทดลอง (strategy of experimentation)

การทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังแสดงในรูปที่ 2.26 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ โดยกระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆ เข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยนเป็นตัวแปรต้น (inputs) ไปสู่ตัวแปรตาม (outputs) ที่มีออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่ง ตัวแปรกระบวนการชนิด x_1, x_2, \dots, x_p เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรกระบวนการชนิด z_1, z_2, \dots, z_q เป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยวัตถุประสงค์ของการทดลองมีดังนี้

- วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเพื่อให้มีค่าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับเป้าหมายมากที่สุด
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเพื่อให้มีความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนองที่ต่ำ
- กำหนดระดับที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองเพื่อให้อิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้มีน้อยที่สุด



รูปที่ 2.26 รูปแบบกระบวนการทั่วไป (Montgomery, 2013)

2.2.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการดำเนินการออกแบบการทดลองมีขั้นตอน ดังนี้

2.2.2.1 ทำความเข้าใจปัญหา เพื่อความเข้าใจถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง โดยต้องหาข้อมูลจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง และเพื่อให้กำหนดแนวทางการทดสอบให้ครอบคลุมปัญหาทั้งหมด

2.2.2.2 เลือกตัวแปรผลตอบ (response) ในการทดลองหนึ่งจะมีผลตอบหลายตัว และมีความจำเป็นที่ต้องกำหนดว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และวิธีการวัดตัวแปรตอบก่อนที่จะเริ่มดำเนินการทดลอง

2.2.2.3 เลือกปัจจัย (factors) ระดับ (level) และขอบเขต (range) ขั้นตอนนี้เป็น การเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงในระหว่างการทดลอง กำหนดขอบเขตที่ปัจจัยที่จะเปลี่ยนแปลง และกำหนดระดับในการทดลอง ต้องพิจารณาว่าจะควบคุมปัจจัยเหล่านี้ได้อย่างไร ดังนั้น ความรู้เกี่ยวกับกระบวนการจึงเป็นสิ่งสำคัญ และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือ การกรองปัจจัย ดังนั้น ควรกำหนดให้ระดับการทดลองมีจำนวนน้อยๆ ในการทดลองเพื่อกรองปัจจัยควร จะเลือกขอบเขตให้มีความกว้างมากๆ และเมื่อรู้ว่าปัจจัยใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุดก่อนลดขอบเขตของปัจจัยให้แคบลง

2.2.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง การเลือกการออกแบบการทดลองเกี่ยวข้องกับ การพิจารณาขนาดของตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อกหรือใช้การสุ่มอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ เพื่อให้ตรงกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.2.2.5 ทำการทดลอง เมื่อทำการทดลองจะต้องมีการติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นกับวิธีการทดลองจะทำให้การทดลองที่ทำนั้นใช้ไม่ได้ ดังนั้น การวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จของการทดลอง

2.2.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ การนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ ข้อมูลเพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่ การนำเอาวิธีการทางสถิติมา ผวนกับความรู้ทางวิศวกรรมความรู้เกี่ยวกับกระบวนการจะทำให้ข้อสรุปที่ออกมานั้นมีเหตุผล สันับสนุนและมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

2.2.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ คือ หาข้อสรุปในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ควรมีการ ทดลองเพื่อยืนยันผลเพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุป (Montgomery, 2013)

2.2.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลใช้กับการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ที่ต้องการจะศึกษาถึงผลรวมที่มีผลต่อผลตอบสนองที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การทดลองแบบแฟกทอเรียลเป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดในการตรวจสอบอิทธิพลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกัน คำว่าแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่สมบูรณ์ในแต่ละครั้ง คือ มีการใช้ระดับของปัจจัยต่างๆ ร่วมกัน จึงสามารถตรวจสอบอิทธิพลต่างๆ ในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ได้พร้อมกัน เช่น ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในแต่ละการทดลองซ้ำ จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และปัจจัยในการทดลองในรูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลสามารถแบ่งรูปแบบการทดลอง (treatment combination) ได้ 2 ประเภท คือ

- อิทธิพลหลัก (main effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยที่แสดงต่อตัวแปรตอบสนองด้วยตัวของมันเองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยเกิดขึ้น
- อิทธิพลร่วม (interaction effect) คือ อิทธิพลของปัจจัยหนึ่งที่จะเปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยร่วมกัน

รูปแบบของการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมีหลายแบบ ดังนี้

2.2.3.1 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย เป็นการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลชนิดที่ง่ายที่สุด ซึ่งเกี่ยวข้องกับปัจจัย 2 ปัจจัย เช่น ปัจจัย A และปัจจัย B โดยปัจจัย A จะประกอบด้วย a ระดับ ส่วนปัจจัย B จะประกอบด้วย b ระดับ ซึ่งในแต่ละการทำซ้ำของการทดลอง จะประกอบด้วย การทดลองรวมปัจจัยทั้งหมดเท่ากับ $a \times b$ การทดลอง และโดยปกติจะมีจำนวนการทดลองซ้ำทั้งหมด n ครั้ง

2.2.3.2 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบการทดลองที่ใช้ในกรณีที่มีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ระดับเหล่านี้ อาจเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณเช่น อุณหภูมิ ความดัน หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักร คนงาน และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนด้วยระดับสูง (high level) และต่ำ (low level) ของปัจจัยหนึ่งๆ สำหรับการออกแบบนี้ ประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 2^k ข้อมูล การออกแบบการทดลองแบบนี้มีประโยชน์อย่างมากต่องานทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ โดยปกติในการออกแบบจะแทนระดับสูงด้วยเครื่องหมาย + และระดับต่ำด้วยเครื่องหมาย - อีกทั้งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k เป็นการออกแบบที่นิยมใช้ทั้งในทางวิชาการและทางวิศวกรรม เนื่องจากมีจำนวนการทดลองที่น้อยที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างครอบคลุม

2.2.3.3 การออกแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองสามารถละเลยอันตรกิริยาบางตัวได้ เนื่องจากถ้าการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ

2^k แบบเต็มที่มีจำนวนปัจจัยมาก จำนวนการทดลองอาจเพิ่มขึ้นมากเกินไปกว่าทรัพยากรที่มีอยู่จะรองรับได้ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างครบถ้วน การออกแบบเช่นนี้เพื่อค้นหาว่ามีปัจจัยใดบ้างเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อผลตอบการทดลอง เพื่อกรองปัจจัยบางตัว ส่วนมากจะใช้ในตอนเริ่มต้นการทดลอง เนื่องจากจะมีปัจจัยจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่ามีผลน้อยหรือไม่มีผลต่อผลตอบสนองที่กำลังพิจารณาอยู่ หลังจากทำการทดลองเพื่อกรองปัจจัยเสร็จสิ้นแล้ว ปัจจัยที่มีผลจะถูกนำไปทำการทดลองอย่างละเอียดในการทดลองต่อไป

2.2.3.4 การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 3 ระดับ หมายถึง การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ และระดับทั้งสามของแต่ละปัจจัยมีค่าเป็น ต่ำ ปานกลาง และสูง สัญลักษณ์ที่ใช้แทนระดับทั้งสามเป็นตัวเลข $-1, 0$ และ 1 ตามลำดับ สังเกตว่าการทดลองแบบนี้จะมีระดับที่สามของปัจจัยเพิ่มเข้ามาในแบบจำลอง ซึ่งทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบที่สนใจ และปัจจัยที่สนใจในลักษณะที่เป็นสมการแบบควอดราติกได้ ซึ่งการออกแบบ 3^k จะได้ผลตอบที่มีลักษณะเป็นส่วนโค้ง (Montgomery, 2013)

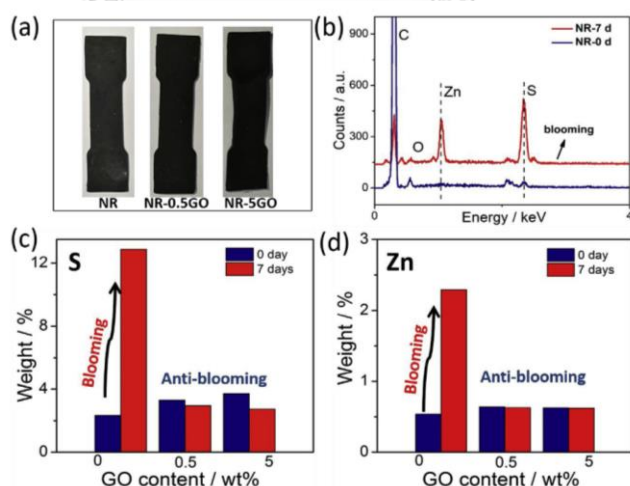
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การเกิดคราบบนแม่พิมพ์อาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น สารเคมีที่มากเกินไปในสูตรยาง การเกิดปฏิกิริยาต่างๆ พื้นผิวของแม่พิมพ์ และแรงยึดติดของยางกับแม่พิมพ์ที่มากเกินไป ทำให้ดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก ซึ่งสาเหตุเหล่านี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เพื่อหาความสำคัญทางสถิติของตัวแปรแต่ละตัวโดยใช้ค่าขอบเขตต่ำ (low level) และสูง (high level) ในการประเมินผลต่อระดับการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ในระหว่างการวัลคาไรเซชันของยาง และลดจำนวนการทดลองที่มากเกินไปจนความจำเป็น เนื่องจากวิธีการนี้จะวิเคราะห์เฉพาะตัวแปรที่มีผลอย่างมากต่อการเกิดคราบ ทำให้หาสาเหตุของการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ได้อย่างรวดเร็ว นำไปสู่การแก้ปัญหาการเกิดคราบบนแม่พิมพ์

Noguera และคณะ (2020) ได้ทำการศึกษาการเติบโตของ Buñuelos ด้วยการใช้ 2^k factorial design โดยวิธีการนี้จะมี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยประกอบ 2 ระดับ (level) อาจเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดันหรือเวลา เป็นต้น หรืออาจเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ เช่น เครื่องจักรหรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับจะแทนระดับสูงและต่ำ หรือ การมีและไม่มีของปัจจัยนั้นๆ ได้ใน 1 การทำซ้ำที่สมบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k ซึ่งการออกแบบนี้มีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่ต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้จำนวนการทดลองน้อยที่สุดและยังสามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้

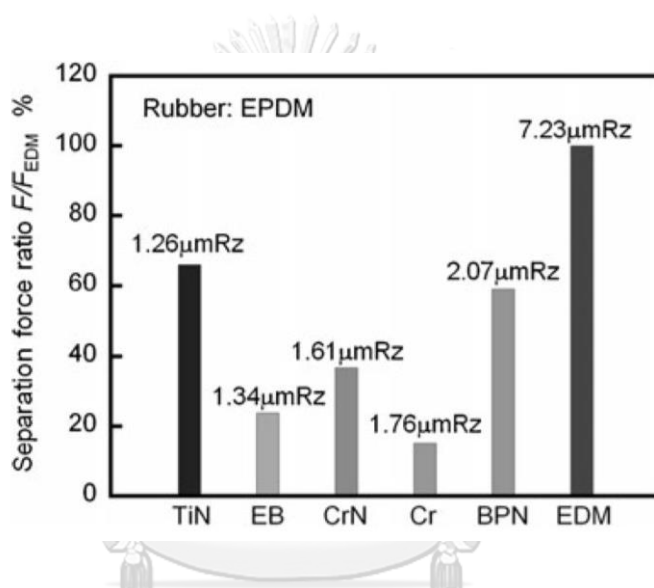
อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบ 2^k จึงถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อรองรับปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือจำนวนน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบ 2^k ประกอบด้วย 2 ระดับ ซึ่งสมมติว่าผลตอบสนองที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลอง (Noguera et al., 2020)

Huang และคณะ (2019) ศึกษาผลของแกรฟีนออกไซด์ ในฟิล์มคอมพอสิตของน้ำยางธรรมชาติเพื่อป้องกันการเกิดบลูม โดยในฟิล์มคอมพอสิตมีส่วนของน้ำยางธรรมชาติ ซัลเฟอร์ ซิงค์ออกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ไดออกทิลไดฟนิลไมด์ ซิงค์ไดเอทิลไดโทโอคาร์บาเมต และผงเขม่าดำ คือ 100, 1, 0.8, 0.3, 1, 0.4 และ 0.05 phr ตามลำดับ พบว่าฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนออกไซด์จะมีสีขาวที่ผิวเมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ในขณะที่ฟิล์มคอมพอสิตที่มีแกรฟีนออกไซด์จะมีสีดำเหมือนเดิม ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการทดสอบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอ็กซ์ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่พื้นผิวของฟิล์มคอมพอสิต พบว่ามีธาตุซัลเฟอร์และซิงค์เพิ่มขึ้น 5 เท่าในฟิล์มคอมพอสิตที่ไม่ได้ใส่แกรฟีนออกไซด์หลังจากผ่านไป 7 วัน ดังรูปที่ 2.27 แสดงถึงการบลูมของธาตุทั้งสองจากการเคลื่อนตัวของซัลเฟอร์ ซิงค์ออกไซด์ และซิงค์ไดเอทิลไดโทโอคาร์บาเมตมาที่พื้นผิวของฟิล์มคอมพอสิต โดยการใส่แกรฟีนออกไซด์สามารถป้องกันการเกิดบลูมได้ เนื่องจากแกรฟีนออกไซด์มีออกซิเจนที่ผิวมาก ทำให้เกิดการดูดซับสารเติมแต่งขึ้นและทำให้สารเติมแต่งไม่สามารถเคลื่อนตัวไปที่ผิวฟิล์มคอมพอสิตได้ (Huang et al., 2019)



รูปที่ 2.27 (a) ภาพของคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ (GO) ที่ต่างกัน, (b) ภาพสเปกตรัมของพื้นผิวก่อนและหลังการเก็บคอมพอสิตที่ไม่มีแกรฟีนออกไซด์เป็นเวลา 7 วัน, (c) และ (d) ฮิสโตแกรมของซัลเฟอร์ และ ซิงค์ออกไซด์ ที่วิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX ก่อนและหลังการเก็บคอมพอสิตที่มีปริมาณแกรฟีนออกไซด์ที่ต่างกันเป็นเวลา 7 วัน (Huang et al., 2019)

Okada และคณะ (2013) ศึกษาแรงยึดติดระหว่างชิ้นงานยางกับแม่พิมพ์ โดยปรับปรุงพื้นผิวของแม่พิมพ์ด้วยหลายวิธี และตรวจสอบแรงยึดติดระหว่างพื้นผิวเพื่อนำยาง EPDM ออกจากแม่พิมพ์ พบว่าการปรับปรุงพื้นผิวด้วยวิธีการกัดเซาะโลหะด้วยการจ่ายอิเล็กตรอน (Electrical discharge machining) ทำให้พื้นผิวมีความหยาบและใช้แรงในการนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์มากที่สุด ในขณะที่การเคลือบผิวด้วยโครเมียมและการขัดด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam polish) ดังรูปที่ 2.28 จะทำให้แม่พิมพ์มีความหยาบน้อยลงและใช้แรงในการดึงชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์น้อยกว่า กล่าวโดยสรุป คือ แรงที่ใช้ดึงชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์จะสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างยางกับแม่พิมพ์ (Okada et al., 2013)



รูปที่ 2.28 แรงที่ใช้ในการแยกชิ้นงานยางออกจากแม่พิมพ์ที่มีความหยาบต่างกันด้วยวิธีต่างๆ (Okada et al., 2013)

Hasan (2020) รายงานว่าน้ำยาถอดแบบ (mold release) มี 2 ชนิด คือ

1. Internal mold release agent (IMR) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สามารถละลายในเรซินผสม ซึ่งระหว่างกระบวนการบ่มชิ้นงาน สารเหล่านี้จะออกมาเป็นสารละลายและย้ายไปอยู่ที่ผิวเนื่องจากการหดตัว ความดัน และอุณหภูมิ โดยการเลือก IMR มีหลักเกณฑ์ดังนี้

- สามารถละลายในระบบได้ทั้งหมด
- มีผลกระทบต่อกระบวนการบ่มน้อยมาก
- มีผลกระทบต่อสีน้อยมาก
- ไม่ทำให้สมบัติทางกายภาพแย่งลง
- ไม่เป็นซิลิโคน สเตียเรต และแว็กซ์ธรรมชาติซึ่งส่งผลต่อการทาสีและกาวยึดติด

- การปลดปล่อยไม่ทำให้เกิดการสะสม
- ช่วยลด cycle time ได้

แต่มีข้อเสีย คือ ต้องมีขั้นตอนการทำความสะอาดถ้ามีการทาสีหรือทากาว ทำให้มีอัตราชิ้นงานบกพร่องสูง (พื้นผิวเป็นรอย)

2. External mold release agent (EMR) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใช้ด้านนอกของพื้นผิวเครื่องมือ และต้องมีการดูแลอย่างมากในการใช้งานเพื่อให้แน่ใจว่าสารเหล่านี้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สารเคมีเหล่านี้ได้แก่ ซิลิโคน เทฟรอน หรือสบู โดยมียุทธศาสตร์เลือกดังนี้

- มีการใช้งานง่าย ไม่ซับซ้อน
- ไม่เป็นสารละลายที่อันตราย
- มีการเปียกที่ดีสำหรับทุกพื้นผิว นั่นคือสารจะไม่หดตัวเมื่อมีการใช้งาน
- แรงตึงผิวควรพอดีกับการเคลือบเจล
- แห้งไว
- ง่ายต่อการขัดออก

มีข้อดี คือ ใช้ได้ง่ายกับชิ้นงานหลายประเภท มีความลื่นมาก ใช้งานสะดวกและรวดเร็ว ราคาถูก แต่มีข้อเสีย คือ มีการปนเปื้อนที่ผิวชิ้นงาน ทำให้มีอัตราชิ้นงานบกพร่องสูง (พื้นผิวเป็นรอย) จำเป็นต้องกระบวนการทำความสะอาดเมื่อมีการทาสีและทากาว และมีการสะสมของสารที่ปล่อยออกมา ทำให้ต้องทำความสะอาดแม่พิมพ์บ่อยครั้ง (Hasan, 2020)

Coleman (2017) รายงานว่าน้ำยาถอดแบบที่ฉีดไปที่แม่พิมพ์โดยตรงมักมีส่วนประกอบของซิลิโคนและฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon) หรือบางชนิดจะฉีดหรือเคลือบที่ผิวของชิ้นงานที่จะขึ้นรูป ซึ่งจะทำในเครื่องปฏิกรณ์ถึงกวนแบบกะนั้นนั้นเพื่อไม่ให้ผ่านเครื่องอัดรีด ดังนั้นสารเคมีที่สามารถหลอมรวมกับพอลิเมอร์ได้จึงเป็นตัวเลือกที่ดี โดยน้ำยาจะเข้ามาอยู่ระหว่างผิวของแม่พิมพ์และพลาสติก เช่น สายโซ่พอลิเมอร์ที่มีอะตอมของฟลูออรีนอยู่ในโครงสร้าง อีกทั้งฟลูออโรคาร์บอนจะไม่ผสมหรือละลายในพอลิเมอร์ แต่จะเข้ากับพื้นผิวแม่พิมพ์ได้ดี ในขณะที่น้ำยาชนิดอื่นอาจละลายในพอลิเมอร์ขณะร้อน แต่จะกลายเป็นสารละลายระหว่างกระบวนการขึ้นรูป อย่างไรก็ตามน้ำยาอาจมีมากกว่าหนึ่งหน้าที่ เช่น เป็นสารหล่อลื่นที่อยู่ที่ผิวของพลาสติก หรือนำพาสารเติมแต่งอื่นๆ มาที่ผิวเพื่อคงรูป ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับสารเติมแต่งที่ต้องทำงานที่ผิว เช่น biocide และ UV stabilizer บางครั้งน้ำยาก็ทำหน้าที่ดีเกินไปและรบกวนการพิมพ์ การติดกาว และการติดสี นอกจากนี้เมื่อน้ำยาละลายในระหว่างการหลอมจะทำให้ความหนืดของพอลิเมอร์ลดลงและทำหน้าที่เป็นสารช่วยในการขึ้นรูปได้ โดยที่สารที่ช่วยในการขึ้นรูปบางชนิดก็ทำหน้าที่เป็นน้ำยาถอดแบบด้วย (Coleman, 2017)

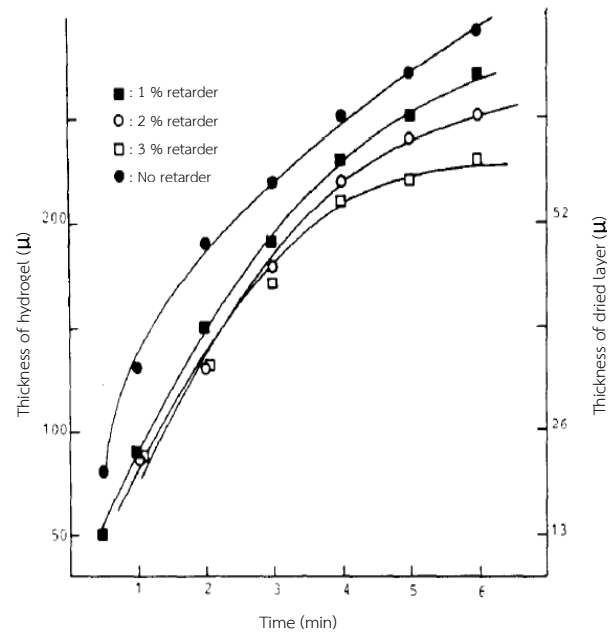
Raja (1999) กล่าวว่า น้ำยาถอดแบบ คือ สารเคมีที่ทำให้ยางขึ้นรูปไม่ติดอยู่กับหลุมแม่พิมพ์ ซึ่งมีอยู่หลายชนิดไม่ว่าจะเป็นสารประเภทสบู่ ซิลิโคน แอคริลิก และโพลูอิน โดยปกติแล้วจะฉีดเคลือบด้านเดียวของแม่พิมพ์และบริเวณที่เป็นโพรงก่อนจะทำการวางยางคอมพาวนด์ โดยต้องมีการฉีดน้ำยาในทุกพื้นที่ของแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับการไหลของยาง เพื่อให้ยางออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายและเร็ว นอกจากนี้ น้ำยาถอดแบบยังสามารถใช้แก้ปัญหาชิ้นงานที่เกิดความบกพร่องได้ดังนี้

- รอยขีดข่วน (abrasion) จะเกิดขึ้นเมื่อผิวของแม่พิมพ์มีการสึกกร่อนเนื่องจากการเสียดสีระหว่างแผ่นของแม่พิมพ์ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยฉีดน้ำยาในส่วนที่ต้องมีการรับน้ำหนักในหลุมของแม่พิมพ์เพื่อใช้ในการขึ้นรูปต่อไป

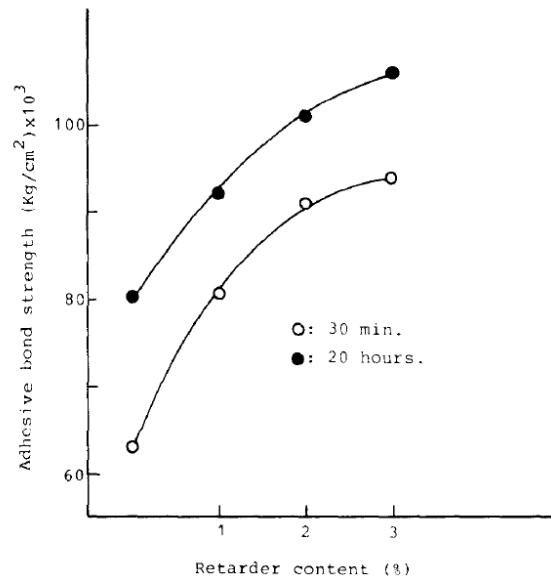
- การเกิดรอยแยกบนพื้นผิว (release Cuts) เกิดจากการฉีดน้ำยามากเกินไป เนื่องจากน้ำยาจะทำให้สะดวกต่อการปลดชิ้นงาน แต่การฉีดที่มากเกินไปจะทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการรอยแยกได้

- ความเป็นรูพรุน (porosity) เกิดจากมีหลุมขนาดเล็กที่ผิวของแม่พิมพ์ที่มาจาก การกัดแม่พิมพ์ที่ไม่เหมาะสมและการปนเปื้อนของแม่พิมพ์ รวมถึงการเป็นสนิมเนื่องจากการบำรุงรักษาที่ไม่ดี ซึ่งสามารถแก้ไขชั่วคราวได้ด้วยการใช้น้ำยาถอดแบบ สำหรับการแก้ไขถาวรสามารถทำได้ด้วยการนำแม่พิมพ์ไปเคลือบ และการเก็บแม่พิมพ์ต้องมีการใช้น้ำมันเครื่องเพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันแล้วเกิดเป็นสนิม (Raja, 1999)

Andreopoulos (1985) ศึกษาการใช้โซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate) เป็นน้ำยาถอดแบบเนื่องจากมีสมบัติที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมีน้อยลง และมีการใส่สารหน่วงเพิ่มเพื่อทำให้ความหนาของฟิล์มเคลือบมีความเหมาะสม พบว่าที่ความเข้มข้นของซีเตรตที่เป็นสารหน่วงที่เหมาะสม คือ 2-3% จะทำให้ได้ฟิล์มหนา 55-65 ไมครอน และใช้เวลาในการเคลือบ 5-6 นาที เนื่องจากจะมีแรงยึดติดที่เหมาะสม ดังรูปที่ 2.29 - 2.30 จะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด (Andreopoulos, 1985)



รูปที่ 2.29 ความหนาของชั้นฟิล์มที่ขึ้นกับเวลา (Andreopoulos, 1985)

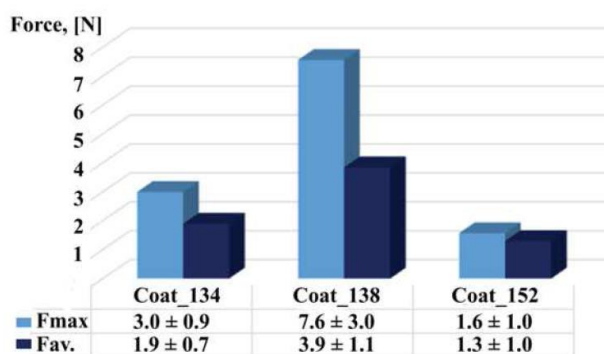


รูปที่ 2.30 แรงยึดเหนี่ยวที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณของสารหน่วง (Andreopoulos, 1985)

Chatada และคณะ (2019) ศึกษาการเคลือบด้วยฟลูออโรพอลิเมอร์ (Fluoropolymer) สามชนิดที่มีชื่อทางการค้า คือ Coat_134, Coat_138 และ Coat_152 บนพื้นผิวของอะลูมิเนียมที่ใช้ในการขึ้นรูปโพลียูรีเทน พบว่าการเคลือบผิวด้วยสารเหล่านี้ทำให้พื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) สูงขึ้น ดังตารางที่ 2.2 ทำให้สารที่มีขี้ไม่สามารติดอยู่ที่พื้นผิวที่มีการเคลือบ จะทำให้มีแรงยึดติดระหว่างโพลียูรีเทนกับพื้นผิวที่เคลือบน้อยลงและพื้นผิวเรียบขึ้น ดังรูปที่ 2.31 (Chatada et al., 2019)

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบมุมสัมผัส (contact angle) และพลังงานพื้นผิว (surface free energy) บนพื้นผิวที่มีการเคลือบด้วยน้ำยาต่างๆ (Chatada et al., 2019)

No.	Code	Contact angle, °		Surface energy, mJ/m ²		
		Distilled water	Diiodomethane	γ_s	γ_s^d	γ_s^p
1	Aluminium surface	53.1 ± 6.6	55.6 ± 1.8	46.7	14.2	32.5
2.	Coat_134	99.3 ± 2.1	77.0 ± 3.2	19.1	16.4	2.7
3.	Coat_138	95.9 ± 2.4	78.6 ± 2.7	18.6	14.1	4.5
4.	Coat_152	105.8 ± 1.1	92.3 ± 5.9	12.0	8.9	3.1



รูปที่ 2.31 ผลการทดสอบแรงยึดติดบนพื้นผิวที่ใช้น้ำยาเคลือบผิว 3 ชนิด (Chatada et al., 2019)

D'Avico และคณะ (2020) ศึกษาการใช้สารละลายอีพอกซี 3 ชนิด คือ Marbocote® W2140 ที่เป็น water-base, EP ที่มีองค์ประกอบของ polyethylene wax 15% และ EV-333 ที่มีองค์ประกอบของขี้ผึ้งและน้ำมันพาราฟินิกมาเป็นน้ำยาถอดแบบบนผิวแม่พิมพ์ที่ถูกเคลือบด้วย AlTiN, NbN, ZrN และ TiN ด้วยวิธีการสะสมไอเชิงกายภาพ (physical vapor deposition, PVD) ในการผลิตยาง NBR พบว่าการเจือจางสารเคมีทั้ง 3 ชนิด ที่ 25 และ 50% โดยน้ำหนัก มีผลต่อแรงดึงผิวของสารละลายน้อยมาก ดังตารางที่ 2.3 ทำให้ประสิทธิภาพของน้ำยายังคงอยู่และช่วยลดต้นทุน

ของอุตสาหกรรมได้ และจากค่ามุมสัมผัส (contact angle) ของ Marbocote® W2140 บนพื้นผิวที่มีการเคลือบจะมีค่าน้อยที่สุด ดังตารางที่ 2.4 ทำให้สารละลายอิมัลชันกระจายตัวบนพื้นผิวแม่พิมพ์ได้ดี สามารถเกิดเป็นฟิล์มกั้นระหว่างยาง NBR กับแม่พิมพ์ ทำให้มีการนำยางออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้น (D'Avico et al., 2020)

ตารางที่ 2.3 ค่าแรงตึงผิวของน้ำยาบริสุทธิ์ (100%wt.) และที่เจือจาง (25%wt., 50%wt.) (D'Avico et al., 2020)

Emulsion	25% γ_{lv} (mN m ⁻¹)	50% γ_{lv} (mN m ⁻¹)	100% γ_{lv} (mN m ⁻¹)
Marbocote® W2140	35	34	33
EP	43	40	38
EV-333	47	44	43

ตารางที่ 2.4 ค่ามุมสัมผัสและค่าพลังงานพื้นผิวของสารละลายบนพื้นผิวที่มีการเคลือบด้วยวิธีต่างๆ (D'Avico et al., 2020)

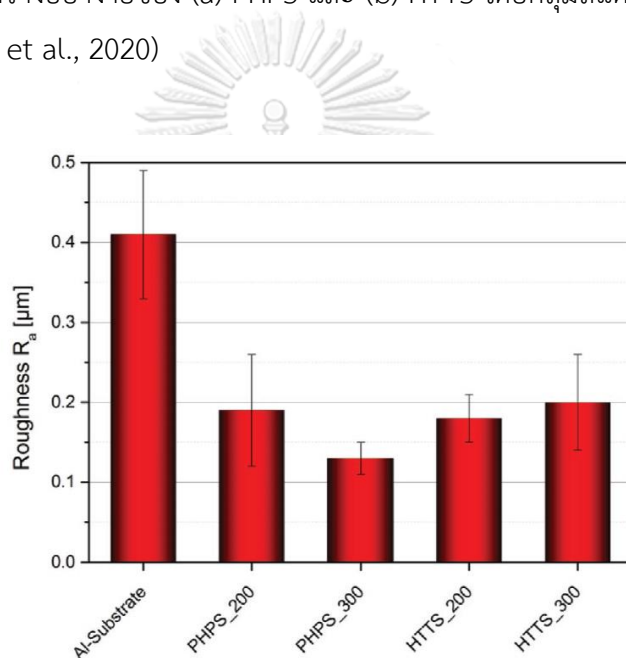
Coatings	θ (°)				SFE (mN m ⁻¹)		
	Water	Glycerol	Diethylene Glycol	Diiodomethane	SFE ^p	SFE ^d	SFE ^{TOT}
AlTiN	90 ± 3	81 ± 2	53 ± 2	46 ± 1	2 ± 1	33 ± 2	35 ± 3
NbN	85 ± 1	75 ± 1	48 ± 1	47 ± 2	4 ± 2	31 ± 1	35 ± 3
ZrN	76 ± 2	73 ± 3	51 ± 2	55 ± 1	8 ± 1	25 ± 2	33 ± 3
TiN	71 ± 2	68 ± 1	42 ± 3	50 ± 2	10 ± 1	27 ± 2	37 ± 3

Barroso และคณะ (2020) ศึกษาการใช้พอลิไซลาเซน (polysilazane) 2 ชนิดที่มีโครงสร้างเคมีต่างกัน คือ ดูราเซน (crosslinked durazane 1800, HTTS) และเปอร์ไฮโดรพอลิไซลาเซน (perhydropolysilazane, PHPS) ที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.32 เป็นวัสดุเคลือบบนพื้นผิวของอะลูมิเนียม โดยมีการให้อุณหภูมิที่ 200 และ 300 °C เพื่อให้เกิดการเชื่อมขวางของเรซิน พบว่าพื้นผิวที่เคลือบแล้วจะมีความหยาดลดลงจาก 0.4 เป็น 0.2 R_a ซึ่งไม่ได้ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในเรซินทั้งสองชนิด ดังรูปที่ 2.33 และจากค่ามุมสัมผัสของน้ำบนพื้นผิว พบว่า HTTS จะมีค่ามุมสัมผัสมากกว่า โดยที่กับอุณหภูมิสูงจะทำให้ค่ามุมสัมผัสต่ำลง ดังตารางที่ 2.5 อีกทั้งจากการทดสอบการยึดติดของฟีโนลิกเรซิน (phenolic resin) บนพื้นผิวที่เคลือบพบว่า พื้นผิวที่เคลือบด้วย PHPS จะมีการยึดติดสูงกว่าพื้นผิวที่ไม่ได้เคลือบ ดังรูปที่ 2.34 ในขณะที่พื้นผิวที่เคลือบด้วย HTTS จะมีการยึดติดต่ำกว่าพื้นผิวที่ไม่ได้เคลือบ และที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้มีการยึดติดดีขึ้น ดังนั้นการใช้ HTTS เคลือบพื้นผิว

ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส จะทำให้มีการยึดติดที่น้อยกว่า เนื่องจากมุมสัมผัสที่สูง จึงทำให้มีพลังงานพื้นผิวที่น้อยที่สุด (Barroso et al., 2020)



รูปที่ 2.32 รูปโครงสร้างอย่างง่ายของ (a) PHPS และ (b) HTTS โดยกลุ่มสีแดงจะเป็นกลุ่มที่เกิดการเชื่อมขวาง (Barroso et al., 2020)

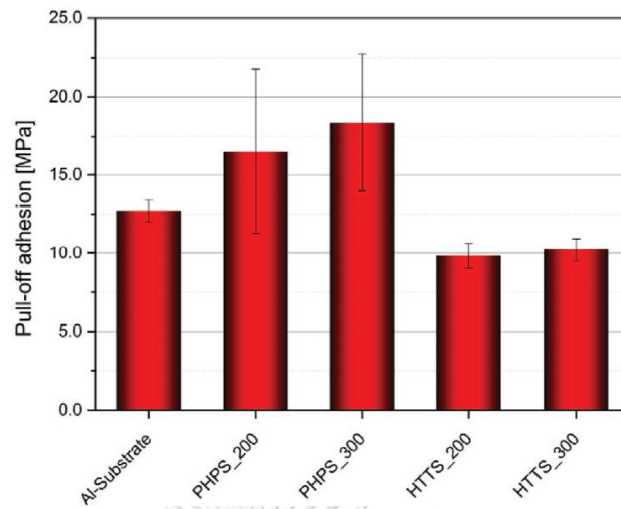


CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.33 ค่าความหยาบเฉลี่ย (R_a) ของพื้นผิวที่ไม่เคลือบและเคลือบที่อุณหภูมิต่างๆ (Barroso et al., 2020)

ตารางที่ 2.5 ค่ามุมสัมผัสและค่าพลังงานพื้นผิวของพื้นผิวต่างๆ ด้วยน้ำและไดโออกไซด์มีเทนที่เกิดการเชื่อมขวางที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส (Barroso et al., 2020)

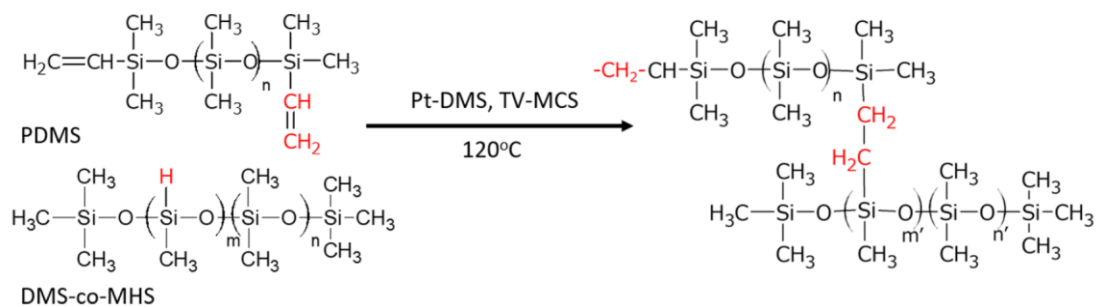
Surface	CA_{H_2O}	CA_{CH_2}	γ_s [mN m ⁻¹]	γ_s^{disp} [mN m ⁻¹]	γ_s^{polar} [mN m ⁻¹]
Al-substrate	57.3° ± 3.6°	54.7° ± 2.3°	49.0 ± 3.7	31.6 ± 1.3	17.4 ± 2.4
PHPS_200	79.4° ± 1.8°	48.0° ± 0.5°	40.0 ± 0.9	35.4 ± 0.3	4.6 ± 0.7
PHPS_300	71.7° ± 0.3°	47.6° ± 0.8°	43.4 ± 0.6	35.6 ± 0.4	7.8 ± 0.2
HTTS_200	86.8° ± 0.4°	49.8° ± 0.6°	36.8 ± 0.5	34.4 ± 0.3	2.4 ± 0.1
HTTS_300	77.5° ± 0.8°	48.8° ± 1.0°	40.4 ± 0.9	34.9 ± 0.6	5.5 ± 0.4



รูปที่ 2.34 ค่าแรงดึงออกเฉลี่ยของเรซินบนพื้นผิวของอลูมิเนียมที่มีการเคลือบและไม่เคลือบที่ การเชื่อมขวางที่ 200 และ 300 องศาเซลเซียส (Barroso et al., 2020)

Gonzales และคณะ (2022) ศึกษาการเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนคอมพอสิตที่ใช้ในการแยกสารละลายอินทรีย์ โดยใช้ความร้อนในการเร่งให้เกิดการเชื่อมขวาง โดยกลไกการเกิดการเชื่อมขวางแสดงดังรูปที่ 2.35 ที่จะเห็นว่าบริเวณที่เกิดการเชื่อมขวางคือกลุ่มของเมทิลระหว่างสายโซ่ ทำให้เกิดเป็นแผ่นของชั้นฟิล์มบาง

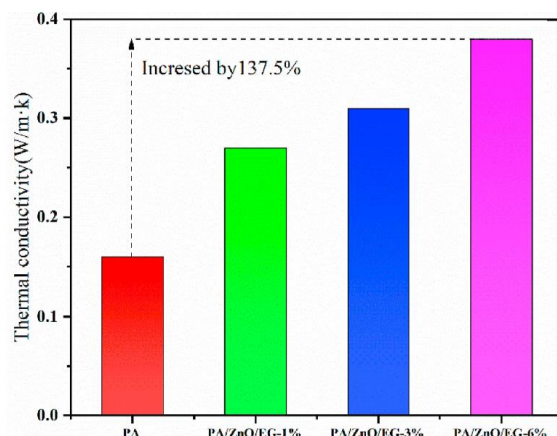
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.35 การเกิดการเชื่อมขวางของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Gonzales et al., 2022)

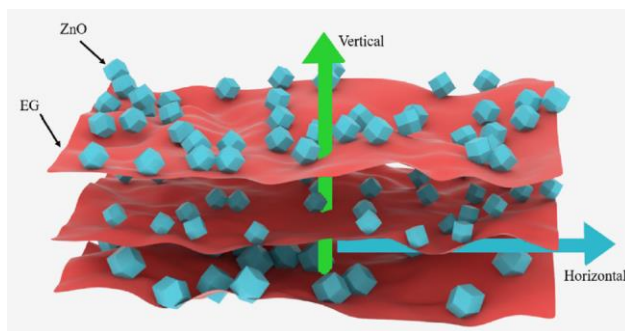
Al-sorory และคณะ (2022) ศึกษาสมบัติเชิงกล ความร้อน และไฟฟ้าของยูเทคติกอัลลอย (Sn96Ag3.5Cu0.5) ที่ใส่อนุภาคของซิงค์ออกไซด์ปริมาณ 0.1-1 wt.% จากผลของการทดสอบพบว่า ใส่ซิงค์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะทำให้มีอุณหภูมิการหลอมเหลว (melting temperature, T_m) และความร้อนจำเพาะ (specific heat, C_p) เนื่องจากมีการกระจายตัวในโครงร่าง ทำให้ความร้อนที่ใช้หลอมจึงสูงขึ้น (Al-sorory et al., 2022)

Wang และคณะ (2022) ศึกษาคอมพอสิตของแกรไฟท์ขยาย (expanded graphite, EG) ที่ การใส่กรดพาลมิติก (Palmitic acid, PA) และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) สำหรับการใช้เป็นวัสดุกักเก็บ ความร้อน พบว่า เมื่อมีการใส่ 6 wt.% ZnO/EG จะทำให้ค่าการนำความร้อนสูงขึ้น 137.5% ดังรูปที่ 2.36 เนื่องจากการรวมตัวของซิงค์ออกไซด์และแกรไฟท์ที่มีโครงร่างสามมิติ ดังรูปที่ 2.37 ทำให้เกิดการนำความร้อนทั้งแนวนอนและแนวตั้ง ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนจึงเกิดได้เร็วขึ้น



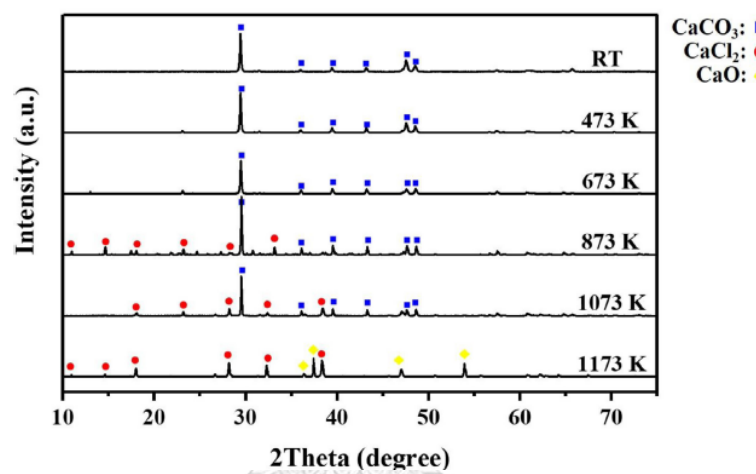
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 2.36 ค่าการนำความร้อนของคอมพอสิต (Wang et al., 2022)

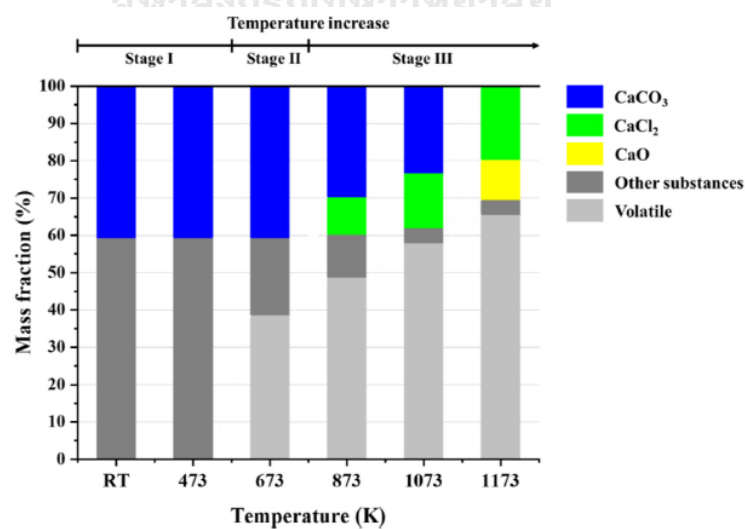


รูปที่ 2.37 โครงร่างสามมิติของคอมพอสิต (Wang et al., 2022)

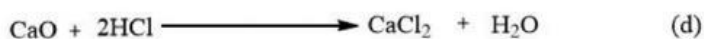
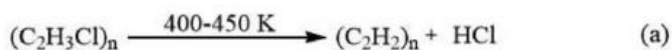
Zou และคณะ (2021) ศึกษาการไพโรไลซิส (pyrolysis) ของพอลิเมอร์ลอกหุ้มด้านนอกของสายเคเบิลที่ใช้ PVC/CaCO₃ โดยจากทดสอบสารตกค้างจากการสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค XRD และนำมาคำนวณสัดส่วนของน้ำหนักรูปที่ 2.38-2.39 พบว่าธาตุที่พบคือ CaO, CaCl₂, CaCO₃ และสายระเหยอื่นๆ โดยที่ CaCO₃ จะลดลงเมื่อใช้ความร้อนที่สูงขึ้น และทำให้มีสารระเหยเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจาก CaCO₃ จะสลายตัวเป็น CaO และ CaO จะทำปฏิกิริยากับ HCl กลายเป็น CaCl₂ และยังทำให้มีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) เกิดขึ้นในปริมาณมากอีกด้วย ดังกลไกการเกิดปฏิกิริยาดังรูปที่ 2.40



รูปที่ 2.38 กราฟ XRD ของสารตกค้างที่อุณหภูมิต่างๆ (Zou et al., 2021)

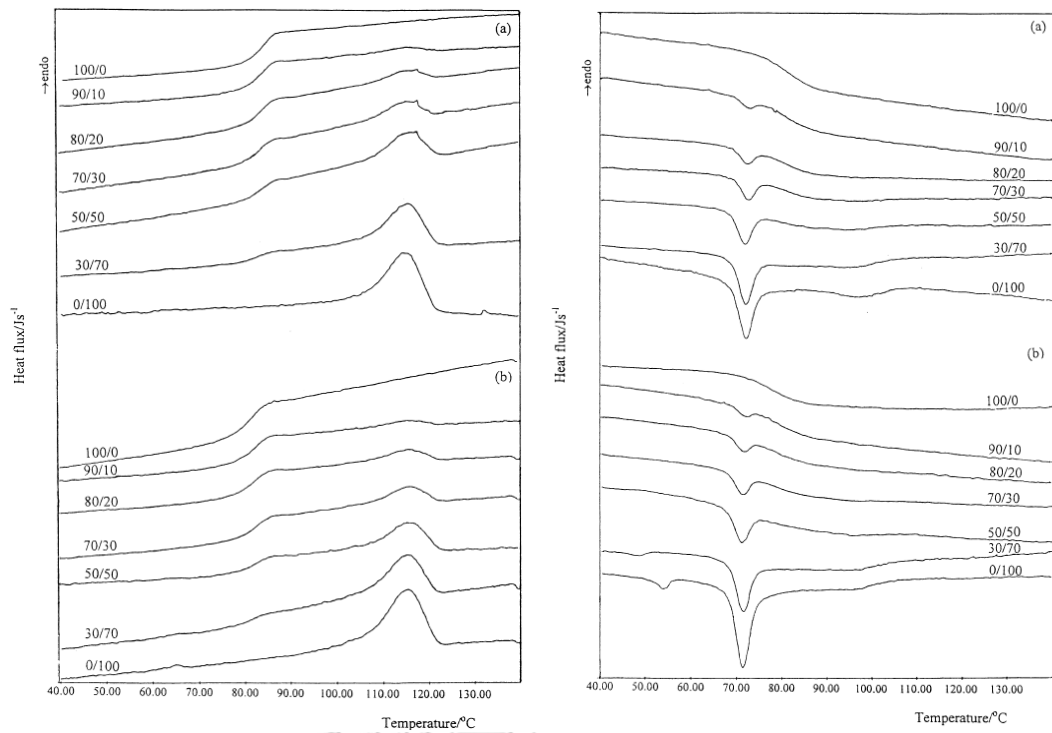


รูปที่ 2.39 สัดส่วนน้ำหนักรูปที่ 2.39 ของ CaO, CaCl₂, CaCO₃ และสายระเหยอื่นๆ (Zou et al., 2021)

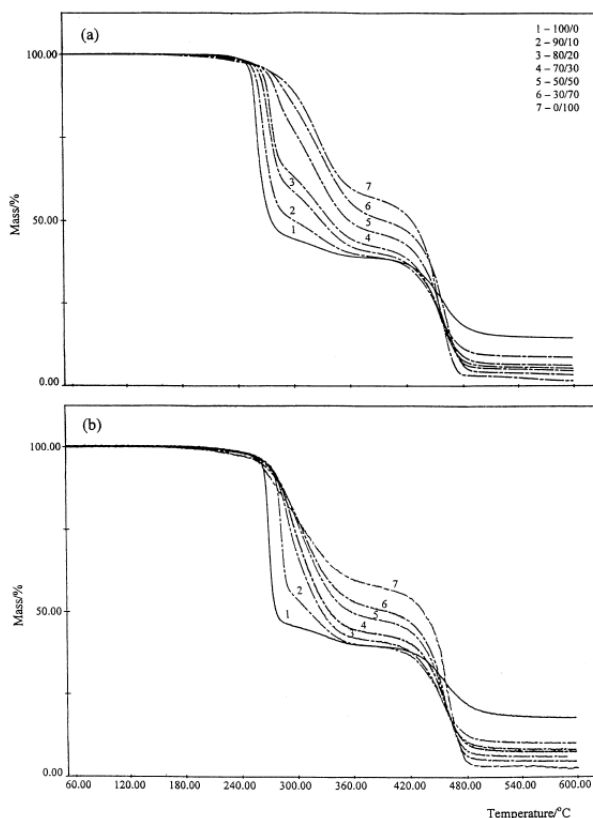


รูปที่ 2.40 กลไกการเกิด $CaCl_2$, CaO และ CO_2 (Zou et al., 2021)

Vrandečić และคณะ (2001) ศึกษาผลของการใส่ Ca/Zn ต่อการสลายตัวทางความร้อนของ PVC/CPE จากการทดสอบด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริเมทรี (Differential scanning calorimetry, DSC) พบว่าการใส่ Ca/Zn 1% ทำให้พลังงานที่ใช้ในการสลายผลึก (heat of fusion) และพลังงานที่ใช้ในการเกิดผลึก (heat of crystallization) สูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass temperature, T_g) ของ PVC และพอลิเมอร์ผสม (polymer blend) ลดลง 2 และ 1-2.5 °C ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.41 อีกทั้งมีการปลดปล่อยกรดไฮโดรคลอริก (dehydrochlorination) ของ PVC เพิ่มขึ้น แต่ใน CPE ลดลง เนื่องจาก CPE มีเสถียรภาพทางความร้อนมากกว่า เพราะการจัดเรียงตัวของ PVC จะเป็นแบบหัวต่อหาง (head to tail) ที่เป็นระเบียบมากกว่า จึงทำให้ PVC มีการปลดปล่อยกรดไฮโดรคลอริกง่ายกว่า เนื่องจากพันธะ C-Cl จะอ่อนกว่าในการจัดเรียงตัวแบบหัวต่อหัว (head to head) หรือหางต่อหาง (tail to tail) ของ CPE ที่เป็นแบบสุ่ม ทำให้จะเกิด การปลดปล่อยกรดไฮโดรคลอริกในรูปของ vinyl ที่มีพันธะ C-Cl ที่แข็งแรงกว่า อีกทั้งการสลายตัวของ CPE มีปริมาณคลอรีนเท่ากับ PVC จะมีการสลายตัวช้ากว่า ดังรูปที่ 2.42 เพราะเกิดการปลดปล่อยกรดไฮโดรคลอริกแบบสุ่ม ในขณะที่ PVC จะเกิดแบบสลับ (zip) นอกจากนี้อัตราการเกิดการปลดปล่อยกรดไฮโดรคลอริกของคอมพอสิตจะสูงสุดเมื่อมีการใส่ Ca/Zn จะสูงกว่าเมื่อไม่ได้ใส่ โดยเฉพาะที่ 0/100 อีกทั้งการเพิ่มอัตราส่วนของ CPE ในคอมพอสิตจะทำให้มีเสถียรภาพลดลงเพราะจะมี $ZnCl_2$ เกิดขึ้นนั่นเอง (Vrandečić et al., 2001)

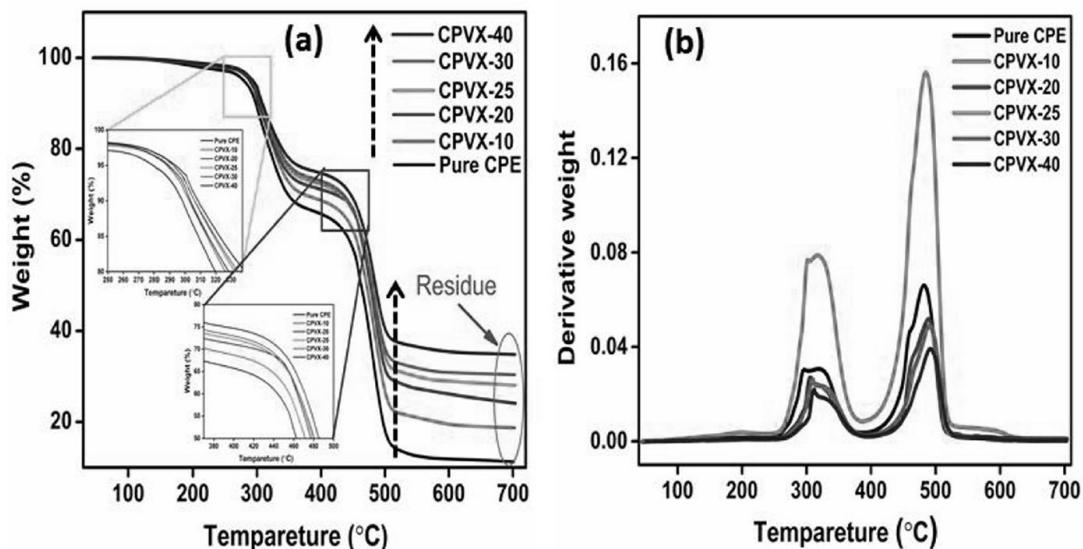


รูปที่ 2.41 กราฟ DSC ของคอมโพสิต PVC/CPE ที่ (a) ไม่เสถียร และ (b) เสถียร ในปริมาณต่างๆ (ซ้าย) อัตราความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (ขวา) อัตราความเย็น 10 องศาเซลเซียสต่อนาที (Vrandečić et al., 2001)



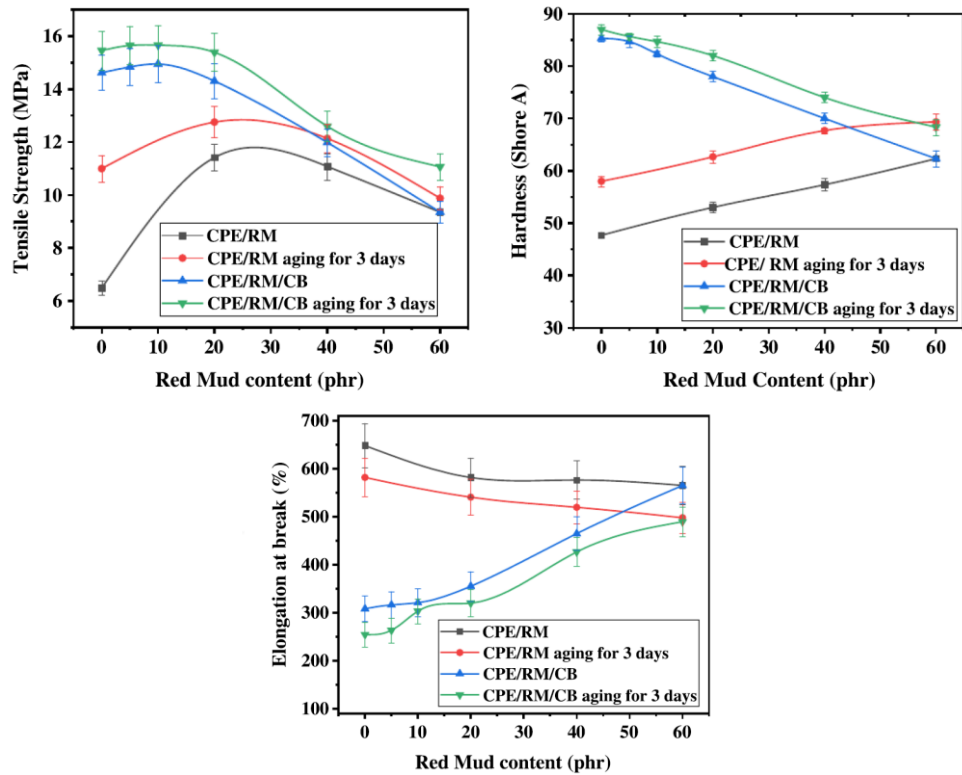
รูปที่ 2.42 กราฟการสลายตัวของคอมพอสิต PVC/CPE ที่ (a) ไม่เสถียร และ (b) เสถียร ในปริมาณต่างๆ (Vrandečić et al., 2001)

Mondal และคณะ (2017) ศึกษาผลของการใส่ Vulcan XC-72 (VXC) ที่เป็นเขม่าดำในยาง CPE ต่อสมบัติเชิงกลและการนำไฟฟ้าของคอมพอสิต โดยมีการใส่ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide, DCP) ไตรอัลลิไซยานูเรต (triallyl cyanurate, TAC) แมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide, MgO) และไดบิวทิลดีลอูเรต (dibutyltin dilaurate, DBTDL) เป็นสารวัลคาไนเซชัน (curing agent), สารเสริมการเชื่อมโยง (co-agent), สารรับกรด (acid scavenger) และสารรักษาเสถียรภาพทางความร้อน (heat stabilizer) ตามลำดับ พบว่าเมื่อคอมพอสิตที่มีการใส่ VXC มากจะทำให้มีแรงยึดติดระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์กับเขม่าดำมาก จึงเกิดเป็นชั้นขวางกั้นไม่ให้เกิดการสลายออกซิเดชันในการสลายตัวจึงสูงขึ้น นอกจากนี้ยังทำให้มีสารตกค้างมาก โดยที่ MgO จะมีการสลายตัว 2 ช่วง คือที่ 174 °C และ 240 °C ดังรูปที่ 2.43 (Mondal et al., 2017)

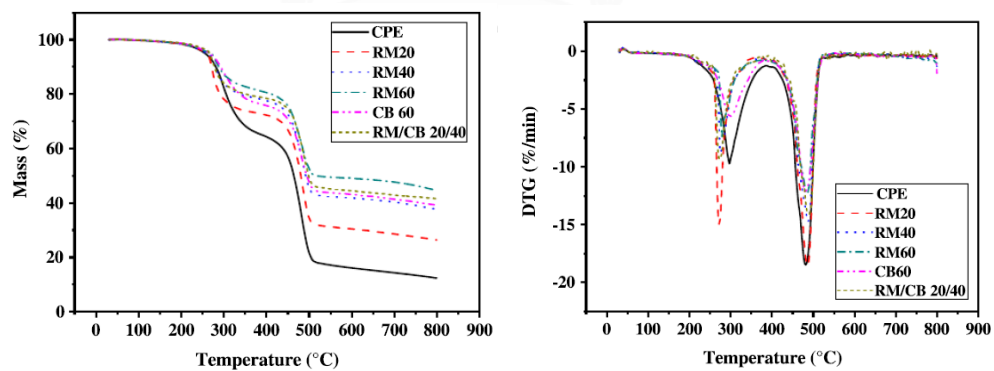


รูปที่ 2.43 กราฟ (a) DSC และ (b) TGA ของ CPE คอมพอสิตที่อุณหภูมิต่างๆ (Mondal et al., 2017)

Qiu และคณะ (2020) ศึกษาการเติม red mud (RM) ในยาง CPE เพื่อแทนที่เขม่าดำ โดยใส่ RM/CB ในอัตราส่วนต่างๆ ต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติทางความร้อนของคอมพอสิต โดยที่ RM มีองค์ประกอบหลัก คือ Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 และ Na_2O เป็น 38%, 21.6%, 20.2% และ 11.4% ตามลำดับ ในการผสมคอมพอสิตมีการใส่ไตรอัลลิลไอโซไซยาเนตเป็นสารวัลคาไนเซชัน ไตรอัลลิลไอโซไซยานูเรต (triallyl isocyanurate, TAIC) เป็นสารเสริมการเชื่อมโยง คลอรีเนตพอลิโอเลฟิน (Chlorinated polyolefin), ซิงออกไซด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ (magnesium oxide) เป็นสารรักษาเสถียรภาพ และกรดสเตียริก (stearic acid) เป็นสารกระตุ้น จากการทดสอบสมบัติการดึงยืดพบว่า ค่าความแข็งแรงของการดึงยืดและค่าความแข็งมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ความยาวยืด ณ จุดขาด ลดลงเมื่อมีการอบ (aging) ที่ 100 °C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ดังรูปที่ 2.44 เนื่องจากการใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนเซชันจะมีการหลงเหลืออยู่ในระบบ ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันต่อระหว่างกรอบ นอกจากนี้จากการทดสอบการวิเคราะห์ด้วยเทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าเมื่อมี RM มากขึ้น ทำให้อุณหภูมิการสลายตัวในช่วงแรกของ CPE ลดลง แต่อุณหภูมิในการสลายตัวช่วงที่สองเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.45 เนื่องจาก RM มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นออกไซด์ ซึ่งจะช่วยให้แรงการหลุดของกรดไฮโดรคลอริก แต่เขม่าดำจะช่วยลดการแพร่ความร้อนสู่ CPE ได้ ทำให้มีการหลุดของกรดไฮโดรคลอริกยากกว่า (Qiu et al., 2020)



รูปที่ 2.44 ผลของการอบที่ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 72 ชั่วโมง ต่อค่าความแข็งแรงการดึงยืด ความแข็ง และความยาวยืด ณ จุดขาด ของ CPE/RM/CB คอมพอสิตที่ปริมาณต่างๆ (Qiu et al., 2020)



รูปที่ 2.45 กราฟ DTG และ TG ในบรรยากาศไนโตรเจนที่อัตราการความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ของ CPE/RM/CB คอมพอสิต (Qiu et al., 2020)

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย (materials)

- 3.1.1 ยางคลอรีเนตพอลิเอทิลีน (chlorinate polyethylene, CPE)
- 3.1.2 สารตัวเติมประเภทเสริมแรง ได้แก่ เชม่าดำ
- 3.1.3 สารตัวเติมประเภทไม่เสริมแรง ได้แก่ แคลเซียมคาร์บอเนต
- 3.1.4 สารต้านทานการเสื่อมสภาพ ได้แก่ เมทลออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์
- 3.1.5 สารช่วยในการผสมยาง ได้แก่ น้ำมัน กรดไขมัน
- 3.1.6 สารคงรูปยาง ได้แก่ โคเอเจนต์ (co-agent) และ ไดคิวมิลเปอร์ออกไซด์ (dicumyl peroxide)
- 3.1.7 น้ำยาถอดแบบ ได้แก่ DC-235E
- 3.1.8 น้ำชนิดปราศจากไอออน (DI water)

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย (Machine & Instrument)

- 3.2.1 เครื่องนวดยาง รุ่น 3 Liters ยี่ห้อ Yong Fong
- 3.2.2 เครื่องผสมยางแบบสองลูกกลิ้ง รุ่น R 8 ยี่ห้อ Yong Fong
- 3.2.3 เครื่องขึ้นรูปแบบกดอัด (compression machine) ยี่ห้อ LIN CHENG
- 3.2.4 เครื่องรีออมิเตอร์แบบจานแกว่ง (oscillating disc rheometer) รุ่น ODR 200 ยี่ห้อ Mitutoyo
- 3.2.5 เครื่องทดสอบพลังงานของรังสีเอกซ์ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดร่วม (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer, SEM-EDX) รุ่น JEOL ยี่ห้อ JSM-6610LV
- 3.2.6 เครื่องทดสอบแรงดึงวัสดุแบบเอนกประสงค์ (universal tensile machine) รุ่น Tensometer ยี่ห้อ Monsanto
- 3.2.7 เครื่องทดสอบความแข็ง (durometer) รุ่น GS-719G
- 3.2.8 เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) รุ่น -3055A ยี่ห้อ Union
- 3.2.9 แม่พิมพ์แบบอัดรูปร่างแผ่น (slab) และแม่พิมพ์จำลองแบบกดอัด

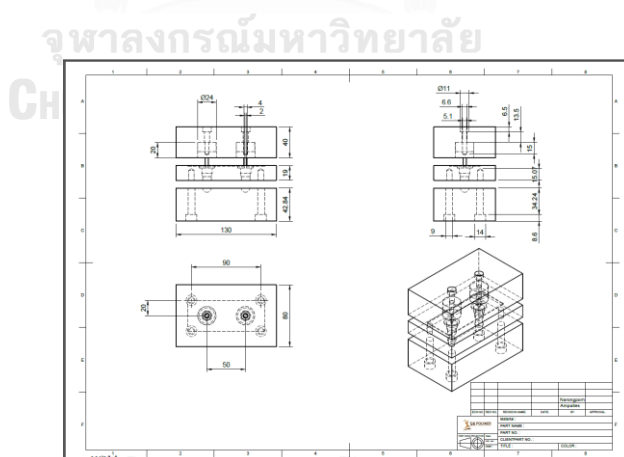
3.3 แผนการทดลอง

ตอนที่ 1 การทดลองเชิงแพทโทเรียล เพื่อหาความสำคัญของตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดคราบในอุตสาหกรรม โดยเลือกตัวแปรจากการเก็บข้อมูลเกี่ยวกับการผลิตชิ้นงานที่เกิดคราบ และผลจากการทดสอบคราบด้วยเทคนิคการวิเคราะห์พลังงานของรังสีเอ็กซ์ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ตอนที่ 2 การทดลองเชิงเดี่ยว เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อการเกิดคราบในอุตสาหกรรม โดยพิจารณาเฉพาะตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดคราบแล้วจึงกำหนดค่าของตัวแปร

3.4 ขั้นตอนการทดลอง

- 3.4.1 เก็บข้อมูลการผลิตชิ้นงานต่างๆ ที่เกิดคราบในอุตสาหกรรม เช่น รูปร่างของชิ้นงาน ลักษณะการเกิดคราบ และค่าเสียโอกาสจากการเกิดคราบที่เกิดขึ้นต่อปี โดยมีชนิดยาง ได้แก่ EPDM, CR, CPE และ NBR และมีการใช้ระบบวัลคาไนเซชันด้วยเปอร์ออกไซด์ ซัลเฟอร์ และเมทัลออกไซด์
- 3.4.2 นำคราบที่เกิดขึ้นระหว่างการผลิตไปทดสอบด้วยเทคนิค SEM-EDX และวิเคราะห์ผลทดสอบ
- 3.4.3 กำหนดระดับต่ำและสูงของตัวแปรจำนวน 4 ตัวแปร เพื่อใช้ในการทดลองเชิงแพทโทเรียล และกำหนดผลตอบสนองของการทดลอง
- 3.4.4 สั่งทำแม่พิมพ์จำลองจากเหล็กชนิด S50C ที่มีขนาด $\varnothing 20 \times 24.4$ มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.1 - 3.2



รูปที่ 3.1 ภาพเขียนแบบของแม่พิมพ์จำลอง



รูปที่ 3.2 แม่พิมพ์จำลองที่ใช้ในการทำการขึ้นรูปชิ้นงาน

3.4.5 ผสมยางคอมพาวนด์ที่การปรับเปลี่ยนปริมาณสารเคมีจากการเลือกตัวแปรในการทดลองตามภาวะที่กำหนดดังตารางที่ 3.1 โดยเริ่มจากการผสมคอมพาวนด์เอ คือ การผสมยางกับสารเคมีทุกชนิดยกเว้นน้ำมันและสารวัลคาไนเซชัน เนื่องจากต้องการให้มีแรงเฉือนสำหรับการผสมที่สูง เพื่อให้สารเคมีที่มีอนุภาคขนาดเล็กมีการแตกตัวและกระจายตัวได้ดีในยางคอมพาวนด์ จากนั้นจึงทำการผสมคอมพาวนด์เอกับน้ำมันเพื่อลดความแข็งของยาง โดยค่อยๆ ใส่น้ำมันทีละน้อย และทำการผสมคอมพาวนด์เอที่ผสมน้ำมันแล้วกับสารวัลคาไนเซชันเพื่อเป็นคอมพาวนด์บี ซึ่งต้องมีการควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมไม่ให้สูงจนเกินไป เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันระหว่างการผสม โดยสูตรยาง ZnO - และ ZnO + คือ ปริมาณซิงค์ออกไซด์ที่ 0 และ 6 phr ตามลำดับ สูตรยาง 4Q - และ 4Q + คือ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนตที่ 0 และ 50 phr ตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 ภาวะที่ใช้ในการผสมสูตรยางทั้ง 4 สูตร

สูตรยาง	คอมพาวนด์เอ		คอมพาวนด์เอผสมน้ำมัน		คอมพาวนด์บี	
	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)
ZnO - / 4Q -	20	120 - 140	25	110 - 120	3	<80
ZnO - / 4Q +	25	120 - 140	25	110 - 120	3	<80
ZnO + / 4Q -	25	120 - 140	30	110 - 120	3	<80
ZnO + / 4Q +	30	120 - 140	30	110 - 120	3	<80

- 3.4.6 ขึ้นรูปชิ้นงานตามการทดลองเชิงแพททอเรียล 16 ภาวะ โดยกำหนดค่าตัวแปรควบคุมดังนี้
- มีการเก็บชิ้นงานทั้งหมด 147 ซ็อต (shots)
 - ปริมาตรยางต่อการขึ้นรูป 1 ซ็อต คือ 8.10 cm^3
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป $160 \text{ }^\circ\text{C}$
 - ความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป 180 kg/cm^2
 - ปริมาตรน้ำยาถอดแบบต่อภาวะ คือ 200 cm^3
 - 1 ภาวะการขึ้นรูปจะมีการทำซ้ำรวม 2 ครั้ง
- 3.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลของการทดลองเชิงแพททอเรียลทั้ง 16 ภาวะด้วยการใช้ ANOVA
- 3.4.8 วางแผนการทดลองและทำการขึ้นรูปชิ้นงานจากการทดลองเชิงเดี่ยว เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อการเกิดคราบ โดยมีทั้งหมด 9 ภาวะ และให้มีการกำหนดค่าตัวแปรควบคุมดังนี้
- มีการเก็บชิ้นงานทั้งหมด 147 ซ็อต (shots)
 - ปริมาตรยางต่อการขึ้นรูป 1 ซ็อต คือ 8.10 cm^3
 - อุณหภูมิที่ใช้ในการขึ้นรูป $160 \text{ }^\circ\text{C}$
 - ความดันที่ใช้ในการขึ้นรูป 180 kg/cm^2
 - ปริมาตรน้ำยาถอดแบบต่อภาวะ คือ 200 cm^3
 - 1 ภาวะการขึ้นรูปจะมีการทำซ้ำรวม 2 ครั้ง
- 3.4.9 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลองเชิงเดี่ยว
- 3.4.10 เขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์

4.1 การเก็บข้อมูลการเกิดคราบบนชิ้นงานต่างๆ ในโรงงานผลิตและการเลือกตัวแปรสำหรับการทดลองเชิงแพทโทเรียล

จากการเก็บข้อมูลการเกิดคราบบนแม่พิมพ์ในอุตสาหกรรม พบว่าคราบมีลักษณะเป็นของแข็งขนาดเล็กจนถึงเป็นผง มีสีดำ-น้ำตาลเข้ม และติดอยู่บนผิวของแม่พิมพ์ แสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทำให้ชิ้นงานที่ผลิตได้หลังจากการขึ้นรูปมีผิวที่ไม่เรียบ มีความขรุขระ โดยเมื่อมีคราบเกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ จะต้องนำแม่พิมพ์ไปล้างทำความสะอาดด้วยกรดที่มีความเข้มข้นสูงเป็นเวลา 7-8 ชั่วโมง ต่อการล้าง 1 ครั้ง จึงจะสามารถนำแม่พิมพ์มาผลิตชิ้นงานต่อได้



รูปที่ 4.1 ลักษณะคราบที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์

จากการเก็บข้อมูลการเกิดคราบในโรงงานทำผลิตภัณฑ์ยางและค่าเสียโอกาสที่เกิดขึ้นจากการนำแม่พิมพ์ไปทำความสะอาดต่อปีแสดงในตารางที่ 4.1 พบว่าชิ้นงาน CP/P มีค่าเสียโอกาสที่เกิดขึ้นต่อปีมากที่สุด เนื่องจากมีอัตราการผลิตที่มากและความถี่ในการเกิดคราบสูงที่สุด ทำให้เลือกชิ้นงาน CP/P มาใช้ในการวิเคราะห์หาสาเหตุการเกิดคราบในงานวิจัยนี้ โดยชิ้นงานที่เกิดคราบคือชิ้นงานที่ผิวมีความขรุขระ มีความต้านบนผิว แสดงในตารางที่ 4.2

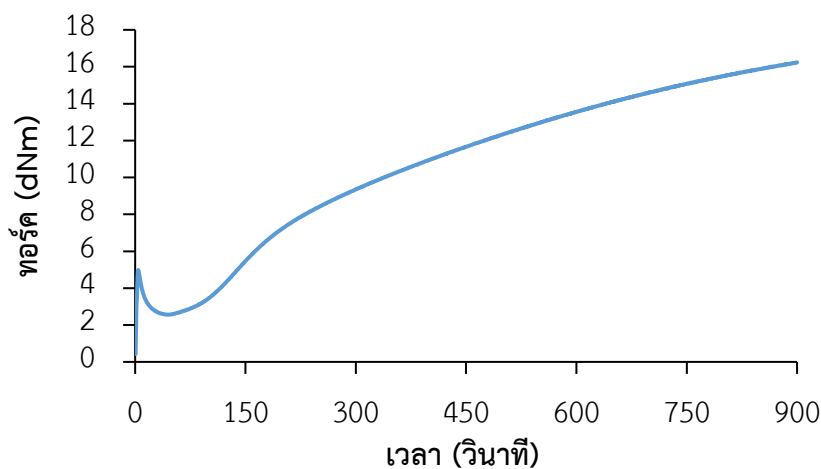
ตารางที่ 4.1 รหัสและค่าเสียโอกาสของชิ้นงานที่เกิดคราบ

ชนิดยาง + ระบบการวัลคาไนเซชัน	ชิ้นงานที่เกิดคราบ		ค่าเสียโอกาส (บาท/ปี)
	รหัสชิ้นงาน.	ตัวย่อ	
EPDM + peroxide	R51YB50E12	E/P	6,709
EPDM + sulflur	R28ZB50E03	E/S	54,693
CR + metallic oxide	R28OB60C01	CR/M	4,076
CPE + peroxide	R51YB50P02	CP/P	85,559
NBR + peroxide	R51YB50N14	NB/P	18,088
NBR + sulflur	R18ZW50N01	NB/S	7,404

ชิ้นงาน CP/P มีภาวการณ์ขึ้นรูปชิ้นงานในอุตสาหกรรมคือ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 330 วินาที แล้วจึงนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยเมื่อนำยางคอมพาวนด์ไปทดสอบลักษณะการคงรูปที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อดูลักษณะการคงรูปของยางแสดงดังรูปที่ 4.2 พบว่ายางคอมพาวนด์ถูกขึ้นรูปที่เวลาในการคงรูป (curing time, T_C) ที่ระดับการเชื่อมขวาง 50% (T_{C50}) แล้วจึงนำเข้าอบในตู้อบเพื่อเพิ่มปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันและลดต้นทุนในการผลิต ซึ่งวิธีนี้จะสามารถผลิตชิ้นงานในปริมาณมากๆ ในเวลาเดียว ดังนั้นเวลาการขึ้นรูปชิ้นงานจึงถูกเลือกเป็นตัวแปรสำหรับการทดลองเชิงแพททอเรียล เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานที่ไม่สมบูรณ์อาจทำให้ถอดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก เป็นผลทำให้ชิ้นงานเกิดคราบขึ้นได้

ตารางที่ 4.2 ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดคราบ

ชิ้นงาน	ลักษณะชิ้นงานทั่วไป	ลักษณะชิ้นงานที่เกิดคราบ
E/P		
E/S		
CR/M		
CP/P		
NB/P		
NB/S		



รูปที่ 4.2 ลักษณะการคงรูปของยาง CP/P ที่ 160 องศาเซลเซียส

การผลิตชิ้นงานยางในอุตสาหกรรมมีการใช้น้ำยาถอดแบบเพื่อให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วสามารถนำออกจากแม่พิมพ์ได้ง่าย เนื่องจากน้ำยาถอดแบบทำให้ผิวของแม่พิมพ์มีความลื่น โดยในอุตสาหกรรมมีการใช้น้ำยาถอดแบบหลายชนิด แสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าการใช้อาจไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตชิ้นงานบางประเภท เนื่องจากในอุตสาหกรรมมีการนำน้ำยาถอดแบบมาเจอกับน้ำประปาในอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่มาก ทำให้ประสิทธิภาพของน้ำยาถอดแบบลดลง ทำให้มีคราบติดอยู่ที่ผิวแม่พิมพ์ นอกจากนี้ยังใช้น้ำประปาในการเจือจาง ซึ่งอาจมีการปนเปื้อนของสารเคมีหรือไอออนของโลหะหนักต่างๆ และทำให้มีคราบเกิดขึ้น ดังนั้นจึงเลือกเป็นตัวแปรในการทดลองเชิงแพก ทอเรียลเป็นอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน (deionized water) เนื่องจากมีความบริสุทธิ์มากกว่าน้ำประปา

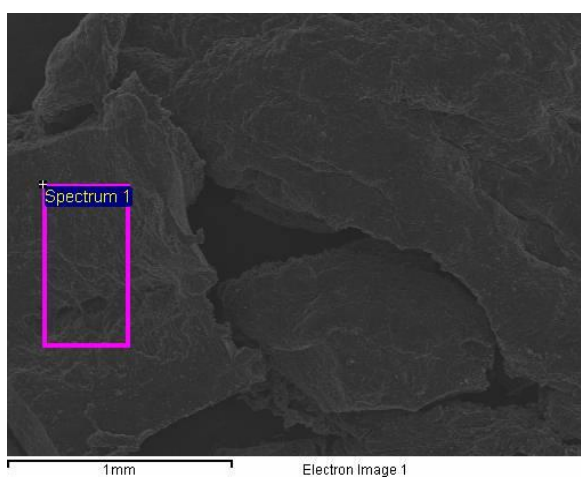
ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบและอัตราส่วนในการผสมของน้ำยาถอดแบบ

ชนิดของน้ำยาถอดแบบ	องค์ประกอบ	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก
Silicone #1	Polydimethyl siloxane 35%	1:100
Silicone #2	Polydimethyl siloxane 35%	1:50
Silicone diluted	Polydimethyl siloxane 35%	1:600
RMR810	Polyalkene Glycol 18%	1:40
Frelease 44	Fluorine compounds 1%	1:100

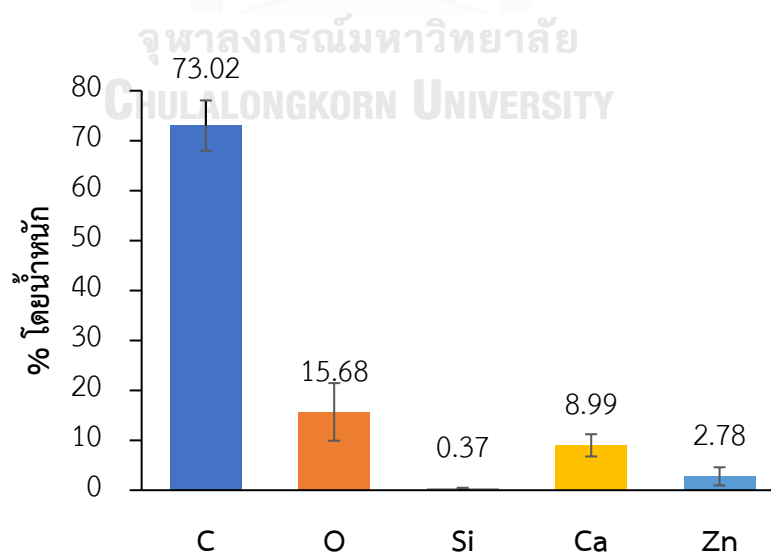
คราบที่เกิดขึ้นบนแม่พิมพ์ถูกนำไปทดสอบด้วยเทคนิค SEM-EDX เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบที่อยู่ในคราบ แสดงในรูปที่ 4.3 - 4.12 ดังนี้

1. คราบจาก E/P

จากผลการทดสอบคราบของ EP/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX ดังรูปที่ 4.3 - 4.4 พบว่าในคราบจะมีองค์ประกอบของคาร์บอน ออกซิเจน ซิลิกา แคลเซียมและซิงค์ โดยที่อาจมาจากยาง EPDM เขม่าดำ และแคลเซียมคาร์บอเนต ที่มีองค์ประกอบของแคลเซียมคาร์บอเนตและซิลิกาไดออกไซด์ อีกทั้งมาจากซิงค์ออกไซด์



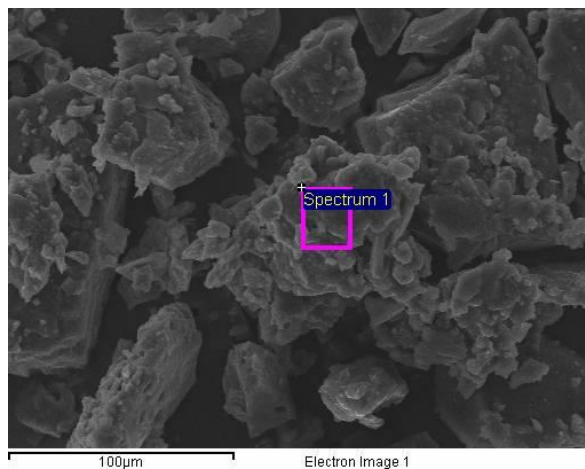
รูปที่ 4.3 พื้นผิวจากคราบของ E/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX



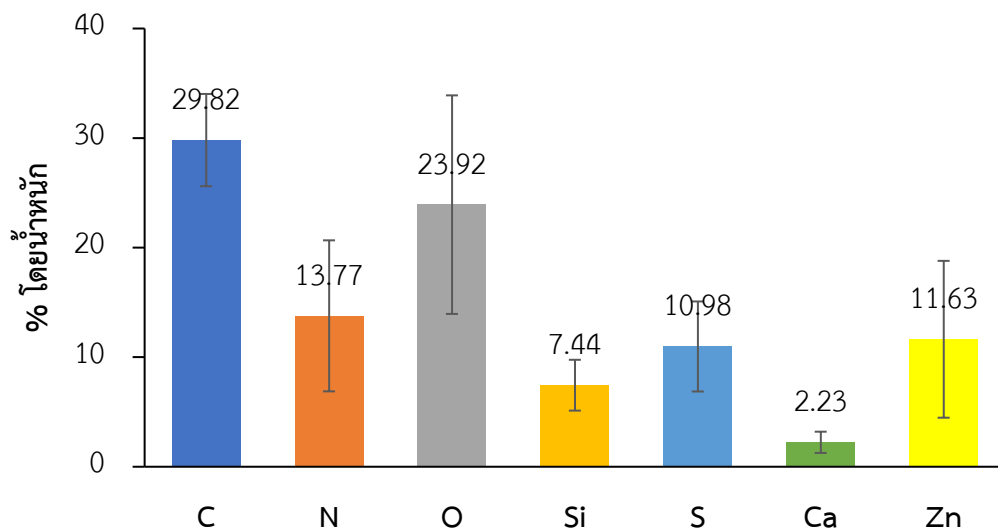
รูปที่ 4.4 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ E/P

2. คราบจาก E/S

จากผลการทดสอบคราบของ E/S ด้วยเทคนิค SEM-EDX ดังรูปที่ 4.5 – 4.6 พบธาตุคาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน ซิลิกา ซัลเฟอร์ แคลเซียมและซิงค์ ที่มาจากยาง EPDM เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต ซิงค์ออกไซด์ และสารป้องกันการเสื่อมสภาพ ที่มีไนโตรเจนอยู่ในโครงสร้าง อีกทั้งยังใช้ระบบการวัลคาไนเซชันเป็นซัลเฟอร์ ทำให้พบซัลเฟอร์ที่มาจากสารตัวเร่งและสารคงรูปยาง โดยที่ซิงค์มาจากซิงค์ออกไซด์เช่นเดียวกัน



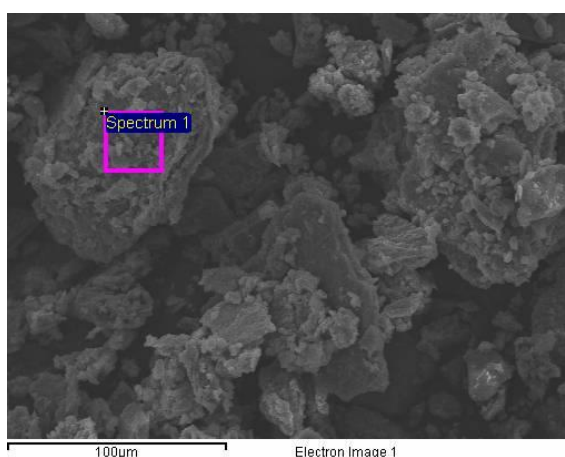
รูปที่ 4.5 พื้นผิวจากคราบของ E/S ด้วยเทคนิค SEM-EDX



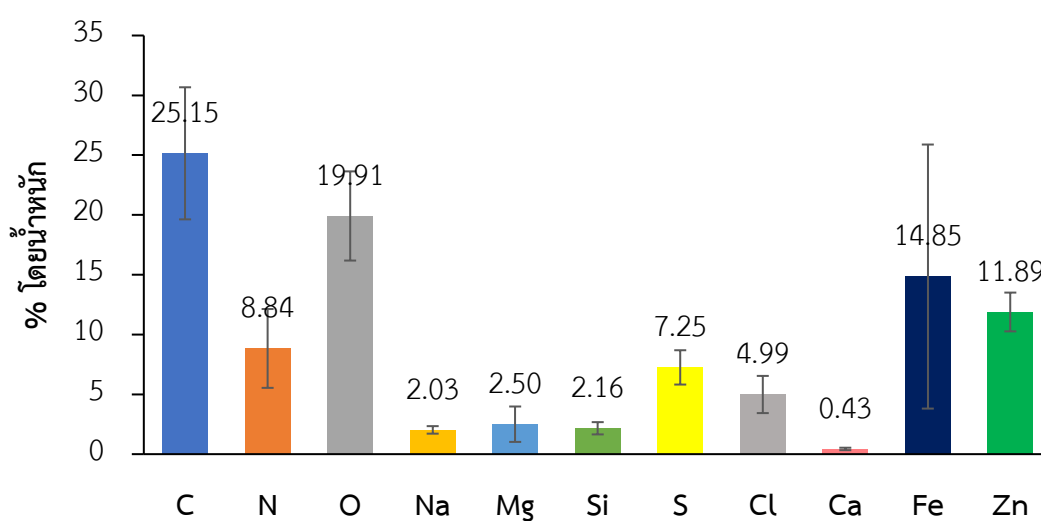
รูปที่ 4.6 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ E/S

3. คราบจาก C/M

จากการทดสอบ SEM-EDX ของคราบ C/M ดังรูปที่ 4.7 - 4.8 พบว่ามีหลายองค์ประกอบที่อยู่ในคราบ โซเดียมที่พบมาจากโซเดียมอะซิเตทที่ใส่ลงไปในสูตรยาง ไนโตรเจนมาจากสารตัวเร่ง โดยที่แคลเซียม แมกนีเซียมและซิลิกา มาจากแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ และซัลเฟอร์ที่พบมาจากสารช่วยวัลคาไนเซชัน คลอรีนมาจากยาง CR และน้ำมันที่มีคลอรีนอยู่ในโครงสร้าง และซิงค์มาจากซิงค์ออกไซด์ที่เป็นสารคงรูปในสูตรยาง โดยที่เหล็กที่พบมาจากการปนเปื้อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บคราบและแม่พิมพ์



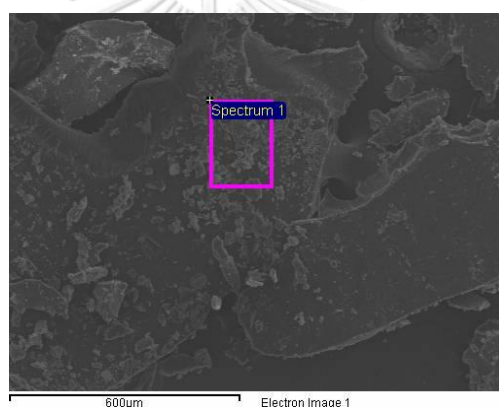
รูปที่ 4.7 พื้นผิวจากคราบของ C/M ด้วยเทคนิค SEM-EDX



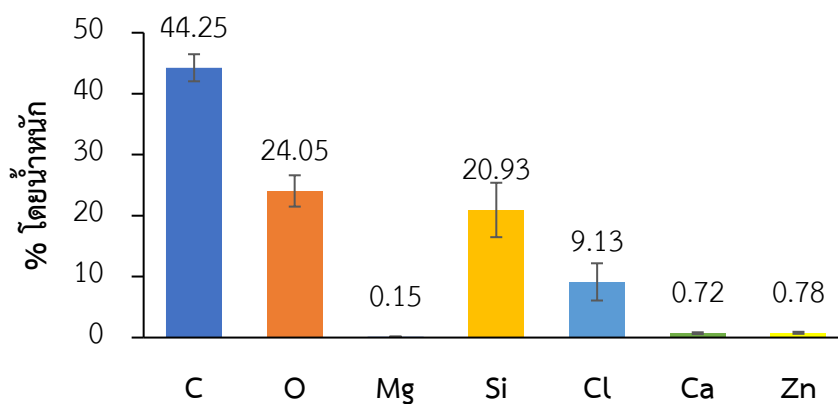
รูปที่ 4.8 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ C/M

4. คราบจาก CP/P

จากผลการทดสอบด้วยเทคนิค SEM-EDX ของคราบ CP/P ดังรูปที่ 4.9 - 4.10 พบว่าในคราบมีองค์ประกอบของคาร์บอน ออกซิเจน แมกนีเซียม ซิลิกา คลอรีน แคลเซียมและซิงค์ ที่มาจากยาง Chlorinate Polyethylene (CPE) เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต โดยที่ออกซิเจนพบจากแคลเซียมคาร์บอเนต แมกนีเซียมออกไซด์ แคลเซียมออกไซด์ และซิงค์ออกไซด์ นอกจากนี้ซิลิกาที่พบในคราบอาจมาจากซิลิกาที่มีอยู่ในแคลเซียมคาร์บอเนตและซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากแคลเซียมคาร์บอเนตและซิงค์ออกไซด์เป็นกรดเชิงพาณิชย์ที่มีการปนเปื้อนของซิลิกาอยู่ 5 และ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ส่วนคลอรีนที่พบนั้นอาจพบจากยาง CPE และน้ำมันที่มีคลอรีนอยู่ในโครงสร้าง แคลเซียมและแมกนีเซียม มาจากสารรักษาเสถียรภาพทางความร้อนที่ใส่ลงไปในสูตรยางเพื่อเป็นตัวรับกรดไฮโดรคลอริกที่เกิดขึ้น นอกจากนี้ยังพบซิงค์ที่มาจากซิงค์ออกไซด์



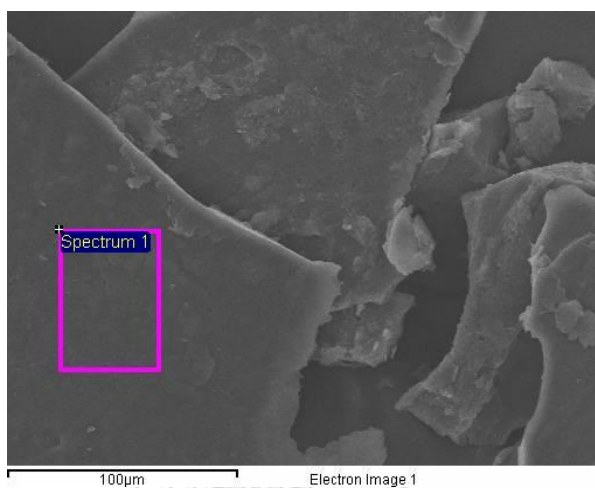
รูปที่ 4.9 พื้นผิวจากคราบของ CP/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX



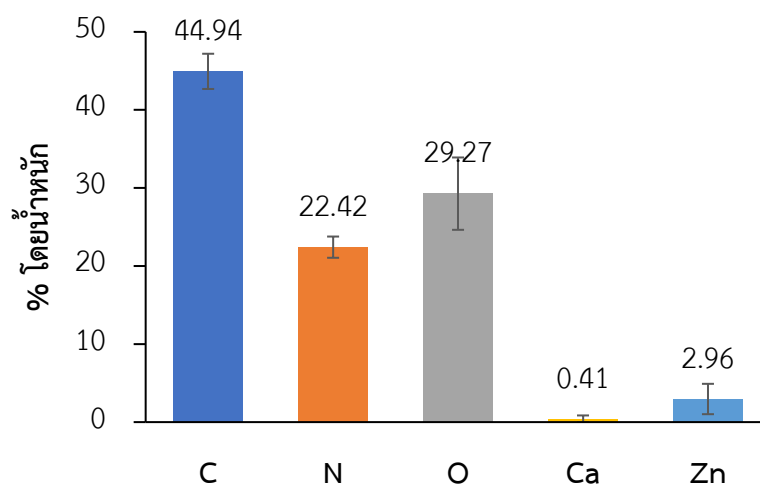
รูปที่ 4.10 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ CP/P

5. คราบจาก NB/P

จากผลการทดสอบคราบของ NB/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX จากภาพที่ 4.11 – 4.12 พบว่ามีองค์ประกอบของคาร์บอน ออกซิเจน ไนโตรเจน ซิงค์และแคลเซียม พบจากยาง NBR เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนตและซิงค์ออกไซด์



รูปที่ 4.11 พื้นผิวจากคราบของ NB/P ด้วยเทคนิค SEM-EDX



รูปที่ 4.12 ชนิดและปริมาณของธาตุที่เจอในคราบของ NB/P

จากการทดสอบด้วยเทคนิค SEM-EDX ของคราบทั้ง 5 สูตรยาง ดังตารางที่ 4.4 พบว่า องค์ประกอบส่วนใหญ่ที่พบเป็นคาร์บอน ออกซิเจน แคลเซียมและซิงค์ ซึ่งมาจากโครงสร้างของยาง เขม่าดำ แคลเซียมคาร์บอเนต และซิงค์ออกไซด์ ที่มีอยู่ในสูตรยางแต่ละสูตร ทำให้มีคราบเกิดขึ้น ดังนั้นปริมาณของซิงค์ออกไซด์และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตจึงถูกเลือกเป็นอีกสองตัวแปร สำหรับการหาสาเหตุของการเกิดคราบด้วยการทดลองเชิงแพทโทเรียล

ตารางที่ 4.4 ธาตุที่พบในคราบทั้ง 5 ชิ้นงาน

ชิ้นงาน	ธาตุ										
	C	O	N	Ca	Zn	Si	Cl	S	Mg	Na	Fe
E/P	✓	✓		✓	✓	✓					
E/S	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓			
C/M	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CP/P	✓	✓		✓	✓	✓	✓		✓		
NB/P	✓	✓	✓	✓	✓						

จากการเก็บข้อมูลการเกิดคราบบนชิ้นงานต่างๆ และผลการทดสอบ ทำให้เลือกใช้ชิ้นงาน CP/P เป็นต้นแบบสำหรับการวิเคราะห์การสาเหตุการเกิดคราบ เนื่องจาก CP/P มีค่าเสียโอกาสที่เกิดขึ้นจากการเกิดคราบต่อปีมากที่สุด ซึ่งในการผลิตชิ้นงาน CP/P ใช้น้ำยาถอดแบบที่มีส่วนประกอบของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน ดังนั้นตัวแปรทั้ง 4 ตัว คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป ปริมาณซิงค์ออกไซด์ ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน จึงถูกกำหนดขอบเขตต่ำและสูง ดังตารางที่ 4.5 เพื่อใช้ในการทดลองเชิงแพทโทเรียล และกำหนดให้ตัวแปรตอบสนองคือร้อยละของชิ้นงานที่เกิดคราบและชิ้นงานอาการของเสียอื่นๆ จำนวน 147 shots โดยเครื่องหมาย - แทนระดับขอบเขตต่ำของตัวแปร และเครื่องหมาย + แทนระดับขอบเขตสูงของตัวแปร ดังนั้นการทดลองเชิงแพทโทเรียลจึงมี 16 การทดลอง ดังตารางที่ 4.6 โดยแต่ละการทดลองมีการทำซ้ำรวม 2 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนสำหรับนำไปคำนวณทางสถิติ

ตารางที่ 4.5 ตัวแปรที่จะนำมาศึกษาด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

ตัวแปร	ขอบเขตต่ำ (-)	ขอบเขตสูง (+)
A = เวลาในการขึ้นรูป (วินาที)	T_{c50} (300)	$T_{c50} + 200$ (500)
B = ปริมาณซิงค์ออกไซด์ (ZnO) (phr)	0	6
C = ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต (4Q) (phr)	0	50
D = อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบกับน้ำปราศจากไอออน	1/600	1/100

ตารางที่ 4.6 ภาวะสำหรับการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและค่าของตัวแปรต่างๆ ในแต่ละภาวะ

ภาวะ	เวลาการขึ้นรูป	ปริมาณ ZnO	ปริมาณ 4Q	อัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของน้ำยาถอดแบบกับ น้ำปราศจากไอออน
1	-	-	-	-
2	-	-	-	+
3	-	-	+	-
4	-	-	+	+
5	-	+	-	-
6	-	+	-	+
7	-	+	+	-
8	-	+	+	+
9	+	-	-	-
10	+	-	-	+
11	+	-	+	-
12	+	-	+	+
13	+	+	-	-
14	+	+	-	+
15	+	+	+	-
16	+	+	+	+

4.2 การทดลองเชิงแฟกทอเรียล

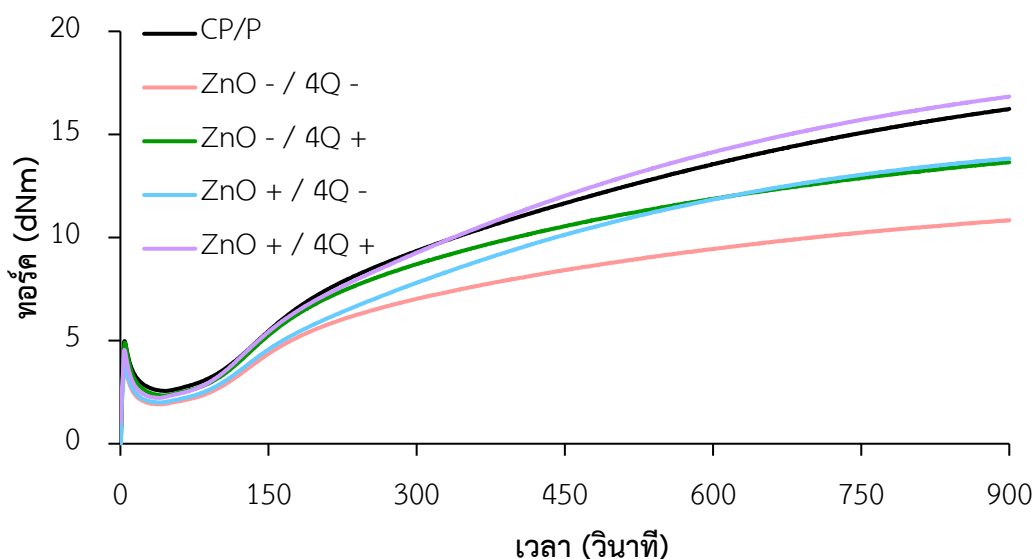
จากการเลือกชิ้นงาน CP/P เป็นชิ้นงานต้นแบบในการวิเคราะห์สาเหตุของการเกิดคราบในงานวิจัย โดยแสดงสูตรยางของชิ้นงาน CP/P และสูตรต่างๆ ที่มีการปรับเปลี่ยนสารเคมีจากการเลือกตัวแปรในการทดลอง แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปริมาณสารเคมีของสูตรยางต่างๆ

สารเคมี	ปริมาณสารเคมีในสูตรยางต่างๆ (phr)				
	CP/P	ZnO - / 4Q -	ZnO - / 4Q +	ZnO + / 4Q -	ZnO + / 4Q +
ยางคลอริเนตพอลิเอทิลีน	100	100	100	100	100
เขม่าดำ	25	25	25	25	25
สารช่วยในกระบวนการผลิต	66	66	66	66	66
สารเสถียรภาพทางความร้อน	6.66	6.66	6.66	6.66	6.66
แคลเซียมคาร์บอเนต	50	0	50	0	50
ซิงค์ออกไซด์	3.33	0	0	6	6
สารโคเอเจนท์อินทรีย์	2	2	2	2	2
สารเปอร์ออกไซด์อินทรีย์	5	5	5	5	5

จากการเลือกตัวแปรที่มีการปรับเปลี่ยนสูตรเคมีของยางจำนวน 4 สูตร จึงได้นำยางไปทดสอบสมบัติการคงรูปของยาง แสดงดังรูปที่ 4.13 และตารางที่ 4.8 พบว่า ลักษณะการคงรูปของยางเป็นแบบมาร์ชชิ่ง (marching) เนื่องจากยางใช้เปอร์ออกไซด์เป็นสารวัลคาไนเซชัน โดยที่ค่าทอร์คต่ำสุด (minimum torque) ของและค่าทอร์คสูงสุด (maximum torque) ของสูตรยาง ZnO - / 4Q -, ZnO - / 4Q +, ZnO + / 4Q - และ ZnO + / 4Q + มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารเติมแต่งที่เพิ่มความแข็งของยาง เนื่องจากมีลักษณะเป็นอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้สายโซ่ของพอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้ยาก ค่าทอร์คจึงสูงขึ้น ดังนั้นสูตรยางที่ไม่ได้ใส่สารเติมแต่งทั้งสองจึงมีค่าทอร์คน้อยที่สุด ส่งผลให้ค่าความแข็ง (hardness) น้อยเช่นกัน (Wu et al., 2022 และ Misra et al., 2021) นอกจากนี้เวลาสกอร์ช (scorch time) เวลาที่ย่างเกิดปฏิกิริยาคงรูปไป 50% (T_{c50}) และ 90% (T_{c90}) ของสูตรยางทั้ง 5 มีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาณสารวัลคาไน

เซชันหรือปริมาณของเปอร์ออกไซด์และโคเอเจนท์ในระบบยางมีในปริมาณที่เท่ากันในทุกสูตรยาง ทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันของสูตรยางทั้ง 5 สูตร มีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.13 ลักษณะการคงรูปของยางที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที

ตารางที่ 4.8 ค่าลักษณะการคงรูปของยางในสูตรต่างๆ

สูตรยาง	ลักษณะการคงรูปของยาง				
	ค่าทอร์คต่ำสุด (minimum torque) (dNm)	ค่าทอร์คสูงสุด (maximum torque) (dNm)	เวลาการ สกอรัช (T_{s2}) (นาที)	เวลาที่ยาง คงรูปไป 50% (T_{c50}) (นาที)	เวลาที่ยาง คงรูปไป 90% (T_{c90}) (นาที)
CP/P	2.56	16.22	2:09	5:02	11:48
ZnO - / 4Q -	1.91	10.72	2:08	4:56	11:27
ZnO - / 4Q +	2.19	13.79	2:16	4:58	11:27
ZnO + / 4Q -	2.23	13.83	2:12	5:08	11:31
ZnO + / 4Q +	2.40	16.81	2:10	5:12	11:52

จากการทดสอบสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 4.9 ค่าความแข็งแรงของการดึงยึด ความยาวยึด ณ จุดขาด ความแข็งแรงของการฉีกขาดของสูตรยาง ZnO + / 4Q - จะมีค่าสูงสุด เนื่องจากซิงค์ออกไซด์ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล แต่แคลเซียมคาร์บอเนตทำให้สมบัติเชิงกลลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสูตรยาง ZnO - / 4Q + ที่ไม่มีซิงค์ออกไซด์แต่มีแคลเซียมคาร์บอเนตในสูตรยาง จะมีค่าความแข็งแรงของการดึงยึด ความยาวยึด ณ จุดขาด และค่าความแข็งแรงของการฉีกขาดต่ำสุด นอกจากนี้สูตร ZnO - / 4Q - ไม่มีซิงค์ออกไซด์ที่ช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และไม่มีแคลเซียมคาร์บอเนตที่ลดสมบัติเชิงกล ดังนั้นสมบัติเชิงกลจึงใกล้เคียงกับสูตร CP/P แต่ในสูตร ZnO + / 4Q + ที่มีการใส่ทั้งซิงค์ออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตในปริมาณที่มากกว่าสูตร CP/P ทำให้อุณหภูมิของสารเคมีทั้งสองสามารถรวมตัวกัน และไม่กระจายตัวในเนื้อยาง ทำให้สมบัติต่างๆ มีค่าลดลง (Wu et al., 2022, Xu, 2022, Zhou et al., 2022 และ Mahadevaswamy & Suresha, 2020)

ตารางที่ 4.9 ค่าสมบัติเชิงกลต่างๆ ของสูตรยาง 4 สูตร

สูตรยาง	ค่าความแข็งแรงเฉลี่ย (shore A)	ค่าความแข็งแรงของการดึงยึดเฉลี่ย (kgf/cm ²)	ค่าความยาวยึด ณ จุดขาด เฉลี่ย (%)	ค่าความแข็งแรงของการฉีกขาดเฉลี่ย (kgf/cm)
CP/P	51.7 ± 0.58	139.97 ± 5.14	461.69 ± 42.92	30.29 ± 2.12
ZnO - / 4Q -	43.0 ± 0.00	139.82 ± 5.94	465.75 ± 21.92	30.15 ± 1.11
ZnO - / 4Q +	47.0 ± 0.00	133.07 ± 3.50	458.72 ± 17.54	26.19 ± 0.73
ZnO + / 4Q -	47.0 ± 0.00	149.26 ± 1.94	473.40 ± 1.68	32.74 ± 6.88
ZnO + / 4Q +	53.0 ± 0.00	131.33 ± 3.82	451.83 ± 19.29	27.56 ± 0.84

จากผลของการขึ้นรูปชิ้นงาน 16 ภาพ ดังตารางที่ 4.10 ทำให้เกิดชิ้นงานที่มีตำหนิในลักษณะต่างๆ ดังรูปที่ 4.14 เนื่องจากการขึ้นรูปชิ้นงานในอุตสาหกรรมนั้นสามารถเกิดชิ้นงานของเสียประเภทต่างๆ ได้ ซึ่งสามารถเกิดได้จากเครื่องจักรและการทำงานของพนักงานเป็นต้น นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่อชิ้นงานมีเวลาการขึ้นรูป 300 วินาที และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างน้ำยาถอดแบบกับน้ำปราศจากไอออนที่ 1/600 จะมีปริมาณชิ้นงานที่เป็นคราบและปริมาณชิ้นงานของเสียทั้งหมดมากกว่าเมื่อชิ้นงานมีเวลาการขึ้นรูป 500 วินาที และใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน ที่ 1/100



รูปที่ 4.14 ลักษณะของเสียที่เกิดขึ้นในชิ้นงาน ก) แผล, ข) พอง, ค) ยางไม่เต็ม, ง) คราบ และ จ) ฉีกขาด

ตารางที่ 4.10 ผลของการปรับขึ้นงานตามการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลที่ 16 ภาวะ โดยแสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของเสียที่เกิดขึ้นในการต่างๆ

run	เวลาที่ใช้ในการ ขึ้นรูป (วินาที)	ปริมาณซิงค์ ออกไซด์ (phr)	ปริมาณแคลเซียม คาร์บอเนต (phr)	อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยา ถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน	คราบ (%)	แผล (%)	ฉีกขาด (%)	พอง (%)	ยางไม่เต็ม (%)
1	300	0	0	1/600	18.71 ± 1.44	6.29 ± 4.57	0.34 ± 0.48	11.39 ± 7.46	0.51 ± 0.24
2	300	0	0	1/100	10.71 ± 1.68	16.50 ± 1.68	0.17 ± 0.24	9.69 ± 6.01	1.19 ± 1.20
3	300	0	50	1/600	76.02 ± 0.24	0.17 ± 0.24	0 ± 0.00	0.51 ± 0.24	11.56 ± 7.22
4	300	0	50	1/100	11.39 ± 0.72	9.35 ± 1.68	3.57 ± 3.61	2.89 ± 1.68	2.04 ± 0.96
5	300	6	0	1/600	64.97 ± 14.91	3.06 ± 1.44	0.51 ± 0.24	0.85 ± 0.72	0.68 ± 0.48
6	300	6	0	1/100	27.89 ± 9.62	4.93 ± 3.13	0 ± 0.00	10.54 ± 6.25	1.02 ± 0.96
7	300	6	50	1/600	50.68 ± 7.22	7.14 ± 6.25	0.34 ± 0.48	9.69 ± 1.68	0 ± 0.00
8	300	6	50	1/100	35.71 ± 4.33	13.10 ± 1.68	0 ± 0.00	11.56 ± 0.96	1.02 ± 0.96
9	500	0	0	1/600	15.82 ± 6.01	2.55 ± 3.13	0.34 ± 0.48	10.88 ± 1.44	0.34 ± 0.48
10	500	0	0	1/100	5.44 ± 0.00	2.72 ± 0.48	0.34 ± 0.48	5.27 ± 0.72	0.34 ± 0.48
11	500	0	50	1/600	8.67 ± 4.09	2.55 ± 2.16	0 ± 0.00	2.55 ± 3.61	1.53 ± 2.16
12	500	0	50	1/100	8.67 ± 2.65	2.89 ± 1.68	1.02 ± 0.96	1.87 ± 0.72	0 ± 0.00
13	500	6	0	1/600	32.14 ± 1.20	1.53 ± 0.24	0 ± 0.00	3.40 ± 3.37	0 ± 0.00
14	500	6	0	1/100	0 ± 0.00	1.70 ± 1.44	0 ± 0.00	2.04 ± 1.92	0.34 ± 0.00
15	500	6	50	1/600	30.95 ± 1.44	3.40 ± 0.00	0 ± 0.00	1.70 ± 0.48	0.17 ± 0.24
16	500	6	50	1/100	0 ± 0.00	6.29 ± 0.72	0 ± 0.00	0.51 ± 0.24	0.34 ± 0.00

หลังจากผลของการขึ้นทั้ง 16 ภาวะ นำไปสู่การหาค่าความสำคัญทางสถิติของแต่ละตัวแปร โดยการใช้ ANOVA ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการต่างๆ โดยเริ่มจากการหาค่าคอนทราสต์ (contrast_{AB...K}) ของแต่ละตัวแปร ได้จากสมการ 4.1 ซึ่งจะมีการใช้เครื่องหมาย + แทนถึงตัวแปร ขอบเขตสูง และเครื่องหมาย - แทนตัวแปรขอบเขตต่ำ แล้วจึงคำนวณหาค่าการประมาณค่าอิทธิพล (effect estimate, AB...K) และค่าผลรวมของการเบี่ยงเบนกำลังสอง (sum of squares, SS_{AB...K}) ของแต่ละตัวแปร ตามสมการที่ 4.2 - 4.3

$$\text{contrast}_{AB\dots K} = (a \pm 1)(b \pm 1) \dots (k \pm 1) \quad (4.1)$$

$$AB\dots K = \frac{2}{n2^k} (\text{contrast}_{AB\dots K}) \quad (4.2)$$

$$SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{contrast}_{AB\dots K})^2 \quad (4.3)$$

เมื่อ A, B, ..., K หมายถึงตัวแปร และ a, b, ..., k หมายถึงจำนวนระดับของแต่ละตัวแปร

หลังจากนั้นหาค่าผลรวมทั้งหมดของการเบี่ยงเบนกำลังสอง (total sum of squares, SS_T) ค่าผลรวมของการเบี่ยงเบนกำลังสองจากความผิดพลาด (sum of squares of error, SS_E) ตามสมการที่ 4.4 - 4.5 เพื่อหาค่าเฉลี่ยกำลังสองของผลกระทบ (mean squares of effect, MS_{treatments}) ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาด (mean squares of error, MS_E) อัตราส่วนความแปรปรวน (variance ratio, F₀) และค่าความน่าจะเป็น (probability value, P-value) ดังสมการที่ 4.6 - 4.9

$$SS_T = \sum_i \sum_j \dots y_{ij\dots}^2 - \frac{y_{\dots}^2}{N} \quad (4.4)$$

$$SS_E = SS_{\text{total}} - SS_{\text{treatments}} \quad (4.5)$$

$$MS_{\text{treatments}} = \frac{SS_{\text{treatments}}}{df_{\text{treatments}}} \quad (4.6)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{df_E} \quad (4.7)$$

$$F_0 = \frac{MS_{\text{treatments}}}{MS_E} \quad (4.8)$$

$$P\text{-value} = F_0, df_{AB\dots K}, df_E \quad (4.9)$$

เมื่อ $y_{ij..}$ คือ ค่าของผลตอบสนอง $y_{...}$ คือ ค่าผลตอบสนองเฉลี่ย $SS_{\text{treatments}}$ คือ ผลรวมของการเบี่ยงเบนกำลังสองของทรีทเมนต์ N คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด และ df หมายถึง degree of freedom. (Montgomery, 2013)

จากร้อยละการเกิดคราบของชิ้นงาน จึงนำมาคำนวณตั้งสมการข้างต้น แสดงผลในตารางที่ 4.11 พบว่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการเกิดคราบมากที่สุด คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน เนื่องจากทั้งสองตัวแปร มีค่า F_0 ที่ 8.658 และ 8.995 ตามลำดับ ส่งผลให้ค่า P -value เท่ากับ 0.019 และ 0.017 ตามลำดับ โดยที่ค่า P -value ที่น้อยกว่า 0.05 แสดงถึงว่าตัวแปรนั้นมีความสำคัญต่อผลของการทดลอง จากการใช้ระดับความน่าเชื่อถือข้อมูลที่ 95% ซึ่งตัวแปรทั้งสองนี้ก็แสดงอยู่ในวงกลมสีแดงที่จะเห็นว่าไม่อยู่ในแนวเดียวจากเส้นกราฟในรูปที่ 4.15 ที่เป็นการพล็อตระหว่างค่า normal comparability กับ effect of parameter แสดงถึงว่าตัวแปรทั้งสองมีผลต่อการทดลองเช่นเดียวกัน โดยตัวอย่างการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ก. (Noguera et al., 2020)

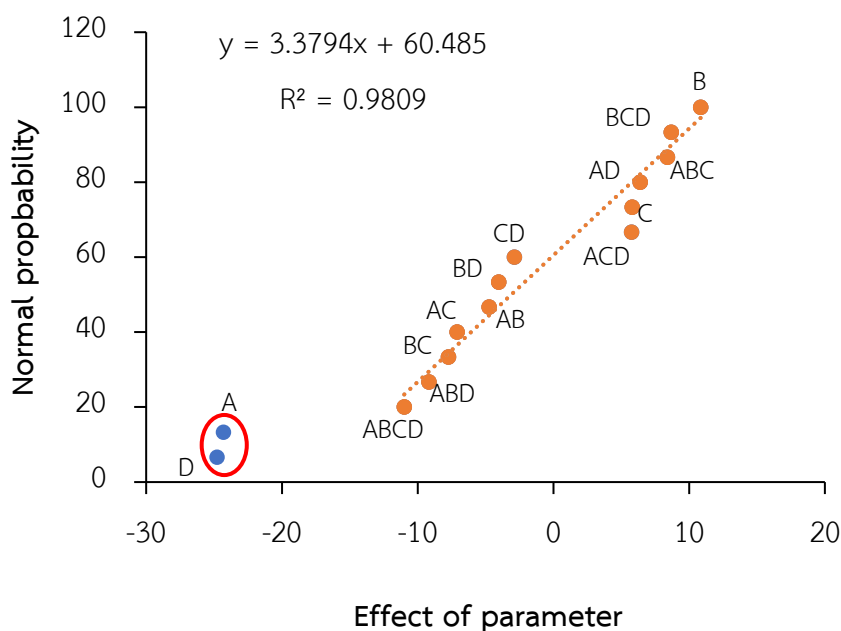
จากการขึ้นรูปชิ้นงานที่เวลา 500 วินาที จะมีปริมาณชิ้นงานที่เป็นคราบน้อยกว่า เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงาน คือ เวลาที่ทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันระหว่างการขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เมื่อชิ้นงานถูกขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 160 °C และมีเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานอยู่ที่ 300 วินาที จะเทียบเท่ากับเวลาในการคงรูปที่ระดับการเชื่อมขวาง 50% (T_{C50}) เมื่อเทียบกับชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่ 500 วินาทีที่อุณหภูมิเดียวกันจะเทียบเท่ากับเวลาในการคงรูปที่ระดับการเชื่อมขวาง 70% (T_{C70}) แสดงว่าชิ้นงานที่ขึ้นรูปที่เวลานานกว่า จะเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันมากกว่า และทำให้ชิ้นงานมีความแข็งแรงมากกว่าจึงสามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ และยังทำให้แรงยึดติดระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์น้อยลงด้วย ทำให้ไม่มีการหลงเหลือของเศษยางที่ผิวแม่พิมพ์ที่นำไปสู่การเกิดคราบ ซึ่งคราบที่เกิดขึ้นอาจมาจากเปอร์ออกไซด์ที่ตกค้างจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ หรือการเกิดเกลือของแคลเซียมที่มาจากการละลายของแคลเซียมคาร์บอเนตในน้ำมันที่มีอยู่ในสูตรยาง ดังนั้นการขึ้นรูปที่เวลานานขึ้นจะทำให้มีการตกค้างของเปอร์ออกไซด์ที่ลดลงและลดการเกิดเกลือของแคลเซียมได้คราบที่เกิดขึ้นจึงลดลง (Zou et al., 2021 และ Palys, 2020)

จากการใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน ที่ 1/600 พบว่า จะมีปริมาณชิ้นงานที่เป็นคราบมากกว่าเมื่อมีการใช้ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักที่ 1/100 เนื่องจากที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1/100 มีความเข้มข้นของพอลิไดเมทิลไซลอกเซนสูงกว่า โดยที่น้ำยาถอดแบบจะทำให้ผิวของแม่พิมพ์มีความลื่นมากขึ้น เนื่องจากการเกิดชั้นฟิล์มของพอลิไดเมทิลไซลอกเซน (Gonzales et

al., 2022) ทำให้สามารถนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ง่ายขึ้นและไม่เกิดคราบที่ผิวแม่พิมพ์ อย่างไรก็ตามการเจือจางน้ำยาถอดแบบ สามารถลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรม แต่ถ้าเจือจางมากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของน้ำยาถอดแบบน้อยเกินไปที่จะทำให้ผิวของแม่พิมพ์ลื่นเพื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ ดังนั้นการใช้ความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่ต่ำจึงทำให้มีคราบติดอยู่ที่ผิวแม่พิมพ์

ตารางที่ 4.11 ผลของการคำนวณด้วย ANOVA ของชิ้นงานที่เกิดคราบจากการทดลอง

ตัวแปร	SS	df	MS	F ₀	P-value
A	2361.662	1	2361.662	8.658	0.019
B	472.027	1	472.027	1.731	0.225
C	134.726	1	134.726	0.494	0.502
D	2453.45	1	2453.450	8.995	0.017
AB	89.895	1	89.895	0.330	0.582
AC	200.454	1	200.454	0.735	0.416
AD	163.779	1	163.779	0.600	0.461
BC	238.198	1	238.198	0.873	0.377
BD	64.572	1	64.573	0.237	0.640
CD	32.945	1	32.945	0.121	0.737
ABC	282.046	1	282.046	1.034	0.339
ABD	335.799	1	335.799	1.231	0.299
ACD	132.759	1	132.759	0.487	0.505
BCD	302.393	1	302.393	1.109	0.323
ABCD	483.177	1	483.177	1.771	0.220
Error	2182.109	8	272.764		
Total	7747.884	15			

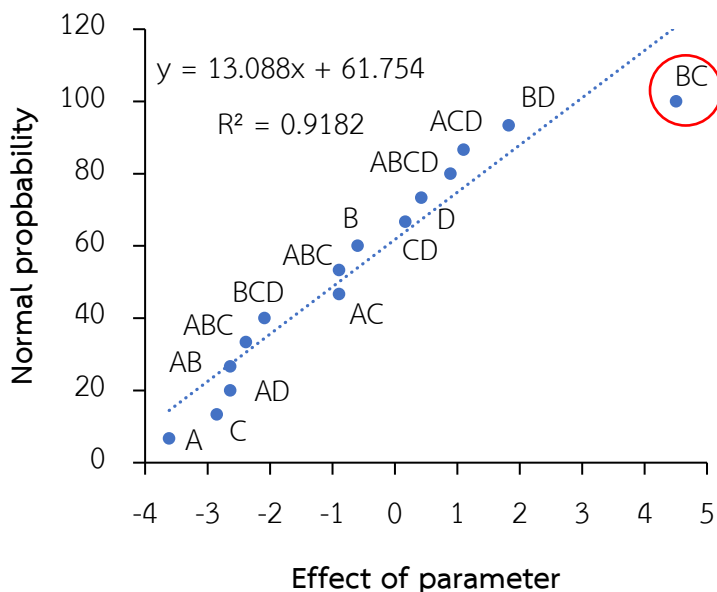


รูปที่ 4.15 กราฟ Normal probability ของชิ้นงานที่เป็นคราบ

นอกจากนี้จึงนำอาการของเสียอื่นๆ มาคำนวณทางสถิติ เพื่อหาความสำคัญของตัวแปรโดยแสดงค่า P-value ของอาการของเสียต่างๆ ในตารางที่ 4.12 พบว่า ไม่มีตัวแปรสำคัญมีส่งผลกระทบต่อของเสียอาการแผล ฉีกขาด และยางไม่เต็ม แต่ของเสียการพองมีอันตรกิริยาของปริมาณของซิงค์ออกไซด์และปริมาณของแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลต่อการพองของชิ้นงาน ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกับกราฟ normal probability กับ effect of parameter ดังรูปที่ 4.16 เนื่องจากซิงค์ออกไซด์เป็นสารเติมแต่งที่ใส่ลงไปเพื่อเป็นสารรับสารรักษาเสถียรภาพทางความร้อน เพราะในการผลิตชิ้นงานจากยาง CPE จะมีแก๊สไฮโดรคลอไรด์ที่เกิดขึ้น ดังนั้นซิงค์ออกไซด์จะช่วยลดการเกิดแก๊สที่เกิดขึ้นในผลิตภัณฑ์โดยการที่ซิงค์ออกไซด์ทำปฏิกิริยากับแก๊สไฮโดรคลอไรด์ที่เกิดขึ้น กลายเป็น $ZnCl_2$ (Moezzi et al., 2016) ซึ่งทำให้ชิ้นงานที่เป็นอาการพองลดลงได้ ในขณะที่แคลเซียมคาร์บอเนตจะสามารถเกิดการละลายในกรดไฮโดรคลอริกและสามารถเกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ดังนั้นชิ้นงานอาการพองจึงเพิ่มขึ้นนั่นเอง (Zou et al., 2021)

ตารางที่ 4.12 ผลของการคำนวณด้วย ANOVA ของชิ้นงานอาการต่างๆ

ตัวแปร	P-value			
	แผล	ฉีกขาด	พอง	ยางไม่เต็ม
A	0.065	0.367	0.073	0.271
B	0.916	0.182	0.742	0.302
C	0.754	0.367	0.142	0.361
D	0.113	0.321	0.814	0.520
AB	0.725	0.662	0.170	0.401
AC	0.670	0.472	0.624	0.443
AD	0.209	0.662	0.170	0.623
BC	0.103	0.321	0.033	0.325
BD	0.616	0.157	0.326	0.361
CD	0.739	0.182	0.925	0.401
ABC	0.298	0.417	0.211	0.374
ABD	0.438	0.367	0.624	0.537
ACD	0.992	0.417	0.545	0.553
BCD	0.670	0.211	0.268	0.361
ABCD	0.886	0.472	0.624	0.473



รูปที่ 4.16 กราฟ Normal probability ของชิ้นงานอาการต่างๆ

4.3 การทดลองเชิงเดียว

จากการทดลองเชิงแฟกทอเรียลพบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญต่อการเกิดคราบ คือ เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนนำมาสู่การทดลองเชิงเดี่ยวที่มีการปรับเปลี่ยนค่าของตัวแปรทั้งสองนี้ เพื่อดูแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่อผล การเกิดคราบ โดยกำหนดภาวะกลางจากผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลและอ้างอิงจากการผลิตในอุตสาหกรรม ดังนี้

- เวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป 400 วินาที
- อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน 1/350
- ปริมาณซิงค์ออกไซด์ 3.33 phr
- ปริมาณแคลเซียมคาร์บอเนต 50 phr

จากการขึ้นรูปชิ้นงานตามภาวะที่กำหนด แสดงผลในตารางที่ 4.13 พบว่า ชิ้นงานที่เกิดคราบ จะมีปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับชิ้นงานบกพร่องอาการอื่นๆ โดยภาวะที่ใช้เวลาการขึ้นรูปที่ 400 วินาทีและใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนที่ 1/250 พบว่าไม่มีคราบเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.13 ผลของการทดลองเชิงเดี่ยว

ลำดับ	เวลาที่ใช้ ในการ ขึ้นรูป (วินาที)	อัตราส่วน โดยน้ำหนัก ของน้ำยา ถอดแบบต่อ น้ำปราศจาก ไอออน	คราบ (%)	ฟอง (%)	ฉีกขาด (%)	ยางไม่เต็ม (%)	แผล (%)
1	350	1/350	62.24 ± 1.44	0.17 ± 0.24	1.70 ± 0.48	2.21 ± 1.20	0.85 ± 0.72
2	375	1/350	37.07 ± 1.44	0.85 ± 0.24	2.89 ± 0.24	1.02 ± 0.48	0.68 ± 0.00
3	400	1/350	15.99 ± 4.33	1.70 ± 0.00	1.87 ± 0.72	2.04 ± 1.44	2.04 ± 0.48
4	425	1/350	3.06 ± 1.44	2.38 ± 0.00	3.06 ± 0.48	0.17 ± 0.24	1.87 ± 0.24
5	450	1/350	1.70 ± 0.48	1.87 ± 0.24	3.40 ± 0.48	0.85 ± 0.24	1.70 ± 0.48
6	400	1/250	0.00	1.87 ± 0.72	2.38 ± 0.48	0.34 ± 0.00	0.34 ± 0.00
7	400	1/300	10.20 ± 4.81	2.04 ± 0.96	2.72 ± 0.48	1.02 ± 0.48	0.85 ± 0.24
8	400	1/400	32.65 ± 1.92	0.51 ± 0.24	2.04 ± 0.48	0.34 ± 0.48	0.17 ± 0.24
9	400	1/450	43.20 ± 4.33	1.53 ± 0.24	2.55 ± 0.00	0.00	0.51 ± 0.24

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเวลาการขึ้นรูป ดังรูปที่ 4.17 พบว่า เมื่อใช้เวลาการขึ้นรูปที่ 425 วินาที ชิ้นงานที่เป็นคราบลดลง ขณะที่เมื่อใช้เวลาการขึ้นรูปที่ 350 วินาที ชิ้นงานที่เป็นคราบมีปริมาณที่มาก เนื่องจากเวลาการขึ้นรูปที่นานทำให้ชิ้นงานเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่มากกว่า ดังนั้นชิ้นงานจึงมีความแข็งแรงมากกว่า อีกทั้งยังทำให้แรงยึดติดระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์ลดลง ดังนั้นคราบที่เกิดขึ้นจึงน้อยลง

การขึ้นรูปชิ้นงานยางในแม่พิมพ์ด้วยความร้อนและความดัน ยางจะเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันเพื่อทำให้สมบัติของยางเปลี่ยนจากเทอร์โมพลาสติกเป็นเทอร์โมเซต ซึ่งทำให้ยางสามารถคงรูปได้ในอุณหภูมิสูงและมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานต่างๆ การเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่สมบูรณ์ ต้องมีการใช้ความร้อน ความดันและเวลาที่เหมาะสม ซึ่งสามารถวิเคราะห์ด้วยเครื่อง

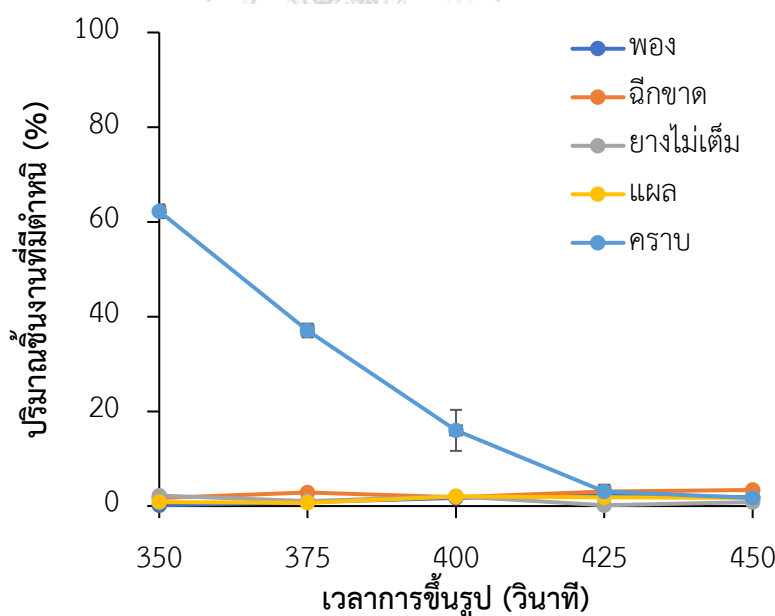
รีออร์มิเตอร์ เพื่อดูลักษณะการคงรูปของยางจากการใส่สารวัลคาไนเซชันชนิดต่างๆ โดยที่ลักษณะการคงรูปของยางมี 3 ประเภท (Kruželák et al., 2016)

1.1 มาร์ชซิ่ง (marching) ลักษณะการคงรูปของยางเมื่อเวลานานขึ้น จะทำให้ค่าทอร์คสูงสุดเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ โดยสารวัลคาไนเซชันที่ทำให้เกิดการคงรูปแบบนี้คือ เปอร์ออกไซด์ เนื่องจากสารประเภทนี้สามารถเกิดการเชื่อมขวางได้เรื่อยๆ ซึ่งทำให้ค่าความแข็งของชิ้นงานสูงขึ้นเมื่อยางถูกขึ้นรูปด้วยเวลาที่มาก

1.2 พาทิว (plateau) ลักษณะการคงรูปของยางเมื่อเวลานานขึ้น ค่าทอร์คจะมีค่าคงที่ นั่นคือ ชิ้นงานจะมีค่าความแข็งคงที่ เมื่อมีการขึ้นรูปชิ้นงานทีนาน

1.3 รีเวอร์ชั่น (reversion) ลักษณะการคงรูปของยางเมื่อเวลานานขึ้น จะทำให้ค่าทอร์คลดลง ส่งผลให้สมบัติเชิงกลของชิ้นงานด้อยลง มีความเปราะเนื่องจากการเสื่อมสลาย สารวัลคาไนเซชันที่ทำให้เกิดการคงรูปในลักษณะนี้คือ ซัลเฟอร์ และ เมทัลออกไซด์

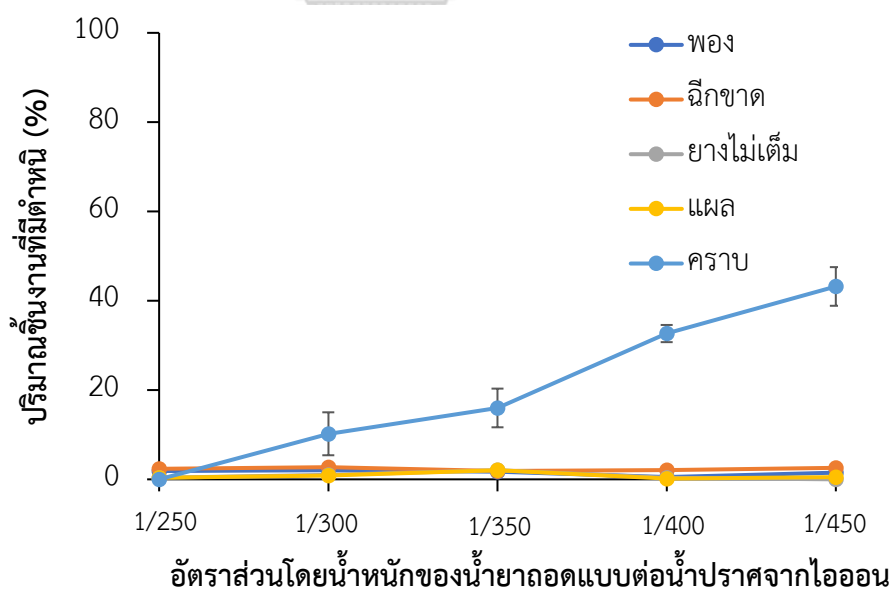
ดังนั้นการขึ้นรูปชิ้นงานยางที่มีลักษณะการคงรูปแบบมาร์ชซิ่ง ควรพิจารณาเลือกเวลาที่ทำให้ยางเกิดการเชื่อมขวางมากกว่า 65% (T_{c65}) เนื่องจากจะทำให้ยางมีความแข็งแรงมากพอที่จะทำให้ยางสามารถหลุดออกจากแม่พิมพ์ได้ด้วยที่ไม่มีคราบเกิดคราบขึ้น



รูปที่ 4.17 ปริมาณชิ้นงานที่มีตำหนิที่เกิดในลักษณะต่างๆ กับเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูป

เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนที่ 1/250 พบว่าไม่มีคราบเกิดขึ้นเลย ดังรูป 4.18 เนื่องจากสารละลายมีความเข้มข้นของพอลิไดเมธิลไซลอคเซนที่ 0.0012wt.% ขณะที่เมื่ออัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออนที่ 1/450 มีชิ้นงานที่เป็นคราบเกิดขึ้นมาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของพอลิไดเมธิลไซลอคเซนที่ 0.00067 wt.% ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่มาก ทำให้ผิวของแม่พิมพ์มีความลื่นมาก ดังนั้นสิ่งตกค้างจึงไม่หลงเหลืออยู่บนแม่พิมพ์ที่นำไปสู่การเกิดคราบ ชิ้นงานที่เป็นคราบจึงลดลง

น้ำยาถอดแบบ คือ น้ำยาที่ทำให้ผิวของแม่พิมพ์ลื่น เพื่อให้ชิ้นงานยางที่ขึ้นรูปบนแม่พิมพ์ไม่ติดอยู่บนผิวของแม่พิมพ์และสามารถปลดออกได้ง่าย โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ของน้ำยาถอดแบบมักเป็น ซิลิโคน ฟลูออรีน เป็นต้น เนื่องจาก อะตอมของธาตุเหล่านี้มีโมเลกุลขนาดเล็กที่สามารถเกาะและเคลือบอยู่บนผิวของแม่พิมพ์ได้ ทำให้อย่างไม่ติดอยู่บนผิวของแม่พิมพ์ ดังนั้นความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบ จึงไม่ควรต่ำกว่า 0.0008-0.0010 wt.% เพื่อให้ผิวของแม่พิมพ์มีการเคลือบของน้ำยาถอดแบบได้อย่างทั่วถึง อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่มากเกินไป ทำให้ชิ้นงานมีจุดบกพร่องอื่นๆ ได้ เช่น ชิ้นงานยางไม่เชื่อม และชิ้นงานเป็นแผล เนื่องจากน้ำยาถอดแบบไปกั้นขวางการคงรูปของยางในแม่พิมพ์ ดังนั้น เมื่อมีการฉีดน้ำยาถอดแบบแล้ว จึงควรเป่าด้วยลมป็นอีกครั้ง เพื่อให้ไม่มีหยดของน้ำยาถอดแบบหลงเหลืออยู่บนผิวของแม่พิมพ์ (Guevara et al., 2020)



รูปที่ 4.18 ปริมาณชิ้นงานที่มีตำหนิที่เกิดขึ้นในลักษณะต่างๆ กับอัตราส่วนโดยน้ำหนักของน้ำยาถอดแบบต่อน้ำปราศจากไอออน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการศึกษา

5.1.1 จากการวิเคราะห์ตัวแปรที่ทำให้เกิดคราบบนแม่พิมพ์ระหว่างการผลิตวาล์วไนเซชันของยาง ด้วยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล พบว่าเวลาที่ใช้ในการขึ้นรูปชิ้นงานและความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบ เป็นตัวแปรสำคัญที่ส่งผลให้มีคราบเกิดขึ้น

5.1.2 จากการวิเคราะห์ผลของตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดคราบบนแม่พิมพ์ด้วยการทดลองเชิงเดี่ยว พบว่าเวลาการขึ้นรูปที่นาน ทำให้ยางเกิดปฏิกิริยาวัลคาไนเซชันที่สมบูรณ์มากกว่า ดังนั้นยางจึงมีความแข็งแรงมากกว่า เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ จะไม่ส่งผลให้มีเศษของชิ้นงานติดอยู่บนผิวของแม่พิมพ์ ซึ่งนำไปสู่การเกิดคราบ อีกทั้งเมื่อความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่มากกว่า ทำให้ผิวของแม่พิมพ์มีความลื่นมาก ส่งผลให้ชิ้นงานที่ขึ้นรูปแล้วสามารถถูกปลดออกได้อย่างง่าย และยังไม่ทำให้สิ่งตกค้างหลงเหลืออยู่บนผิวของแม่พิมพ์ คราบที่เกิดขึ้นจึงลดลง

5.2 ข้อเสนอแนะ

เวลาการขึ้นรูปที่นานและความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่มาก สามารถลดการเกิดคราบได้ อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมควรเลือกเวลาการขึ้นรูปและความเข้มข้นของน้ำยาถอดแบบที่เหมาะสม ซึ่งควรมีการทดลองสำหรับการใช้ในระดับอุตสาหกรรมเพิ่มเติม นอกจากนี้การใช้น้ำยาถอดแบบชนิดอื่นก็เป็นอีกหนึ่งตัวแปรที่สามารถพิจารณาต่อได้

บรรณานุกรม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

- Al-sorory, H., S. Gumaan, M., & Shalaby, R. M. (2022). ZnO nanoparticles and compositional dependence of structural, thermal, mechanical, and electrical properties for eutectic SAC355 lead-free solder alloys. *Journal of Results in Materials*, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2022.100285>
- Andreopoulos, A. G. (1985). Sodium Alginate as a Mould Release. *Biomaterials*, 6, 138-139.
- Barroso, G., Döring, M., Horcher, A., Kienzle, A., & Motz, G. (2020). Polysilazane-Based Coatings with Anti-Adherent Properties for Easy Release of Plastics and Composites from Metal Molds. *Advanced Materials Interfaces*, 7(10). <https://doi.org/10.1002/admi.201901952>
- Chałada, Ł., Adamiak, M., & Woźniak, A. (2019). Evaluation of Properties of Anti-Adhesive Coatings on the Surface of Injection Moulds made of Al Alloys. *Archives of Materials Science and Engineering*, 1-2(97), 5-11. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.2865>
- Coleman, E. A. (2017). Plastics Additives. In *Applied Plastics Engineering Handbook* (pp. 489-500). <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-39040-8.00021-3>
- D'Avico, L., Beltrami, R., Pargoletti, E., Trasatti, S. P. M., & Cappelletti, G. (2020). Insight into the Release Agents/PVD Coatings Interaction for Plastic Mold Technology. *Coatings*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/coatings10030281>
- Fazli, A., & Rodrigue, D. (2020). Recycling Waste Tires into Ground Tire Rubber (GTR)/Rubber Compounds: A Review. *Composites Science*, 103(4), 1-43. <https://doi.org/10.3390/jcs4030103>
- Gonzales, R. R., Kato, N., Awaji, H., & Matsuyama, H. (2022). Development of polydimethylsiloxane composite membrane for organic solvent separation. *Separation and Purification Technology*, 285, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120369>
- Guevara, J. D., Müllner, P., Jones, M. L., & Jankowski, E. (2020). Development of a Molecular Model for Understanding the Polymer-metal Interface in Solid State Pumps. *Journal of Computational Science Education*, 11(2). <https://doi.org/10.22369/issn.2153-4136/11/2/3>

- Hasan, Z. (2020). *Tooling for Composite Aerospace Structures: Manufacturing and Applications*. Butterworth-Heinemann.
- Huang, S., Hou, J., Yin, J., Zhang, Z., Ding, B., Duan, Y., & Zhang, J. (2019). Anti-Blooming Effect of Graphene Oxide on Natural Rubber Latex Composite Films. *Composites Science and Technology*, 174, 142-148.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.02.027>
- Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2014). Peroxide vulcanization of natural rubber. Part I: effect of temperature and peroxide concentration. *Journal of Polymer Engineering*, 34(7), 617-624. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2014-0034>
- Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2016). Sulphur and peroxide vulcanisation of rubber compounds. *Chemical Papers*, 70(12), 1533-1555.
<https://doi.org/10.1515/chempap-2016-0093>
- Mahadevaswamy, H. S., & Suresha, B. (2020). Role of nano-CaCO₃ on mechanical and thermal characteristics of pineapple fibre reinforced epoxy composites. In 572, *Materials Today: Proceedings*,
- Manaila, E., Stelescu, M. D., & Craciun, G. (2012). Aspects Regarding Radiation Crosslinking of Elastomers. In *Advanced Elastomers – Technology, Properties and Applications* (pp. 1-33). <https://doi.org/10.5772/47747>
- McKeen, L. (2020). The effect of heat aging on the properties of elastomers and rubbers. In *THE EFFECT OF LONG TERM THERMAL EXPOSURE ON PLASTICS AND ELASTOMERS* (2 ed., pp. 277-312). William Andrew.
<https://doi.org/10.1016/C2020-0-02194-8>
- Misra, A., Shukla, M., Shukla, M. K., Srivastava, D., & Nagpal, A. K. (2021). Nano CaCO₃ modified multifunctional epoxy nanocomposites: A study on flexural and structural properties. In 3295, *Materials Today: Proceedings*,
- Moezzi, A., Cortie, M., & McDonagh, A. (2016). Transformation of zinc hydroxide chloride monohydrate to crystalline zinc oxide. *The royal society of chemistry*, 45, 7385-7390. <https://doi.org/10.1039/c5dt04864h>

- Mondal, S., Ganguly, S., Das, P., Bhawal, P., Das, T. K., Ravindren, R., Ghosh, S., & Das, N. C. (2017). Effect of thermal-air ageing treatment on mechanical properties and electromagnetic interference shielding effectiveness of low-cost nanostructured carbon filled chlorinated polyethylene. *Materials Science & Engineering B*, 225, 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.08.024>
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8 ed.).
- Noguera, J., Jiménez-Cabas, J., Álvarez, B., Caicedo-Ortiz, J., & Ruiz-Ariza, J. (2020). Analysis of Buñuelos Growth Rate Using 2^k Factorial Design. *Procedia Computer Science*, 177, 267-275.
- Okada, A., Okamoto, Y., Clare, A., & Uno, Y. (2013). Fundamental Study on Releasability of Molded Rubber from Mold Tool Surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(5-8), 1515-1521. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5415-x>
- Palys, L. H. (2020). Peroxide Cure Systems. In *Rubber Technology Compounding and Testing for Performance* (3 ed., pp. 611-640).
- POLYMERS, H. O. (2016). CPE chlorinated polyethylene. In C. c. polyethylene (Ed.). ChemTec Publishing.
- Qiu, L., Phule, A. D., Han, Y., Wen, S., & Zhang, Z. X. (2020). Thermal Aging, Physico-Mechanical, Dynamic Mechanical Properties of Chlorinated Polyethylene/Red Mud Composites. *Polymer Composites*, 41(11), 4740-4749. <https://doi.org/10.1002/pc.25747>
- Raja, K. S. (1999). *Rubber Processing-Rubber History, Factors Influencing Molding, Mold Design Studies* California State University,].
- Vrandečić, N. S., Klarić, I., & Roje, U. (2001). Effect of Ca/Zn Stabiliser on Thermal Degradation of Poly(Vinyl Chloride)/Chlorinated Polyethylene Blends. *Polymer Degradation and Stability*, 74(2), 203-212. [https://doi.org/10.1016/s0141-3910\(01\)00013-1](https://doi.org/10.1016/s0141-3910(01)00013-1)

- Wang, K., Yan, T., Zhao, Y. M., Li, G. D., & Pan, W. G. (2022). Preparation and thermal properties of palmitic acid @ZnO/Expanded graphite composite phase change material for heat storage. *Energy*, 242, 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122972>
- Wu, Y., Dong, C., Bai, X., & Yuan, C. (2022). Synergistic effects of ZnO whiskers and MWCNTs on the friction-induced vibration of a polymer. *Tribology International*, 167, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107383>
- Xu, Y. L., Jun Li, Wanggen (2022). Evolution in electrochemical performance of the solid blend polymer electrolyte (PEO/PVDF) with the content of ZnO nanofiller. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 632, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.127773>
- Zhou, H. Y., Liangdong , Li, S., Li, Z., Wei, Z., Huang, Z., Lu, S., Chen, D., Zhang, Z., & Li, Y. (2022). A bio-based compatibilizer (ESO-g-S-HPG) to improve the compatibility and mechanical properties of CaCO₃/HDPE composites. *Composites Science and Technology*, 219, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2021.109251>
- Zou, Y., Li, Y., Bourbigot, S., Zhang, J., Guo, Y., Li, K., He, X., & Baolati, J. (2021). Determination of solid-phase reaction mechanism and chlorine migration behavior of co-pyrolyzing PVC –CaCO₃ based polymer using Temperature-dependent FTIR and XRD analysis. *Polymer Degradation and Stability*, 193, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109741>
- ภูมिरะเบียบ, ภ. (2013). สารเคมีสำหรับยาง (Additives for Rubber). 1-5.
 สถาบันพลาสติก. (2011). เทคโนโลยีการผลิตยางคอมพาวด์. 2-25.
 สถาบันพลาสติก. (2013). เทคโนโลยีการขึ้นรูปยาง (*forming*).
<http://rubber.oie.go.th/Article.aspx?aid=3404>

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาวสิริธร อุดมโชติ
วัน เดือน ปี เกิด	20 มิถุนายน 2541
สถานที่เกิด	นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	ปริญญาโท วิทยาศาสตร์บัณฑิต
ที่อยู่ปัจจุบัน	196/173 หมู่ 1 ต.นครสวรรค์ตก อ.เมืองนครสวรรค์ จ.นครสวรรค์ 60000



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล

จากตารางที่ 4.10 จะนำมาคำนวณหาความสำคัญทางสถิติของแต่ละตัวแปร โดยพิจารณาเฉพาะร้อยละชิ้นงานที่เป็นคราบ มีวิธีการคำนวณดังนี้

1. คำนวณหาค่า contrast ในแต่ละภาวะและตัวแปรจากสมการที่ 4.1 เช่น

$$\text{Contrast ของตัวแปร A และ B ในภาวะที่ 1} = 18.71 \times (-1) \times (-1) = 18.71$$

$$\text{Contrast ของตัวแปร A และ B ในภาวะที่ 2} = 10.71 \times (-1) \times (-1) = 10.71$$

จากนั้นจึงหา contrast รวมของแต่ละตัวแปร เช่น contrast รวมของตัวแปร A และ B คือ ผลรวมของ contrast ของตัวแปร A และ B ในภาวะที่ 1-16

$$\text{contrast}_{AB} = 18.71 + 10.71 + (-76.02) + (-11.39) + 64.97 + (-27.89) + (-50.68) + (-35.71) + (-15.82) + (-5.44) + (-8.67) + (-8.67) + 32.14 + 0 + 30.95 + 0 = -37.93$$

2. คำนวณหา effect of parameter ดังสมการที่ 4.2 เช่น

$$AB = \frac{2}{n2^k} (\text{contrast}_{AB})$$

โดยที่ จำนวนการทำซ้ำ (n) = 2 และจำนวนตัวแปร (k) = 4

$$\text{จะได้ } AB = \frac{2}{2 \times 2^4} (-37.93) = -4.74$$

ซึ่งค่า effect of parameter จะถูกนำไปพล็อตดังรูปที่ 4.14

3. หา sum of square ของแต่ละตัวแปร โดยคำนวณได้จากสมการที่ 4.3 เช่น sum of square ของตัวแปร A และ B

$$SS_{AB} = \frac{1}{n2^k} (\text{contrast}_{AB})^2$$

โดยที่ จำนวนการทำซ้ำ (n) = 2 และจำนวนตัวแปร (k) = 4

$$\text{จะได้ } SS_{AB} = \frac{1}{2 \times 2^4} (-37.93)^2 = 89.89$$

ค่า contrast, effect of parameter และค่า sum of square ของแต่ละตัวแปร แสดงดังตารางที่

ตารางที่ ก.1 ค่า contrast, effect of parameter และ sum of square ของแต่ละตัวแปร

Run	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	ACD	BCD	ABCD
1	-18.71	-18.71	-18.71	-18.71	18.71	18.71	18.71	18.71	18.71	18.71	-18.71	-18.71	-18.71	-18.71	18.71
2	-10.71	-10.71	-10.71	10.71	10.71	10.71	-10.71	10.71	-10.71	-10.71	-10.71	10.71	10.71	10.71	-10.71
3	-76.02	-76.02	76.02	-76.02	76.02	-76.02	76.02	-76.02	76.02	-76.02	76.02	-76.02	76.02	76.02	-76.02
4	-11.39	-11.39	11.39	11.39	11.39	-11.39	-11.39	11.39	-11.39	11.39	11.39	11.39	-11.39	-11.39	11.39
5	-64.97	64.97	-64.97	-64.97	-64.97	64.97	64.97	-64.97	-64.97	64.97	64.97	-64.97	-64.97	64.97	-64.97
6	-27.89	27.89	-27.89	27.89	-27.89	27.89	-27.89	27.89	-27.89	27.89	-27.89	27.89	27.89	-27.89	27.89
7	-50.68	50.68	50.68	-50.68	-50.68	50.68	50.68	-50.68	-50.68	50.68	-50.68	50.68	50.68	-50.68	50.68
8	-35.71	35.71	35.71	35.71	-35.71	-35.71	-35.71	35.71	35.71	35.71	-35.71	-35.71	-35.71	35.71	-35.71
9	15.82	-15.82	-15.82	-15.82	-15.82	-15.82	-15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	15.82	-15.82	-15.82
10	5.44	-5.44	-5.44	5.44	-5.44	-5.44	5.44	5.44	-5.44	-5.44	5.44	-5.44	-5.44	5.44	5.44
11	8.67	-8.67	8.67	-8.67	-8.67	8.67	-8.67	-8.67	8.67	-8.67	-8.67	8.67	-8.67	8.67	8.67
12	8.67	-8.67	8.67	8.67	-8.67	8.67	8.67	-8.67	-8.67	8.67	-8.67	-8.67	8.67	-8.67	-8.67
13	32.14	32.14	-32.14	-32.14	32.14	-32.14	-32.14	-32.14	-32.14	32.14	-32.14	-32.14	32.14	32.14	32.14
14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	30.95	30.95	30.95	-30.95	30.95	30.95	-30.95	30.95	-30.95	-30.95	30.95	-30.95	-30.95	-30.95	-30.95
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Contrast	-194.39	86.90	46.43	-198.13	-37.93	-56.63	51.19	-61.73	-32.14	-22.96	67.18	-73.30	46.09	69.56	-87.93
Effect of parameter	-24.30	10.86	5.80	-24.77	-4.74	-7.08	6.40	-7.72	-4.02	-2.87	8.40	-9.16	5.76	8.69	-10.99
Sum of Square	2361.66	472.03	134.73	2453.45	89.89	200.45	163.78	238.20	64.57	32.95	282.05	335.80	132.76	302.39	483.18