

ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ออนไลน์ในการตั้งค่าที่เหมาะสมโดยใช้การออกแบบการทดลอง
กรณีศึกษากระบวนการผลิตดอกยางรถยนต์

ชาญชัย พรหมจรรย์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

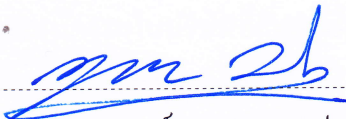
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ธันวาคม 2559

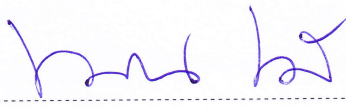
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

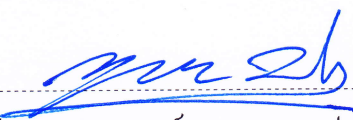
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์
ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของ ชาญชัย พรหมจรรย์ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

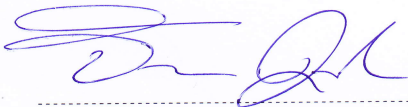
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

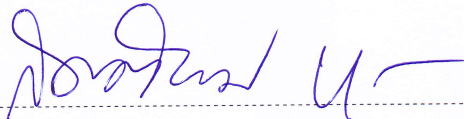
.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

คณะกรรมการสอบปากเปล่าวิทยานิพนธ์

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เกียรติเจริญผล)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ)

.....กรรมการ
(ดร. จักรวาล คุณะดิลก)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. กิตติพงษ์ บุญโล่ง)

คณะวิศวกรรมศาสตร์อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ของมหาวิทยาลัยบูรพา

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ดร. อาณัติ ดีพัฒนา)

วันที่ 29 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กฤษดา ประสพชัยชนะ ผู้ซึ่งกรุณาให้คำแนะนำ
คำปรึกษา ข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตลอดจนการแก้ไขเพื่อให้งานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัย
ขอกราบขอบพระคุณไว้อย่างสูง ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณพนักงานในบริษัทที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล
ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้
โอกาสผู้วิจัยได้เข้ามาศึกษาหาความรู้ จนส่งผลให้ประสบผลสำเร็จในวันนี้ รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง
ทุกท่านที่ไม่ได้กล่าวถึงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ชาญชัย พรหมจรรย์

53920662: สาขาวิชา: วิศวกรรมอุตสาหการ; วศ.ม. (วิศวกรรมอุตสาหการ)

คำสำคัญ: ดอกยาง/ การออกแบบการทดลอง/ วิชาลเบสิก

ชาญชัย พรหมจรรย์: ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ออนไลน์ในการตั้งค่าที่เหมาะสม
โดยใช้การออกแบบการทดลอง กรณีศึกษากระบวนการผลิตดอกยางรถยนต์ (ONLINE
COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM WITH OPTIMAL SETTING BASE ON DESIGN OF
EXPERIMEN: A CASE STUDY OF TIRE TREAD MANUFACTURING PROCESS.)

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: กฤษดา ประสพชัยชนะ, Ph.D., 167 หน้า. ปี พ.ศ. 2559.

การศึกษาในกระบวนการผลิตดอกยางของโรงงานตัวอย่าง พบว่ามีสัดส่วนของเสีย 10% ในปี 2554 ซึ่งลักษณะของเสีย คือ น้ำหนักดอกยางไม่เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักดอกยาง เพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมต่อการผลิต โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ (2⁷) โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ ซึ่งทำการศึกษา 7 ปัจจัย ได้แก่ ความหนืดของคอมพาวด์แคป คอมพาวด์วิง และคอมพาวด์อันเดอร์แทรค อุณหภูมิเครื่องเอ็กทрудเดอร์ของคอมพาวด์แคป คอมพาวด์วิง และคอมพาวด์อันเดอร์แทรค และความเร็วของสายการผลิต ผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักดอกยางอย่างมีนัยสำคัญ คือ ความหนืดของคอมพาวด์แคป และความเร็วของสายการผลิต จากนั้นนำสมการถดถอยมาประยุกต์ใช้กับโปรแกรมวิชาลเบสิก เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรแบบออนไลน์ ส่งผลให้สัดส่วนของเสียสามารถลดลงจาก 10% เหลือ 1.5% ซึ่งคิดเป็นมูลค่าของของเสียลดลง 468,000 บาทต่อเดือนในปี 2555

53920662: INDUSTRIAL ENGINEERING; M.Eng. (INDUSTRIAL ENGINEERING)

KEYWORD: TIRE TREAD/ DESIGN OF EXPERIMENT/ VISUAL BASIC

CHANCHAI PROMJUN: ONLINE COMPUTERIZED CONTROL SYSTEM WITH OPTIMAL SETTING BASE ON DESIGN OF EXPERIMEN A CASE STUDY OF TIRE TREAD MANUFACTURING PROCESS. ADVISOR COMMITTEE: KRITSADA PROSOPSUKCHAICHANA, Ph.D., 167 P. 2016.

A case study of tire tread manufacturing industry showed that the defect ratio was 10% in 2011. The defect of tread is undesired weight. The objective of this research is to study the factors and determine the optimal factor levels for the desired weight of tread. The experiment was started with a full factorial (2^7) experimental design. Seven factors, namely viscosity of cap compound, wing compound, under tread compound, extruder temperature of cap compound, wing compound, under tread compound and line speed were selected in the experiment design. Each factor was divided into two levels. The experimental results indicated that the significant factors were viscosity of cap compound and line speed. Then the integration of regression model and visual basic program were applied to construct the online computerized control system for setting the optimal level of viscosity of cap compound and line speed. Therefore, defect ratio was reduced from 10% to 1.5% and the defect cost was decreased 468,000 Baht per month in 2012.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ	1
ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
ขอบเขตงานวิจัย	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	3
ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
แผนการดำเนินงานวิจัย	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
ยางรถยนต์	6
ส่วนประกอบของยางรถยนต์	7
วัตถุดิบสำหรับการผลิตยางรถยนต์	10
ระบบการทำให้ยางคงรูป	18
คุณสมบัติของยางคอมพาวด์	20
คุณสมบัติของยางคงรูป	21
การทดสอบคุณสมบัติของยางคอมพาวด์	26
เครื่องจักรที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวด์	30
ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการผสมกับคุณสมบัติของยางคอมพาวด์และ ยางคงรูป	33
การขึ้นรูปและการคงรูปยางคอมพาวด์	34
เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางรถยนต์	39
การออกแบบการทดลองแบบ Factorial	43

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล.....	44
การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	44
แบบจำลองการถดถอย.....	45
โปรแกรมวิซวลเบสิก.....	45
การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อฮาร์ดแวร์.....	46
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
3 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	54
ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง.....	54
ชนิดของดอกยางที่ทำการผลิต.....	55
เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตดอกยางชนิด Cap wing.....	57
ขั้นตอนการผลิตดอกยางชนิด Cap wing.....	64
รายละเอียดของปัญหา.....	70
การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา.....	71
การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง.....	73
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	74
4 ผลการดำเนินการวิจัย.....	83
ผลการทดลอง.....	83
การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	85
การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป.....	89
การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย.....	93
การทวนสอบความถูกต้องของสมการ.....	95
การใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมระดับของปัจจัย.....	99
การทดลองใช้ Program ควบคุมแบบอัตโนมัติ.....	112
5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	118
สรุปผลการดำเนินงานวิจัย.....	118
ข้อเสนอแนะ.....	120
บรรณานุกรม.....	121

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	123
ภาคผนวก ก.....	124
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	167

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1-1 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของเสียของกระบวนการผลิตยางรถยนต์.....	2
1-2 แผนการดำเนินการทดลอง.....	5
3-1 ระดับของปัจจัย.....	77
3-2 การทดลองเป็นชนิด 2^k Factorial design แบบ Full factorial และบันทึกผล.....	81
4-1 ผลการทดลอง.....	84
4-2 ข้อมูลวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16.....	90
4-3 ระดับของปัจจัย.....	96
4-4 ผลการทดลองทำซ้ำ.....	96
4-5 ค่าสัดส่วนน้ำหนักเทียบกับ Size code มาตรฐาน.....	114
4-6 ผลของการทดลอง.....	115

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1-1 ส่วนแบ่งทางการตลาดของยางรถยนต์.....	1
2-1 กระบวนการผลิตยางรถยนต์แบบ Conventional process.....	7
2-2 โครงสร้างของยางรถยนต์.....	8
2-3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ.....	10
2-4 เครื่องทดสอบความแข็งของยางที่ผ่านการ Vulcanize แล้วชนิด Shore A.....	22
2-5 เครื่องวัดความหนาแน่นของยางคอมพาวด์.....	28
2-6 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์.....	28
2-7 เครื่องวัดระดับการแตกตัวของสารตัวเติมของยางคอมพาวด์.....	29
2-8 เครื่องผสมคอมพาวด์ชนิด 2 ลูกกลิ้ง.....	30
2-9 ส่วนประกอบของเครื่อง Banbury mixer.....	39
2-10 ส่วนประกอบของเครื่องรีดยางชนิด Two roll mill และ Twin screw calender.....	39
2-11 เครื่อง Calender.....	40
2-12 Tread เอ็กทราเดอร์และ Cooling conveyor.....	40
2-13 เครื่องผลิต Bead และ Apex เอ็กทราเดอร์.....	41
2-14 เครื่องผลิต Green tire.....	41
2-15 เครื่องอบยาง.....	42
2-16 เครื่องตรวจสอบคุณภาพยางเส้น.....	42
3-1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโรงงานตัวอย่าง.....	54
3-2 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap base-base pen.....	55
3-3 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap base.....	56
3-4 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap wing.....	57
3-5 เอ็กทราเดอร์สำหรับ Cap คอมพาวด์.....	58
3-6 เอ็กทราเดอร์ สำหรับ Wing คอมพาวด์.....	58
3-7 เอ็กทราเดอร์ สำหรับ Under tread คอมพาวด์.....	59
3-8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ตัวที่ 1.....	59
3-9 เครื่องชั่งน้ำหนัก ตัวที่ 2.....	60
3-10 สายพานลำเลียง No. 1, 2, 3.....	61

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-11 เครื่องตัดดอกยาง.....	62
3-12 เครื่องชั่งตัวที่ 3.....	62
3-13 เครื่องบรรจุดอกยางและรถเก็บดอกยาง.....	63
3-14 ขั้นตอนการผลิตดอกยางชนิด Cap-wing.....	64
3-15 การป้อนยางเข้าเครื่องเอ็กทราเดอร์.....	65
3-16 การประกอบ Pre-former.....	66
3-17 การประกอบ Die plate.....	66
3-18 ดอกยางผ่าน Shock cooling.....	66
3-19 ดอกยางเข้าเครื่องชั่งที่ 1.....	67
3-20 ป้อนดอกยางเข้า Cooling 1.....	67
3-21 ดอกยางเข้า Cooling 2.....	68
3-22 ดอกยางเข้า Cooling 3.....	68
3-23 Skiver ตัดดอกยาง.....	69
3-24 เครื่องชั่งที่ 3 ชั่งน้ำหนักดอกยาง.....	69
3-25 เครื่องจักรบรรจุดอกยางเข้า Leaf tray.....	69
3-26 ลักษณะปัญหา Over spill.....	70
3-27 ลักษณะปัญหา Explosive JLB.....	70
3-28 ข้อมูลการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตดอกยาง.....	71
3-29 ข้อมูลการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตดอกยางแยกตามสาเหตุการเกิด.....	72
3-30 ลักษณะปัญหาน้ำหนักช่วงต้นการผลิต.....	72
3-31 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	74
3-32 Fishbone diagram.....	75
3-33 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Cap คอมพาวด์ (T798).....	77
3-34 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Wing คอมพาวด์ (W346).....	78
3-35 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Under tread คอมพาวด์ (K005A).....	78
3-36 TCU.....	79
3-37 มาตรฐานของค่า ความเร็วของสายการผลิตและการปรับแบบ Manual.....	79

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3-38 การกำหนดจำนวนการทำซ้ำ (Replicate).....	80
4-1 Compound ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง.....	83
4-2 ฮีสโตแกรมค่าส่วนตกค้าง (Residuals).....	86
4-3 แผนภูมิค่าส่วนตกค้าง (Residuals).....	86
4-4 แผนภูมิการกระจายตัวของสัคส่วนตกค้าง (Residuals).....	87
4-5 ผล Runs test เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของสัคส่วนตกค้าง.....	87
4-6 แผนภูมิการกระจายตัวของสัคส่วนตกค้าง (Residuals).....	88
4-7 ผล Test of equal variances เพื่อตรวจสอบความเสถียรของสัคส่วนตกค้าง.....	89
4-8 แผนภูมิการ Test of equal variances ของสัคส่วนตกค้าง.....	89
4-9 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	92
4-10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลังจากการลดรูปสมการ.....	93
4-11 ผลการวิเคราะห์ห้ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16.....	94
4-12 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16.....	94
4-13 ผลการหาขนาดตัวอย่างการทดลองซ้ำ.....	95
4-14 การกระจายตัวของผลการทดลองทำซ้ำ.....	97
4-15 ผลการทดสอบ t-test และ z-test.....	98
4-16 ขั้นตอนการเขียนโปรแกรม.....	100
4-17 โปรแกรมที่ใช้.....	101
4-18 หน้าข้อมูลและค่าควบคุมที่ใช้ในการเขียน โปรแกรม.....	101
4-19 การติดตั้งสายส่งสัญญาณ.....	102
4-20 หน้าจอ Touch screen การรับข้อมูลเข้า PLC.....	102
4-21 การสร้างหน้าต่าง (Screen) ใหม่.....	103
4-22 การสร้าง Change screen switch สำหรับข้อที่ 3.2.1-3.2.5.....	104
4-23 การสร้างกล่องข้อความ.....	105
4-24 การนำค่าจาก PLC มาแสดงบนจอ.....	106
4-25 การสร้าง Bit switch.....	106
4-26 การป้อนข้อมูล Address ของ PLC ใน Bit address.....	107

สารบัญภาพ (ต่อ)

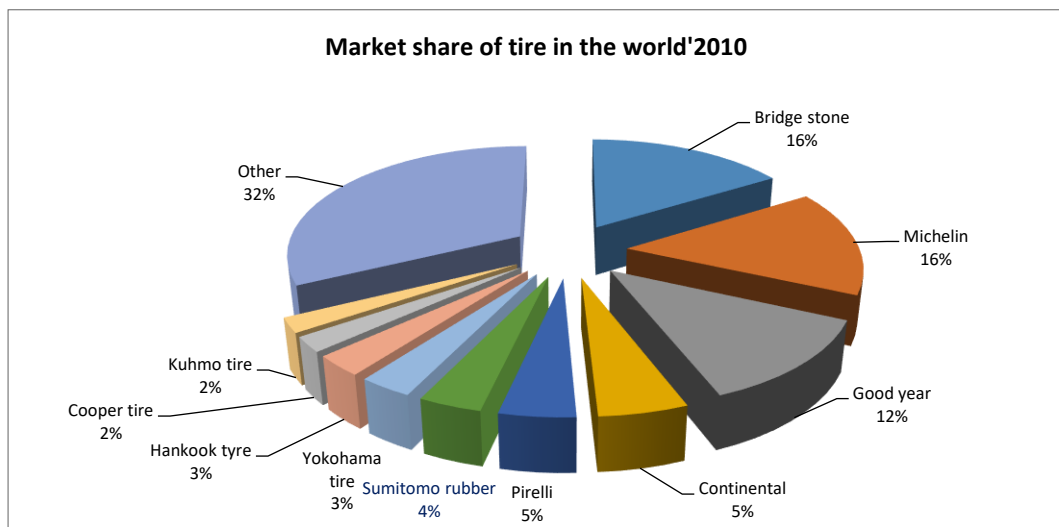
ภาพที่	หน้า
4-27 การพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบน Bit switch.....	107
4-28 การสร้าง Word switch.....	108
4-29 การป้อนข้อมูล Address ของ PLC ใน Word address.....	108
4-30 การพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบน Word switch.....	109
4-31 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ CAP.....	110
4-32 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ WING.....	111
4-33 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ UNDERTREAD.....	111
4-34 การใช้ PLC tester ทดสอบการทำงานของโปรแกรม.....	112
4-35 การป้อนค่าความหนืดของ Cap คอมพาวด์.....	113
4-36 ปัญหาหน้าหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐานหลังการปรับปรุง.....	117

บทที่ 1

บทนำ

ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันการแข่งขันทางธุรกิจมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ อันเนื่องมาจากความสามารถของผู้บริโภคที่สามารถเข้าถึงผู้ผลิตผ่านทางสื่อต่าง ๆ ที่ทำได้ง่ายขึ้น ประกอบกับจำนวนผู้ผลิตที่เพิ่มมากขึ้นทั้งขนาดใหญ่ ขนาดกลาง และขนาดย่อม ดังนั้น การตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคเพื่อแข่งขันส่วนแบ่งทางการตลาด จึงเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญที่แต่ละสถานประกอบการต้องคิดโดยอาศัยหลักการด้านคุณภาพ ราคา หรือการตอบสนองด้านการส่งมอบที่ฉับไว เพื่อเอาตัวรอดในสถานการณ์ที่มีการแข่งขันรุนแรงดังกล่าว ตลาดยางรถยนต์ก็เช่นกันที่มีการแข่งขันกันสูง ดังแสดงในภาพที่ 1-1 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีผู้ผลิตจำนวนมาก ดังนั้น ผู้ผลิตจะสามารถอยู่รอดได้ก็จำเป็นต้องเพิ่มส่วนแบ่งทางการตลาดให้มากขึ้น



ภาพที่ 1-1 ส่วนแบ่งทางการตลาดของยางรถยนต์

ปัญหาที่สำคัญของผู้ผลิต คือ คุณภาพ เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่ชี้บ่งถึงต้นทุนในการผลิต และราคาขาย ดังนั้น จึงต้องให้ความสนใจในการศึกษา และหาแนวทางการแก้ไขเพื่อลดปัญหาคุณภาพ หรือข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ให้เกิดขึ้นน้อยที่สุดหรือไม่เกิดเลย

ตารางที่ 1-1 เปรียบเทียบอัตราการเกิดของเสียของกระบวนการผลิตยางรถยนต์

(ข้อมูลเฉลี่ยตั้งแต่เดือน ม.ค. 2553-เม.ย. 2554)

Process	อัตราการเกิดของเสียต่อวัน (%)
Mixing	7.8
Steel topping	10.2
Textile topping	9.8
Bead	7.7
Ply	8.5
Breaker	9.2
Inner liner	8.2
Tread	10.0
Sidewall	9.3
Building	9.5
Curing	7.0
Inspection	1.8
Total	100

จากการศึกษาข้อมูลอัตราการเกิดของเสียของกระบวนการผลิตยางรถยนต์ของโรงงาน ตัวอย่าง ตั้งแต่เดือน มกราคม 2553 ถึงเดือนเมษายน 2554 พบว่ากระบวนการที่มีปัญหาด้านคุณภาพ ที่ทำให้เกิดเป็นของเสีย และเกิดการนำกลับมาผลิตใหม่มากที่สุด คือ กระบวนการผลิตดอกยางหรือ Tread ซึ่งมีอัตราการเกิดของเสียเฉลี่ยต่อวันเท่ากับ 10.0% และมีแนวโน้มในการเกิดมากขึ้นในอนาคต

ดังนั้น การเพิ่มโอกาสในการแข่งขันโดยการลดอัตราของเสียจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจ โดยต้องหาแนวทางปรับปรุงที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปัญหาน้ำหนักดอกยาง ไม่ได้ตามมาตรฐานในกระบวนการผลิตดอกยาง (Tread extruder process) ชนิดโครงสร้าง Cap-Wing
2. เพื่อศึกษาถึงระดับปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตดอกยางเพื่อลดปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐาน กระบวนการผลิตดอกยาง (Tread extruder process) ชนิดโครงสร้าง Cap-Wing
3. เพื่อสามารถลดอัตราของเสียที่เกิดในกระบวนการผลิตดอกยาง (Tread extruder process) ชนิดโครงสร้าง Cap-Wing
4. เพื่อสามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิกในการควบคุม การปรับแต่งค่าเครื่องจักร

ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาในกระบวนการผลิตดอกยางชนิด Cap-Wing
2. ศึกษาปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ส่งผลต่อปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐาน
3. ประยุกต์ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิกเพื่อใช้ในการแก้ไขปัญหา

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาสภาพทั่วไปและเก็บข้อมูลเบื้องต้นเพื่อกำหนดปัญหาของกระบวนการผลิตดอกยางชนิดแคปวิง
2. สำรวจสภาพปัจจุบันของปัญหา
3. นำข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อหาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา
4. ศึกษาค้นคว้า ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและออกแบบการทดลอง
5. ทำการทดลองเพื่อหาปัจจัยและระดับปัจจัยที่มีผลต่อปัญหา และออกแบบวิธีการปรับปรุงกระบวนการ
6. กำหนดแนวทางการแก้ไข และควบคุมปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหา
7. วิเคราะห์และประเมินผล โดยเปรียบเทียบผลระหว่างก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง
8. ประยุกต์ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิคกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้จากการทดลองเพื่อใช้ในการปรับค่าต่าง ๆ เครื่องจักรและควบคุมระดับปัจจัยที่เหมาะสม

9. สรุปผลการวิจัย

ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงปัจจัยและระดับของปัจจัยที่มีผลกระทบต่อปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐาน และหาแนวทางการแก้ไขได้
2. ลดปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐาน ในกระบวนการผลิตดอกยางลง 80% ในโครงสร้างดอกยางชนิดแคปวิง
3. สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมวิซวลเบสิกเพื่อควบคุมระดับของปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐาน ผ่านทางการควบคุมค่าต่าง ๆ ของเครื่องจักร
4. ลดต้นทุนในการผลิตและเพิ่มผลผลิต
5. สามารถนำแนวทางในการศึกษาไปประยุกต์ใช้กับการผลิตชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่มีกระบวนการผลิตที่คล้ายคลึงกัน

แผนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1-2 แผนการดำเนินการทดลอง

No.	หัวข้อ	ระยะเวลา										
		ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1	ศึกษาสภาพทั่วไป และเก็บข้อมูล เบื้องต้น	↔										
2	สำรวจสภาพปัจจุบัน	↔										
3	นำข้อมูลมาวิเคราะห์ เพื่อหาปัจจัย	↔										
4	ศึกษาค้นคว้า ทฤษฎี และงานวิจัยที่ เกี่ยวข้อง		↔									
5	ทำการทดลองเพื่อหา ปัจจัยและระดับปัจจัย ที่มีผลต่อปัญหา		↔									
6	กำหนดแนวทาง การแก้ไข			↔								
7	วิเคราะห์และ ประเมินผล			↔								
8	ประยุกต์ใช้ Software visual basic				↔							
9	สรุปผลงานวิจัย					↔						

บทที่ 2

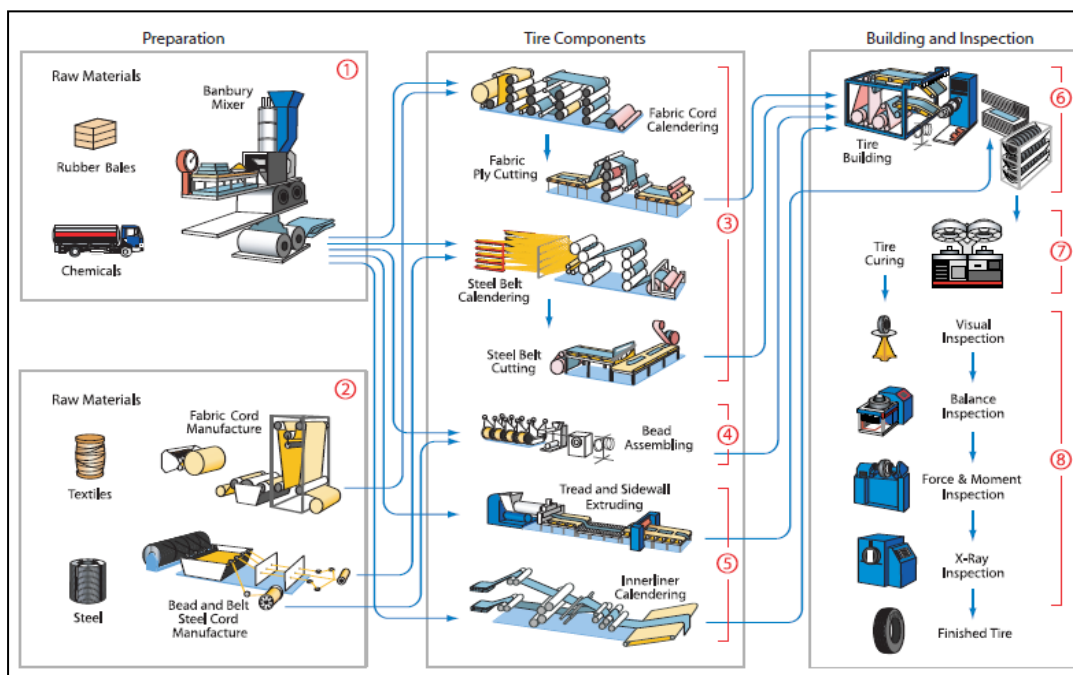
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ยางรถยนต์

ยางรถยนต์ คือ ส่วนหนึ่งของล้อรถยนต์ประดิษฐ์ขึ้นในปี พ.ศ. 2382 โดย ชาร์ลส์ กูดเยียร์ ชาวอเมริกัน ยางรถยนต์เป็นส่วนเคี้ยวของรถยนต์ที่สัมผัสกับพื้นถนน ดังนั้น จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการขับเคลื่อนของรถยนต์ ยางรถยนต์เป็นวัสดุที่ผสมผสานคุณสมบัติพิเศษต่าง ๆ เอาไว้มากมาย เช่น ความสามารถในการรับแรงกระแทก ความสามารถในการยืดหยุ่น มีช่วงชีวิตการใช้งานที่นาน ดังนั้น ยางรถยนต์จึงถูกใช้เป็นวัสดุที่แบกรับน้ำหนักทั้งหมดของรถยนต์ และช่วยในการบังคับทิศทางของรถยนต์ ทำหน้าที่ส่งแรงม้าจากเครื่องยนต์สู่พื้นผิวถนนและยึดเกาะถนน ในขณะที่เข้าโค้ง

1. ประเภทของยางรถยนต์

ยางรถยนต์แบ่งตามลักษณะของการเก็บลมจะมีอยู่ 2 ชนิด คือ แบบที่มียางใน (Tube tire) และแบบไม่มียางใน (Tubeless tire) ลักษณะยางรถยนต์แบบมียางใน ยางในจะพองตัวขึ้นดันยางนอกแนบสนิทกับขอบกระทะล้อเพื่อให้รถยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปได้ สำหรับยางรถยนต์แบบไม่มียางใน ขอบของยางนอกจะแนบสนิทกับขอบกระทะล้อเพื่อทำให้ลมไม่สามารถรั่วออกมาภายนอกได้ ยางรถยนต์แบบมียางในมักจะใช้ในรถบรรทุกขนาดใหญ่ ส่วนยางรถยนต์แบบไม่มียางในจะใช้กับรถนั่งส่วนบุคคลและรถกระบะที่รับภาระในการบรรทุกไม่มากนัก กระบวนการผลิตยางรถยนต์ส่วนใหญ่จะผลิตแบบดั้งเดิมดังภาพที่ 2-1 ซึ่งจะเริ่มจากการรับวัตถุดิบ มีการแปรรูปขึ้นต้นก่อนที่ จะนำประกอบขึ้นรูปเป็น Green tire และนำไปอบเพื่อให้เป็นลวดลายตามที่ต้องการก็จะได้ยางรถยนต์ออกมา



ภาพที่ 2-1 กระบวนการผลิตยางรถยนต์แบบ Conventional process

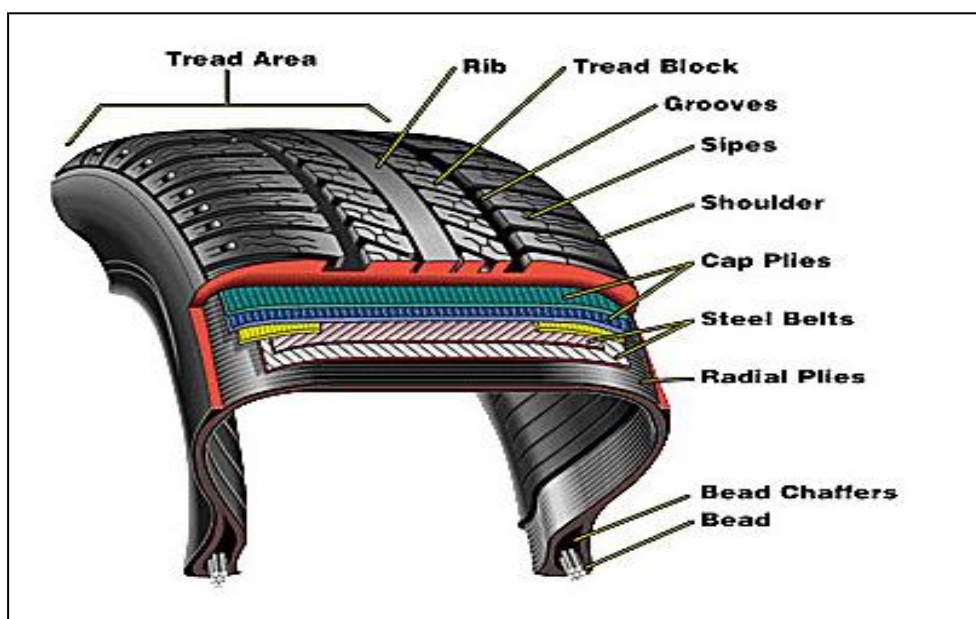
ส่วนประกอบของยางรถยนต์

1. ดอกยาง (Tread)

ดอกยางทำขึ้นจากเนื้อยางล้วน ๆ โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ เอ็กทราuder ผ่าน Die ซึ่งกัดเป็นช่อง ตามรูปร่างที่ต้องการแล้วทำการตัดให้ได้ความยาวหน้ายางทำหน้าที่ในการยึดเกาะกับพื้นผิวถนนช่วยให้สามารถควบคุมทิศทางของรถได้ง่ายขึ้น ยางรถยนต์ทุกชนิดในปัจจุบันนี้จะมีดอกยาง ยกเว้นยางรถยนต์ที่ใช้ในการแข่งขันทางเรียบและแห้ง ดอกยาง คือ ส่วนที่อยู่บนหน้ายาง และสัมผัสพื้นผิวถนนตลอดเวลาที่รถวิ่ง ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ร่องยาง คือ ร่องที่ลึกลงไปจากหน้ายาง หรือร่องที่อยู่ระหว่างดอกยาง ร่องยางที่ตื้นจะทำให้ยางเกาะถนนแห้งในสภาพแฉะจัดได้ดี แต่จะรีดน้ำได้น้อย และลื่นบนสภาพถนนที่มีฝนตกหนักและมีน้ำท่วมขังอยู่บนผิวถนน เพราะร่องยาง มีไว้เพื่อรีดน้ำให้ออกจากหน้ายาง ไม่ให้น้ำแทรกตัวอยู่ระหว่างหน้ายางกับพื้นถนนจนเกิดอาการลื่น

ปัจจุบันเทคโนโลยีในการผลิตยางในบริษัทยางทุกยี่ห้อต่างคิดค้นเพื่อออกแบบดอกยางในรูปแบบและวัตถุประสงค์ในการใช้งาน การรีดน้ำ การสลัดโคลน การตะกุก การยึดเกาะและป็นในองศาที่ปลอดภัย และเสถียรบนถนนในเวลาใช้งาน ยางรถยนต์ที่ใช้งานบนถนนที่เรียบ ดอกยาง

จึงเป็นแบบดอกละเอียด ร่องยังไม่ห่าง สามารถรีดน้ำออกด้านข้างได้อย่างรวดเร็ว มีพื้นที่สัมผัสกับผิวถนนมาก และมีเสียงรบกวนน้อย ส่วนยางประเภทออฟโรด ลุยโคลน หินหรือใช้งานในเส้นทางวิบาก ดอกยางจึงมีบั้งใหญ่ และมีร่องยางห่าง เพื่อเน้นการสลัดโคลน หิน หรือน้ำ ยางสำหรับเส้นทางกึ่งลุย กึ่งเรียบ ดอกยางจะผสมกันระหว่างยางถนนเรียบ และยางสำหรับลุยทางวิบาก การใช้งานบนทางเรียบก็จะเกาะถนนไม่ได้มาก และมีเสียงรบกวน



ภาพที่ 2-2 โครงสร้างของยางรถยนต์

ประเภทของดอกยาง มีการแบ่งออกเป็น 4 ประเภท

1.1 ดอกยางละเอียด (Rib pattern) มีดอกยาง และร่องยางเป็นแถวตามแนวเส้นรอบวง ของยาง และมีรูปแบบการเรียงตัวของร่องยาง ตามการออกแบบของบริษัทผู้ผลิต โดยทั่วไปแล้ว เน้นให้ยางใช้งานได้ดีในสภาพถนนเรียบ

1.2 ดอกบั้ง (Lug pattern) ดอกยางและร่องยางเป็นแนวขวาง กับเส้นรอบวงของยาง ซึ่งการออกแบบยางเช่นนี้ต้องการประสิทธิภาพในการตะกุก อีกทั้งร่องยางมีความลึก ทำให้มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน เหมาะสำหรับใช้งานบนถนนที่ขรุขระ และทางเรียบในความเร็วต่ำ และปานกลาง

1.3 ดอกแบบผสม (Rib lug pattern) เป็นการผสมจุดเด่นของยางทั้งสองแบบ โดยดอกละเอียดจะอยู่ตรงกลาง โดยมีดอกบั้งอยู่รอบนอกทั้งสองด้าน

1.4 ดอกแบบบล็อก (Block pattern) ดอกยางประเภทนี้มีลักษณะเป็นจุด หรือก้อน อาจมีรูปทรงแบบวงกลม หรือเหลี่ยมก็ได้ ให้แรงตะกุกสูง เหมาะสำหรับใช้งานแบบออฟโรดทั้งลุยโคลนและทราย

2. ผ้าใบชนิดโลหะ (Breaker)

Breaker เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของยางรถยนต์ ทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของยาง ทำให้สามารถรองรับแรงกระแทกจากพื้นถนนได้ดีมากขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยในการป้องกันวัตถุเจาะทะลุขึ้นหน้ายาง ไปยังชั้นยางใน ซึ่งจะทำให้เกิดยางเก็บลมไม่อยู่ หรือเกิดการระเบิดของยางรถยนต์ได้

Breaker ทำจากเส้นลวดฉาบด้วยยาง ซึ่งลวดจะเป็นเหล็กกล้าชุบด้วยทองแดง ขนาดของเส้นลวดขึ้นอยู่กับขนาดของยางรถยนต์ และน้ำหนักที่สามารถบรรทุกได้ ซึ่งบางครั้งมีขนาดมากกว่า 3 มิลลิเมตร กระบวนการผลิต Breaker ใช้กระบวนการผลิตแบบ Topping โดยใช้เครื่อง Calender ในการเคลือบยางคอมพาวด์ให้ติดกับเส้นลวด

3. ชั้นผ้าใบ (Carcass)

ทำจากผ้าใบ (Textiles) ฉาบยางเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวยางบริเวณส่วนแก้มยาง และไหล่ยาง กระบวนการผลิตทำเช่นเดียวกับการทำ Breaker แต่ใช้วัตถุดิบที่เป็นเส้นใย Nylon แทนเส้นลวด

4. แก้มยาง (Side wall)

แก้มยาง (Side wall) ทำจากเนื้อยางล้วน ๆ โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปโดยใช้ เอ็กทราเดอร์ ผ่าน Die ซึ่งกัดเป็นช่องตามรูปร่างที่ต้องการ ทำหน้าที่ลดแรงกระแทกระหว่างพื้นถนนกับตัวรถ ช่วยในการระบายความร้อนออกจากภายในยาง แก้มยางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิดหลัก ๆ คือ ชนิดแก้มยางสีดำและแก้มยางสีขาว โดยหน้าที่และคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ต่างกันที่ความสวยงาม

5. ขอบวงล้อ (Bead)

ขอบวงล้อ ทำขึ้นมาจากเส้นลวดแรงดึงสูง (High tensile wire) ที่ฉาบด้วยเนื้อยาง แล้วนำมาดัดเป็นวงหลาย ๆ ชั้นตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกระทะล้อรถยนต์ ทำหน้าที่ในการยึดยางให้ติดกับขอบกระทะล้อรถยนต์ และป้องกันการรั่วของอากาศที่อยู่ภายในโครงยาง กระบวนการผลิตขอบวงล้อใช้เครื่องเอ็กทราเดอร์ในการผลิต โดยการดันยางให้หุ้มผิวด้านนอกของเส้นลวด แล้วนำเส้นลวดดังกล่าวไปดัดเป็นวงตามขนาดของที่ต้องการ

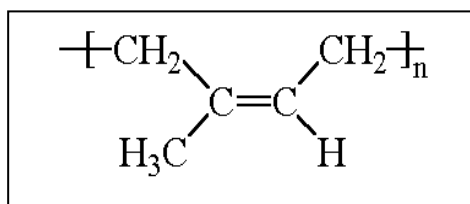
วัตถุดิบสำหรับการผลิตยางรถยนต์

วัตถุดิบ (Raw materials) ในกระบวนการผลิตยางรถยนต์จะประกอบด้วยวัตถุดิบหลักดังต่อไปนี้

1. ยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR)

ยางธรรมชาติได้มาจากต้นยาง (*Hevea brasiliensis*) ในรูปของน้ำยางสด หลังจากนั้นจึงนำมาแปรรูปเป็นยางแห้ง เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งาน ยางธรรมชาติที่ใช้กันอยู่ในอุตสาหกรรมได้แก่ ยางแผ่นรมควัน (Ribbed smoked sheet; RSS) ยางแผ่นผึ่งแห้ง (Air dried sheet; ADS) ยางแท่งมาตรฐาน เช่น Standard thai rubber; STR นอกจากนี้ยังมียางที่มีความหนืดคงที่ (Constant viscosity rubber; CV) ซึ่งใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมยาง ยางธรรมชาติสามารถเกิดการตกผลึกหรือสายโมเลกุลเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบเมื่อเกิดความเครียด (Strain crystallize) ซึ่งเป็นผลให้ยางมีความแข็งแรงต่อแรงดึง และต่อแรงกระทำให้นึกขาด (Tensile strength and tear strength) โครงสร้างของสายโซ่โมเลกุลหลักของยางธรรมชาติมีพันธะที่ไม่อิ่มตัว หรือพันธะคู่ (Unsaturated or double bonds) ดังแสดงในภาพที่ 2-3 ดังนั้น จึงง่ายที่จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน โอโซนและแสงยูวี และจากคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้นทำให้ยางธรรมชาติไม่ทนน้ำมันจะบวมพองได้โดยสาร Aromatic, aliphatic and halogenated hydrocarbons

โครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติของยางธรรมชาติ



ภาพที่ 2-3 โครงสร้างของยางธรรมชาติ

เนื่องจากยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก จึงมีความจำเป็นต้องบด (Masticate) ให้มีน้ำหนักโมเลกุลลดลง เพื่อช่วยให้การผสมสารเคมีต่าง ๆ ทำได้ง่ายขึ้น ดังนั้น เพื่อลดขั้นตอนดังกล่าวจึงมีการใช้ยางธรรมชาติชนิดที่มีความหนืดคงที่หรือยางซีวี (Constant viscosity rubber; CV) หรือยางธรรมชาติที่ผสมน้ำมันแล้ว (Oil extended graded) มาใช้แทนยางธรรมชาติชนิดปกติ การใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติในรูปยางแห้ง สามารถทำเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ มากมาย จนไม่สามารถที่จะสรุปให้ครอบคลุมทั้งหมดได้ อย่างไรก็ตามคุณสมบัติเด่น

ของยางธรรมชาติอื่น ได้แก่ ความแข็งแรงของยางที่ไม่ได้เติมสารตัวเติมเพื่อเสริมความแข็งแรง (Reinforcing fillers) หรือมีความแข็งแรงของเนื้อยางล้วน ๆ (Pure gum strength) สูง ระบายความร้อนได้ดี เหนียวติดกันเองได้ดี (Good tack) เหล่านี้จึงทำให้นิยมใช้ยางธรรมชาติในการผลิตยางรถยนต์ชนิดต่าง ๆ ยางรองกันการสั่นสะเทือน ซิลกันร้ว ฉนวนไฟฟ้า ยางรองสะพาน ยางรองอาคาร พื้นรองเท้า ท่อยาง ท่อเสริมแรง สายพานลำเลียง ยางบุผนังและผลิตภัณฑ์อัดแม่พิมพ์ชนิดต่าง ๆ

2. ยางสังเคราะห์ (Synthetic rubber; SR)

เนื่องจากยางธรรมชาติมีคุณสมบัติคือในเรื่องการทนทานต่อสภาพอากาศ การทนทานต่ออุณหภูมิสูงและราคาที่สูงจึงมีการผลิตยางสังเคราะห์ขึ้น เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องของยางธรรมชาติข้างต้น ยางสังเคราะห์ที่สำคัญเชิงพาณิชย์ ได้แก่ พอลิไอโซพรีน หรือ Synthetic natural rubber เรียกย่อว่า ไออาร์ (IR) พอลิบิวทาไดอิน (Polybutadiene, BR) และพอลิคลอโรพรีน (Polychloroprene, CR) หรือนีโอพรีน

2.1 พอลิไอโซพรีน (IR) เนื่องจากมีสูตรและโครงสร้างทางเคมีเช่นเดียวกับยางธรรมชาติ จึงมีคุณสมบัติโดยทั่วไปคล้ายกับยางธรรมชาติ จะมีความแตกต่างกันบ้างเพียงเล็กน้อยคือ ไออาร์มีโครงสร้างโมเลกุลสมมาตรกว่า สีจางกว่า และเนื่องจากการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบกว่า จึงทำให้ยางไออาร์ตกผลึกหรือมีการเรียงตัวของสายโมเลกุลขณะเกิดความเครียด น้อยกว่ายางธรรมชาติเป็นผลให้ความแข็งแรงของยางที่ไม่ผสมสารตัวเติมเสริมความแข็งแรง และยางผสมที่ยังไม่ทำให้คงรูปรวมทั้งความแข็งแรงของยางที่คงรูปแล้วต่อการดึง และต่อแรงกระทำให้ฉีกขาดต่ำกว่ายางธรรมชาติทั่วไป การใช้ประโยชน์เช่นเดียวกับยางธรรมชาติ จึงใช้ทดแทนกันได้ และนิยมใช้ยางไออาร์ผสมกับยางพอลิบิวทาไดอิน และยางสตาयरินบิวทาไดอิน (เอส บี อาร์; SBR) เพื่อปรับปรุงขั้นตอนในการผลิตมากกว่าที่จะใช้ยางธรรมชาติผสมที่ทำได้ยากกว่า

2.2 พอลิบิวทาไดอิน (BR) สังเคราะห์โดยปฏิกิริยาเคมี Solution polymerization คุณภาพพื้นฐานของยางบีอาร์ ขึ้นอยู่กับปริมาณของ cis-1, 4 และ 1, 2-vinyl ยางบีอาร์ ที่มีปริมาณ cis-1, 4 สูง (>90%) จะมี Tg ประมาณ -90 องศาเซลเซียส สามารถห้คงที่อุณหภูมิต่ำได้ดีมาก มีคุณสมบัติการกระเด็งและต้านทานการขัดสีได้ดีมาก เนื่องด้วยการกระเด็งดีจึงทำให้คุณสมบัติยืดเกาะถนนที่เปียกได้ดีต่ำ เมื่อใช้ผลิตยางรถยนต์ เพื่อแก้ไขคุณสมบัติด้อยดังกล่าวจึงต้องใช้คู่กับยางชนิดอื่น

การพอลิเมอไรส์ที่ได้ยางบีอาร์ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลต่ำทำให้บดยาก โดยทั่วไปแล้วการผลิตยางบีอาร์จะทำให้ได้จุดสมดุลระหว่างกระบวนการผลิตกับคุณภาพการใช้งานผลิตภัณฑ์ ยางบีอาร์ส่วนใหญ่จะบดและผสมให้เข้ากับสารเคมียาก มีความเหนียวติดกันเองต่ำ

ยืดหยุ่นสูงจนทำให้การขึ้นรูปโดยการอัดผ่านหัวดายไม่ดี ความไม่อึดตัวในสายโซ่หลักของ โมเลกุลยางบิโอาร์ ทำให้ต้องเติมสารป้องกันยางเสื่อมด้วยออกซิเจน แสงยูวีและโอโซน ยางบิโอาร์ ไม่ทนน้ำมัน ไม่ทนต่อสาร Aromatic, aliphatic and halogenated hydrocarbons ยางผสมที่มียาง บิโอาร์เป็นวัตถุดิบหลัก สามารถทำให้คงรูปโดยกัมมะถัน สารประกอบที่สลายตัวให้กัมมะถัน และ เพอร์ออกไซด์ และสามารถได้ยางคงรูปที่มีสมบัติต่าง ๆ เหมาะสมเมื่อผสมสารตัวเติมและน้ำมัน ในปริมาณพอเพียง การใช้ประโยชน์ยางบิโอาร์ส่วนใหญ่ใช้ผสมกับยางชนิดอื่น เช่น ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์เอส บี อาร์ ซึ่งบิโอาร์จะช่วยลดการเกิดความร้อนสะสม และเพิ่มความต้านทานต่อ การขีดสีให้กับยางผสม และถ้าใช้ยางรถยนต์ในสภาพอากาศเย็นจัด จะมีข้อได้เปรียบด้านการเกาะ ถนนที่ผิวหน้าเป็นน้ำแข็งได้ดี นอกจากนี้มีการใช้ในการผลิตรองเท้า สายพานลำเลียงและสายพาน สั่งกำลัง

2.3 ยางเอสบิโอาร์ (SBR) เป็นยางสังเคราะห์ที่มีประวัติความเป็นมาของการผลิต จากเหตุผลที่ระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 สหรัฐอเมริกาและเยอรมันถูกตัดขาดจากแหล่งผลิตยาง ธรรมชาติ จึงทำให้เกิดการคิดสังเคราะห์ยางขึ้นใช้ และมีการผลิตสืบต่อกันมาจนปัจจุบัน เอสบิโอาร์ สามารถผลิตโดยการพอลิเมอร์ไรซ์ได้ทั้งแบบอิมัลชัน และ โซลูชัน ซึ่งเกรดที่ใช้อย่างกว้างขวางจะ ผลิตแบบอิมัลชัน ปฏิกิริยาอิมัลชันพอลิเมอร์ไรซ์เซชันให้ผล Random Copolymer โดยที่อุณหภูมิ ของปฏิกิริยาเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมคุณสมบัติของยาง ซึ่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ (Cold polymerization) จะให้ยางที่มีคุณสมบัติดีกว่าที่อุณหภูมิสูง (Hot polymerization) โซลูชันพอลิเมอร์ไรซ์เซชันให้ผล Random, Dib lock, Triblock หรือ Multiblock copolymers ซึ่ง Triblock และ Multiblock ถูกจัดเป็น Thermoplastics elastomers สำหรับในที่นี่จะกล่าวถึงเฉพาะ Random copolymers เท่านั้น เอสบิโอาร์ เป็นยางสังเคราะห์ที่มีการใช้ในหลาย ๆ ผลิตภัณฑ์เพื่อ แทนที่ยางธรรมชาติ แม้ว่าจะต้องเติมสารช่วยเสริมความแข็งแรงในปริมาณมาก เพื่อให้ได้ คุณสมบัติความทนแรงดึง ทนแรงฉีกขาด และเพื่อให้มีอายุการใช้งานนานก็ตาม เอสบิโอาร์มี คุณสมบัติการกระเดื่องต่ำ เมื่อเทียบกับยางธรรมชาติ ดังนั้น เอสบิโอาร์จึงมีความร้อนสะสมเกิดขึ้นสูง เมื่อหักงอโดยเฉพาะส่วนที่มีความหนา อย่างไรก็ตาม ข้อดีของเรื่องการกระเดื่องเมื่อเทียบกับยาง ธรรมชาติ กลับเป็นข้อได้เปรียบในการใช้ผลิตส่วนของดอกยางล้อรถยนต์โดยสาร เพราะพลังงาน ที่สูญเสียมากจะทำให้คุณสมบัติการเกาะถนนเปียกดีขึ้น ผนวกกับความทนทานต่อการสึกหรอดี ทำให้ส่วนของดอกยางใช้เอสบิโอาร์ จึงเป็นผลให้มีการใช้เอสบิโอาร์ปริมาณมากในอุตสาหกรรมผลิต ยางรถยนต์

เอสปีอาร์ไมทนน้ำมัน ไมทนสารตัวทำลาย Aromatic, Aliphatic หรือ Halogenated เนื่องด้วยในสาร โมเลกุลมีส่วนของพันธะคู่ ฉะนั้น จึงจำเป็นต้องเติมสารป้องกันออกซิเจน โอโซน และแสงยูวี ในทางการค้ามีเอสปีอาร์ชนิดผสมน้ำมัน (Oil-extended SBR) และที่ผลิตเป็น มาสเตอร์แบทช์ (Master batches) ซึ่งเกรดเหล่านี้มีข้อดีสำหรับผู้ใช้ คือ ลดขั้นตอนการเติมสาร ตัวเติมหรือการเติมน้ำมัน รวมทั้งมีการผลิตเอสปีอาร์ในรูปแบบน้ำยางเพื่อใช้ในการเคลือบหลังพรม และงานอื่น ๆ การทำให้ยางเอสปีอาร์คงรูปโดยระบบกำมะถัน สารละลายตัวในกำมะถัน และ เพอรอกไซด์ในการผลิตสายพานลำเลียง ผลิตภัณฑ์อัดแม่พิมพ์ พื้นรองเท้า ท่อยางเสริมความ แข็งแรงและเคลือบลูกกอล์ฟ แม้ว่าโดยหลักการแล้ว คุณสมบัติพื้นฐานของตัวยางเองเป็นสิ่งบ่งชี้ คุณภาพหรือคุณสมบัติพื้นฐานของผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากยางนั้น ๆ แต่ก็สามารถที่จะตัดแปลง คุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ด้วยชนิดและปริมาณของสารเคมีสำหรับยางที่เติมลงไปในสูตรทำ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งสารเหล่านี้มีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตและต่อความเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ โมเลกุลยาง

3. สารทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing agent)

การใช้ประโยชน์ของยางมีข้อจำกัดจากจุดอ่อนที่ยางจะไวต่อความเปลี่ยนแปลงของ อุณหภูมิ คือ เหนียวเมื่อร้อนและแข็งเปราะเมื่อเย็น จึงเป็นที่มาของการค้นหาวិธีการแก้ไข ข้อบกพร่องนี้โดยนักวิทยาศาสตร์หลายท่าน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2373 เป็นต้นมา และผู้ที่ได้รับการยกย่อง ว่าเป็นคนแรกในการค้นพบวิธีการแก้จุดบกพร่องดังกล่าวของยาง หรือวิธีการทำให้ยางคงรูป (Cure or vulcanization) คือ นักประดิษฐ์และนักธุรกิจชาวอเมริกาชื่อ Charles goodyear แต่เป็นที่ น่าเสียดายว่า Goodyear มีปัญหาด้านการเงินจนต้องโทษด้านหนี้ตลอดจนสุขภาพไม่ดี นอกจากนั้น ยังไม่มีผู้ที่จะสนับสนุนในการศึกษารายละเอียดของกระบวนการที่ทำให้ยางคงรูปจากกำมะถันและ ความร้อน เขาจึงชะลอที่จะจดสิทธิบัตรในเรื่องนี้ และในปี พ.ศ. 2385 Goodyear ได้ส่งตัวอย่างยาง ที่ได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติให้คงรูปแล้วนี้ไปที่ สหราชอาณาจักร ซึ่งตัวอย่างยางดังกล่าวได้เป็น ตัวอย่างให้ Hancock ทำการทดลองจนพบว่า เมื่อผสมผสมกำมะถันกับยางแล้วให้ความร้อนใน ระยะเวลาหนึ่งก็จะทำให้ยางเปลี่ยนเป็นคงรูปได้ ความเปลี่ยนแปลงนี้ต่อมา William brockedon ได้ให้ชื่อว่า “Vulcanization” ซึ่งมาจาก Vulcan หมายถึง เทพเจ้าแห่งไฟเมื่อ Hancock ได้ศึกษา ทดลองจนเข้าใจโดยสมบูรณ์ในกระบวนการที่ทำให้ยางเปลี่ยนแปลง เขาได้ยื่นขอจดสิทธิบัตรที่ สหราชอาณาจักร เมื่อวันที่ 21 พฤษภาคม พ.ศ. 2387 ในขณะที่ Goodyear ขอจดสิทธิบัตรทาง สหรัฐอเมริกา เมื่อวันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ. 2387 ซึ่งได้เสนอการใช้สารประกอบตะกั่วร่วมกับ กำมะถันด้วย เพราะพบว่าได้ผลดีกว่าการใช้กำมะถันเพียงอย่างเดียว

4. สารตัวเร่ง (Accelerators)

สารตัวเร่งเป็นสารที่ช่วยเร่งให้ปฏิกิริยาของรูปเกิดเร็วขึ้น การค้นพบสารตัวเร่งเริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2424 Rowley ได้จดสิทธิบัตรการใช้แอมโมเนียเป็นตัวช่วยในการทำให้ยางคงรูป และในปี พ.ศ. 2541 WO and WA oswald ได้จดสิทธิบัตรการใช้อนิลินเป็นสารตัวเร่งและเป็นสารป้องกันยางเสื่อม แต่การใช้อนิลินเป็นอันตรายในอุตสาหกรรม จึงมีการค้นคว้าเพื่อใช้สารอื่น ๆ อีก เช่น ใช้อนุพันธ์ของอนิลิน

โดยในปี พ.ศ. 2457 S.J. Peachey ได้จดสิทธิบัตรการใช้ไนโตรโซไดเมทิลอนิลินเป็นสารตัวเร่ง ตัวเร่งสำคัญอีกสองตัวที่ได้ค้นพบในเวลาต่อมา คือ ไดฟีนิลกวานิดีน (Diphenyl guanidine, DPG) และเมอแคปโทเบนโซไทอาโซล (Mercaptobenzothiasoles, MBT) สาร DPG ถูกจดสิทธิบัตรโดย M.L. Weiss ในปี พ.ศ. 2465 และกลายเป็นสารตัวเร่งที่นิยมใช้มาก แต่ภายหลังถูกแทนที่ด้วย MBT ซึ่งเป็นสารตัวเร่งที่ทำให้ยางที่ดั่งทิ้งไว้มีอายุการใช้งานนานขึ้น มีความต้านทานต่อการสึกหรอสูง และง่ายต่อการป้องกันการเกิดการคงรูปก่อนกำหนดหรือสก็อช ต่อมาในปี พ.ศ. 2473 ได้เริ่มมีการค้นคว้าเพื่อผลิตสารตัวเร่งที่มีประสิทธิภาพชะลอการเกิดปฏิกิริยา (Delayed action) คือ เป็นสารตัวเร่งที่ไม่เร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิการผลิตแต่ช่วยเร่งในขณะที่ทำให้ยางคงรูป เพราะสารตัวเร่งชนิดนี้จะสลายให้สารตัวเร่งออกมาที่อุณหภูมิสูง การใช้สารตัวเร่งมีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อช่วยควบคุมเวลา หรืออุณหภูมิของการทำให้ยางคงรูปและช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของยางที่คงรูป การลดระยะเวลาในการทำให้ยางคงรูปโดยทั่วไปทำได้โดยการปรับปริมาณหรือชนิดของสารตัวเร่งโดยทั่วไปจะมีหลักการอยู่ ดังนี้

ใช้สารตัวเร่งเพียงชนิดเดียว (Primary accelerators) เพียงพอที่จะให้การคงรูปตามที่ต้องการภายในเวลาที่กำหนด

4.1 ใช้สารตัวเร่ง 2 ชนิดร่วมกัน โดยประกอบด้วยสารตัวเร่ง Primary ในปริมาณมาก ร่วมกับตัวเร่ง Secondary ในปริมาณน้อย (ประมาณ 20-30% ของปริมาณรวม) เพื่อช่วยกระตุ้นสารตัวเร่งร่วมกัน เพื่อให้มีการเสริมประสิทธิภาพเกิดขึ้น ทำให้ได้คุณสมบัติของยางที่ดีกว่าการใช้สารตัวเร่งตัวใดตัวหนึ่งเพียงอย่างเดียว

4.2 ใช้สารตัวเร่งที่เกิดปฏิกิริยาได้ช้า เพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาของรูปในสภาวะอุณหภูมิขณะกระบวนการผสมและการฟอร์มรูปร่าง

ข้อพึงระวัง 3 ประการในการใช้สารตัวเร่ง ได้แก่

ประการที่ 1 เนื่องจากโดยปกติใช้สารตัวเร่งในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับสารอื่น ๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันการสูญเสียจากการฟุ้ง จึงอาจใช้ในรูปแบบของเม็ด หรือในรูปแบบของมาสเตอร์แบทซ์

ประการที่ 2 เพื่อป้องกันการเกิดสก็อช ควรเติมสารตัวเร่งลำดับสุดท้ายของการบดผสม โดยวิธีนี้ยังช่วยลดการสูญเสียจากการระเหยของสารตัวเร่งอีกด้วย

ประการที่ 3 เพื่อป้องกันการบวม ไม่ควรใช้สารตัวเร่งในปริมาณที่มากเกินไปจนความสามารถที่จะละลายในยาง

5. สารตัวเติม (Fillers)

สารตัวเติม คือ สารที่เติมลงในยาง โดยมีวัตถุประสงค์หลักเบื้องต้นเพื่อลดต้นทุนการผลิต สารตัวเติมถูกใช้กับยางมาตั้งแต่ระยะแรก สารตัวเติมเหล่านั้น ได้แก่ ซอล์ค ดิน และซิงค์ออกไซด์ ซึ่งใช้เป็นสารตัวเติมเสริมประสิทธิภาพในยาง แต่หลังจากที่อุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์เจริญขึ้นความต้องการผลิตยางล้อรถยนต์ที่ทนทาน ทำให้มีการค้นคว้าเพื่อหาสารที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของยางรถยนต์มากขึ้น ในปี พ.ศ. 2447 S.C Mote ซึ่งทำงานที่บริษัท India rubber gutta percha and telegraph works ที่เมืองซิลเวอร์ทาวน์ได้พบเขม่าดำซึ่งผลิตโดยการเผาไหม้ไม้ สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงเชิงกลให้กับยางได้

ในปี พ.ศ. 2455 J. Tew และ G. Oenslager พบว่าถ้าเติมเขม่าดำลงในยางจะทำให้ความต้านทานของยางต่อการสึกหรอดีขึ้น ดังนั้น ระยะต่อมาจึงนิยมนำเขม่าดำมาผสมกับยาง ในระยะนั้นเขม่าดำผลิตได้จากก๊าซธรรมชาติทั้งสิ้น ซึ่งได้เขม่าที่เรียกว่า Channel black ต่อมาการผลิตเขม่าดำชนิดต่าง ๆ เพิ่มขึ้นอีก เช่น Thermal black ซึ่งเริ่มผลิตในปี พ.ศ. 2459

โดย Brown lee และ Uhlinger และในปี พ.ศ. 2463 บริษัท โคลัมเบียคาร์บอน ได้ผลิตเขม่าดำชนิด Furnace black ออกมา เป็นต้น ปัจจุบันการใช้เขม่าดำชนิดต่าง ๆ เหล่านี้ขึ้นอยู่กับความต้องการในการเสริมความแข็งแรงให้กับยาง

ชนิดและการผลิตเขม่าดำ

5.1 เขม่าดำชนิดแลมป์ เตรียมจากการเผาไหม้ไม้สมบูรณ์ของวัตถุดิบชนิดใดชนิดหนึ่งในกลุ่มน้ำมันปลา

น้ำมันสัตว์ รวมทั้งส่วนสกัดจากปิโตรเลียมซึ่งอาจเตรียมเป็นชนิดแบทช์หรืออย่างต่อเนื่อง คุณสมบัติของเขม่าดำชนิดแลมป์จะแปรปรวน ไปขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น และวิธีการเตรียม

5.2 เขม่าดำชนิดซาเนลเตรียมจากการเผาไหม้แก๊สธรรมชาติให้เปลวไฟจากการเผาไหม้กระทบกับท่อเหล็ก

ซึ่งเคลื่อนไปมาเหนือเปลวไฟ เมื่อเกิดเขม่าดำจะมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่กวาดเขม่าลงช่องเก็บและส่งต่อโดยสายพาน อนึ่ง เนื่องจากกระบวนการผลิตเขม่าดำชนิดซาเนลมีข้อจำกัด

ในด้านราคาและการสร้างมลพิษในบรรยากาศ ประกอบกับมีเขม่าดำชนิดเฟอเนส ซึ่งมีข้อได้เปรียบในข้อจำกัดดังกล่าว ความนิยมใช้เขม่าดำชนิดซาลังลดลง

5.3 เขม่าดำชนิดเทอร์มอลเตรียมจากการให้ความร้อนสูงประมาณ 1,300 องศาเซลเซียส แยกสลายแก๊สธรรมชาติในเตาเผาที่บุผนังด้วยอิฐ อนุภาคเขม่าดำชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 120-500 นาโนเมตร เทคโนโลยีการผลิตพัฒนาโดยอเมริกัน ซึ่งเริ่มการผลิตระดับการค้าเมื่อประมาณปี พ.ศ. 2465 และเนื่องจากราคาแก๊สธรรมชาติสูง ทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถรับภาระต้นทุนการผลิตเขม่าดำชนิดนี้ได้ จึงได้หยุดการผลิต ดังนั้น เขม่าดำชนิดดังกล่าวจึงมีความสำคัญในการใช้เป็นสารตัวเติมสำหรับการทำผลิตภัณฑ์ยางลดลง

5.4 เขม่าดำชนิดอะเซททีลีน องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนที่สูงถึง 85% ในอะเซททีลีน เป็นแหล่งที่สำคัญที่สามารถให้เขม่าดำได้โดยการแยกสลายด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น ในเยอรมันใช้วิธีแยกด้วยกระแสไฟฟ้า ในช่วงเวลาของสงครามโลก (พ.ศ. 2482-2488) การให้ความร้อนแก่อะเซททีลีนสูงถึง 800 องศาเซลเซียส จะแยกสลายเป็นไฮโดรเจนและคาร์บอนที่บริสุทธิ์มาก ไฮโดรเจนถูกแยกออกทางส่วนบนและเก็บรวบรวมกับเขม่าดำที่ส่วนล่างของอุปกรณ์แยกสลาย การใช้เขม่าดำชนิดนี้กับยาง จะช่วยเพิ่มการนำความร้อนและการนำไฟฟ้า

5.5 เขม่าดำชนิดเฟอร์เนส เป็นชนิดที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์ยางมากกว่าเขม่าดำชนิดอื่น ๆ

เริ่มมีการพัฒนาการผลิตเมื่อต้นสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นเขม่าที่อนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-80 นาโนเมตร กระบวนการผลิตที่สำคัญ คือ กระบวนการที่ใช้น้ำมันดิบเป็นวัตถุดิบตั้งต้น ซึ่งจะทำให้ผลผลิตที่ได้สูงกว่าการใช้แก๊สธรรมชาติ และสอดคล้องกับหลักการสำคัญของการผลิตเขม่าดำที่ต้องการให้มีคุณสมบัติเสริมความแข็งแรง ภายใต้เงื่อนไขของการใช้วัตถุดิบเชื้อเพลิงที่เหมาะสมและราคาถูก ประกอบกับรูปแบบของเตาเผาที่ให้ผลผลิตเป็นชนิดและคุณสมบัติที่สอดคล้องกับความต้องการใช้ในปริมาณสูง

6. สารตัวกระตุ้น (Activators)

สารตัวกระตุ้นเป็นสารที่ช่วยให้สารตัวเร่งทำงานดีขึ้น การค้นพบสารตัวกระตุ้นในระยะเวลาเดียวกันกับการค้นพบสารตัวเร่ง คือ ราวปี พ.ศ. 2463 พบว่ากรดไขมัน เช่น กรดโพลี กรดสเตียริก เป็นต้น ถ้าใส่ปนเข้ากับซิงค์ออกไซด์จะทำให้การทำงานของสารตัวเร่งมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ฉะนั้น สูตรของยางธรรมชาติทั่วไปจึงประกอบด้วย ยางธรรมชาติ กำมะถัน สารตัวเร่ง ซิงค์ออกไซด์และกรดไขมันมาจนทุกวันนี้

7. สารป้องกันออกซิเดชัน (Antioxidants)

ยางสามารถถูกออกซิไดส์ได้ในอากาศ ถ้าหากใส่สารเคมีที่ป้องกันการออกซิไดส์ลงไป จะช่วยให้ยางมีอายุการใช้งานได้นานขึ้น สารป้องกันยางเสื่อมหรือแอนติออกซิแดนท์ตัวแรกที่ได้ถูกจดสิทธิบัตรในปี พ.ศ. 2451 โดย Ostwald คือ สารอนิสิน ในราวปี พ.ศ. 2471 บริษัท คูปองซ์ และคูตริช ได้ค้นพบ PBN (Phenyl β -naphthylamine) ซึ่งเป็นสารป้องกันยางเสื่อมสภาพที่นิยมใช้มากระยะหนึ่ง ดังนั้น ในระยะปี พ.ศ. 2473 สูตรทั่วไปของยางจะประกอบด้วยยาง กำมะถัน ตัวเร่ง ซิงค์ออกไซด์ กรดไขมัน เขม่าดำและสารป้องกันยางเสื่อมสภาพ

8. สารทำให้นิ่มและแฟคทิส (Softeners factices)

ในระยะแรก ๆ น้ำมันทุกชนิด และขี้ผึ้ง ถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมยางเพื่อเป็นสารทำให้ยางนิ่มสารที่ใช้มาก คือ Asphaltum น้ำมันลินสีดและ Stearine ในปลายศตวรรษที่ 19 ขี้ผึ้ง พาราฟินและแฟคทิสจึงถูกนำมาใช้ สารเหล่านี้มีคุณสมบัติหลัก คือ ช่วยให้การผสมยางกับสารอื่น ๆ ทำได้ง่ายขึ้น และเพื่อลดความแข็งของยาง

ในปี พ.ศ. 2390 Anderson เป็นคนแรกที่เห็นความสำคัญของแฟคทิสในการผสมลงไป ในยาง ระยะแรกแฟคทิสที่เตรียมได้จากผสมกำมะถันกับน้ำมันพีชมีสีดำ ทำให้มีข้อจำกัดในการใช้ใน พ.ศ. 2392 Nickles และ Rochelle พบว่าสามารถเตรียมแฟคทิสสีขาวได้ด้วยการผสมน้ำมันกับซัลเฟอร์คลอไรด์ จนกระทั่งปัจจุบันแฟคทิสสีอ่อนและสีขาวสามารถใช้ได้กับยางที่ทำให้คงรูปที่อุณหภูมิห้อง (Cold vulcanize) ในเครื่องอัด และในบรรยากาศไอน้ำหรืออากาศร้อน โดยที่ยางนั้นมีสารตัวเร่งอยู่ด้วย

9. สารสี (Pigments)

ก่อนที่จะมีการใช้สารตัวเร่งในยาง สีที่ใช้ในยางส่วนใหญ่จะเป็นสีที่มาจากสารอนินทรีย์ หลังจากที่ได้ค้นพบสารตัวเร่งอินทรีย์แล้ว การใช้สีที่ทำจากสารอินทรีย์จึงเพิ่มขึ้น สีตัวแรกที่นิยมใช้ คือ อันติโมนิซัลไฟด์ ซึ่งจะช่วยให้ยางมีอายุการใช้งานนานขึ้น นอกจากนี้อันติโมนิซัลไฟด์ยังให้การวัลคาไนซ์ที่ดี ทำให้ใช้กำมะถันน้อยลงอีกชนิด คือ โลหะออกไซด์ เช่น เพอริกออกไซด์ ซิงค์ออกไซด์ ก็ใช้เป็นสารสีในยาง แต่การที่มันมีโลหะอื่นเจือปนอยู่ เช่น ทองแดง แมงกานีส จะทำให้มีผลเสียต่อยางในระยะยาว ซึ่งค้นพบโดย John B. Orr ในปลายปี พ.ศ. 2403 โดยการใส่ซิงค์ซัลเฟตและแบเรียมซัลไฟด์ทำปฏิกิริยากัน ใช้เป็นสารให้สีที่ดี ส่วนสารให้สีขาวที่ดี คือ ทิทาเนียม ซึ่งภายหลังปรับปรุงใช้ทิตาเนียมไดออกไซด์ ซึ่งค้นพบโดย Jevson และ Farub ในนอร์เวย์ และ Barton ในอเมริกาได้ปรับปรุงและผลิตเป็นอุตสาหกรรมในปี พ.ศ. 2476 ทิตาเนียมออกไซด์ให้ความขาวเป็นห้าเท่าของซิงค์ออกไซด์ และสองเท่าของซิงค์ซัลไฟด์ เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาเคมีและไม่เป็นพิษ จึงนิยมใช้เป็นสารสีขาวในยางจนกระทั่งปัจจุบัน

ระบบการทำให้ยางคงรูป (Vulcanizing or curing systems)

ปฏิกิริยาการทำให้ยางคงรูป (Vulcanization) ASTM (American society for testing and materials) ได้ให้คำจำกัดความว่า “กระบวนการที่ไม่สามารถผันกลับได้” ซึ่งระหว่างที่เกิดกระบวนการนั้น ยางที่ผสมสารเคมีมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมี ทำให้ยางมีสถานะของพลาสติกลดลงและเพิ่มความต้านทานต่อการบวมพองในอินทรีย์สารเหลว ขณะเดียวกันปรับปรุงคุณสมบัติความยืดหยุ่นดีขึ้นหรือขยายช่วงอุณหภูมิครอบคลุมกว้างขึ้น การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวนี้สามารถเกิดได้โดยสารเคมีหลายชนิดรวมทั้งการฉายรังสี ระบบที่ทำให้ยางคงรูปมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น ระบบกำมะถัน เป็นต้น

1. ระบบการทำให้ยางคงรูปโดยกำมะถัน (Sulphur)

ระบบการทำให้ยางคงรูปที่ใช้กันมาตั้งแต่เริ่มรู้จักกระบวนการนี้ คือ การใช้กำมะถัน ซึ่งเป็นระบบที่ใช้อย่างกว้างขวางกับยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ ประเภทที่โมเลกุลของยางมีโครงสร้างทางเคมีเป็นโมเลกุลแบบไม่อิ่มตัว พันธะเคมีเชื่อมขวางโมเลกุลยางที่จะเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยาของยางคงรูป เป็นแบบกำมะถันเชื่อม โมเลกุล ปฏิกิริยาเคมีของการเกิดยางคงรูปเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนมาก และคุณสมบัติทางกายภาพของยางที่คงรูปแล้วขึ้นอยู่กับชนิดหรือลักษณะของพันธะเคมีเชื่อมโมเลกุลยางที่เกิดขึ้น ซึ่งพันธะเคมีอาจเป็น mono-(1), di(2), tri(3) หรือมากกว่า 3 คือ Poly-sulfide ปริมาณของพันธะเคมีแต่ละชนิดจะมากน้อยอย่างไรขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ คือ ระบบของการทำให้ยางคงรูป ระยะเวลาและอุณหภูมิของการใช้ยาง ออบยางให้คงรูป

การใช้กำมะถันทำให้ยางคงรูป อาจจำแนกได้เป็น 4 ระบบ คือ 1) ใช้กำมะถันเพียงลำพัง 2) ใช้กำมะถันร่วมกับสารตัวเร่งระบบธรรมดา 3) ระบบใช้กำมะถันปริมาณน้อยและ 4) ระบบสารละลายตัวให้กำมะถัน ระบบที่เรียกว่า ระบบคงรูปอย่างมีประสิทธิภาพ (Efficient vulcanizing; EV systems) เพราะเกิดพันธะเชื่อมขวางโมเลกุลแบบ Mono-sulfidic มากกว่า Polysulfidic ซึ่งการเกิดพันธะแบบนี้ทำให้ยางที่คงรูปแล้วมีความทนทานต่อความร้อนได้ดีกว่ากรณีระบบที่ 2 ที่ใช้ปริมาณกำมะถันในสัดส่วนธรรมดา (Conventional vulcanizing; CV system) คือ ประมาณ 2.5-3.5 phr ใช้สารตัวเร่งน้อยประมาณ 0.3-1.0 phr ซึ่งพันธะเชื่อมโยงส่วนใหญ่เป็นแบบ Polysulfidic และแบบ Cyclic or chain modification ในระบบ EV ใช้ปริมาณกำมะถันน้อยประมาณ 0.25-0.7 phr ร่วมกับสารตัวเร่งปริมาณมาก ประมาณ 2.5-5.0 phr อาจมีการใช้ระบบที่ใช้ปริมาณกำมะถันช่วงกลางระหว่าง EV และ CV คือ ใช้กำมะถันประมาณ 1-2 phr ซึ่งเรียกว่าระบบกึ่งประสิทธิภาพ (Semi-EV)

การทำให้ยางคงรูประบบที่ 4 เป็นการใช้สารกลุ่มที่สลายตัวให้กำมะถัน ณ อุณหภูมิที่ใช้ อบให้ยางคงรูป สารกลุ่มนี้ที่รู้จักใช้กันมาช้านานแล้ว และปัจจุบันยังคงใช้กันอย่างกว้างขวาง คือ TMTD (Tetramethyl thiuram disulfide) และอนุพันธ์ของ Morpholine เช่น DTDM (Dithio dimorpholine) ข้อได้เปรียบของการใช้สารประกอบสลายตัวให้กำมะถัน คือ ลดปัญหาเรื่อง การลวมของกำมะถัน ปฏิกิริยาการคงรูปของยางจะไม่เริ่มจนกว่ากำมะถันจะสลายออกมาจากการแตกตัวของสารประกอบ ฉะนั้น การเริ่มเกิดปฏิกิริยาของยางคงรูป หรือยางตายหรือยางสก็้อช จะช้ากว่าการใช้ระบบกำมะถัน โดยตรง การแตกตัวของ TMTD และของอนุพันธ์ Morpholine จะเกิดการฟอรัมสารที่เป็นตัวเร่งและตัวกระตุ้นปฏิกิริยาทันที ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาเป็นไปอย่างรวดเร็ว สารประกอบทั้ง 2 ชนิดดังกล่าว ให้ลักษณะกราฟของการคงรูปคล้าย ๆ กราฟที่ได้จากการใช้ สารตัวเร่งกลุ่ม Sulphenamides แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่านอกจากข้อได้เปรียบดังกล่าว TMTD และอนุพันธ์ Morpholine ยังให้พันธะเคมีในการเชื่อมโมเลกุลบางส่วนใหญ่เป็นแบบ Monosulfide ซึ่งมีความทนต่อการเสื่อมอันเนื่องมาจากความร้อนได้ดีมาก การใช้เพื่อให้ได้เปรียบของระบบ สารประกอบสลายตัวให้กำมะถันดังกล่าว มักใช้สารนี้ในปริมาณ 2 ส่วนแทนการใช้กำมะถัน โดยตรง 1 ส่วนเพื่อให้ได้การคงรูปของในระดับเดียวกัน

ผลิตภัณฑ์บางชนิดที่ผลิตจากยางธรรมชาติ หรือยางสังเคราะห์เอสปีอาร์และต้องการ ความแข็งแรงจะทำให้กำมะถันเพียงลำพังในการทำให้ยางคงรูป เช่น ผลิตภัณฑ์หวิยาง เปลือก แบดเตอร์รี่ ยางเคลือบแท่งและท่อป้องกันสารเคมี โดยปกติมักใช้กำมะถันกับผลิตภัณฑ์เหล่านี้ ประมาณ 25 phr อย่างไรก็ตามวิธีการปัจจุบันอาจเติมสารตัวเร่ง เช่น DPG (Diphinyl guanidine) บ้างเล็กน้อย

ชนิดของกำมะถัน

กำมะถันที่ใช้ในอุตสาหกรรมยางมี 2 ชนิด คือ ชนิดธรรมดา กับชนิดไม่ละลาย ชนิด ธรรมดาเป็นผลึกมีรูปร่างขนมเปียกปูน การละลายในยางธรรมชาติ กำมะถันชนิดนี้ละลายได้ 1 ส่วนต่อยาง 100 ส่วนที่อุณหภูมิห้อง และละลายได้ 5 ส่วนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ถ้าเติม กำมะถันธรรมดา 3 ส่วนลงในยางธรรมชาติ กำมะถันจะละลายระหว่างการบดผสม เมื่อตั้งยาง ที่บดแล้วทิ้งไว้ให้เย็น กำมะถันจะเคลื่อนมาอยู่ที่ผิวและตกผลึก ทำให้ผิวหน้าของยางเป็นฝ้า ซึ่ง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า กำมะถันบลูม (Sulfur bloom) ลักษณะเช่นนี้เป็นปัญหาต่อคุณสมบัติ การเชื่อมติดของยางในขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนของยางรถยนต์ จึงจำเป็นต้องกำจัดโดยการเข้ด ออกด้วยตัวทำลาย การบลูมของกำมะถันอาจเกิดได้กับชั้นยางที่ผ่านการทำให้คงรูปแล้ว (Vulcanizate) หากกระบวนการทำให้ยางคงรูปไม่สมบูรณ์ (Under cure) หรือมีปริมาณกำมะถัน

ที่ไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลือมาก การบดไม่จำเป็นต้องมาจากกำมะถัน อาจเป็นสารตัวอื่น ๆ ก็ได้ เช่น ถ้าเติมน้ำมันพาราฟินิก 5 ส่วนในยางนีโอพรีน จะเกิดการซึมออกมาจากยางที่คงรูปแล้ว อันเนื่องมาจากพอลิเมอร์มีความต้านทานต่อตัวทำลาย

การแก้ปัญหาคงรูปของกำมะถันสามารถแก้ได้โดยการใช้กำมะถันชนิดไม่ละลาย กำมะถันชนิดนี้มีรูปร่างไม่แน่นอน ละลายได้น้อยมากในยาง กำมะถันชนิดไม่ละลายมักจะไม่เปลี่ยนไปเป็นชนิด Rhombic แม้จะบดที่อุณหภูมิสูงก็ตาม อย่างไรก็ตามหากยังมีการบดเมื่อใช้กำมะถันชนิดไม่ละลาย ควรเตรียมในรูปกำมะถันมาสเตอร์แบทช์ก่อน และเติมเป็นตัวสุดท้ายของการบดผสม โดยวิธีนี้ความร้อนที่จะเกิดสะสมในกำมะถันจะลดน้อย ทำให้การผันเปลี่ยนไปเป็นรูป Rhombic ลดลง การเปรียบเทียบระบบทำให้ยางคงรูปโดยกำมะถัน กับระบบทำให้ยางคงรูปที่ไม่ใช้กำมะถัน เช่น ระบบเพอรอกไซด์ กำมะถันจะทำปฏิกิริยาเฉพาะกับสารตัวเร่งและตัวกระตุ้นมากกว่าสารอื่น ๆ และหากเลือกใช้สารตัวเร่งและตัวกระตุ้นเหมาะสมก็สามารถควบคุมปฏิกิริยาการคงรูปภายใต้เงื่อนไขเวลาและอุณหภูมิที่กำหนดได้ คุณสมบัติของยางคงรูปโดยกำมะถันโดยทั่วไปจะมีคุณสมบัติด้านแรงดึงสูงกว่า ทนการฉีกขาดและการหักงอดีกว่ากรณียางที่คงรูปไม่ใช้ระบบมะถัน แต่ข้อเสียของระบบยางคงรูปโดยกำมะถัน คือ การบดทั้งก่อนการคงรูปและเมื่อยางคงรูปแล้วและข้อด้อยด้านคุณสมบัติการขูดตัวเนื่องจากแรงอัดและการยืด ณ ที่อุณหภูมิสูงรวมทั้งไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพ

คุณสมบัติของยางคอมพาวด์

คุณสมบัติของยางคอมพาวด์ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ชนิดของยาง ชนิดและปริมาณของสารตัวเติมและสารทำให้ยางนิ่ม เป็นต้น ยางมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติก คือ ประกอบด้วยส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่สามารถไหลได้ และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น ดังนั้น สัดส่วนระหว่างทั้งสององค์ประกอบจึงมีความสำคัญอย่างมากต่อกระบวนการขึ้นรูปของยาง คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของยางคอมพาวด์ คือ ความสามารถในการไหล คุณสมบัตินี้อาจแสดงในรูปของความหนืด (Viscosity) ที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าความหนืดหนืดหรือบางครั้งอาจแสดงในรูปของความสามารถในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าพลาสติกซิตี (Plasticity) คุณสมบัติความหนืดและพลาสติกซิตีจะแปรผกผันกัน กล่าวคือ ยางคอมพาวด์ที่มีความหนืดสูงก็จะมีคุณสมบัติพลาสติกซิตีที่ต่ำเพราะยางจะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก เครื่องมือวัดค่าพลาสติกซิตีจะแสดงค่าพลาสติกซิตีในรูปของค่า Plasticity number ซึ่งค่านี้จะสูงขึ้นตามค่าความหนืด

นอกจากความสามารถในการไหลแล้ว คุณสมบัติที่สำคัญอื่น ๆ ของยางคอมพาวด์ ได้แก่ คุณสมบัติการคงรูปก่อนเวลาอันสมควร (Premature vulcanization) หรือสกอรัซ ถ้าหากเกิดการคงรูปได้เร็วเกินไปหรือมีระยะเวลาสกอรัซที่สั้นเกินไปก็อาจก่อให้เกิดปัญหาระหว่างการไหลขึ้นรูป เพราะเมื่อยางคอมพาวด์เริ่มเกิดการคงรูป ความหนืดของยางก็จะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้ยางไหลได้ยากขึ้น ในบางครั้งอาจทำให้ยางไหลได้ไม่เต็มแม่พิมพ์ คุณสมบัติของยางคอมพาวด์ที่มีความสำคัญรองลงมา ได้แก่ ความเหนียวติดกัน (Tack) และความแข็งแรงของยางไม่คงรูปหรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า Green strength คุณสมบัติความเหนียวติดกัน หมายถึง ความสามารถในการยึดติดกันเองของยางดิบหรือยางคอมพาวด์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีการประกอบหลาย ๆ ชิ้นเข้าด้วยกันก่อนการคงรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งยางรถยนต์ ส่วนค่า Green strength นั้นเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงของยางคอมพาวด์ ยางแต่ละชนิดจะมีค่า Green strength ที่ไม่เท่ากัน เช่น ยางธรรมชาติจะมีค่า Green strength สูงกว่ายางสังเคราะห์ พอลิไอโซพรีน เป็นต้น ความแข็งแรงของยางคอมพาวด์เป็นสมบัติที่มีความสำคัญต่อการขึ้นรูปด้วยการอัดฉีด เพราะถ้ายางคอมพาวด์มีความแข็งแรงสูง ยางที่ได้จากการอัดฉีดหรือที่เรียกว่า อี๊กทรูดเดด จะมีความเสถียรทางรูปร่างสูงด้วยเช่นกัน โอกาสที่ยางจะเกิดการบิดเบี้ยวของรูปร่างในระหว่างการคงรูปก็จะต่ำ

คุณสมบัติของยางคงรูป

1. ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งของยาง หมายถึง ความต้านทานของพื้นผิวต่อการกดของตัวกด ที่มีขนาดเฉพาะและภายใต้แรงกดที่กำหนด เครื่องวัดความแข็งของยางมีหลายชนิดแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกดและแรงที่ใช้กดลงบนพื้นผิว สเกลที่ใช้วัดจะเริ่มตั้งแต่ศูนย์จนถึง 100 แรงที่ใช้กดอาจมาจากน้ำหนักที่คงที่หรืออาจใช้สปริงแทนก็ได้

หน่วยที่ใช้สำหรับวัดความแข็งของยางมีอยู่ 2 หน่วย คือ IRHD (International rubber hardness degree) และชอร์ (Shore unit) ซึ่งการวัดความแข็งในหน่วย IRHD นั้นจะใช้ลูกกลมแข็ง (Rigid ball) แทนตัวกดและแรงกดจะมาจากน้ำหนักที่คงที่ ส่วนเครื่องวัดความแข็งที่ให้หน่วยชอร์นั้นเรียกว่าเครื่องคูโรมิเตอร์ (Durometer) ซึ่งมีหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดมีอยู่ 2 แบบ คือแบบชอร์เอ (Shore A) ดังแสดงในภาพที่ 2-7 และแบบชอร์ดี (Shore D)



ภาพที่ 2-4 เครื่องทดสอบความแข็งของยางที่ผ่านการ Vulcanize แล้วชนิด Shore A

2. ความทนทานต่อแรงดึง (Tensile strength, TS)

ความทนทานต่อแรงดึง คือ ค่าแรงดึงสูงสุดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือค่าความเค้นสูงสุดที่ใช้ในการดึงขึ้นทดสอบมาตรฐานจนขาดที่อัตราเร็วในการดึงคงที่ ซึ่งมีหน่วยเป็นเมกะพาสกาล (MPa หรือ N/mm^2) ยางแต่ละชนิดจะมีค่าความทนทานต่อแรงดึงแตกต่างกัน ยางที่สามารถดกผลึกได้ ในขณะที่ถูกดึงหรือได้รับความเครียด (Strain-induced crystallization) เช่น ยางธรรมชาติ และยางคลอโรพรีนจะมีค่าทนทานต่อแรงดึงสูงกว่ายางที่ไม่สามารถดกผลึกได้ อย่างไรก็ตาม การเติมสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ รวมถึงระบบการคงรูปก็ส่งผลโดยตรงต่อคุณสมบัติแรงดึงของยาง โดยทั่วไปค่าความทนทานต่อแรงดึงของยางจะอยู่ในช่วง 7 MPa ถึง 45 MPa ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี

3. การยืดตัวหรือความเครียด (Elongation or strain)

การยืดตัวของชิ้นทดสอบที่เกิดขึ้นจากแรงดึง ซึ่งจะแสดงในรูปของร้อยละของการยืดตัวเมื่อเปรียบเทียบกับความยาวตั้งต้น เช่น การยืดตัวที่ 300% หมายถึง ชิ้นทดสอบถูกยืดออกไปจนมีความยาวเป็น 4 เท่าของความยาวเริ่มต้น ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (Elongation at break, EB) คือ ระดับการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นทดสอบ ซึ่งค่าความเค้น ณ จุดนี้ ก็คือ ค่าความทนทานต่อแรงดึงนั่นเอง โดยทั่วไปการยืดตัว ณ จุดขาดของยางมีค่าอยู่ในช่วง 100% ถึงมากกว่า 1000% ขึ้นอยู่กับชนิดของยางและสูตรการผสมเคมี ส่วนค่าความเครียดก็สัมพันธ์กัน โดยตรงกับค่าการยืดตัวของยาง เพราะว่าความเครียด คือ อัตราส่วนของระยะที่ยางยืดตัวต่อความยาวตั้งต้นของยาง ด้วยเหตุนี้เมื่อยางยืดตัวมากขึ้น ค่าความเครียดของยางก็จะสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน

4. โมดูลัส (Modulus, M)

สำหรับยางแล้วค่าโมดูลัสจะ หมายถึง ความเค้นในหน่วย MPa ที่ต้องใช้ในการยืดยางให้ได้ค่าการยืดตัวตามที่กำหนดไว้ โดยทั่วไปจะกำหนดการยืดตัวไว้ที่ 100% และ 300% เช่น หากยางมีค่า 100% โมดูลัส (M100) เท่ากับ 5 MPa หมายถึง การที่จะดึงยางให้ได้ 100% ของการยืดตัวจะต้องได้ความเค้นเท่ากับ 5 MPa เนื่องจากค่าโมดูลัสจะสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ดังนั้น จึงนิยมใช้ค่าโมดูลัสของยางในการบ่งชี้คุณสมบัติความแข็งแรง (Stiffness) และระดับการเชื่อมโยง (Vulcanization degree) ของยาง โดยทั่วไปค่า 100% โมดูลัสของยางอยู่ในช่วง 1 MPa ถึงมากกว่า 13 MPa ขึ้นอยู่กับสูตรการผสมเคมี

5. คุณสมบัติแรงกด (Compressive properties)

แม้ว่าคุณสมบัติแรงดึงจะเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญมากที่สุดเพราะเป็นคุณสมบัติที่นิยมใช้ในการกำหนดมาตรฐานหรือคุณภาพของผลิตภัณฑ์ แต่ในสภาวะการใช้งานจริงนั้น ผลิตภัณฑ์ยางส่วนใหญ่มักได้รับแรงกดมากกว่าแรงดึง โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์ยางที่ได้รับการใช้งานในเชิงวิศวกรรม เช่น ยางรองคอสะพาน ยางรองฐานตึก ยางลดการสั่นสะเทือน เป็นต้น ด้วยเหตุนี้ คุณสมบัติแรงกดจึงเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญต่อการออกแบบหรือการใช้งานของผลิตภัณฑ์ดังกล่าว เมื่อก่อนยางได้รับแรงกด ยางจะเกิดการยุบตัวในแนวตั้ง และถ้าหากยางก้อนได้รับแรงกดภายในพื้นที่ผิวที่ลื่นมาก ๆ ยางก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งก้อน คือ ยางทั่วทั้งก้อนมีอิสระเต็มที่ในการเปลี่ยนแปลงรูปร่างตามแรงภายนอกที่เข้ามากระทำและเนื่องจากว่ายางจัดเป็นวัสดุที่ไม่สามารถกดอัดได้ (Incompressible material) ดังนั้น การยุบตัวในแนวตั้ง (แกน Z) ดังกล่าวจึงส่งผลให้ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างทั้งในแนวแกน X และในแนวแกน Y ด้วยขนาดที่เท่า ๆ กัน ด้วยเหตุนี้การออกแรงกดก้อนยางในแนวแกน Z (Compression test) จึงเปรียบเสมือนกับการออกแรงดึงยางทั้งในแนวแกน X และในแนวแกน Y พร้อม ๆ กันด้วยแรงดันที่เท่ากัน

ในกรณีของการทดสอบคุณสมบัติแรงกดค่าโมดูลัสกดซึ่งบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยาง ส่วนใหญ่นิยมแสดงในรูปของค่ายังส์โมดูลัสกด (Compressive young's modulus) ซึ่งจะแตกต่างจากค่าโมดูลัสในการทดสอบสมบัติแรงดึง เพราะค่าโมดูลัสในการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงจะเป็นการระบุค่าความเค้นที่ความเครียดใด ๆ แต่ค่ายังส์โมดูลัสกดจะเป็นค่าที่ได้จากความชันในช่วงต้น ๆ ของกราฟที่พล็อตระหว่างความเค้นกดและความเครียดกด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ค่ายังส์โมดูลัสกดก็คือ อัตราส่วนระหว่างความเค้นกด

ต่อความเครียดกดนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ค่ายังส์โมดูลัสนี้จะใช้แสดงความสามารถในการต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางได้เฉพาะในช่วงความเครียดต่ำ ๆ เท่านั้น

6. คุณสมบัติแรงเฉือน (Shear properties)

นอกจากคุณสมบัติแรงดึงซึ่งแรงที่เข้ามากระทำกับยางจะอยู่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นที่หน้าตัดของยางแล้วยางยังสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ เมื่อได้รับแรงในทิศทางที่ขนานกับพื้นที่หน้าตัด เรียกแรงที่กระทำกับยางในลักษณะเช่นนี้ว่าแรงเฉือน (Shear force) ส่วนความเค้นและความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของยางในลักษณะเช่นนี้จะเรียกว่าความเค้นเฉือน (Shear stress, τ) และความเครียดเฉือน (Shear strain, γ) ตามลำดับ

เนื่องจากเมื่อนำความเค้นเฉือนไปพล็อตกราฟเทียบกับค่าความเครียดเฉือน จะพบว่าเส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะค่อนข้างเป็นเส้นตรง ด้วยเหตุนี้การวัดค่าโมดูลัสเฉือนของยางจึงสามารถทำได้ค่อนข้างสะดวกเพราะค่าโมดูลัสเฉือนจะมีค่าเท่ากับความชันของกราฟที่ได้ โดยทั่วไปค่าโมดูลัสเฉือนของยางมีค่าค่อนข้างต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่ายังส์โมดูลัส ค่าโมดูลัสเฉือนของยางจะขึ้นอยู่กับค่าความแข็ง เพราะถ้ายางมีความแข็งมากก็就会有ความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่างสูงซึ่งจะส่งผลทำให้ยางมีค่าโมดูลัสเฉือนที่สูงขึ้นด้วย สำหรับยางที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมซึ่งมีค่าความแข็งอยู่ในช่วง 30 ถึง 75 IRHD ส่วนใหญ่จะมีค่าโมดูลัสเฉือนอยู่ในช่วงประมาณ 0.3 ถึง 2.18 MPa

7. ความทนทานหรือความต้านทานต่อการฉีกขาด (Tear strength or tear resistance)

ผลิตภัณฑ์อาจเกิดจากความเสียหายในระหว่างการใช้งานอันเนื่องจากการเกิดและการขยายตัวของรอยแตก ทำให้ผลิตภัณฑ์เกิดการฉีกขาดจนกระทั่งไม่สามารถใช้งานต่อไปได้อีก การฉีกขาดมีแนวโน้มจะเกิดได้ดีในบริเวณที่มีการสะสมของความเค้น (Stress concentration) โดยเฉพาะบริเวณที่มีรอยบากหรือรอยตำหนิต่าง ๆ ค่าความทนทานต่อการฉีกขาด คือ แรงที่มากที่สุดต่อหนึ่งหน่วยความหนาที่ต้องใช้ในการฉีกชิ้นตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน มีหน่วยเป็นนิวตันต่อมิลลิเมตร (N/mm) ความทนทานต่อการฉีกขาดจะขึ้นอยู่กับระดับของการเชื่อมโยงของพันธะในยาง ยางที่ได้รับการคงรูปที่อุณหภูมิต่ำและใช้ระยะเวลาในการคงรูปน้อยจะมีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดสูง โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตจากยางที่มีค่าความทนทานต่อการฉีกขาดต่ำ เช่น ยางซิลิโคน จำเป็นต้องเพิ่มความระมัดระวังในการขนส่งและติดตั้งเพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่จะทำให้อย่างเสียหายในระหว่างการใช้งาน

8. ความเสียดทาน (Friction) และความต้านทานต่อการขัดถู (Abrasion resistance)

ความเสียดทานและการสึกหรอเป็นสิ่งที่สัมพันธ์กันเนื่องจากการสึกหรอเกิดจากกระบวนการสูญเสียเนื้อวัสดุไปในระหว่างการเกิดความเสียดทานหรือการขัดถู ถ้าไม่มีความ

เสียดทานเกิดขึ้น การสีกหรือก็จะไม่เกิด คุณสมบัติความต้านทานต่อการสีกหรือของยางจะเรียกกัน โดยทั่วไปว่าความต้านทานต่อการขจัด ความเสียดทานและการสีกหรือเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา เมื่อต้องนำยางไปใช้งานในเชิงพลวัต (Dynamic applications) กล่าวคือ ในระหว่างการใช้งาน ยาง จะได้รับแรงกระทำจากภายนอกแบบเป็นรอบ ๆ ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยางที่ได้รับการใช้งาน ในเชิงพลวัต ได้แก่ ยางรถยนต์ เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient) ของยาง ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ มากมาย เช่น รูปร่าง อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วในการขจัด รวมถึงลักษณะ ทางพื้นผิวของยางและวัสดุที่สัมผัส ความเสียดทานที่สูงอาจก่อให้เกิดผลเสียได้เพราะจะทำให้เกิด ความร้อนที่ผิวสัมผัสสูง จึงทำให้ยางที่อยู่บริเวณดังกล่าวเกิดการเสื่อมสภาพได้อย่างรวดเร็ว วิธีที่ใช้ ในการลดความเสียดทานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ได้แก่ การใช้สารหล่อลื่นหรือการปรับสภาพ พื้นผิวยางด้วยกระบวนการทางเคมี

ความต้านทานต่อการขจัดของยางเป็นคุณสมบัติที่วัดได้อย่างถูกต้องได้ยาก ไม่ว่าจะเป็น การวัดในห้องปฏิบัติการซึ่งขึ้นทดสอบจะถูกขจัดบนพื้นผิวขัดหรือการวัดการสีกหรือในผลิตภัณฑ์ จริง เนื่องจากความคมของผิวขัด สภาพการขัด อุณหภูมิ รวมถึงอัตราการกำจัดเศษยางออกจาก ผิวขัด ล้วนแล้วแต่มีผลต่อการวัดทั้งสิ้น

9. คุณสมบัติวิสโคอิลาสติก (Viscoelastic)

ยางมีคุณสมบัติเป็นวิสโคอิลาสติกที่มีองค์ประกอบสำคัญอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ไหลได้ คล้ายของเหลวหนืด และส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่น โดยในสภาพที่ยังไม่คงรูป ยางยังคงสามารถ ไหลได้อยู่ นั่นหมายถึง ยางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดในสัดส่วนที่ค่อนข้างสูง ในขณะที่องค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นมีสัดส่วนที่ค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อยางได้รับการคงรูป แล้ว การเกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติของโมเลกุลยางจะทำให้ยางมีความยืดหยุ่นสูงขึ้นและทำให้ ยางไม่สามารถไหลได้อีก นั่นคือ ยางที่คงรูปแล้วจะมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นแม้ว่า การคงรูปจะทำให้องค์ประกอบส่วนหนึ่งที่เป็นของเหลวหนืดมีสัดส่วนลดลง แต่การคงรูปก็ไม่สามารถทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดนี้หายไปจากเนื้อยางได้หมด ดังนั้น ยางจึง ไม่ใช่วัสดุที่มีความยืดหยุ่นอย่างสมบูรณ์ด้วยเหตุนี้ยางคงรูปที่ได้รับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็น ระยะเวลาานาน ๆ และเมื่อแรงกระทำจากภายนอกหมดไป ยางจะกลับคืนสู่รูปร่างที่ใกล้เคียงเดิม เท่านั้นแต่จะไม่กลับคืนสู่รูปร่างเดิมอย่างสมบูรณ์หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง ก็คือ การเปลี่ยนแปลง รูปร่างบางส่วนจะได้กลับคืนมาแต่บางส่วนจะอยู่ตัวอย่างถาวร การเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ของยางคงรูปนี้เป็นผลมาจากองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่ยังหลงเหลืออยู่นั่นเอง คุณสมบัติที่เกิดขึ้นเนื่องจากความเป็นวิสโคอิลาสติกของยาง ได้แก่ การเสียวอย่างถาวร การคลาย

ตัวของความเค้นและการคืบ คุณสมบัติเหล่านี้นอกจากจะขึ้นอยู่กับชนิดของยางแล้ว ยังขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติมและสารทำให้ยางนึ่ม ระบบคงรูป และกระบวนการผลิตอีกด้วย

10. การเสียรูปอย่างถาวร

หมายถึง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่ยังคงอยู่หลังปลดปล่อยแรงจากภายนอกที่กระทำ ถ้ายางถูกยึดภายใต้สภาวะที่กำหนดและปล่อยให้หดตัวกลับ ระยะยืดที่ยังคงเหลืออยู่หลังจากการหดตัวกลับเรียกว่า การเสียรูปหลังการดึง ซึ่งมีหน่วยเป็นร้อยละของความยาวตั้งต้น แต่ถ้ายางถูกกดภายใต้สภาวะที่กำหนด การลดลงของความหนาหลังจากที่ได้รับการกดเมื่อเทียบกับความหนาตั้งต้นเรียกว่า การเสียรูปหลังการกด (Compression set) ซึ่งมีหน่วยเป็นร้อยละเมื่อเปรียบเทียบกับระยะที่กดตัวอย่าง เช่น ถ้ายางมีค่าการเสียรูปหลังการกด 100% นั้น หมายถึง ยางเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างสมบูรณ์และถาวร และถ้ายางมีค่าการเสียรูปหลังการกด 0% ก็จะหมายความว่ายางชนิดนี้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างถาวร ค่าการเสียรูปหลังการกดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ระดับของการกด และระยะเวลาของการกด สำหรับผลิตภัณฑ์ยางที่ต้องใช้ในการอุดรอยรั่ว เช่น ปะเก็น ซีล ฯลฯ ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ต้องมีค่าการเสียรูปหลังการกดที่ต่ำ นั่นคือ ยางต้องมีความสามารถในการคืนรูปหรือกลับสู่สภาพตั้งต้นได้อย่างรวดเร็วเพื่อรักษาแรงอุด (Sealing force) ให้คงอยู่ตลอดอายุการใช้งาน

11. การคลายตัวของความเค้น

หมายถึง การลดลงของความเค้นตามเวลาในขณะที่ยางได้รับความเครียดคงที่ ขอบเขตของการลดลงของความเค้นตามเวลาจะแปรผันโดยตรงกับองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดที่ยังคงหลงเหลืออยู่ในยางหลังการคงรูป กล่าวคือ หากยางมีความยืดหยุ่นสมบูรณ์ ค่าความเค้นก็จะไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่ถ้ายางคงรูปมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของเหลวหนืดหลงเหลืออยู่มาก ค่าความเค้นก็จะลดลงอย่างรวดเร็วตามเวลา คุณสมบัตินี้มีความสำคัญสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ใช้อุดรอยรั่ว เช่น ซีลและปะเก็น เช่นเดียวกับค่าการเสียรูปหลังการกด โดยทั่วไปการวัดประสิทธิภาพของการอุดรอยรั่วทำได้โดยการวัดค่าการคลายตัวของความเค้นของยางภายใต้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างแบบกด ยางที่มีประสิทธิภาพในการอุดรอยรั่วสูงควรมีค่าการคลายตัวของความเค้นต่ำ

การทดสอบคุณสมบัติของยางคอมพาวด์

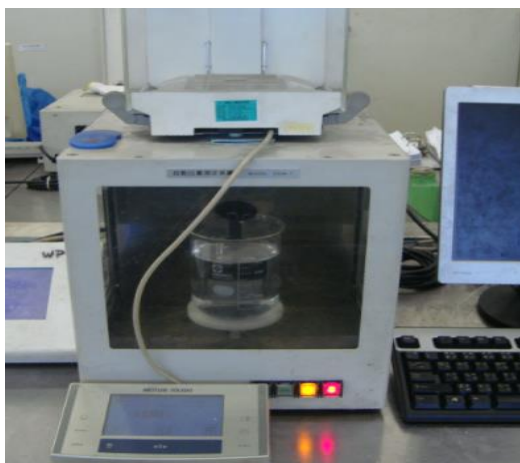
หลังจากการผสมยางคอมพาวด์ที่ได้ควรได้รับการตรวจสอบคุณภาพหรือทดสอบคุณสมบัติก่อนการนำไปผ่านกระบวนการขึ้นรูปต่าง ๆ ต่อไป เพราะการตรวจสอบคุณสมบัติของยางคอมพาวด์จะช่วยให้รู้ว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระหว่างการผสมหรือไม่ ส่วนใหญ่แล้ว

ยางคอมพาวด์ทุกแบบที่ได้รับการทดสอบเพื่อค้นหาว่าเกิดความแปรปรวนระหว่างแต่ละแบบมากน้อยเพียงใด อย่างไรก็ตาม ในกรณีการผสมยางมาสเตอร์แบบที่มีองค์ประกอบเพียงไม่กี่ชนิด คุณภาพของผลิตภัณฑ์นั้น ๆ ไม่มีความสำคัญมากนัก ผู้ทดสอบก็อาจปรับลดระดับความถี่ของการทดสอบลงได้ โดยทั่วไปคุณสมบัติของยางคอมพาวด์ต้องมีการทดสอบเป็นประจำได้แก่

1. ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่นของยางคอมพาวด์สามารถใช้บ่งบอกถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระหว่างการผสมได้ เช่น ในกรณีที่มีการเติมสารตัวเติมในปริมาณที่สูงเกินไป ค่าความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ก็จะเปลี่ยนไปเช่นกัน แต่ไม่สามารถใช้เป็นข้อบ่งชี้ความผิดปกติที่เกิดจากการเติมสารเคมีอื่น ๆ ที่เติมลงไปปริมาณน้อย ๆ ได้ เพราะแม้ว่าจะเกิดความผิดพลาดขึ้นจากการเติมสารเหล่านี้ ความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ก็จะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก วิธีการวัดความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว คือ การชั่งน้ำหนักของยางคอมพาวด์ทั้งในอากาศและในของเหลวที่ทราบความหนาแน่นที่แน่นอน (ปกตินิยมใช้น้ำกลั่น ยกเว้นในกรณีที่ยางคอมพาวด์มีความหนาแน่นน้อยกว่า 1 กรัม/ มิลลิลิตร (g/cm^3) ก็นิยมใช้อัลกอฮอล์แทน) โดยใช้เครื่องทดสอบในภาพที่ 2-5 ซึ่งเมื่อนำผลต่างของน้ำหนักที่วัดได้หารด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลว ก็จะได้ปริมาตรของยางคอมพาวด์ เมื่อทราบน้ำหนักและปริมาตรของยางคอมพาวด์ก็จะสามารถคำนวณหาค่าความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ได้โดยง่าย อย่างไรก็ตามวิธีวัดดังกล่าวไม่สามารถใช้ในการวัดความหนาแน่นของยางคอมพาวด์ที่มีรูพรุนอยู่ภายในได้ เพราะรูพรุนที่มีอยู่ภายในเหล่านี้จะทำให้น้ำหนักของยางเมื่อชั่งในของเหลวมีค่าต่ำกว่าความเป็นจริง จึงทำให้เกิดความผิดพลาดในการหาค่าความหนาแน่นขึ้นได้ ซึ่งในกรณีหลังนี้จำเป็นต้องวัดความหนาแน่นโดยใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ที่เรียกว่าเครื่อง Ultracycnometer

เครื่อง Ultracycnometer เป็นเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดความหนาแน่นของแข็ง เครื่องนี้จะทำการวัดปริมาตรของชิ้นตัวอย่างโดยอาศัยหลักการแทนที่ของของเหลวของอาร์คิมิดีส อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ใช้ในการทดสอบจะไม่ใช้ของเหลวแต่จะเป็นก๊าซที่มีขนาดโมเลกุลเล็ก เช่น ก๊าซฮีเลียม (He) ทั้งนี้ เนื่องจากก๊าซดังกล่าวมีขนาดเล็กมาก มันจึงสามารถแทรกเข้าไปในรูพรุนของชิ้นตัวอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ปริมาตรของชิ้นตัวอย่างที่วัดได้ด้วยเครื่องมือชนิดนี้จึงมีความถูกต้องสูง ด้วยเหตุนี้ เครื่อง Ultracycnometer จึงสามารถใช้วัดความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างทั้งที่มีรูพรุนและไม่รูพรุนอยู่ภายใน



ภาพที่ 2-5 เครื่องวัดความหนาแน่นของยางคอมพาวด์

2. ความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity)

ความหนืดมูนนี่เป็นคุณสมบัติพื้นฐานที่นิยมใช้ทดสอบคุณภาพของยางคอมพาวด์ เพราะความหนืดมูนนี่จะช่วยบ่งบอกถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม เช่น ในกรณีที่มีการเติมน้ำมันหรือสารตัวเติมมากเกินไป ความหนืดมูนนี่ของยางก็จะต่ำหรือสูงผิดปกติ เป็นต้น การวัดค่าความหนืดมูนนี่สามารถทำได้โดยใช้เครื่อง Mooney viscometer ในภาพที่ 2-6 โดยส่วนใหญ่จะทำการวัดที่อุณหภูมิ 100°C หรือ 125°C ก็ได้



ภาพที่ 2-6 เครื่องวัดความหนืดมูนนี่ (Mooney viscosity) ของยางคอมพาวด์

3. ลักษณะของการคงรูป (Cure characteristics)

การทดสอบการคงรูปของยางคอมพาวด์ที่นิยม คือ ใช้เครื่องทดสอบการคงรูป เช่น เครื่อง Oscillating disc rheometer (ODR) หรืออาจใช้เครื่องรุ่นใหม่ที่เรียกว่า Moving die

rheometer (MDR) เพราะกราฟที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องเหล่านี้ อาจช่วยบอกได้ว่าเกิดความผิดพลาดขึ้นในระหว่างที่ทำการผสมสารทำให้ยางคงรูปลงไปหรือไม่ เช่น หากผู้ผสมเคมีใส่สารกลุ่มที่ทำให้ยางคงรูปผิดชนิดหรือเกิดความผิดพลาดในการชั่งสารเคมีในกลุ่มนี้หรือสารเคมีในกลุ่มนี้อาจจะปลิวหายไปหรือเกาะติดอยู่ตามผนังของเครื่องผสมลักษณะการคงรูปของยางในเบชนั้น ก็จะแตกต่างจากเบชก่อน ๆ ก่อนข้างมากในกรณีนี้ผู้ผสมจำเป็นต้องกลับไปตรวจสอบอีกครั้งว่าความผิดปกติที่พบนั้นเกิดจากสาเหตุใดเพื่อที่จะได้ทำการปรับปรุงแก้ไขได้ทันที่

4. ระดับการแตกตัวของสารตัวเติม (Degree of dispersion)

การทดสอบระดับการแตกตัวของสารตัวเติมสามารถทำได้ค่อนข้างง่ายโดยการนำยางคอมพาวด์ปริมาณเล็กน้อยไปรีดผ่านเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ที่มีการตั้งระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งให้ต่ำที่สุด ซึ่งยางคอมพาวด์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกระดาษบาง ๆ จากนั้นก็ทำการยัดยางแผ่นนี้ออกและทำการตรวจสอบระดับการแตกตัวของสารตัวเติมด้วยตาเปล่าหรืออาจใช้กล้องหรือแว่นขยายที่มีกำลังขยายต่ำประมาณ 10-20 เท่า เข้าช่วย (ทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D2663) หากพบกลุ่มก้อนของสารตัวเติมหรือสารเคมีหรือพบบริเวณที่ยังคงเป็นยางใส ซึ่งแสดงถึงบริเวณที่ยังไม่เกิดการผสมกับสารเคมี หรือพบสิ่งแปลกปลอมต่าง ๆ ก็แสดงว่ายางคอมพาวด์เบชนั้นมีคุณภาพไม่ดี นอกจากการตรวจสอบโดยใช้สายตาแล้ว การใช้เครื่องทดสอบก็ได้รับความนิยมเช่นกัน เพราะให้ผลทดสอบที่ถูกต้องและไม่อาศัยความสามารถส่วนบุคคลของผู้ทดสอบ ลักษณะของเครื่องทดสอบแสดงในภาพที่ 2-7 ผลจากเครื่องทดสอบจะออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์การกระจายตัว โดยตัวเลขมากขึ้นการกระจายตัวจะดีขึ้น มีค่าสูงสุดที่ 100



ภาพที่ 2-7 เครื่องวัดระดับการแตกตัวของสารตัวเติมของยางคอมพาวด์

เครื่องจักรที่ใช้ในการผสมยางคอมพาวด์

1. เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง

การผสมยางมีจุดประสงค์สำคัญก็เพื่อให้องค์ประกอบต่าง ๆ โดยเฉพาะสารตัวเติมแตกตัวได้ดี (Dispersive mixing) และกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งเนื้อยาง (Distributive mixing) เครื่องผสมยางที่นิยมใช้กันมากในอดีต คือ เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังแสดงในภาพที่ 2-8 จากภาพจะเห็นว่าลูกกลิ้ง 2 ลูกจะหมุนเข้าหากัน แต่อัตราเร็วของการหมุนของลูกกลิ้งแต่ละลูกจะแตกต่างกันกล่าว คือ ลูกกลิ้งด้านหน้า หรือด้านที่ติดกับผู้ปฏิบัติงานจะหมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่ำกว่าลูกกลิ้งด้านหลังประมาณ 1.05 ถึง 1.20 เท่า ซึ่งอัตราส่วนของความเร็วของลูกกลิ้งนี้ (1 : 1.5 หรือ 1 : 1.20) เรียกว่า Friction ratio การที่ลูกกลิ้งทั้ง 2 ลูกหมุนด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันจะทำให้เกิดแรงเสียดทานขึ้นในบริเวณช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสอง นอกจากนี้ภายในบริเวณด้านในของลูกกลิ้งแต่ละลูกจะมีการเจาะรูให้เป็นช่องหรือโพรงสำหรับให้ของเหลว เช่น น้ำ หรือน้ำมัน ไหลผ่านเพื่อให้ความร้อนหรือระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการขัดสี



ภาพที่ 2-8 เครื่องผสมคอมพาวด์ชนิด 2 ลูกกลิ้ง

การผสมยางจะเริ่มต้นจากการนำยางไปรีดผ่านลูกกลิ้งหลาย ๆ รอบ แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตรงช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง จะทำให้โมเลกุลของยางถูกตัดขาด ส่งผลให้ความหนืดของยางลดลงจนสามารถติดกับลูกกลิ้งด้านหน้าได้ จากนั้นก็เริ่มทำการปรับระยะห่างระหว่างลูกกลิ้งทั้งสองเพื่อให้มียางบางส่วนเหลืออยู่ที่บริเวณเหนือช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง เรียกยางส่วนนี้ว่ายางแบงก์ (Bank) โดยปกติแล้วในระหว่างที่ทำการผสมยางแบงก์จะหมุนเวียนผ่านเข้าไปในช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งอยู่ตลอดเวลา องค์ประกอบต่าง ๆ ก็จะถูกเติมเข้าไปในยางโดยเริ่มจากสารเคมีต่าง ๆ ที่เป็นผงรวมถึงสารตัวเติมด้วยส่วนน้ำมันและสารทำให้หนืดก็จะถูกเติมหลังจากที่สารตัวเติมบางส่วนได้

ถูกเติมเข้าไปในยางรีบรียแล้ว หลังจากที่ได้เติมสารเคมีแต่ละชนิดลงไปไปยังผู้ผสมต้องการ กรีดยางที่เป็นแถบอยู่บนผิวด้านหน้าของลูกกลิ้งแล้วทำการสลับไขว้เพื่อให้สารเคมีที่เป็น องค์ประกอบต่าง ๆ กระจายตัวในยางได้อย่างสม่ำเสมอ และเมื่อสิ้นสุดการผสมก็ทำการรีด ยางคอมพาวด์ให้เป็นแผ่น จากนั้นก็ทำให้ยางเย็นลงสู่อุณหภูมิห้องก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปต่อไป

จุดเด่นหลักของเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง คือ แรงเฉือนที่เกิดขึ้นตรงช่องว่างระหว่าง ลูกกลิ้งมีค่าค่อนข้างสูง ส่วนประกอบต่าง ๆ ผสมเข้าไปในยางได้ดีและทำให้สารตัวเติม เกิดการแตกตัวที่ดี นอกจากนี้ในระหว่างการผสมนั้น ยางมีพื้นที่ผิวสัมผัสกับอากาศสูงมาก ดังนั้น การระบายความร้อนจึงเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ยางยังคงมีความหนืดสูงในระหว่าง การผสม อย่างไรก็ตามเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น

- 1.1 ใช้ระยะเวลาในการผสมค่อนข้างนาน
- 1.2 ประสิทธิภาพการผสมขึ้นอยู่กับทักษะของผู้ปฏิบัติการ
- 1.3 มีฝุ่นละอองและความสกปรกสูง
- 1.4 ควบคุมความสม่ำเสมอทางคุณภาพของการผสมในแต่ละครั้งได้ยาก

ด้วยเหตุนี้ปัจจุบันจึงนิยมใช้เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งสำหรับรีดยางให้เป็นแผ่นหรือ ใช้สำหรับผสมสารเคมีกลุ่มที่ทำให้บางคงรูปให้กระจายตัวเข้าไปในยางมาสเตอร์แบช มากกว่า ที่จะใช้ในการผสมยางกับสารตัวเติมชนิดต่าง ๆ

2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)

เครื่องผสมระบบปิดเป็นเครื่องผสมที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เพราะเครื่องผสมระบบปิด ได้ถูกออกแบบมาเพื่อแทนที่เครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง โดยทั่วไปเครื่องผสมระบบปิดประกอบด้วย ห้องผสมโรเตอร์ แรม และระบบหล่อเย็นหรือระบบให้ความร้อน ซึ่งระบบหล่อเย็นหรือระบบ ให้ความร้อนนี้จะถูกติดตั้งทั้งที่ผนังด้านในของห้องผสมและที่โรเตอร์ โดยการเจาะรูให้เป็นโพรง เพื่อให้ของเหลวที่เป็นตัวกลางไหลผ่านเพื่อช่วยระบายความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีใน ระหว่างการผสมหรือเพื่อให้ความร้อนแก่เครื่องผสม

สำหรับโรเตอร์ที่ใช้ในเครื่องผสมระบบปิดส่วนใหญ่จะมีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลาง ต่อความยาวเท่ากับ 1 : 1.4 และ 1 : 1.7 รูปร่างลักษณะของโรเตอร์ที่ใช้ก็มีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับ การออกแบบของบริษัทผู้ผลิต โดยทั่วไปแล้วโรเตอร์ทั้ง 2 ที่อยู่ในเครื่องผสมจะมีอัตราเร็วของ การหมุนที่ไม่เท่ากันทำให้มีอัตราส่วนการขัดสีที่สูง ยกเว้นในเครื่องผสมระบบปิดบางชนิดที่มี การออกแบบให้โรเตอร์ทั้งสองมีอัตราเร็วของการหมุนที่เท่ากัน การผสมหรือแรงเฉือนนอกจาก จะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์ทั้งสองแล้วยังเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่าง

โรเตอร์กับผนังด้านในของห้องผสมอีกด้วย แรงเฉือนที่บริเวณใดจะสูงหรือต่ำนั้นก็ขึ้นอยู่กับลักษณะการออกแบบและการจัดวางของโรเตอร์

2.1 เครื่องผสมระบบปิดแบบนัวร์ (Banbury-type internal mixer)

เครื่องแบบนัวร์เป็นเครื่องที่ใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน โรเตอร์ทั้งสองเครื่องผสมจะเป็นแบบ Non-interlocking หรือบางครั้งเรียกว่า Non-intermeshing คือ รัศมีการหมุนของโรเตอร์ทั้งสองจะไม่คาบเกี่ยวกัน โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องผสมระบบปิดชนิดนี้จะหมุนด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน โดยมีอัตราเร็วสัมพันธ์ของโรเตอร์ตั้งแต่ 1 : 1.1 ถึง 1 : 1.2 ขึ้นอยู่กับรุ่นของเครื่องได้มีการพัฒนาแบบโรเตอร์รุ่นใหม่ ๆ ที่สามารถทำให้โรเตอร์ทั้งสองหมุนด้วยความเร็วที่เท่ากันได้ เรียกโรเตอร์ชนิดใหม่นี้ว่า Synchronous technology (ST) โรเตอร์ในเครื่องที่ผสมแบบนี้ แรงเฉือนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณช่องว่างระหว่างปีกของโรเตอร์กับผนังของห้องผสม ส่วนพื้นที่ที่เหลือในห้องผสมนั้นมิใช่เพื่อให้ยางและองค์ประกอบอื่น ๆ ไหลหมุนเวียนไปมาได้สะดวก ซึ่งการไหลเวียนไปมาของยางจะช่วยทำให้องค์ประกอบต่าง ๆ กระจายตัวในยางได้ดียิ่งขึ้น

2.2 เครื่องผสมระบบปิดแบบอินเตอร์เมกซ์ (Intermix-type internal mixer)

โรเตอร์ของเครื่องผสมแบบนี้เป็นแบบ Intermeshing เครื่องผสมแบบอินเตอร์เมกซ์ได้รับการออกแบบมาเพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องผสมและโรเตอร์ได้ดีกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนัวร์ ดังนั้น จึงทำให้เครื่องผสมชนิดนี้มีประสิทธิภาพการผสมที่สูงมาก สารตัวเติมสามารถแตกตัวและกระจายในยางได้ดีและยางคอมพาวด์ที่ได้จากการผสมในแต่ละครั้งจะมีความแปรปรวนต่ำมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโรเตอร์แบบ Intermeshing นี้มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์ที่ผสมในแต่ละครั้งมีปริมาณค่อนข้างน้อยจึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมใช้กันมากในโรงงานอุตสาหกรรม

2.3 เครื่องผสมระบบปิดแบบที่ปรับระยะห่างระหว่างโรเตอร์ได้ (Variable intermeshing clearance-type internal mixer)

เครื่องผสมชนิดนี้มีลักษณะการจัดวางตัวของโรเตอร์เช่นเดียวกับเครื่องผสมอินเตอร์เมกซ์ กล่าวคือ รัศมีการหมุนของโรเตอร์ทั้งสองจะคาบเกี่ยวกัน แต่ภายในเครื่องผสมรุ่นนี้ ผู้ผสมสามารถทำการปรับเปลี่ยนระยะห่างระหว่างโรเตอร์ทั้งสองในระหว่างการผสมได้ ซึ่งการปรับเปลี่ยนระยะห่างดังกล่าวจะทำให้เกิดผลดี คือ ถ้าตั้งระยะห่างระหว่างโรเตอร์ให้สูงในช่วงแรกของการผสมก็จะทำให้การป้องกันยางและสารเคมีเข้าไปในเครื่องเป็นไปได้โดยง่าย และเมื่อยางสารเคมีทั้งหมดได้เข้าไปในเครื่องแล้ว การปรับลดระยะห่างระหว่างโรเตอร์ก็จะทำให้แรงเฉือนมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้สารตัวเติมเสริมแรงแตกตัวได้ดียิ่งขึ้น

นอกจากเครื่องผสมระบบปิดทั้ง 3 ชนิดที่ได้กล่าวมาแล้ว ยังมีเครื่องผสมระบบปิดชนิดอื่น ๆ อีกที่มีการจำหน่ายเชิงการค้า โดยเฉพาะเครื่องผสมระบบปิดที่มีการผลิตในประเทศแถบเอเชีย เช่น ประเทศเกาหลีหรือไต้หวัน เป็นต้น เครื่องผสมระบบปิดเหล่านี้มักมีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า เครื่องนวดยาง (Kneader) แม้ว่าเครื่องนวดยางจะมีหลักการทำงานคล้ายกับเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี คือ โรเตอร์ทั้งสองของเครื่องนวดจะหมุนแบบไม่คาบเกี่ยวกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากโรเตอร์ของเครื่องนวดยางมีรูปร่างที่แตกต่างจากโรเตอร์ของเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ดังนั้น เครื่องนวดยางส่วนใหญ่จึงมีประสิทธิภาพในการผสมที่ต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แม้ว่าเครื่องนวดยางจะให้ประสิทธิภาพการผสมที่ต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรี แต่เนื่องจากเครื่องนวดยางมีราคาต่ำกว่าเครื่องผสมระบบปิดแบบนบุรีมาก ดังนั้น เครื่องนวดยางจึงเป็นเครื่องผสมที่ผู้ประกอบการของไทยนิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน

ข้อดีของการใช้เครื่องผสมระบบปิด (เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง)

1. ยางคอมพาวด์ที่ผสมได้ในแต่ละครั้งมีคุณค่าค่อนข้างสม่ำเสมอ
2. ลดความแปรปรวนอันเนื่องมาจากทักษะของผู้ปฏิบัติงาน
3. สามารถผสมยางคอมพาวด์ในปริมาณมากในแต่ละครั้ง
4. ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมค่อนข้างต่ำ
5. การดูแลรักษาความสะอาดของโรงผสมยางสามารถทำได้โดยง่าย

ข้อเสียของการใช้เครื่องผสมระบบปิด (เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง)

1. การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ยาก ทำให้อุณหภูมิของยางคอมพาวด์ในระหว่างการผสมสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว
2. ใช้เวลานานในการทำความสะอาดเครื่องผสมแต่ละครั้ง
3. ต้องมีการลงทุนสูงเนื่องจากเครื่องผสมระบบปิดมีราคาแพง

ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการผสมกับคุณสมบัติของยางคอมพาวด์และยางคงรูป

ระดับของการผสม (State of mix) มีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติของทั้งยางคอมพาวด์และยางคงรูป โดยเฉพาะในยางที่มีการเติมสารตัวเติมเสริมแรง หากการผสมยางใช้ระยะเวลาในการผสมที่สั้นเกินไป ยางแบบนั้นก็จะมียกระดับของการผสมต่ำ ยางคอมพาวด์ที่ผสมได้จะมีความหนืดค่อนข้างสูงเพราะสารตัวเติมแตกตัวได้ไม่ดี ทำให้กระบวนการแปรรูปเป็นไปได้ด้วยความยากลำบาก นอกจากนี้ ยางคงรูปที่ได้ก็จะมีคุณสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ไม่ดี เมื่อเพิ่มระยะเวลาที่ใช้ในการผสมยางให้นานขึ้น ระดับของการผสมก็จะสูงขึ้น ยางคอมพาวด์ที่ได้ก็จะมิ

ความหนืดต่ำลงเพราะสารตัวเติมแตกตัวได้ดี กระบวนการแปรรูปก็จะทำได้ง่ายขึ้น และยางคงรูปที่ได้อีกก็จะมีคุณสมบัติทั้งเชิงกลและเชิงพลวัตที่ดีขึ้น

1. ความสัมพันธ์ระหว่างระดับของการผสมกับความหนืดของยางคอมพาวด์

สามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากระดับของการแตกตัวของสารตัวเติม ยางที่มีระดับของการผสมต่ำจะมีความหนืดสูงเนื่องจากการแตกตัวของสารตัวเติมยังค่อนข้างน้อย มีช่องว่างหรือรูพรุนอยู่ในโครงสร้างของสารตัวเติมมาก ยางที่แทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้จะถูกพิจารณาว่าเป็นส่วนหนึ่งของสารตัวเติมที่ไม่สามารถไหลได้แม้จะมีแรงจากภายนอกมากระทำ เรียกว่ายางส่วนที่แทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างเหล่านี้ว่า ยางส่วนที่ไม่สามารถไหลได้ (Immobilized rubber) ส่วนที่เป็นเมทริกซ์ ซึ่งโอบล้อมสารตัวเติมอยู่ด้านนอกนั้น จะเป็นยางส่วนที่เกิดการไหลเมื่อมีแรงจากภายนอกเข้ามากระทำ จึงเรียกกยางส่วนนี้ว่า ยางส่วนที่สามารถไหลได้ (Mobilized rubber) ที่ระดับของการผสมต่ำ ๆ ยางส่วนที่ไม่สามารถไหลได้จะมีปริมาณค่อนข้างสูงส่งผลทำให้ยางคอมพาวด์มีความหนืดที่สูงตามไปด้วย แต่เมื่อการผสมดำเนินต่อไป สารตัวเติมก็จะเกิดการแตกตัวมากขึ้น ทำให้แอกโกลเมอเรตขนาดใหญ่แตกตัวเป็นแอกโกลเมอเรตขนาดเล็กและเป็นแอกกรีเกตในที่สุด ซึ่งการแตกตัวของสารตัวเติมดังกล่าวจะทำให้เกิดการปลดปล่อยยางส่วนที่ไม่สามารถไหลได้ให้ออกมาสู่ระบบมากขึ้น จึงทำให้ความหนืดของยางคอมพาวด์ค่อย ๆ ลดลงตามระดับของการผสม หรือตามระยะเวลาของการผสม จนเข้าสู่ค่าคงที่ค่าหนึ่งเมื่อการผสมเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์

การขึ้นรูปและการคงรูปยางคอมพาวด์

การขึ้นรูปและการทำให้ยางคงรูปเป็นขั้นตอนที่สำคัญในกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ยาง หลังจากการผสมยางคอมพาวด์ที่ได้จะต้องถูกนำไปขึ้นรูปให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ตามต้องการก่อนที่จะนำไปคงรูปต่อไป โดยทั่วไปการขึ้นรูปยางคอมพาวด์ให้เป็นผลิตภัณฑ์สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 เทคนิคใหญ่ ๆ ได้แก่ การใช้แม่พิมพ์ (Moulding) การอัดรีด (Extrusion) และการใช้เครื่องรีดแบบหลายลูกกลิ้งหรือที่เรียกว่าเครื่องคาลเ็นเดอร์ (Calendar) ปัจจัยหลักที่เป็นตัวกำหนดเทคนิคการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ยางก็คือ รูปร่างของผลิตภัณฑ์นั่นเอง ตัวอย่าง เช่น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างคงที่ และมีความยาวมาก ๆ เช่น ท่อยางหรือยางขอบกระจกรถยนต์ก็จำเป็นต้องใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด แต่สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแผ่นเรียบและมีขนาดใหญ่และยาว เช่น สายพานลำเลียงก็ควรเลือกใช้เทคนิคการขึ้นรูปด้วยเครื่องคาลเ็นเดอร์ เป็นต้น

ในบางกรณี การขึ้นรูปและการคงรูปอาจเกิดขึ้นได้ในขั้นตอนเดียวกัน เช่น ในกรณีของการขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ แต่ในบางกรณีการขึ้นรูปและการคงรูปอาจแยกออกจากกันอย่างชัดเจน ดังเช่น ในกรณีของการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดหรือการใช้เครื่องกลึงเป็นต้น

การขึ้นรูปและคงรูปด้วยเทคนิคการอัดรีด (Extrusion)

การอัดรีดเป็นเทคนิคการขึ้นรูปที่ต้องอาศัยเครื่องอัดรีดเพื่ออัดให้ยางไหลผ่านหัวตาย (Die) ที่มีรูปร่างต่าง ๆ ผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด ต้องเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีรูปร่างของภาพตัดขวางเหมือนกันตลอดแนวความยาว รูปร่างของภาพตัดขวางของผลิตภัณฑ์จะเหมือนกับรูปร่างของตาย ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ขึ้นรูปโดยใช้เทคนิคนี้ ได้แก่ ท่อยาง ยางหุ้มสายเคเบิล ยางขอบกระจก และยางรัดของ เป็นต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดมีชื่อเรียกกันโดยทั่วไปว่าเครื่องเอ็กทูดเดอร์ (เอ็กทูดเดอร์) ซึ่งเครื่องเอ็กทูดเดอร์นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ชนิดที่อาศัยแรงอัดจากแรม (Ram) และชนิดที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (Screw) เครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดหลังเป็นชนิดที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน เนื่องจากยางที่ได้ออกมาหลังการขึ้นรูปด้วยการอัดรีดยังเป็นยางที่ไม่คงรูป ดังนั้น ยางที่ขึ้นรูปแล้วจึงยังไม่อยู่ในสภาพที่พร้อมจะถูกนำไปใช้งาน ผู้ผลิตจำเป็นต้องทำยางที่ผ่านการขึ้นรูปเหล่านี้ไปผ่านขั้นตอนการคงรูปก่อนที่จะนำไปใช้งาน

1. เครื่องเอ็กทูดเดอร์ที่อาศัยแรงอัดจากแรม (Ram เอ็กทูดเดอร์)

เครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดนี้ไม่เป็นที่นิยมใช้ในปัจจุบันเนื่องจากการทำงานของเครื่องเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ยางคอมพาวด์ที่ร้อนจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องอัด (Chamber) หลังจากนั้นแ่งอัดหรือแรมก็จะอัดยางให้ไหลผ่านหัวตายด้วยระบบไฮดรอลิก ยางที่ผ่านหัวตายออกมาจะเรียกว่าเอ็กทูดเดต (Extrudate) ข้อดีของเครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดนี้คือ เอ็กทูดเดตที่ได้จะมีความเสถียรทางรูปร่างสูง เครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดนี้จึงนิยมใช้สำหรับขึ้นรูปยางคอมพาวด์ให้เป็นพรีฟอร์ม คือ การเตรียมยางคอมพาวด์ให้มีรูปร่างที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปขึ้นรูปด้วยแม่พิมพ์ต่อไป

2. เครื่องเอ็กทูดเดอร์ที่อาศัยแรงอัดจากการหมุนของเกลียวหนอน (Screw เอ็กทูดเดอร์)

เครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดนี้ได้รับการพัฒนามาจากเครื่องเอ็กทูดเดอร์แบบแรกเพื่อให้สามารถป้อนยางคอมพาวด์เข้าสู่เครื่องได้อย่างต่อเนื่อง เครื่องเอ็กทูดเดอร์ชนิดนี้ประกอบด้วยเกลียวหนอนซึ่งหมุนอยู่ในบาริลหรือห้องอัด ซึ่งทั้งเกลียวหนอนและบาริลสามารถตั้งอุณหภูมิให้สูงหรือต่ำได้ตามต้องการที่ปลายด้านหนึ่งของบาริลจะเป็นที่ตั้งของหัวตายและปลายอีกด้านหนึ่งจะเป็นช่องสำหรับป้อนยางคอมพาวด์เข้าสู่เครื่อง ยางคอมพาวด์ที่ป้อนเข้าสู่เครื่องส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของแถบยาว หรือในบางครั้งอาจอยู่ในรูปของยางเม็ด การหมุนของเกลียวหนอนจะทำให้ยางคอมพาวด์ไหลเข้าไปในบาริลอย่างต่อเนื่อง ขณะที่ยางไหลจากด้านหลังไปยังด้านหน้า

ของเครื่อง แรงเฉือนที่เกิดขึ้นจะทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงขึ้น ส่งผลทำให้ยางมีความหนืดลดลงจนอยู่ในสภาพที่สามารถขึ้นรูปได้ง่าย การหมุนของเกลียวหนอนยังก่อให้เกิดแรงดันสำหรับดันยางคอมพาวด์เหล่านี้ให้ไหลผ่านหัวคายที่อยู่ทางด้านหน้าอีกด้วย ซึ่งแรงดันที่เกิดขึ้นนี้จำเป็นต้องรักษาให้คงที่เพื่อให้ได้เอ็กทูดเดอร์ที่มีความเสถียรทางรูปร่างสูง ส่วนขนาดของแรงดันที่เกิดขึ้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการหมุนเกลียวหนอนแล้ว ยังขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของเกลียวหนอน รวมถึงพื้นที่ภาพตัดขวางของรูคายด้วย

โดยทั่วไปแรงอัดหรือแรงดันจะสูงขึ้นเมื่อ Screw pitch ลดลง ดังนั้น ตัวเกลียวหนอนที่มี Pitch ขนาดเล็กและมีความเร็วรอบในการหมุนสูงก็จะก่อให้เกิดแรงดันที่สูงด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม สภาวะเช่นนี้อาจก่อให้เกิดปัญหาในเชิงปฏิบัติ เพราะความร้อนที่เกิดจากการขัดสีจะมีค่าสูงและไม่สม่ำเสมอจึงอาจทำให้ยางตายขณะที่อยู่ในบารเรลได้ ดังนั้น จึงได้มีการออกแบบเพื่อให้เครื่องทูดเดอร์มีแรงดันสูงเฉพาะที่บริเวณปลายด้านหน้าของบารเรลเท่านั้นเพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหายางตายและการไหลย้อนกลับของยาง การเพิ่มขึ้นของแรงดันภายในบารเรลนี้สามารถทำได้โดยการออกแบบรูปร่างของเกลียวหนอนให้เหมาะสม กล่าวคือ เมื่อพิจารณาจากปลายด้านหลังถึงปลายด้านหน้า ตัวเกลียวหนอนควรมีขนาดใหญ่ หรืออาจจะลดขนาดความกว้างของ Pitch ลง

โดยทั่วไปเกลียวหนอนควรมีความยาวที่สูงเพียงพอสำหรับให้ความร้อนและทำให้ยางนิ่มพร้อมทั้งก่อให้เกิดแรงดันที่สูงเพียงพอสำหรับการอัดเท่านั้น เพราะหากเกลียวหนอนมีความยาวมากเกินไปก็จะก่อให้เกิดผลเสียหลายอย่าง เช่น ทำให้สิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น และเพิ่มอัตราเสี่ยงต่อการเกิดยางตาย เพราะยางอาจจะมีอุณหภูมิสูงเกินไป

สำหรับเครื่องเอ็กทูดเดอร์แล้วความยาวของเกลียวหนอน (L) จะถูกกำหนดในรูปของจำนวนเท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) เช่น เครื่องเอ็กทูดเดอร์สำหรับใช้ในการผลิตดอกยางรถยนต์ (Tread tire) จะมีความยาวประมาณ 3 ถึง 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (3D-5D) ของเกลียวหนอน เป็นต้น

เครื่องเอ็กทูดเดอร์ที่มีความยาวตั้งแต่ 3D ถึง 6D เหมาะสำหรับทำให้ยางนิ่มเท่านั้น ไม่ได้ช่วยทำให้อุณหภูมิของยางสูงขึ้นมากนัก ดังนั้น ผู้ผลิตจึงต้องทำให้ยางคอมพาวด์มีอุณหภูมิสูงเพียงพอโดยการนำยางคอมพาวด์ไปรีดผ่านเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้งก่อนที่จะป้อนยางเข้าสู่เครื่องเอ็กทูดเดอร์ประเภทนี้จึงมีชื่อเรียกว่า เครื่องเอ็กทูดเดอร์แบบป้อนร้อน (Hot feed เอ็กทูดเดอร์) ส่วนเครื่องเอ็กทูดเดอร์อีกประเภทหนึ่งที่มีความยาวของตัวเกลียวหนอนค่อนข้างสูง คือ ตั้งแต่ 12D-24D จะมีชื่อเรียกว่า เครื่องเอ็กทูดเดอร์แบบป้อนเย็น (Cold feed เอ็กทูดเดอร์) ทั้งนี้ เนื่องจากผู้ผลิตสามารถนำยางที่เย็นป้อนเข้าสู่เครื่องได้โดยตรง นอกจากความยาวของเกลียวหนอนที่นิยมแสดงในรูปของเส้นผ่านศูนย์กลางแล้วความลึกของช่องเกลียวหนอนก็มักมีค่าเท่ากับ D/ 5 หรือ

D/ 6 และขนาดของ Pitch มักมีค่าเท่ากับ D ในระหว่างกระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กทรูดเตอร์ ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับผนังของบาริลควรมีค่าสูงในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับเกลียวหนอนควรมีค่าต่ำ ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ยางหมุนไปพร้อม ๆ กับเกลียวหนอน ด้วยเหตุนี้พื้นผิวของเกลียวหนอนควรได้รับการขัดให้เรียบเป็นมัน หรืออาจตั้งอุณหภูมิของบาริล เพื่อที่จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างยางกับเกลียวหนอนมีค่าต่ำ อย่างไรก็ตามไม่ควรตั้งค่าอุณหภูมิของเกลียวหนอนให้สูงเกินไปเพราะอาจทำให้ยางตายได้ และในทำนองกลับกันก็ไม่ควรตั้งอุณหภูมิของบาริลให้ต่ำเกินไปจนไม่สามารถทำให้ยางมีอุณหภูมิสูงเพียงพอสำหรับการขึ้นรูปได้

โดยทั่วไปเอ็กทรูดเดอร์ที่ออกจากรูตายมักมีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูตายเสมอ ขนาดของเอ็กทรูดเดอร์ที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลมาจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่า การบวมตัวของเอ็กทรูดเดอร์ (Extrudate swell) ทั้งนี้ เนื่องจากยางมีคุณสมบัติเป็น วิสโคอิลาสติก เมื่อ โมเลกุลของยางถูกบังคับให้ไหลผ่านตาย แรงดันหรือความเค้นที่เกิดขึ้นจะบังคับให้โมเลกุลของยางเกิดการจัดเรียงตัว (Orientation) ในทิศทางของความเค้นนั้น ๆ ซึ่งสภาวะเช่นนี้เป็นสภาวะที่ไม่เสถียรเมื่อยางไหลออกมาจากหัวตาย ความเค้นจากภายนอกก็จะหมดไป โมเลกุลของยางก็จะพยายามกลับสู่สภาวะเดิม ซึ่งเป็นสภาวะที่เสถียร กล่าวคือ โมเลกุลของยางจะหดตัวกลับมาพันกันอย่างอิสระเช่นเดิม การหดกลับของโมเลกุลยางซึ่งเกิดจากส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นของยางเช่นนี้จะทำให้ยางเกิดการหดตัวตามแนวยาวและเกิดการขยายตัวในแนวด้านข้าง จึงส่งผลทำให้เอ็กทรูดเดอร์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของตาย นอกจากขนาดของการบวมตัวจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นของยางแล้ว ยังขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ในการขึ้นรูปอีกด้วย ด้วยเหตุนี้ ก่อนการผลิตจริงจึงจำเป็นต้องมีการทดลองขึ้นรูปก่อน เพื่อเลือกขนาดของตายและหาสภาวะการผลิตที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเอ็กทรูดเดอร์ที่มีขนาดตามต้องการ

องค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นของยางนอกจากจะส่งผลโดยตรงต่อการเกิดการบวมตัวของเอ็กทรูดเดอร์แล้ว ยังส่งผลต่อความเรียบของผิวเอ็กทรูดเดอร์อีกด้วย โดยทั่วไปหากยางมีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นในสัดส่วนที่ต่ำเมื่อเทียบกับส่วนที่เป็นของเหลวที่สามารถไหลได้ ยางก็จะไหลได้ดี เอ็กทรูดเดอร์ก็จะเกิดการบวมตัวน้อยและมีพื้นผิวที่เรียบกว่ายางที่มีองค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นในสัดส่วนที่สูง ด้วยเหตุนี้ การออกสูตรยางจึงเป็นสิ่งสำคัญ ยางที่มีปริมาณสารตัวเติมสูงก็จะทำให้องค์ประกอบส่วนที่เป็นของแข็งยืดหยุ่นลดลง การขึ้นรูปก็จะเป็นไปได้ง่ายยิ่งขึ้น สารตัวเติมที่นิยมใช้ในการออกสูตรยางสำหรับการขึ้นรูปด้วยการอัดรีด ได้แก่ สารตัวเติมที่ไม่เสริมแรงและสารตัวเติมกึ่งเสริมแรง เป็นต้น ส่วนการเติมสารทำให้ยางนิ่ม เช่น น้ำมัน หรือการเติมสารช่วยในกระบวนการผลิต เช่น แฟกทิกซ์ นอกจากจะช่วย

ทำให้กระบวนการขึ้นรูปด้วยเครื่องเอ็กทูดเตอร์เป็นไปได้โดยง่ายแล้ว ยังมีส่วนช่วยทำให้ผิวของเอ็กทูดเตตเรียบสวยยิ่งขึ้นอีกด้วย

ยางคอมพาวด์ที่จะนำมาขึ้นรูปด้วยการอัดรีดควรปราศจากสิ่งปลอมปนต่าง ๆ เพราะสิ่งปลอมปนเหล่านี้อาจไปติดอยู่ที่บริเวณหัวคาย และทำให้เกิดเป็นร่องยาวอยู่บนพื้นผิวของเอ็กทูดเตตได้ นอกจากนี้สิ่งปลอมปนจากภายนอกแล้ว ควรต้องระวังการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อนของสารตัวเติมหรือสารเคมีบางประเภทในระหว่างการเตรียมยางคอมพาวด์อีกด้วย นอกจากนี้ปัญหาเรื่องสิ่งปลอมปนแล้ว สภาพะของการขึ้นรูปก็มีผลต่อรูปร่างของเอ็กทูดเตตด้วยเช่นกัน กล่าวคือ หากผู้ผลิตทำการขึ้นรูปโดยใช้อัตราเร็วในการผลิต ที่สูงเกินไป คือ หากยางถูกดันให้ไหลผ่านหัวคายด้วยความเร็วที่สูงมากเกินไป เอ็กทูดเตตที่ได้อาจเกิดการบิดเบี้ยว (Distortion) ของรูปร่างหรืออาจเกิดรอยตำหนิที่บริเวณพื้นผิวได้ เรียกปรากฏการณ์การบิดเบี้ยวของรูปร่างของเอ็กทูดเตตดังกล่าวว่า Melt fracture

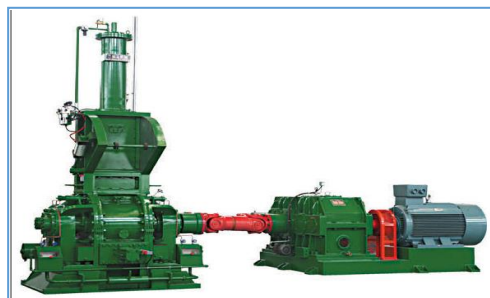
นอกจากปัญหาต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ยังมีปัญหาอื่น ๆ ที่อาจพบได้ในการขึ้นรูปยางด้วยเครื่องเอ็กทูดเตอร์ ซึ่งปัญหาเหล่านี้ ได้แก่

1. ปัญหายางเหนียวติดเกลียวหนอน ปัญหานี้เกิดจากยางนี้มามากเกินไป สามารถแก้ไขได้โดยการนำยางไปคลุกแป้งก่อนป้อนเข้าสู่เครื่อง
2. ปัญหารูพรุนในยางเนื่องจากไล่อากาศออกไม่หมด ปัญหานี้เกิดจากความดันไหลกลับ (Back pressure) ของยางไม่สูงเพียงพอ ดังนั้น เพื่อเลี่ยงปัญหาที่อาจจะเกิดจากหัวคายที่ใหญ่เกินไป พื้นที่ภาพตัดขวางของหัวคายควรมีค่าไม่เกิน $\frac{1}{4}$ ของพื้นที่ภาพตัดขวางของบารเรล
3. ปัญหาการฉีกขาดตามขอบของเอ็กทูดเตต ปัญหานี้อาจเกิดจากยางคอมพาวด์มีความแข็งแรงที่ไม่สูงเพียงพอ ควรแก้ไขปัญหานี้โดยการปรับปริมาณของสารตัวเติมเสริมแรงให้สูงขึ้น
4. ปัญหาพื้นผิวเอ็กทูดเตตที่หยาบอาจเกิดได้จากหลายสาเหตุ เช่น ยางได้รับการบดย่อย (Mastication) ไม่มากเพียงพอ สารเคมีโดยเฉพาะสารตัวเติมอาจแตกตัวและหรือกระจายตัวได้ไม่ดี เกิดปัญหาเรื่องจุดตาย (Dead spot) อุณหภูมิที่หัวคายต่ำเกินไป
5. ปัญหาเรื่องการย้อย (Sagging) ซึ่งหากพบในยางธรรมชาติก็ให้เติมแฟกทิลลงไปในปริมาณที่สูงขึ้น หรืออาจทำการปรับสูตรเคมียางเพื่อให้ยางมีอัตราเร็วในการคงรูปสูงขึ้น นอกจากนี้การผสมยางสไตรีนบิวตาไดอีน

เครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางรถยนต์

1. ขั้นตอนการผสมยางคอมพาวด์

เครื่องผสมยางเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการผลิต ยางคอมพาวด์ (ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และสารเคมี) จะถูกนำไปบดผสมกัน ภายในห้องผสมที่มีการควบคุม อุณหภูมิ ความดันและเวลาตามที่สูตรกำหนดไว้ ทั้งนี้ เพื่อให้ได้ยางที่มีคุณสมบัติทั้งทางด้านกายภาพและเคมีตามต้องการสูตรที่ใช้ในการผสมจะมีอยู่มากมายแตกต่างกันไปตามหน้าที่ของส่วนประกอบที่จะนำไปผลิต เครื่องผสมนี้เป็นเครื่องจักรที่ใช้เทคโนโลยีสูงควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ เครื่องผสมยางที่ได้รับความนิยมมาก คือ Banbury mixer ในภาพที่ 2-9 ซึ่งมีคุณสมบัติที่ช่วยในการผสมได้ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อเครื่องผสมระบบปิด



ภาพที่ 2-9 ส่วนประกอบของเครื่อง Banbury mixer

2. ขั้นตอนการรีดยางคอมพาวด์

ยางคอมพาวด์ที่ถูกผสม โดยเครื่อง Banbury mixer มาแล้วจะถูกส่งต่อมายังเครื่องรีด เพื่อทำการรีดยางคอมพาวด์ ออกเป็นแผ่นเพื่อให้ง่ายกับการใช้งาน และช่วยในการระบายความร้อนของยาง เครื่อง Two roll mill หรือ Twin screw calender ในภาพที่ 2-10



ภาพที่ 2-10 ส่วนประกอบของเครื่องรีดยางชนิด Two roll mill และ Twin screw calender

3. การทำ Carcass และ Breaker

จะใช้เครื่อง Calendar ในการขึ้นรูปโดยจะนำผสมยางคอมพาวด์ให้เกิดความร้อนโดยใช้ Two roll mill แล้วส่งยางเข้าสู่เครื่อง Calendar เพื่อเคลือบยางเข้ากับผ้าใบหรือเส้นลวดลักษณะของเครื่อง Calendar ดังแสดงในภาพที่ 2-11 เมื่อผ่านการเคลือบด้วยยางแล้ว Carcass และ Breaker จะถูกส่งไปตัดให้ได้ขนาดตามต้องการก่อนที่จะส่งไปขึ้นรูปเป็นเส้นยางต่อไป



ภาพที่ 2-11 เครื่อง Calendar

4. การทำส่วนดอกยางและแก้มยาง

การผลิตดอกยางใช้เครื่องเอ็กทรีเตอร์ ในการผลิต โดยการเอ็กทรีเตอร์ยางคอมพาวด์ผ่าน Die plate ที่มีขนาดตามที่ต้องการ การผลิตส่วนของแก้มยางก็มีวิธีการผลิตแบบเดียวกันเครื่องจักรที่ใช้จะเป็นชนิดต่อเนื่องดังภาพที่ 2-12



ภาพที่ 2-12 Tread เอ็กทรีเตอร์และ Cooling conveyor

5. การทำ Bead และ Apex

วงขอบล้อ (Bead) คือ ส่วนของยางที่ติดอยู่กับกระทะล้อรถยนต์ ทำขึ้นมาจากเครื่องสร้างวงขอบล้อ (Bead forming machine) โดยการนำเส้นลวดด้วยเนื้อยางให้เป็นแถบแล้วนำมา

ขดให้เป็นวงหลาย ๆ ชั้นตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ดังนั้น วงขอบล้อจึงประกอบไปด้วยเนื้อและเส้นลวด (Wire) หลังจากได้ Bead แล้วจะประกอบเข้ากับ Apex ซึ่งผลิตมาจากเอ็กทรูเดอร์ ดังแสดงในภาพที่ 2-13



ภาพที่ 2-13 เครื่องผลิต Bead และ Apex เอ็กทรูเดอร์

6. การขึ้นรูปยางเป็น Green tire

เป็นการนำส่วนประกอบทั้งหมดที่อยู่ในโครงสร้างของยางมาประกอบกันเป็น Green tire โดยใช้ Tire building machine ก่อนที่จะส่งต่อไปเพื่อทำการอบยางให้กลายมาเป็นยางรถยนต์ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากยางรถยนต์ประกอบด้วยส่วนประกอบจำนวนมาก ลักษณะของเครื่องผลิต Green tire แสดงในภาพที่ 2-14



ภาพที่ 2-14 เครื่องผลิต Green tire

7. การอบยาง (Curing)

เป็นการทำให้ Green tire กลายเป็นยางรถยนต์โดยให้ความร้อนและความดัน ดังภาพที่ 2-15 ตามระยะเวลาที่กำหนดในขั้นตอนนี้นักงานจะเป็นผู้นำโครงยางดิบเข้าสู่เครื่องอบยาง (Curing

press) ซึ่งการอบยาง และขบวนการวัลคาไนซ์ จะทำให้ยางที่เหนียวและมีความยืดหยุ่นมากเกินไป เปลี่ยนเป็นยางที่มีความแข็ง ลดความยืดหยุ่นให้น้อยลง และให้มีความทนทานมีอายุการใช้งานที่ยาวนานในการอบยางจะต้องมีการควบคุมเวลา อุณหภูมิ ความดัน และการไหลของน้ำร้อน ให้พอเหมาะที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ที่สมบูรณ์



ภาพที่ 2-15 เครื่องอบยาง

8. ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพ

เป็นการตรวจสอบคุณภาพภายนอกและค่าความเสถียรของยางโดยใช้เครื่องจักรในการตรวจยางที่อบเสร็จแล้วทุกชนิดจะต้องผ่านการตรวจสอบทุกเส้น ก่อนที่จะส่งเข้าคลังสินค้า และลูกค้าต่อไป การตรวจสอบจะครอบคลุมถึงรูปลักษณะ และตำหนิต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับตัวยาง รวมทั้งทำการคัดแยกส่วนที่เป็นยางเสียออกไป นอกจากนี้ยางเรเดียลทุกเส้นจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องวัดค่าแรง (Force variation machine) ในภาพที่ 2-16 เพื่อตรวจสอบค่าแรงที่กระทำกับยางขณะใช้งานว่ามีค่าต่ำกว่าที่กำหนดหรือไม่ ถ้าหากมีค่าแรงที่กระทำค่าใดค่าหนึ่งสูงกว่าที่กำหนด จะต้องนำค่าที่บันทึกด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์มาวิเคราะห์หาสาเหตุ และทำการแก้ไขปรับปรุงโดยวิศวกรที่รับผิดชอบทางด้านค่าความสม่ำเสมอของคุณภาพ (Uniformity) ส่วนยางที่มีค่าแรงกระทำเกินขอบเขตที่กำหนดจะถูกส่งจำแนกเป็นยางเสีย



ภาพที่ 2-16 เครื่องตรวจสอบคุณภาพยางเส้น

การออกแบบการทดลองแบบ Factorial

แนวทางในการออกแบบการทดลอง

ขั้นตอนในการออกแบบการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 7 ขั้นตอนด้วยกัน

1. การทำความเข้าใจถึงปัญหา (Recognition of and statement of the problem)

การทำความเข้าใจถึงปัญหาเป็นขั้นตอนแรกของการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยมุมมองจากหลาย ๆ องค์ประกอบด้วยกันเพื่อให้เข้าใจประเด็นปัญหาได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งการทำความเข้าใจปัญหาที่ดีจะทำให้ขั้นตอนต่อไปสามารถทำได้ดีและจะส่งผลต่อการแก้ไขปัญหาที่ถูกต้องมากขึ้น

2. การเลือกตัวแปรผลตอบแทน (Selection of response variable)

เป็นการเลือกตัวแปรที่จะแสดงผลของการทดลองออกมา ซึ่งในบางครั้งตัวแปร 1 ตัว อาจส่งผลต่อตัวแปรผลตอบแทนหลายค่า ดังนั้น การเลือกตัวแปรผลตอบแทนที่ถูกต้องจะช่วยการวิเคราะห์ผลการทดลองทำได้ถูกต้องมากขึ้น รวมถึงวิธีในการวัดผลของตัวแปรผลตอบแทนนั้น ๆ ด้วย ทั้งหมดต้องกำหนดให้เรียบร้อยก่อนการทดลองจะเริ่ม

3. การเลือกปัจจัย ระดับและขอบเขต (Choice of factors, level, and range)

การคัดเลือกปัจจัยสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน หนึ่งในนั้น คือ การใช้แผนภูมิเหตุและผล (Cause and effect diagram) หรือรู้จักกันในนามแผนภูมิก้างปลา (Fish bone diagram) โดยปกติจะใช้ 4M 1E ในการคัดเลือกปัจจัยที่เหมาะสมต้องอาศัยความรู้ทางด้านกระบวนการเป็นอย่างดี เพื่อให้สามารถหา Factor ที่เกี่ยวข้องได้ถูกต้อง การคัดเลือกปัจจัยอาจใช้วิธีการ Factor screening โดยการใช้ระดับปัจจัยสูงสุดและต่ำสุด เพื่อกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหลังจากนั้นจึงค่อยปรับระดับของปัจจัยลง เพื่อให้ผลที่เข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น

4. เลือกรูปแบบการออกแบบการทดลอง

การเลือกรูปแบบการออกแบบการทดลองรวมถึงการกำหนดขนาดของตัวอย่าง (Number of replicate) รวมถึงการเลือกรูปแบบการรัน Order ทั้งหมดนี้สามารถใช้ Computer ในการกำหนดได้ทั้งหมดซึ่งรวมถึงการ Random ด้วย ในการเลือกรูปแบบการออกแบบการทดลอง เราจำเป็นต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์หลักของการทดลองอยู่เสมอเพื่อให้การเลือกรูปแบบการออกแบบการทดลองสามารถตอบสนองต่อวัตถุประสงค์ได้

5. ทำการทดลอง

การดำเนินการทดลองต้องติดตามอย่างระมัดระวังเพื่อให้การดำเนินการทดลองเป็นไปตามแผนการที่วางไว้ หากเกิดความผิดพลาดในขั้นตอนการดำเนินการทดลองจะทำให้ผลการทดลองที่เกิดขึ้นไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ผลต่อได้ ดังนั้น ขั้นตอนนี้จึงเป็นหัวใจของความสำเร็จในการออกแบบการทดลอง

6. วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติเป็นอีกขั้นตอนที่มีความสำคัญต่อการออกแบบการทดลอง เพราะเป็นขั้นตอนที่จะหาความสัมพันธ์หรือผลของปัจจัยแต่ละตัวที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ว่ามีระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ อย่างไร ดังนั้น การเลือกเครื่องมือในการวิเคราะห์รวมไปถึงความรู้ของผู้ที่วิเคราะห์ผลล้วนมีความสำคัญในระดับที่สูง

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การสรุปผลเป็นการนำข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์แล้วมาตัดสินใจ รวมถึงสรุปความมีนัยสำคัญของปัจจัยแต่ละตัว รวมไปถึงระดับของปัจจัยนั้นที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง การสรุปผลหากผ่านขั้นตอนการยืนยันผลการทดลองก่อนที่จะสรุปผลย่อมทำให้เกิดความน่าเชื่อถือมากขึ้น

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล

การทดลองส่วนมากในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป การออกแบบเชิง Factorial จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยจะพิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ Level ทั้งหมดในการทดลองนั้น ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึง ผลอันเกิดจากการเปลี่ยนระดับของปัจจัยนั้นที่มีต่อตัวแปรผลตอบ (Response) ซึ่งจะเรียกว่าผลหลัก (Main effect)

การออกแบบการทดลองเชิง Factorial มีประสิทธิภาพมากกว่าการทดลองทีละปัจจัย และยังสามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรืออันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วย ซึ่งทำให้เราสามารถวิเคราะห์ผล และหลีกเลี่ยงการสรุปที่ผิดพลาด นอกจากนี้ยังสามารถประเมินระดับของแต่ละปัจจัยได้ด้วย

การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของที่ได้จากกลุ่มตัวอย่าง ตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไปโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มและความแปรปรวนภายในกลุ่ม ความแปรปรวนระหว่างกลุ่มจะเกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่าง ๆ หากค่าแตกต่างกันมาก

ค่าความแปรปรวนจะมากตามไปด้วย ส่วนค่าความแปรปรวนภายในกลุ่มจะบ่งบอกถึงการกระจายตัวของข้อมูลว่ามีการกระจายตัวมากหรือน้อย

แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอยเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบสนอง ซึ่งจะทำได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดของแต่ละช่วงปัจจัยโดยการประมาณค่าตัวแปร

โปรแกรมวิซวลเบสิก

วิซวลเบสิกเป็นภาษาคอมพิวเตอร์ (Programming language) ที่พัฒนาโดยบริษัท ไมโครซอฟท์ โดยตัวภาษามีรากฐานมาจากภาษา Basic ซึ่งย่อมาจาก Beginner's All purpose symbolic instruction ภาษา Basic มีจุดเด่น คือ ผู้ที่ไม่มีพื้นฐานเรื่องการเขียนโปรแกรมเลยก็สามารถเรียนรู้และนำไปใช้งานได้เมื่อเทียบกับภาษาอื่น ๆ เช่น ภาษา C ปาสคาล ฟอรัแทรน เป็นต้น ไมโครซอฟท์ได้พัฒนาโปรแกรมภาษา Basic มาเป็นเวลานานตั้งแต่ภาษา Mbasic และ Quickbasic ซึ่งได้ติดตั้งมาพร้อมกับระบบปฏิบัติการ MS DOS โดยใช้ชื่อว่า QBASIC ในอดีตโปรแกรมภาษาเหล่านี้ล้วนทำงานใน Text mode คือ เป็นตัวอักษรล้วน ๆ จนกระทั่งเมื่อระบบปฏิบัติการ Windows ได้รับความนิยมทางไมโครซอฟท์จึงพัฒนาภาษา Basic จนกลายเป็นวิซวลเบสิก

วิซวลเบสิกเป็นภาษาที่เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ในการเขียนโปรแกรมนั้นเนื่องจากวิซวลเบสิกมีข้อดีหลายประการ คือ

1. ง่ายต่อการเรียนรู้เหมาะสำหรับผู้เริ่มต้น ทั้งในเรื่องไวยากรณ์ของภาษาเองและเครื่องมือการใช้งาน
2. ความนิยมของตัวภาษา โดยอาจกล่าวได้ว่าภาษา Basic นั้นเป็นภาษาที่คนเรียนรู้และใช้งานมากที่สุดในประวัติศาสตร์ของคอมพิวเตอร์
3. การพัฒนาอย่างต่อเนื่อง การปรับปรุงประสิทธิภาพในด้านของตัวภาษาและความเร็วของการประมวลผล และในเรื่องของความสามารถใหม่ ๆ เช่น การติดต่อกับระบบฐานข้อมูล การเชื่อมต่อกับเครือข่ายอินเทอร์เน็ต
4. ผู้พัฒนาสำคัญของวิซวลเบสิก คือ บริษัท ไมโครซอฟท์ ซึ่งจัดว่าเป็นยักษ์ใหญ่ของวงการคอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน เราจึงสามารถมั่นใจได้ว่า วิซวลเบสิก จะยังมีการพัฒนาปรับปรุงและคงอยู่ไปอีกนาน

การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อฮาร์ดแวร์

วิซวลเบสิก กับฮาร์ดแวร์จะเป็นสิ่งที่ไกลกันมาก ด้วยความที่ วิซวลเบสิก เป็นโปรแกรมที่เน้นการสร้างแอปพลิเคชันเพื่อติดต่อกับผู้ใช้งานเป็นหลักทำให้ละเลยส่วนการติดต่อที่เน้นการเชื่อมโยงกับอุปกรณ์และฮาร์ดแวร์อื่น ๆ ไปแต่ก็ยังมีคนนำเอาวิซวลเบสิก มาใช้งาน ซึ่งก็มาจากความง่ายในการเขียนโปรแกรม และผลงานออกมารวดเร็วสวยงามน่าใช้งาน ในอดีตนั้น การเขียนโปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์นั้นมีความเฉพาะตัวเป็นอย่างมาก เป็นเรื่องยากที่จะนำเอาความรู้จากการติดต่อควบคุมอุปกรณ์ตัวหนึ่งไปใช้งานกับอีกตัวหนึ่งได้ ทั้งนี้ เพราะการเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อและควบคุมในอดีตนั้นใช้งานผ่านภาษา Assembly ซึ่งเป็นภาษาที่ผูกติดกับฮาร์ดแวร์มาก แม้จะให้ผลการทำงานดีเยี่ยมแต่กลับทำให้การเขียน โปรแกรม แก๊ซโปรแกรมทำได้ยากมากเพราะ Assembly เป็นภาษาที่เข้าใจยากมากและเป็นภาษาที่ไม่เป็นโครงสร้างต่อมาเราได้ใช้งานภาษาโปรแกรมยุคใหม่ ๆ เพื่อใช้ในการเขียน โปรแกรมไม่ว่าจะเป็นภาษา C, Pascal ซึ่งภาษา C จะได้รับความนิยมสูงสุด เพราะให้ประสิทธิภาพการทำงานใกล้เคียงกับ Assembly มาก และการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา C นั้นทำความเข้าใจได้ง่ายกว่า

ในปัจจุบันแนวการเขียน โปรแกรมส่วนใหญ่จะใช้ Visual programming ทำให้โปรแกรมภาษาอย่าง วิซวลเบสิก, C++, Delphi ได้รับความนิยมอย่างมาก ทำให้มีความพยายามหลายครั้งที่จะนำเอาภาษาโปรแกรมยุคใหม่ ๆ เหล่านี้มาใช้ในการติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ แม้ว่าในระยะเริ่มแรกนั้นจะทำได้ลำบากและไม่สามารถใช้งานได้ครบถ้วนทั้งหมด แต่ปัจจุบันความสามารถต่าง ๆ ได้รับการพัฒนาให้ครอบคลุมเกือบทั้งหมดแล้วเนื่องจากวิซวลเบสิกเองอาจจะมีความสามารถไม่ครอบคลุมการทำงานทั้งหมดทำให้ในงานบางอย่างต้องพึ่งพาความสามารถของ Windows โดย Windows ก็ได้เตรียมฟังก์ชันชนิดต่าง ๆ ไว้รองรับการทำงานมากมายนับพันฟังก์ชัน ซึ่งเราเรียกฟังก์ชันเหล่านั้นว่า Windows API

Windows API ย่อมาจาก Windows application programming interface เป็นชุดฟังก์ชันที่พร้อมให้ใช้งานทำให้เราไม่ต้องเขียนโค้ดยาว ๆ เพื่อทำงานที่ซับซ้อนซึ่ง Windows ทำได้ดีกว่า และเร็วกว่า เช่น ถ้าต้องการทราบว่า เนื้อที่ว่างในฮาร์ดดิสก์เหลือเท่าไร ก็สามารถใช้ฟังก์ชัน Get disk free space เพียงฟังก์ชันเดียวก็ได้คำตอบ เป็นต้น ฟังก์ชันของ Windows API นั้นมีนับพันฟังก์ชัน แบ่งออกเป็นหมวดหมู่ตามประเภทของการใช้งาน เช่น API ด้านเน็ตเวิร์ค API ด้านกราฟิก API ด้านการพิมพ์ เป็นต้น การใช้งาน Windows API นั้นทำให้เราได้มีวิธีการใช้งาน Windows ที่มี

มาตรฐานเดียว ช่วยลดเวลาการพัฒนาฟังก์ชันขึ้นมาเอง แถมยังลดความผิดพลาดจากการเรียกใช้งานฮาร์ดแวร์โดยตรงอีกด้วย โดย Windows API จะอยู่ตรงกลางระหว่างแอปพลิเคชันกับฮาร์ดแวร์ และระบบปฏิบัติการ Windows นอกจากนี้การใช้งานฟังก์ชันของ Windows API ยังมีข้อดีอีก คือไม่ต้องกังวลเรื่องของการเปลี่ยนแปลงเวอร์ชัน Windows มากนัก เพราะไม่ว่าจะใช้ Windows ต่างเวอร์ชันก็ยังใช้ชื่อเช่นเดิม แต่การทำงานภายในเปลี่ยนไปตามความสามารถที่เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เราไม่จำเป็นต้องติดตามความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นมากนัก ยกเว้นว่าจะมีการยกเลิกการใช้งานในฟังก์ชันใดฟังก์ชันหนึ่ง

เนื่องจาก วิชาลเบสิก นั้นไม่ได้เน้นการติดต่อกับฮาร์ดแวร์ทำให้มีคอนโทรลที่เกี่ยวข้องกับการติดต่อ และควบคุมฮาร์ดแวร์อยู่ค่อนข้างน้อย สำหรับคอนโทรลมาตรฐานตัวเดียวที่มีมาให้สำหรับติดต่อฮาร์ดแวร์ ก็คือ MS Comm ซึ่งเน้นการติดต่อกับพอร์ตแบบอนุกรม แต่พอร์ตขนาดนั้นไม่มีคอนโทรลที่ใช้งานได้โดยตรงต้องหามาเพิ่มเติม นอกเหนือจากการหาคอนโทรลมาใช้งานเพื่อติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์แล้วยังมีอีกแนวทางหนึ่ง คือ การใช้งานฟังก์ชันควบคุม เหมือนกับที่เราใช้งานฟังก์ชันในภาษา C เพื่อติดต่อ สำหรับการเขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมอุปกรณ์ภายนอกผ่านทางพอร์ตขนาน (Parallel port) หรือพอร์ตเครื่องพิมพ์ เรียกอีกอย่างเป็นภาษาช่างว่า การ Interface กับฮาร์ดแวร์ ซึ่งวิชาลเบสิกก็สามารถทำได้ใกล้เคียงกับการใช้งานในภาษา C หรือ Assembly แล้วแต่การเขียนโปรแกรมควบคุมอุปกรณ์ภายนอกนั้น วิชาลเบสิก ไม่มีฟังก์ชันสำหรับติดต่อกับพอร์ตขนาน ได้โดยตรงแต่สามารถเขียนโปรแกรมให้ติดต่อกับพอร์ตได้โดยใช้ฟังก์ชันที่เตรียมมาในรูปแบบของ API (Application programming interface) การประยุกต์ใช้การเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อ และควบคุมฮาร์ดแวร์หลาย ๆ คนอาจสงสัยว่าการเขียนโปรแกรมเพื่อติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์นั้นทำอะไรได้บ้าง เพราะเรื่องของฮาร์ดแวร์นั้นเป็นเรื่องที่สลับซับซ้อน ซึ่งจริง ๆ ก็เป็นเช่นนั้น แต่มันก็ไม่ได้ยากจนเกินไป แถมการประยุกต์ใช้งานยังมีหลากหลายรูปแบบจนเราอาจคิดไม่ถึง

การประยุกต์ใช้ในระบบรักษาความปลอดภัย ตัวอย่างง่าย ๆ เราสามารถเขียน โปรแกรมเพื่อรักษาความปลอดภัยภายในบ้านได้โดยการเขียนโปรแกรมรับข้อมูลจากอุปกรณ์รักษาความปลอดภัยต่าง ๆ ผ่านทางพอร์ตขนาน ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ว่านี้ ก็คือ

1. Sensor ตรวจจับควัน ที่มีสัญญาณ Output แบบหน้าสัมผัส
2. Sensor ตรวจจับความร้อน ที่มีสัญญาณ Output แบบหน้าสัมผัส
3. Sensor ตรวจจับก๊าซพิษ ที่มีสัญญาณ Output แบบหน้าสัมผัส
4. สวิตช์แม่เหล็กใช้ติดตามขอบประตูและหน้าต่าง เพื่อป้องกันผู้บุกรุกเข้ามายามวิกาล

เป็นต้น

ลักษณะต่อการใช้งาน

ตัวอย่างระบบงานในโรงงานอุตสาหกรรม

ในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีเครื่องจักร และเซ็นเซอร์จำนวนมากในการควบคุมนั้น เราสามารถเขียนโปรแกรมเพื่อดึงข้อมูลจาก PLC เพื่อที่จะนำมาแสดงผลขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรต่าง ๆ ผ่านพอร์ตอนุกรมของเครื่องคอมพิวเตอร์

ตัวอย่างระบบงาน Monitoring ของระบบวัดต่าง ๆ แต่ถ้าเป็นรูปแบบของการประยุกต์ใช้งานที่บ่อยที่สุดน่าจะเป็นการ Monitor คุระบบต่าง ๆ ซึ่งจะขอยกตัวอย่าง ดังนี้

1. ระบบแสดงผลของเครื่อง Inspection ต่าง ๆ เป็นพื้นฐานของการแสดงผลผ่านกราฟต่าง ๆ ที่เราได้นำเอาเครื่องมือวัดไปติดตั้งไว้ การแสดงผลกราฟจะอ่านง่าย ตัดสินใจได้แม่นยำ จำเป็นจะต้องเขียนโปรแกรมได้อย่างถูกต้อง สวยงาม และสะท้อนความเป็นจริงต่าง ๆ ได้อย่างถูกต้อง
2. ระบบแสดงผลของเกจต่าง ๆ ในระบบเครื่องมือวัด ระบบที่ต้องอาศัยการวัดค่าต่าง ๆ ประกอบการตัดสินใจนั้น จำเป็นที่จะต้องนำเอาข้อมูลจากเซ็นเซอร์ ซึ่งต่อผ่านพอร์ตต่าง ๆ เข้ามาประมวลผล และแสดงผลให้ผู้ควบคุมสามารถเลือกทำงานได้อย่างถูกต้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

พลวริน พลยิ่ง (2551) การพัฒนาเทียนหอมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองโดยใช้วิธี Combined mixture-process design ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของเทียนหอม (ใช้น้ำตาเทียนเป็นตัวตอบสนอง) ปัจจัยที่สนใจศึกษามี 7 ปัจจัย คือ พาราฟิน พีโอแวกซ์ สเตียริกแอซิด น้ำมันหอม ไมโครแวกซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทียนและขนาดไส้เทียน เพื่อหาระดับที่เหมาะสม ผลการศึกษาพบว่า พาราฟิน 74.43% พีโอแวกซ์ 9.95% สเตียริกแอซิด 2.68% น้ำมันหอม 4.97% ไมโครแวกซ์ 7.98% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทียน 15.00 mm และขนาดไส้เทียน 1.99 mm ให้ผลต่อตัวแปรตอบสนอง คือ ให้น้ำตาเทียนน้อยที่สุด และทำให้ปริมาณน้ำตาเทียนลดลง 96%

สุพลชัย ทองไชย (2548) ศึกษาตัวแปรควบคุมเครื่องเอ็กทราเตอร์ ที่มีผลต่อคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์พีวีซีคอมปาวด์ โดยใช้วิธี Full factorial design 2^k ศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสี ซึ่งมีค่าสี L^* ค่าสี a^* และค่าสี b^* เพื่อนำมาใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ของ

กระบวนการผลิตพีวีซีคอมปาวด์ด้วยเครื่องอัดรีดพลาสติก พบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงต่อค่าสี ได้แก่ อุณหภูมิของกระบอกสกรู ความเร็วรอบของสกรูบด และความเร็วรอบของสกรูป้อน จากผลการทดลองได้ช่วงปรับตั้งค่าที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของกระบอกสกรูมีค่าตั้งแต่ 182 ถึง 188 °C ความเร็วรอบของสกรูบดมีค่าตั้งแต่ 150 ถึง 178 รอบต่อนาที และความเร็วรอบของสกรูป้อนมีค่าตั้งแต่ 30 ถึง 39 รอบต่อนาที จากการเสนอแนวทางในการควบคุมปัจจัยป้อนเข้าสามารถลดของเสียของลักษณะสีจาก 0.377% เหลือ 0.173%

ประเสริฐ ชุมปัญญา (2554) การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน โดยใช้วิธี Full factorial design 2^k ศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นรูปพลาสติกด้วยความร้อน (Plastic thermoforming) หาค่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนที่เหมาะสมที่จะทำให้ความหนาของวัตถุดิบลดลงไม่เกิน 15% จากผลการทดสอบพบว่าอุณหภูมิและระยะเวลาในการให้ความร้อนมีผลทำให้ความหนาของชิ้นงานมีความแตกต่างกัน และที่อุณหภูมิ 250 °C ระยะเวลาให้ความร้อน 29 วินาที จะให้ค่าความหนาเฉลี่ยของชิ้นงานอยู่ที่ 0.421 mm ซึ่งคิดเป็นความหนาเฉลี่ยที่ลดลงจากความหนาเริ่มต้น (0.48) เพียง 12.29%

พีรพรรณ วีรศวิน (2547) การพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมติดตามผลการผลิตแบบต่อเนื่องและการสอบกลับได้ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต ศึกษาการปรับใช้โปรแกรมวิซวลเบสิก เพื่อติดตามผลการผลิตเนื่องจากโปรแกรมเดิมไม่สามารถเชื่อมต่อกับส่วนของเครื่องจักรได้ ซึ่งทำให้สามารถทราบผลการผลิตและติดตามของเสียที่เกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่องและสามารถสอบกลับผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย จึงทำให้สามารถส่งมอบสินค้าได้ทันตามความต้องการของลูกค้าได้

ชาลิต ต่อประสิทธิ์กุล (2545) ได้ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงหัวพ่นสีแบบบั้งในอุตสาหกรรมรถยนต์ ศึกษาสภาพการทำงานของปืนพ่นสีอัตโนมัติแบบบั้ง คุณสมบัติของสี และการตรวจสอบคุณภาพของฟิล์มสีที่ใช้ในโรงงานพ่นสีรถยนต์ แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาศึกษาถึงผลกระทบของคุณภาพฟิล์มสีเมื่ออุปกรณ์ชำรุด โดยอาศัยแผนภูมิเหตุและผลเป็นเครื่องมือช่วยในการกำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้อง โดยวิธีการออกแบบเชิงเฟกทอเรียลเพื่อหาระดับของปัจจัยที่น่าจะมีผลกระทบต่อค่าสมมูลของเพลากลาง ซึ่งพบว่ามี 4 ปัจจัย ได้แก่ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องเชื่อม (Supply voltage) อัตราการป้อนลวดของเครื่องเชื่อม (Welding speed) ค่าความร่วมศูนย์กลางของโยก (Concentricity) และค่าทอร์กของการประกอบโยก (Torque) จากผลการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติวิศวกรรมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ของการวิจัยเบื้องต้นพบว่า มี 3 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าสมมูลของเพลากลาง คือ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องเชื่อม อัตราการป้อนลวดของเครื่องเชื่อม ค่าความร่วมศูนย์กลางของโยก การออกแบบการทดลองแบบเฟกทอเรียลถูกนำมาใช้อีกครั้ง

เพื่อสภาวะที่เหมาะสมโดยเพิ่มระดับ (Level) ให้กับปัจจัยที่มีผลกับค่าสมมูลผลการทดลอง สามารถหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าสมมูลมีค่า 10 กรัม คือ แรงดันไฟฟ้าของเครื่องเชื่อมที่ 28.5036 โวลท์ อัตราการป้อนลวดของเครื่องเชื่อมที่ 22.0191 รอบต่อวินาที และค่าความร่วมมือที่ 0.1436 mm

มะลิ แซ่ฮึง (2544) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบ ในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตใหม่ในการผลิตแผงวงจรไฟฟ้ารวม งานวิจัยนี้ได้ระบุปัจจัยทั้งหมดที่มีผลต่อความหนาผิวเคลือบ โดยใช้แผนภูมิเหตุและผล ซึ่งทำให้ทราบว่า 6 ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อค่าความหนาปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วยความเข้มข้นของน้ำยาเติม Additive อิเล็กโตรไลต์ ความสูงของแผ่นกั้น เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิวและความหนาแน่นของกระแสการออกแบบการทดลองโดยวิธีการ Taguchi ได้ถูกนำมาใช้เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยใดที่มีผลต่อค่าความหนาผิวเคลือบเฉลี่ยและให้ความแข็งแรงต่อค่าตอบสนอง จากการทดลองพบว่าเพียง 3 ปัจจัยเท่านั้นที่มีผลต่อค่าเฉลี่ยความหนาผิวเคลือบ คือ ความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์ เวลาในการเคลือบและความหนาแน่นของกระแส การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลได้ถูกนำมาใช้เพื่อในการวิเคราะห์หาสภาวะที่เหมาะสม ที่จะได้ความหนาผิวเคลือบใกล้เคียงค่ากึ่งกลางและมีความผันแปรน้อยที่สุด โดยไม่มีข้อบกพร่องของคุณสมบัติทางกายภาพ ผลการทดลองพบว่ามี 2 ปัจจัยที่มีอิทธิพล คือ เวลาในการเคลือบผิวและความหนาแน่นกระแสด้วยสภาวะที่เหมาะสม คือ ความหนาแน่นกระแส 30 แอมแปร์/ ตารางเดซิเมตร และเวลาที่ใช้ในการเคลือบ 55 วินาที

วิชาญ วรรณ (2545) ได้ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง โดยวิธีการออกแบบการทดลองและเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ ซึ่งเริ่มต้นจากการพิจารณาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นโดยใช้การระดมสมอง ทำให้สามารถเลือกปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง โดยใช้แผนการทดลอง 2^k แฟกทอเรียลในการทดลองเบื้องต้น โดยทุกระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด คือ 1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง 200 ลิตรต่อนาที 2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง 0.9 เมตรต่อนาที และ 3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Tundish) 1,530 °C พบว่าสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ 158 mm จากความยาวเดิม 681+17 mm

เอก ศิลาวิเศษฤทธิ์ (2543) ศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการ

ที่รีแอคเตอร์ในกระบวนการผลิตผงเมลามีนโดยวิธีออกแบบการทดลอง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยต่าง ๆ คือ สัดส่วนโดยโมลของฟอร์มาลีนต่อผลิตภัณฑ์เมลามีน ค่าความเป็นกรดเบสของผลิตภัณฑ์เมลามีน ฟอร์มาลีน น้ำ และปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์สำหรับกระบวนการผลิตที่รีแอคเตอร์ในกระบวนการผลิตผงเมลามีน ซึ่งเงื่อนไขนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการควบคุมการผลิตที่รีแอคเตอร์เพื่อลดความผันแปรของค่าเวลาการขึ้นรูปของผลิตภัณฑ์ผงเมลามีน งานวิจัยนี้เริ่มจากการเลือกปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้รีแอคเตอร์ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลกระทบต่อค่าเวลาการขึ้นรูป ปัจจัยเหล่านี้ คือ สัดส่วนโดยโมลของฟอร์มาลีนต่อผลิตภัณฑ์เมลามีน ค่าความเป็นกรดเบสของผลิตภัณฑ์เมลามีน ค่าความเป็นกรดเบสของฟอร์มาลีน ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำ ปัจจัยทั้ง 4 นี้ได้นำไปทดลองโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้พบว่า มีเพียง 2 ปัจจัย คือ สัดส่วนโดยโมลของฟอร์มาลีนต่อผลิตภัณฑ์เมลามีนและค่าความเป็นกรดเบสของผลิตภัณฑ์เมลามีน ต่อมาทำการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล 2^k มาใช้เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมต่าง ๆ โดยการเพิ่มระดับของปัจจัยของสัดส่วนโดยโมลของฟอร์มาลีนต่อผลิตภัณฑ์เมลามีนและเพิ่มจำนวนของการทำซ้ำ (Replication) สุดท้ายเป็นการทดลองเพื่อยืนยันผลโดยใช้การทดสอบสมมติฐานซึ่งสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของค่าเวลาการขึ้นรูปในเงื่อนไขต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมา มีความน่าเชื่อถือเพียงพอสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการผลิตผงเมลามีน ผลจากการวิจัยครั้งนี้สามารถสรุปได้เป็น 406 เงื่อนไขที่เหมาะสมซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้จากการวิจัยนี้จะถูกนำไปใช้ในการลดความผันแปรของค่าเวลาการขึ้นรูปดังกล่าวของบริษัทที่ใช้เป็นกรณีศึกษาจาก 30 วินาที เหลือ 20 นาที โดยประมาณ

Ashim roy and Prasad (1998) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Reduction of gold-plating thickness variation เป็นการหาค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ในกระบวนการชุบทอง ทั้งนี้ เพื่อลดปัญหาความไม่แน่นอนของความหนาจากการชุบทอง โดยศึกษาผลกระทบจากปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณกระแส ค่าความเป็นกรดของน้ำยาชุบ ระดับสารประกอบในบ่อชุบ แบบราวสำหรับแขวนงานชุบและอากาศที่ใช้กวนน้ำยาในบ่อชุบ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณกระแสที่ 15 แอมแปร์ ค่าความเป็นกรดของน้ำยาชุบ ระดับสารประกอบในบ่อชุบที่ 1.05 แบบราวสำหรับแขวนงานชุบแบบใหม่และการใช้อากาศในการกวนน้ำยาในบ่อชุบเป็นค่าที่เหมาะสม ทำให้สามารถลดปัญหาความไม่แน่นอนของความหนาจากการชุบทอง ซึ่งจะปรับปรุงความสามารถจากเดิม 3.20 ± 2.41 ไมโครเมตร เป็น 3.05 ± 0.83 ไมโครเมตร โดยมีค่าพิสัยยอมรับที่ 3.50 ± 0.70 ไมโครเมตร

สายใจ ชัยศิรินทร์ (2550) ได้ทำการหาปัจจัยและจุดที่เหมาะสมของกระบวนการแปรรูป

ที่มีผลต่อคุณภาพการผลิตชาฝรั่ง โดยนำเอาเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบเต็มจำนวนมาประยุกต์ โดยพบว่าปัจจัยที่ควบคุมในกระบวนการแปรรูป คือ เวลาและอุณหภูมิในกระบวนการผึ่ง และเวลาในกระบวนการนวด ซึ่งการวัดผลการทดสอบกระทำในรูปแบบของ สี กลิ่นและรสชาติ การออกแบบการทดลองถูกแยกเป็น 2 กรณี คือ การแปรรูปผลิตภัณฑ์ชาไม่และการแปรรูปผลิตภัณฑ์ชาใบ ซึ่งกรณีของการแปรรูปชาไม่ได้อาชีพที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย คือ อุณหภูมิในกระบวนการผึ่ง 20 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นนำมานวดเป็นเวลา 16 นาที และนำไปอบจนแห้งผล คือ ปริมาณสาร TF 1.617% ปริมาณสาร TR 21.490% ผลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส คือ สี 0 กลิ่น -1 และรสชาติ -1 ความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.8277 ซึ่งกรณีของการแปรรูปชาทั้งใบได้อาชีพที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัย คือ อุณหภูมิในกระบวนการผึ่ง 16 °C เป็นระยะเวลา 10 ชั่วโมง 14 นาที จากนั้นนำมานวดเป็นเวลา 2 นาที และนำไปอบจนแห้งผล คือ ปริมาณสาร TF 1.551% ปริมาณสาร TR 22.267% ผลจากการทดสอบทางประสาทสัมผัส คือ สี -2 กลิ่น -1 และรสชาติ -2 ความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 0.7709 ซึ่งสามารถนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้โดยจัดทำเป็นมาตรฐานการแปรรูปชาฝรั่งเพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความสม่ำเสมอและมีคุณภาพตามความต้องการของตลาด

วิทยา รุ่งเจริญวัฒนา (2550) ได้ทำการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในขบวนการผลิตชิ้นส่วน C/ M/ C P-CAR เนื่องจากขบวนการผลิต C/ M/ C P-CAR มีสัดส่วนของเสียสูงที่สุดหลังจากการวิเคราะห์ในเบื้องต้นพบว่าของเสียอาการ Shrinkage มีสัดส่วนมากที่สุดมี % ของเสียที่ 28.57% โดยตั้งเป้าหมายในการลดของเสียอาการ Shrinkage ต่ำกว่า 14% ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียมี 3 ปัจจัย คือ % Chemical composition Si, Na และอุณหภูมิของอลูมิเนียมพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับขบวนการผลิต C/ M/ C P-CAR คือ % Chemical composition Si เท่ากับ 7%, % Chemical composition Na เท่ากับ 0.005% และอุณหภูมิอลูมิเนียม 710 °C ที่ระดับความชื้นร้อยละ 95 โดยมี % ของเสียที่เกิดขึ้น 10.13% ซึ่งบรรลุตามเป้าหมาย

พรสุดา อรัญวงศ์ (2559) ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงคุณภาพการผลิตของชิ้นส่วนพื้นเพื่องเพลาค้อเหวี่ยง ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงหลังการเชื่อมประสานแบบจุดในเบื้องต้นพบปัญหาความสามารถของกระบวนการผลิต (P_{pk}) ต่ำ ประเมินได้ -1.39 มีค่าความต้านทานแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานที่ผลิตได้เท่ากับ 3.2008 kN ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดึง ได้แก่ ชนิดแผ่นโลหะ ปริมาณ กระแสไฟ และเวลาเชื่อม โดยใช้แผ่นโลหะชนิด SK-85 กำหนดกระแสเชื่อม 11 kA เวลาเชื่อมที่ระดับ 2 Cycle ในการผลิตจริง เมื่อติดตามผลพบว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึง และดัชนีความสามารถของกระบวนการเชื่อมเพิ่มขึ้นเป็น

8.120 kN และ 0.93 ตามลำดับ ทางผู้วิจัยจึงสรุปได้ว่าการประยุกต์แนวทางการออกแบบการทดลองในการศึกษานี้นำไปสู่การปรับปรุงคุณภาพกระบวนการผลิตชิ้นส่วนเฟืองเพลาค้อเหวี่ยงได้อย่างมีนัยสำคัญ

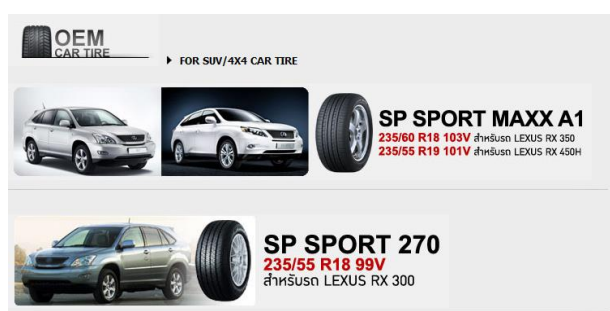
อัจฉรา เตชววงศ์ (2551) ได้หาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้สารเร่งปฏิกิริยาสองชนิดสำหรับกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกชนิดความหนาแน่นสูง ในการทดลองนี้ใช้สารเร่งปฏิกิริยาสองชนิด คือ RZ และ PZ ซึ่งผู้วิจัยได้นำส่วนผสมของ RZ และ PZ (RZ : PZ) จำนวน 5 สัดส่วน คือ 0 : 100, 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25 และ 100 : 0 มาทำการทดลองโดยสัดส่วน 0 : 100 เป็นสัดส่วนที่ใช้ในกระบวนการผลิตในปัจจุบันที่เหลืออีก 4 สัดส่วน คือ สิ่งที่ต้องการศึกษา การทดลองมีสัดส่วนของสารเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีเพียงปัจจัยเดียวแต่แบ่งออกเป็น 5 ระดับ ส่วนตัวแปรตาม คือ คุณสมบัติของเม็ดพลาสติกที่ผลิตได้ ได้แก่ Color index, Melt flow rate, Density และ Molecular weight distribution และทำการทดลองโดยใช้ 7 สิ่งตัวอย่างในทุกการทดลอง ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้การจำแนกทางเดียว ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยา RZ : PZ ในทุก ๆ สัดส่วน จะให้ค่า Melt flow rate, Density และ Molecular weight distribution ที่ไม่แตกต่างกันส่วน Color index พบว่าการใช้ RZ : PZ ในทุก ๆ สัดส่วน จะให้ค่า Color index ที่ไม่แตกต่างกันยกเว้นการใช้ RZ : PZ ในสัดส่วน 100 : 0 ที่มีผลทำให้ Color index มีค่าน้อยกว่าการใช้ RZ : PZ ในสัดส่วนอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญในการผลิตพบว่าการใช้สารเร่งปฏิกิริยา RZ : PZ ในสัดส่วน 75 : 25 จะลดต้นทุนการผลิตได้มากที่สุด คือ สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้วันละ 314,100 บาท เมื่อเทียบกับการผลิตโดยใช้สารเร่งปฏิกิริยา PZ เพียงชนิดเดียว (สัดส่วน 0 : 100)

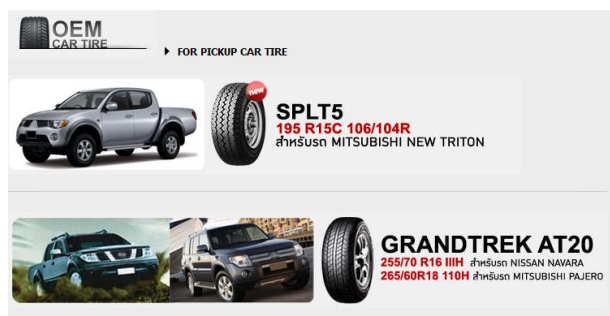
บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

ข้อมูลทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง

บริษัท ซุมิโตโม รับเบอร์อินดัสตรี ประเทศญี่ปุ่น ได้ตั้งโรงงานผลิตยางรถยนต์ Dunlop ในประเทศไทยเมื่อปี 2548 ในชื่อบริษัท ซุมิโตโม รับเบอร์(ไทยแลนด์) จำกัด หรือในนาม SRT โรงงานแห่งนี้ตั้งขึ้นในบริเวณอุตสาหกรรมอมตะซิตี้ จังหวัดระยอง บนพื้นที่ 346 ไร่ หรือประมาณ 585,000 ตารางเมตร โดยใช้การลงทุนจนถึงมิถุนายน 2551 ไปแล้ว 12.2 พันล้านบาท โรงงานเฟสแรกได้เริ่มผลิตยางรถยนต์ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน 2549 ด้วยเทคโนโลยีการผลิตแบบใหม่ในชื่อว่า “SUN SYSTEM” ซึ่งเป็นระบบขบวนการผลิตที่ผสมผสานการผลิตให้เป็นหนึ่งเดียวเพื่อให้ได้ผลการผลิตที่สูง โรงงานเฟสสองได้เริ่มการผลิตเมื่อเดือนตุลาคม 2550 และเมื่อสิ้นสุดปี 2551 โรงงานทั้งสองเฟสจะมีกำลังผลิตยางสำหรับรถยนต์นั่งรถ SUV เอนกประสงค์ และรถปิกอัพ ดังตัวอย่างในภาพที่ 3-1 รวมกันที่ 28,000 เส้นต่อวันและเพื่อที่จะสามารถตอบสนองความต้องการของตลาดภายในอนาคต โรงงาน SRT มีแผนที่จะขยายกำลังการผลิตถึง 100,000 เส้นต่อวันในปี 2560



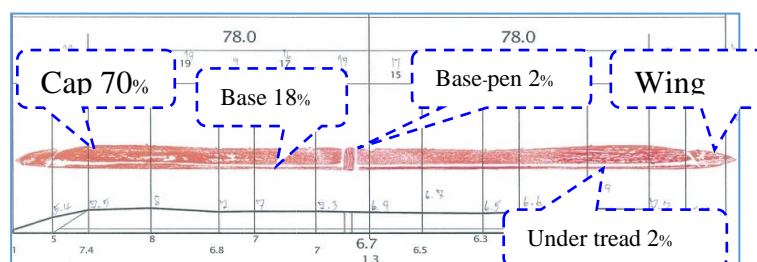


ภาพที่ 3-1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของโรงงานตัวอย่าง

ชนิดของดอกยางที่ทำการผลิต

1. ดอกยางชนิดโครงสร้าง Cap base-base pen

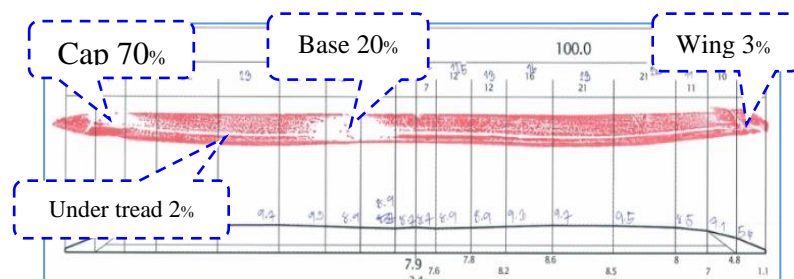
เป็นโครงสร้างที่มีส่วนประกอบ คือ Cap คอมปาวด์ Base คอมปาวด์ Wing คอมปาวด์ Base pen และ Under tread คอมปาวด์ แสดงในภาพที่ 3-2 ซึ่งจะนำไปผลิตเป็นยางรถยนต์ที่ใช้งานในระดับความเร็วที่สูง ปริมาณการผลิต 30% ของยอดผลิตทั้งหมด



ภาพที่ 3-2 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap base-base pen

2. ดอกยางชนิดโครงสร้าง Cap base

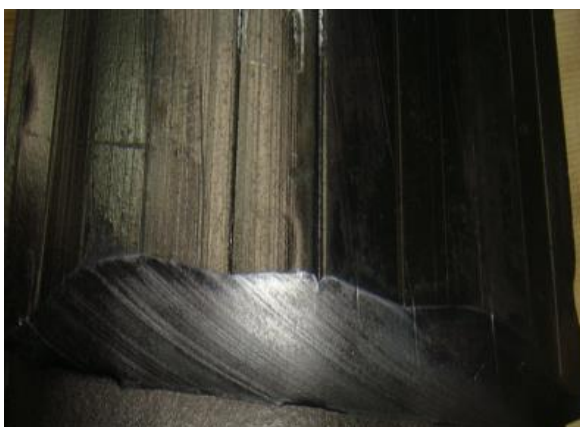
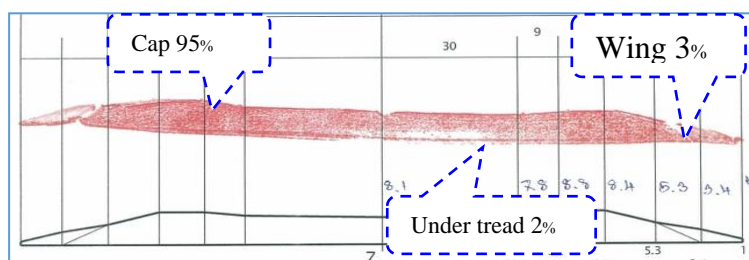
เป็นโครงสร้างที่มีส่วนประกอบ คือ Cap คอมปาวด์ Base คอมปาวด์ Wing คอมปาวด์ และ Under tread คอมปาวด์ แสดงในภาพที่ 3-3 ซึ่งจะนำไปผลิตเป็นยางรถยนต์ที่ใช้งานทั่วไป ปริมาณการผลิต 30% ของยอดผลิตทั้งหมด



ภาพที่ 3-3 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap base

3. ดอกยางชนิดโครงสร้าง Cap wing

เป็นโครงสร้างที่มีส่วนประกอบ คือ Cap คอมปาวด์ Wing คอมปาวด์ และ Under tread คอมปาวด์ แสดงในภาพที่ 3-4 ซึ่งจะนำไปผลิตเป็นยางรถยนต์ขนาดเล็ก ปริมาณการผลิต 40% ของยอดผลิตทั้งหมด



ภาพที่ 3-4 โครงสร้างของดอกยางชนิด Cap wing

การทำงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการวิจัยใน โครงสร้าง Cap wing เนื่องจากปริมาณการผลิตมากที่สุด

เครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตดอกยางชนิด Cap wing

1. Cap คอมพาวด์

ใช้เครื่องเอ็กทราเตอร์ ชนิด Cold feed pin 200 P แสดงในภาพที่ 3-5 ให้ความร้อนกับตัวเครื่องผ่านทางชุด TCU โดยใช้ไอน้ำอุ่นน้ำให้ร้อนแล้วป้อนเข้าสู่เครื่องการป้อนยางคอมพาวด์ จะป้อนเป็นแผ่นหน้ากว้างไม่เกิน 800 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันยางตันก่อนเข้าสู่กรูของเอ็กทราเตอร์



ภาพที่ 3-5 เอ็กทริเตอร์สำหรับ Cap คอมพาวด์

2. Wing compound

ใช้เครื่องเอ็กทริเตอร์ Cold feed Pin 120 K แสดงในภาพที่ 3-6 การให้ความร้อนกับตัวเครื่องจักรผ่านทางชุด TCU เช่นกัน ขนาดของยางคอมพาวด์หน้ากว้างไม่เกิน 400 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-6 เอ็กทริเตอร์ สำหรับ Wing คอมพาวด์

3. Under tread คอมพาวด์

ใช้เครื่องเอ็กทริเตอร์ Cold feed Pin 120 P แสดงในภาพที่ 3-7 การให้ความร้อนผ่านทางชุด TCU ขนาดของยางคอมพาวด์หน้ากว้างไม่เกิน 400 มิลลิเมตร



ภาพที่ 3-7 เอ็กทราเตอร์ สำหรับ Under tread คอมพาวด์

4. เครื่องชั่งตัวที่ 1

ในภาพที่ 3-8 ใช้สำหรับการชั่งน้ำหนักเพื่อปรับความเร็วของสายการผลิต ให้ดอกยางได้น้ำหนักตามที่กำหนด การทำงานของเครื่องชั่งตัวที่ 1 จะชั่งน้ำหนักและส่งค่าให้กับเครื่องชั่งตัวที่ 2 เพื่อประมวลผลน้ำหนักและส่งปรับความเร็วของสายการผลิต



ภาพที่ 3-8 เครื่องชั่งน้ำหนัก ตัวที่ 1

5. เครื่องชั่งตัวที่ 2

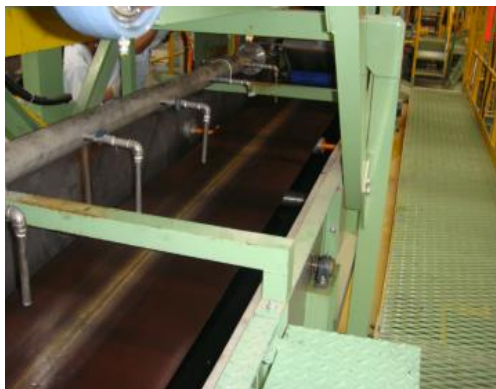
ในภาพที่ 3-9 ใช้สำหรับควบคุมน้ำหนักและสั่งการให้มีการปรับความเร็วของสายการผลิต โดยการสั่งการผ่านเครื่องชั่งตัวที่ 1 ลักษณะการทำงานจะชั่งน้ำหนักยางด้วยความยาว 1 เมตรแล้วเปรียบเทียบน้ำหนักกับมาตรฐานหากน้ำหนักต่ำหรือสูงกว่าค่ามาตรฐานจะส่งข้อมูลเพื่อปรับความเร็วของสายการผลิต ใช้เครื่องชั่งตัวที่ 1 เป็นตัวตรวจสอบน้ำหนักว่าได้ตามที่กำหนดแล้วหรือไม่



ภาพที่ 3-9 เครื่องชั่งน้ำหนัก ตัวที่ 2

6. สายพานลำเลียง No. 1, 2, 3

ในภาพที่ 3-10 คือ ระบบสายพานลำเลียงที่มีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เพื่อระบายความร้อนออกจากดอกยางและป้องกันการหลุดตัวของดอกยางก่อนเข้าเครื่องตัดดอกยาง



ภาพที่ 3-10 สายพานลำเลียง No. 1, 2, 3

7. เครื่องตัดดอกยาง (Skiver)

ในภาพที่ 3-11 ใช้ในการตัดดอกยางให้ได้ความยาวตามที่กำหนด สำหรับนำไปผลิตเป็น Green tire ต่อไป การทำงานจะใช้มอเตอร์เป็นตัวให้ความเร็วใบมีดและใช้น้ำเป็นสารหล่อลื่น ช่วยให้ตัดได้ง่ายขึ้นและลดความร้อนบนใบมีดและตัวดอกยาง



ภาพที่ 3-11 เครื่องตัดดอกยาง

8. เครื่องซั่งตัวที่ 3

ในภาพที่ 3-12 ใช้สำหรับการควบคุมน้ำหนักขั้นสุดท้าย และคัดแยกดอกยางที่มีน้ำหนักตามที่กำหนดเข้าไปจัดเก็บยังเครื่องเก็บดอกยาง ส่วนดอกยางที่น้ำหนักไม่ได้ตามที่กำหนดจะถูกคัดแยกเป็นงานไม่ได้คุณภาพซึ่งเป็นหัวข้อในการทำวิจัยในครั้งนี้



ภาพที่ 3-12 เครื่องซั่งตัวที่ 3

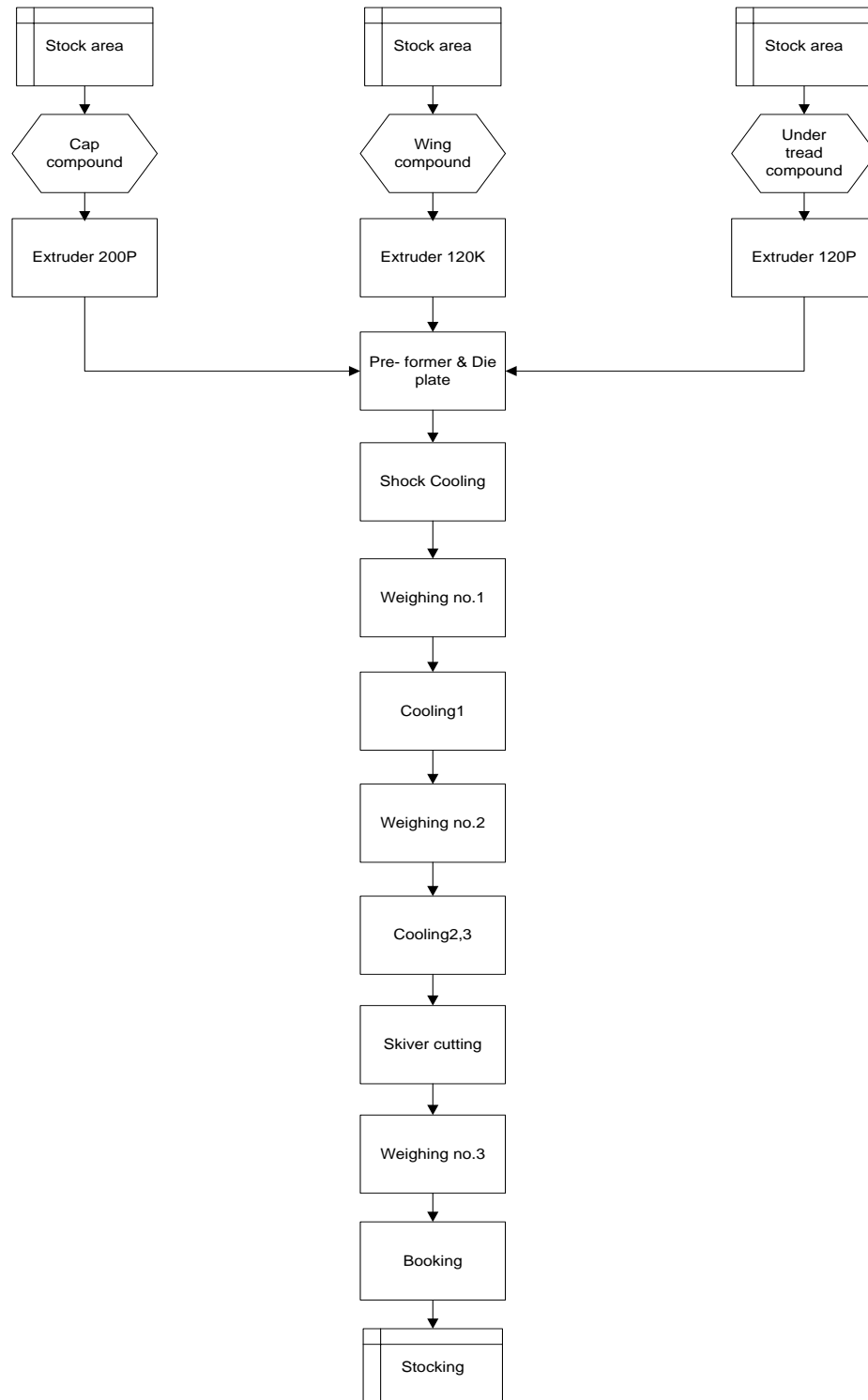
9. เครื่องเก็บดอกยาง

ในภาพที่ 3-13 ใช้สำหรับบรรจุดอกยางในรถบรรจุดอกยาง (Leaf tray) โดยจะบรรจุตามชนิดและปริมาณที่กำหนด เพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากสิ่งภายนอกและช่วยให้การนำดอกยางไปใช้งานทำได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 3-13 เครื่องบรรจุคอกยางและรถเก็บคอกยาง

ขั้นตอนการผลิตดอกยางชนิด Cap wing



ภาพที่ 3-14 ขั้นตอนการผลิตดอกยางชนิด Cap-wing

จากภาพที่ 3-14 ขั้นตอนการผลิตดอกยางเริ่มจากการนำยางคอมพาวด์ซึ่งเก็บอยู่ในพื้นที่จัดเก็บน้ำป้อนเข้าสู่เครื่องเอ็กทราuder โดยส่งผ่านทาง Feed conveyor เข้าสู่ Hopper ของเครื่องเอ็กทราuder แยกตามชนิดของยางตามโครงสร้างของดอกยาง คือ Cap compound, Wing compound และ Under tread compound ยางคอมพาวด์จะถูกนวดโดยสกรูและให้ความร้อน โดยความร้อนจะมาจากน้ำร้อนซึ่งส่งมาจาก Temperature control unit (TCU) ก่อนที่จะส่งผ่านไปยัง Pre-former ซึ่งทำหน้าที่รวมยางคอมพาวด์ที่ผ่านการให้ความร้อนรวมเข้าเป็นโครงสร้างของยาง จากนั้นยางจะถูกส่งผ่าน Die plate เพื่อให้ได้ตามขนาดและรูปร่างตามต้องการ จากนั้นดอกยางที่มีโครงสร้างสมบูรณ์แล้วจะถูกส่งเข้าระบบหล่อเย็นหรือ Shock cooling เพื่อให้ดอกยางเย็นตัวลง จากนั้นจะผ่านเครื่องชั่งตัวที่ 1 แสดงในภาพที่ 3-19 จากนั้นดอกยางจะถูกส่งต่อไปยังระบบหล่อเย็นในช่วงที่ 1 ก่อนที่จะผ่านเครื่องชั่งตัวที่ 2 เพื่อทำการชั่งและปรับน้ำหนักอีกครั้ง ก่อนส่งเข้าระบบหล่อเย็นที่ 2 และ 3 เพื่อให้อุณหภูมิของดอกยางลดลงมาอยู่ที่ระดับต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นดอกยางจะถูกส่งเข้าเครื่องตัดเพื่อตัดให้ได้ความยาวตามที่กำหนดโดยใช้ Skiver ดอกยางที่ผ่านการตัดจนได้ความยาวตามที่กำหนดแล้วจะถูกส่งต่อไปยังชั่งน้ำหนักในครั้งสุดท้ายที่เครื่องชั่งที่ 3 ก่อนที่จะถูกจัดเก็บใน Leaf tray เพื่อรอการนำไปใช้งานต่อไป

1. การป้อนยางคอมพาวด์เข้าเอ็กทราuder

จะใช้พนักงานประจำเครื่องป้อนดังภาพที่ 3-15 ก่อนจะป้อนยางเข้าสกรูจะต้องม้วนปลายของแผ่นยาง เพื่อให้เข้าในปากสกรูได้ง่าย



ภาพที่ 3-15 การป้อนยางเข้าเครื่องเอ็กทราuder

2. การประกอบ Pre former

ในภาพที่ 3-16 ส่วนของ Pre-former มีหน้าที่บังคับการไหลของยาง Compound ให้เป็นไปในแนวทางที่กำหนด การประกอบ Pre-former ทำหลังจากป้อนยางคอมพาวด์เข้าในสกรูแล้วเพื่อป้องกันปัญหา Pre-former เย็นตัว



ภาพที่ 3-16 การประกอบ Pre-former

3. การประกอบ Die plate เพื่อเตรียมผลิตดอกยาง

ดังภาพที่ 3-17 ก่อนการประกอบจะต้องตรวจสอบชนิดของ Die plate ให้ตรงกับชนิดของดอกยางที่จะผลิต



ภาพที่ 3-17 การประกอบ Die plate

4. ขางผ่าน Shock cooling

เพื่อระบายความร้อนขั้นแรก การระบายความร้อนจะใช้น้ำที่มีอุณหภูมิประมาณ 25-27 องศาเซลเซียส ดังแสดงในภาพที่ 3-18



ภาพที่ 3-18 ดอกยางผ่าน Shock cooling

5. ยางถูกลำเลียงเข้าเครื่องซั่งที่ 1
ซึ่งจะซั่งน้ำหนักในเบื้องต้น



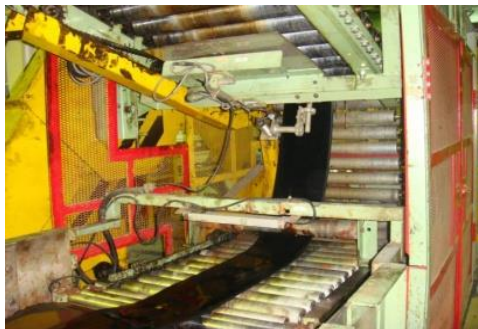
ภาพที่ 3-19 ดอกยางเข้าเครื่องซั่งที่ 1

6. ยางเข้าถูกลำเลียงเข้า Cooling no. 1
เพื่อระบายความร้อนก่อนที่จะซั่งน้ำหนักที่เครื่องซั่งที่ 2



ภาพที่ 3-20 ป้อนดอกยางเข้า Cooling 1

7. ยางเข้าจะถูกลำเลียงผ่านเครื่องซั่งที่ 2
หลังจากที่ระบายความร้อนออกไปบางส่วน โดยที่เครื่องซั่งตัวที่ 2 จะทำการซั่งและปรับ
น้ำหนักให้ได้ตามที่กำหนด



ภาพที่ 3-21 ดอกยางเข้า Cooling 2

8. หลังผ่านการชั่งน้ำหนัก

ดอกยางจะถูกส่งเข้า Cooling 3 เพื่อระบายความร้อนอีกครั้งเพื่อให้ความร้อนอยู่ในระดับอุณหภูมิห้อง



ภาพที่ 3-22 ดอกยางเข้า Cooling 3

9. ดอกยางเข้า Skiver

เพื่อตัดให้ได้ตามขนาดของวงล้อที่ต้องการก่อนที่จะชั่งน้ำหนักในขั้นสุดท้าย



ภาพที่ 3-23 Skiver ตัดดอกยาง

10. ดอกยางเข้าเครื่องซั้งที่ 3

เพื่อทำการซั้งน้ำหนักรีดในขั้นสุดท้าย หากน้ำหนักรีดไม่ได้ตามที่กำหนดดอกยางจะถูกคัดแยกออกจากกระบวนการผลิต เพื่อนำกลับไปผลิตใหม่ซึ่งเป็นปัญหาในการทำงานวิจัยครั้งนี้



ภาพที่ 3-24 เครื่องซั้งที่ 3 ซั้งน้ำหนักรีดดอกยาง

11. ดอกยางที่มีน้ำหนักรีดตามที่กำหนดจะถูกเก็บใน Leaf tray เพื่อรอการนำไปขึ้นรูปเป็น Green tire ต่อไป



ภาพที่ 3-25 เครื่องจักรบรรจุดอกยางเข้า Leaf tray

รายละเอียดของปัญหา

ในกระบวนการผลิตดอกยางที่กล่าวมาแล้วในขั้นต้น จะต้องควบคุมเรื่องน้ำหนักรีดของดอกยางเป็นพิเศษเพื่อให้สามารถนำไปประกอบขึ้นรูปในขั้นตอนต่อไปโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพ ซึ่งปัญหาคุณภาพที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักไม่ได้ตามที่กำหนดมี ดังนี้

1. ปัญหา Over spill

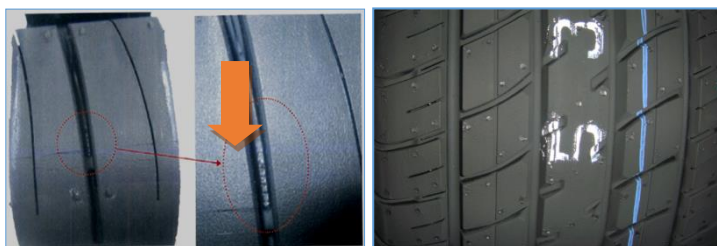
อันเกิดจากน้ำหนักของดอกยางสูงกว่าค่าที่กำหนด เนื่องจากการออกแบบแม่พิมพ์สำหรับอบยางรถยนต์นั้นจะคำนวณปริมาตรของยางดิบ (Green tire) ไว้แล้ว ดังนั้น หากน้ำหนักของดอกยางมากจะทำให้ยางล้นออกจากแม่พิมพ์ ดังภาพที่ 3-26 ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียขึ้นและยางรถยนต์ที่ผลิตออกมาจะไม่สามารถนำไปใช้งานได้เนื่องจากลักษณะภายนอกจะไม่สวยงาม เมื่อเปรียบเทียบกับยางปกติในภาพที่ 3-26 และส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการใช้งานด้วย



ภาพที่ 3-26 ลักษณะปัญหา Over spill

2. ปัญหา Explosive JLB

เกิดจากน้ำหนักของดอกยางต่ำกว่าค่าที่กำหนด ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของยางน้อยกว่าแม่พิมพ์ เมื่อผ่านการอบจะทำให้มองเห็น โครงสร้างภายในของยางรถยนต์ ซึ่งจะทำให้เกิดของเสียเช่นกัน

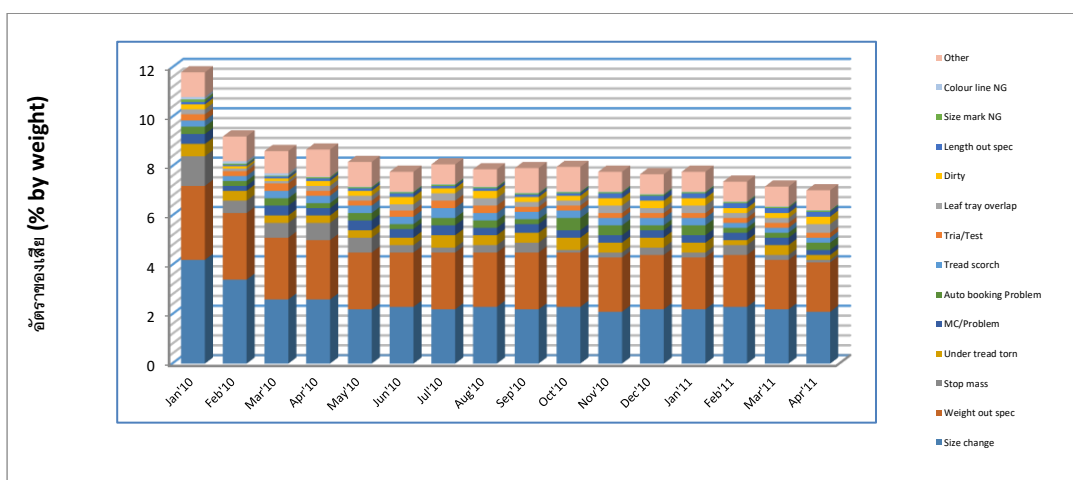


ภาพที่ 3-27 ลักษณะปัญหา Explosive JLB

จากปัญหาคุณภาพหลักของ 2 ประการข้างต้น การควบคุมน้ำหนักของดอกยางจึงต้องทำเป็นพิเศษ ดังนั้น ในกระบวนการผลิตดอกยางจึงติดตั้งเครื่องชั่งไว้ 3 ตำแหน่งด้วยกันเพื่อใช้ในการควบคุมน้ำหนักของดอกยาง และคัดแยกดอกยางที่มีน้ำหนักไม่ได้ตามที่กำหนดออกไป ซึ่งขั้นตอนดังกล่าวทำให้เกิดดอกยางที่ต้องนำกลับไปผลิตใหม่เป็นจำนวนมาก

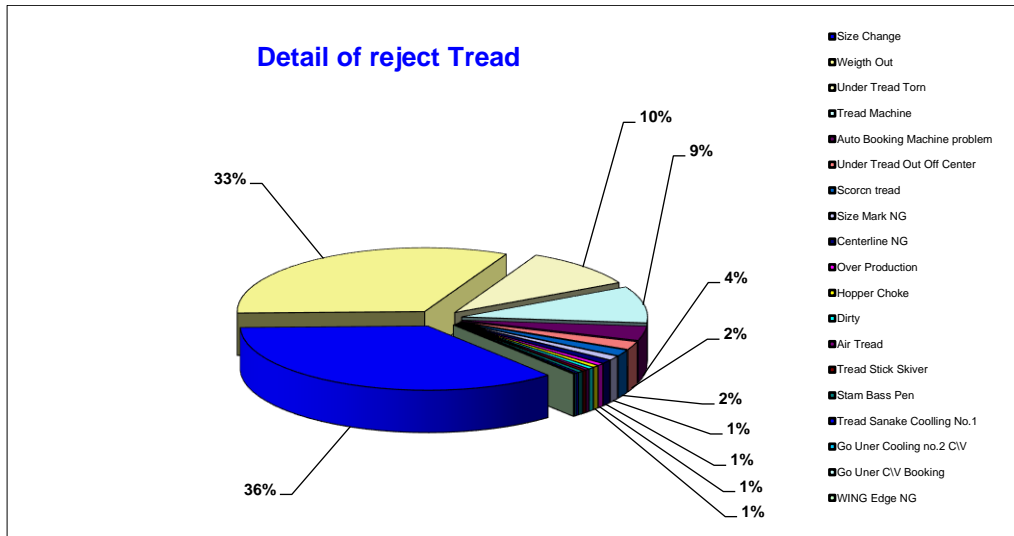
การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการศึกษาข้อมูลอัตราการเกิดของกระบวนการผลิตดอกยางหรือ Tread ในภาพที่ 3-28 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์สูงถึง 7-11% และมีแนวโน้มการลดลงของปัญหาในระดับที่ยังต่ำอยู่ จากปัญหาดังกล่าวทำให้เกิดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 3-28 ข้อมูลการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตดอกยาง

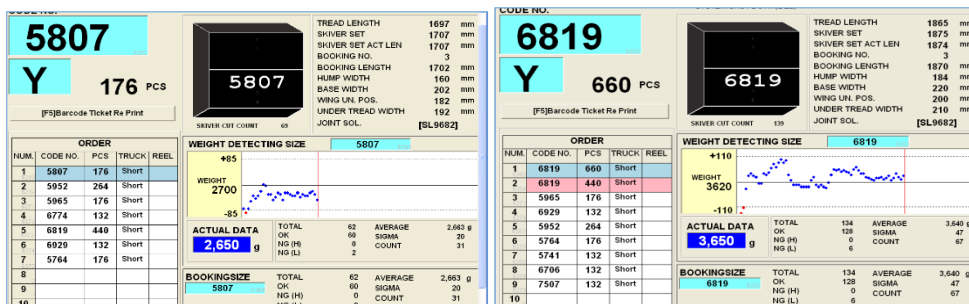
จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยแยกตามสาเหตุการเกิดในภาพที่ 3-29 พบว่าการเปลี่ยนชนิดของผลิตภัณฑ์เป็นสาเหตุอันดับหนึ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากจำนวนชนิดการผลิตมีจำนวนมาก สาเหตุรองลงมา คือ น้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานซึ่งเกิดจากสาเหตุต่าง ๆ หลากหลาย ซึ่งสามารถที่จะหาแนวทางการแก้ไขได้



ภาพที่ 3-29 ข้อมูลการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตดอกยางแยกตามสาเหตุการเกิด

จากข้อมูลยางปริมาณดอกยางที่ต้องนำกลับไปผลิตใหม่จะพบว่ามีปริมาณที่สูงมากกว่า 7% ในแต่ละเดือนและเมื่อแยกรายละเอียดตามสาเหตุของปัญหาจะพบว่าปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานเป็นสาเหตุ 1 ใน 2 สาเหตุหลัก

เมื่อทำการตรวจสอบบันทึกของเครื่องขังตัวที่ 3 พบว่าปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานจะเกิดในช่วงต้นของการผลิตและความรุนแรงของปัญหาจะลดลงและกลับสู่สภาพปกติเมื่อผ่านการผลิตไป 10-16 เส้น



ภาพที่ 3-30 ลักษณะปัญหาน้ำหนักช่วงต้นการผลิต

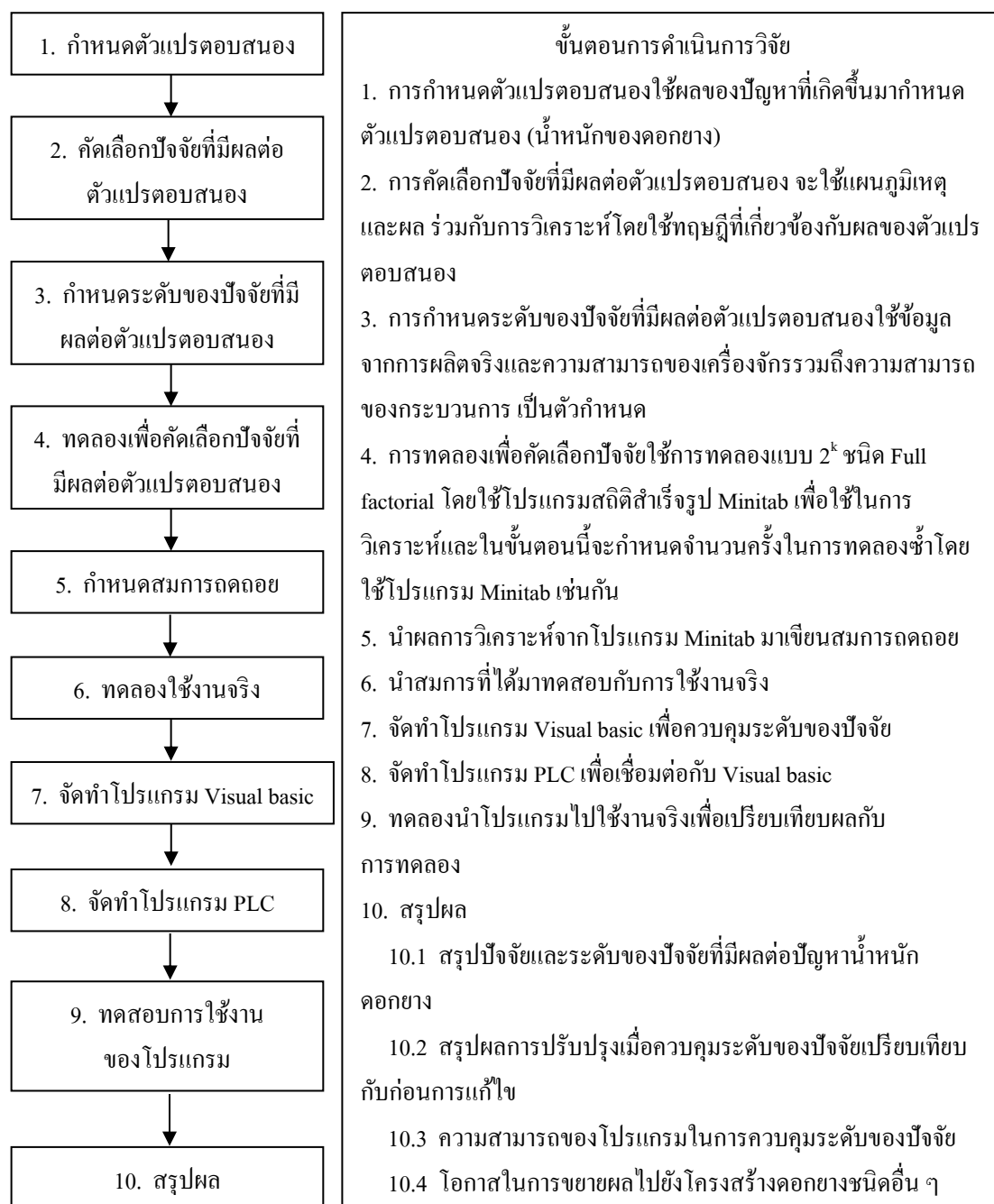
ลักษณะการเกิดของปัญหาจะเกิดขึ้นจะเป็นวงรอบ คือ เมื่อมีการเปลี่ยนรุ่นการผลิตก็จะเกิดปัญหาในลักษณะเช่นเดิม แต่ความรุนแรงขึ้นอยู่ลำดับในการผลิต ดอกยางที่เริ่มผลิตในลำดับต้น ๆ ก็จะมีปัญหาบ้างบางครั้งอาจมากถึง 25-30 เส้นซึ่งเกิดจากอุณหภูมิของเครื่องจักรยังต่ำอยู่ ก่อนที่จะปรับเข้าสู่ภาวะปกติ และเมื่อลำดับการผลิตเพิ่มขึ้นปัญหาจะลดลงและคงที่ คือ อยู่ที่ 10-16 เส้น จากการสังเกตพื้นที่ทำงานจริงพบว่าตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อลำดับของการเพิ่มขึ้นคือ อุณหภูมิของดอกยางที่สูงขึ้นและจะคงที่ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ต้องทำการศึกษาต่อไป

การออกแบบของเครื่องจักรกำหนดให้เครื่องชั่งตัวที่ 2 จุดควบคุมน้ำหนักของดอกยางเป็นหลัก โดยจะปรับความเร็วเพิ่มขึ้นเมื่อน้ำหนักเกินค่าที่กำหนด และจะปรับน้ำหนักลดลงเมื่อน้ำหนักต่ำกว่าค่าที่กำหนด โดยใช้เครื่องชั่งตัวที่ 1 เป็นตัวส่งสัญญาณว่าได้น้ำหนักตามต้องการหรือไม่ ซึ่งทางผู้วิจัยคิดว่าน่าจะเป็นอีกจุดที่ก่อให้เกิดปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามที่กำหนด เนื่องจากเครื่องชั่งตัวที่ 1 และตัวที่ 2 มีระยะห่างประมาณ 30 เมตรหรือคิดเป็นดอกยางประมาณ 15 เส้น ซึ่งในช่วงต้นของการผลิต การปรับค่าความเร็วของการผลิตจะเป็นค่าคงที่ จนกว่าดอกยางจะเข้าสู่เครื่องชั่งที่ 2 จึงจะมีการควบคุมแบบอัตโนมัติ

การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง

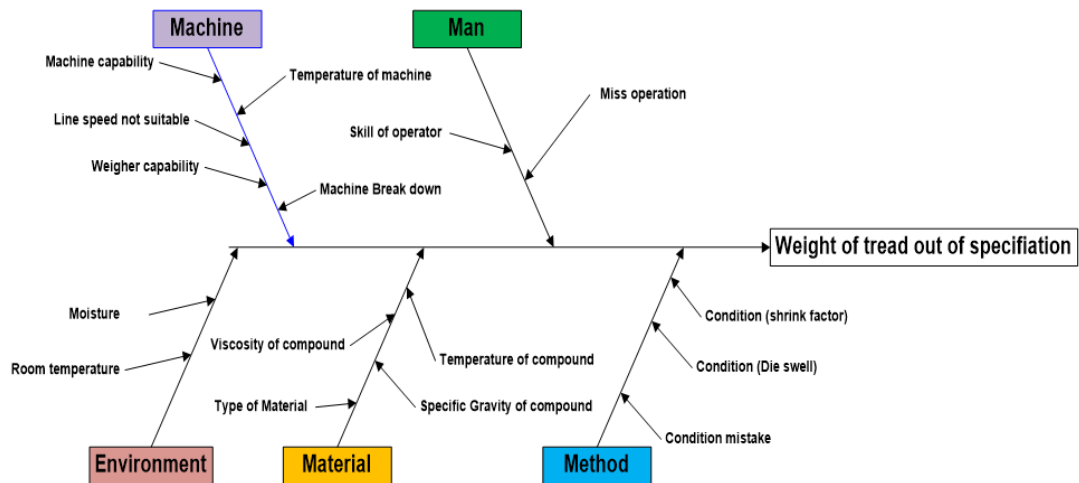
การออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยใช้ Factorial design ชนิด 2^k โดยใช้แบบ Full factorial ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (Minitab) การวิเคราะห์ผลการคำนวณจะใช้ความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ในทางตรงกันข้ามหากค่าต่ำกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยในการทำวิจัยครั้งนี้ใช้ระดับ α ที่ 0.05 ซึ่งจะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีทั้งหมดให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 3-31 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. หลักเกณฑ์ในการคัดเลือกปัจจัย (Factors)



ภาพที่ 3-32 Fishbone diagram

จากปัญหาน้ำหนักของดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดซึ่งคาดว่าเกิดจากหลายสาเหตุด้วยกัน ดังนั้น เพื่อให้สามารถพิจารณาถึงปัจจัยให้ครอบคลุมมากที่สุด จึงได้ใช้แผนภูมิเหตุและผลมาพิจารณาว่าปัจจัยอะไรบ้างที่อยู่ในกระบวนการผลิต โดยนับจากกระบวนการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่เครื่องจักร จนถึงกระบวนการบรรจุขึ้นดอกยางเข้าจัดเก็บใน Leaf tray ที่ส่งผลต่อน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงต้นของการผลิต โดยแยกองค์ประกอบตาม 4M 1E คือ Man, Machine, Material, Method, Environmental

1.1 Man

ปัจจัยที่ส่งผลต่อน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามที่กำหนดจะเกิดจากการทำงานที่ไม่ปฏิบัติตามคู่มือวิธีการทำงานที่กำหนดไว้ อันจะส่งผลกระทบต่อปัญหาในข้างต้น ซึ่งลักษณะการทำงานของโรงงานตัวอย่างจะแบ่งเป็น 3 igrup คือ X, Y, Z โดยจะประกอบด้วยตำแหน่งงานเดียวกัน แต่จากการเก็บข้อมูลของดอกยางชนิดที่เกิดปัญหามากที่สุด 10 อันดับ ที่ผลิตโดยพนักงานที่แตกต่างกันพบว่าลักษณะของปัญหามีความคล้ายคลึงกันจึงตัดปัจจัยเรื่องของผู้ปฏิบัติงานออกไป

1.2 Machine

กระบวนการผลิตดอกยางชนิด Cap-wing ผลิตเฉพาะเครื่องจักร Line 3 การปรับตั้งเครื่องจักรต่าง ๆ มีการปรับตั้งเหมือนกันในแต่ละวัน รวมถึงมีการบำรุงรักษาเครื่องจักรในรอบเวลาที่เหมาะสม ดังนั้น ชนิดของเครื่องจักรจึงไม่เป็นปัจจัยของปัญหา

1.3 Material

จากโครงสร้างของชิ้นงานตัวอย่างที่จะศึกษาเป็นชนิด Cap-wing ซึ่งประกอบด้วย Material หลัก 3 ชนิดด้วยกัน คือ Cap คอมพาวด์ Wing คอมพาวด์ และ Under tread คอมพาวด์ จากคุณสมบัติของยาง Compound ที่ส่งผลต่อการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ โดยใช้การ Extrusion ค่าที่มีผลมากที่สุด คือ ค่าความหนืดของตัววัตถุดิบเอง ซึ่งความหนืดของวัตถุดิบจะเกี่ยวเนื่องกับอุณหภูมิก่อนการแปรรูปด้วย ดังนั้น ในหัวข้อของ Material ปัจจัยที่สนใจ คือ ความหนืดของวัตถุดิบและอุณหภูมิของวัตถุดิบก่อนการขึ้นรูปเป็นดอกยางจึงเลือกมาเป็นปัจจัยที่จะทำการศึกษา

1.4 Method

กระบวนการผลิตดอกยางจะใช้ข้อมูลจากหน่วยงานเทคนิคการผลิต เพื่อใช้ในการปรับตั้งค่าต่าง ๆ ของเครื่องจักร ซึ่งค่าที่ปรับตั้งจะประกอบไปด้วย ความเร็วรอบของสกรู ค่า Shirk factor ค่า Die swell ค่าระยะการตัดของ Skiver ซึ่งทั้งหมดจะเป็นค่าคงที่ ส่วนค่าความเร็วของ Conveyor จะแปรตามน้ำหนักของดอกยางซึ่งเครื่องจักรจะปรับให้เข้าสู่ค่าที่เหมาะสม ดังนั้น ปัจจัยที่สนใจที่คาดว่าจะส่งผลต่อน้ำหนักของดอกยางในช่วงเริ่มการผลิตในหัวข้อของ Method คือ ความเร็วของสายการผลิต จึงเลือกมาเป็นปัจจัยที่จะทำการศึกษา

1.5 Environment

เนื่องจากกระบวนการผลิตใช้เครื่องจักรเป็นหลักและเครื่องจักรจะเป็นระบบปิดทั้งหมด และมีการควบคุมอุณหภูมิขณะที่ทำการผลิต ดังนั้น จึงคิดว่าปัจจัยเรื่องสภาพแวดล้อมในการทำงานไม่น่าจะส่งต่อปัญหาน้ำหนักของดอกยางในช่วงเริ่มต้นการผลิต รวมทั้งสภาพของปัญหาเกิดขึ้นทั้งปี ไม่ได้เจาะจงว่าความรุนแรงจะเพิ่มหรือลด เมื่อเวลาผ่านไปในแต่ละเดือน

2. การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response variables)

ตัวแปรตอบสนองหรือผลตอบสนองที่ใช้ คือ น้ำหนักของดอกยางที่ผ่านการชั่งน้ำหนัก โดยเครื่องชั่งตัวที่ 3 เนื่องจากเป็นตัวชี้วัดด้านคุณภาพของดอกยาง ในการนำไปใช้งานในหน่วยงานการขึ้นรูปเป็น Green tire

3. การกำหนดระดับของปัจจัย (Levels)

การกำหนดระดับของปัจจัยจะใช้สภาพของการทำงานปกติในสภาพปัจจุบันที่ใช้ผลิตชิ้นงานในการกำหนดช่วงของการทดลอง โดยใช้ค่าที่กำหนดจากหน่วยงานเทคนิคการผลิต ซึ่งจะประกอบด้วยค่าสูงสุดและค่าต่ำสุด

ตารางที่ 3-1 ระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	หน่วย
1. ความหนืดของ คอมพาวด์แคป (T798)	42	50	Mooney
2. ความหนืดของคอมพาวด์วิง (W346)	34	42	Mooney
3. ความหนืดของคอมพาวด์อันเดอร์เทรด (K005A)	31	39	Mooney
4. อุณหภูมิของคอมพาวด์แคป (T798)	65	75	องศาเซลเซียส
5. อุณหภูมิของคอมพาวด์วิง (W346)	85	95	องศาเซลเซียส
6. อุณหภูมิของคอมพาวด์อันเดอร์เทรด (K005A)	55	65	องศาเซลเซียส
7. ความเร็วของสายการผลิต	31.3	33.3	เมตร/ นาที

รายละเอียดของระดับปัจจัย

1. ความหนืด ของยางคอมพาวด์จะ ได้จากผลการทดสอบของหน่วยงานทดสอบ (Mill control) ซึ่งจะมีการทดสอบในทุก Lot ของยางคอมพาวด์ที่ส่งมาจากหน่วยงานผสมยาง

COMPOUND INSPECTION RESULT RECORD SHEET (BX082000) Ver. 1.0-39														
COMPOUND INSPECTION RESULT RECORD SHEET											24/08/2011 18:52:24			
COMPOUND NO.		T798DL		MIX DATE		FROM 200811 To 240811		MIX NO.		6		LA-201/15		
CURING		0 13 MIN		RING EL %		0 %		MOONEY ML+4		130		CURELASTOMETER 200 108 MIN		
LOT NO.	INSP. DATE	RING MOD	HS	SPOR	MOONEY VISCOSITY			CURELASTOMETER						
					VISC	SCORCH	MECHINE	ML	MH	T10	T20	T50	T90	T95
STANDARD			68.0	1.167	50.0	20.0		2.20	9.02	0.58		0.60	1.10	
			62.0	1.147	42.0	12.0		1.90	7.36	0.48		0.66	0.90	
621120-1	22.08.11 2KX		62.5	1.158	46	17.6	3	2.02	8.67	0.55	0.63	0.73	0.98	1.06
	22.08.11 2KX							1.99	8.61	0.55	0.63	0.75	1.00	1.06
	22.08.11 2KX							1.98	8.59	0.53	0.62	0.73	0.97	1.07
621121-1	22.08.11 2KX		63.0	1.157	46	18.0	3	1.94	8.57	0.53	0.62	0.72	0.97	1.07
	22.08.11 2KX							2.04	8.75	0.53	0.62	0.73	0.98	1.07
	22.08.11 2KX							2.18	8.92	0.53	0.63	0.75	1.00	1.06
621122-1	22.08.11 2KX		63.2	1.159	45	18.2	3	2.11	8.86	0.53	0.62	0.73	0.98	1.07
	22.08.11 2KX							2.10	8.84	0.55	0.62	0.73	0.98	1.06
	22.08.11 2KX							2.05	8.82	0.53	0.62	0.73	0.98	1.07
621123-1	22.08.11 2KX		62.4	1.157	46	17.7	3	1.99	8.82	0.55	0.63	0.75	1.00	1.10
	22.08.11 2KX							2.01	8.87	0.55	0.63	0.75	1.00	1.06
	22.08.11 2KX							1.96	8.71	0.53	0.62	0.73	0.97	1.07
621124-1	22.08.11 2KX		64.0	1.158	46	17.0	3	2.01	8.46	0.53	0.62	0.73	0.98	1.06
	22.08.11 2KX							1.97	8.67	0.53	0.62	0.73	0.98	1.06
	22.08.11 2KX							1.96	8.58	0.55	0.63	0.75	1.00	1.06
621125-1	22.08.11 2KX		63.2	1.154	47	17.2	3	2.00	8.68	0.55	0.63	0.75	1.00	1.10
	22.08.11 2KX							2.06	8.70	0.55	0.63	0.75	1.00	1.10
	22.08.11 2KX							2.00	8.59	0.53	0.62	0.73	1.00	1.06
621126-1	22.08.11 2KX		62.5	1.157	46	17.6	3	1.89	8.53	0.50	0.58	0.70	0.95	1.07
	22.08.11 2KX							1.99	8.69	0.53	0.62	0.73	0.98	1.06
	22.08.11 2KX							1.98	8.60	0.53	0.62	0.73	0.98	1.06
621127-1	22.08.11 2KX		63.2	1.156	47	17.0	3	1.96	8.69	0.53	0.62	0.73	0.98	1.06

ภาพที่ 3-33 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Cap คอมพาวด์ (T798)

COMPOUND INSPECTION RESULT RECORD SHEET (BX082000) Ver. 1.0.39

24/08/2011
18:54:18

COMPOUND NO. W346DL MIX DATE FROM 200811 TO 240811 MIX NO. 6 LA-201/15

CURING 0 13 MIN RING EL. % 0 MOONEY ML1+4 130 CURELASTOMETER 200 96 MIN

LOT NO.	INSP. DATE	RING MOD.	HS	SPOR	MOONEY VISCOSITY			CURELASTOMETER									
					VISC	SCORCH	MECHINE NO.	ML	MH	T10	T20	T50	T90	T95			
STANDARD			57.0	1.105	42.0	25.0		1.60	8.80	0.46							
	MAX		51.0	1.085	34.0	15.0		1.31	7.20	0.28					0.65	0.81	
	MIN		54.4	1.090	34	21.3		1.43	7.41	0.43	0.53	0.70	0.93	1.01			
620014-1	20.08.11 1Y							1.38	7.39	0.47	0.57	0.73	0.97	1.01			
620015-1	20.08.11 1Y		55.2	1.092	34	20.8	3	1.38	7.40	0.45	0.57	0.72	0.97	1.01			
621001-1	21.08.11 1Y		52.4	1.093	34	23.6	2	1.43	7.64	0.48	0.58	0.75	0.97	1.01			
621002-1	21.08.11 1Y		52.9	1.095	34	23.3	2	1.41	7.52	0.45	0.55	0.72	0.95	1.01			
621003-1	21.08.11 1Y		53.2	1.092	34	23.5	2	1.40	7.48	0.47	0.57	0.73	0.97	1.01			
621004-1	21.08.11 1Y		52.6	1.094	33	23.8	2	1.39	7.59	0.45	0.57	0.73	0.98	1.01			
622062-1	22.08.11 1Z		56.3	1.090	34	21.4	2	1.47	8.11	0.47	0.57	0.73	0.97	1.01			
622063-1	22.08.11 1Z		55.8	1.093	35	21.1	2	1.46	7.98	0.47	0.58	0.75	0.98	1.01			
622064-1	22.08.11 1Z		56.7	1.091	34	21.6	2	1.46	7.90	0.48	0.58	0.76	0.98	1.01			
624006-1	24.08.11 1Y		54.6	1.087	33	22.6	3	1.39	7.49	0.45	0.55	0.72	0.97	1.01			
624007-1	24.08.11 1Y		55.1	1.089	33	22.4	3	1.40	7.45	0.47	0.57	0.73	0.97	1.01			
624008-1	24.08.11 1Y		54.9	1.087	33	22.1	3	1.40	7.53	0.45	0.55	0.72	0.97	1.01			
624009-1	24.08.11 1Y		55.2	1.088	33	22.7	3	1.40	7.54	0.45	0.55	0.72	0.95	1.01			
624010-1	24.08.11 1Y		54.8	1.089	33	22.3	3	1.52	7.71	0.43	0.55	0.73	0.97	1.01			
624011-1	24.08.11 1Y		54.9	1.088	33	22.5	3	1.44	7.64	0.45	0.57	0.73	0.97	1.01			

Exec Print Exit

ภาพที่ 3-34 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Wing คอมพาวด์ (W346)

COMPOUND INSPECTION RESULT RECORD SHEET (BX082000) Ver. 1.0.39

24/08/2011
18:55:34

COMPOUND NO. K005A MIX DATE FROM 200811 TO 240811 MIX NO. 3 LA-201/15

CURING 175 8 MIN RING EL. % 0 MOONEY ML1+4 130 CURELASTOMETER 200 72 MIN

LOT NO.	INSP. DATE	RING MOD.	HS	SPOR	MOONEY VISCOSITY			CURELASTOMETER									
					VISC	SCORCH	MECHINE NO.	ML	MH	T10	T20	T50	T90	T95			
STANDARD			70.0	1.170	41.0	13.0		1.65	12.65	0.35				0.52	0.81		
	MAX		64.0	1.150	31.0	7.0		1.35	10.35	0.29				0.42	0.67		
	MIN		67.0	1.164	42	10.5	2	1.70	14.80	0.35	0.42	0.52	0.73	0.81			
322107-1	23.08.11 2X							1.75	14.79	0.35	0.42	0.50	0.73	0.81			
322108-1	23.08.11 2X		67.8	1.165	41	9.7	2	1.76	15.00	0.37	0.42	0.52	0.73	0.81			
322109-1	23.08.11 2X		68.5	1.164	42	10.2	2	1.72	10.81	0.35	0.42	0.53	0.82	0.91			
322005-1	22.08.11 1Z		67.2	1.163	39	10.4	1	1.59	14.29	0.37	0.42	0.52	0.73	0.81			
322006-1	22.08.11 1Z		67.3	1.164	40	10.5	1	1.58	14.04	0.35	0.40	0.50	0.73	0.81			
322008-1	22.08.11 1Z							1.60	14.14	0.35	0.40	0.50	0.72	0.81			

Exec Print Exit

ภาพที่ 3-35 มาตรฐานค่าการทดสอบของยาง Under tread คอมพาวด์ (K005A)

2. อุณหภูมิของยางคอมพาวด์การควบคุมอุณหภูมิของยางคอมพาวด์ จะใช้การควบคุม โดย Temperature control Unit (TCU) ในภาพที่ 3-36 ซึ่งจะให้ความร้อนผ่านทางน้ำร้อนส่งเข้าสู่เครื่องจักร โดยน้ำร้อนจะได้จากไอน้ำค่าที่ใช้ในการทดลองจะใช้ค่าต่ำสุดและสูงสุดจากหน่วยงานเทคนิคการผลิต



ภาพที่ 3-36 TCU

3. ความเร็วของสายการผลิต การกำหนดความเร็วของสายการผลิตจะกำหนดโดยหน่วยงานเทคนิคการผลิตเพื่อใช้ในการเริ่มการผลิตและหลังจากนั้นเครื่องจักรจะทำการปรับอัตโนมัติเพื่อให้น้ำหนักของดอกยางอยู่ในระดับที่กำหนด โดยความเร็วเริ่มต้นจะใช้ค่าคงที่จากระยะที่ 0 เมตร จนถึงระยะ 30 เมตร ดังแสดงในภาพที่ 3-37 ในค่าคงที่ดังกล่าวมีการกำหนดค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดไว้เพื่อให้สามารถปรับแก้ไขให้เหมาะกับเครื่องจักร และกระบวนการผลิตระดับความเร็วสามารถปรับได้เองโดยตัวพนักงานใน Mode manual ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะใช้การปรับแบบ Manual เช่นกัน



ภาพที่ 3-37 มาตรฐานของค่า ความเร็วของสายการผลิตและการปรับแบบ Manual

4. การทดลองเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

การกำหนดจำนวนการทำซ้ำ (Replicate)

การกำหนดจำนวนการทำซ้ำใช้การคำนวณจากโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab โดยกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้

Power and Sample Size for 2-Level Factorial Design

Number of factors: 7

Number of corner points: 128

Specify values for any three of the following:

Replicates:

Effects: 50

Power values: .95

Number of center points per block: 0

Standard deviation: 30

Design... Options... Graph... Help OK Cancel

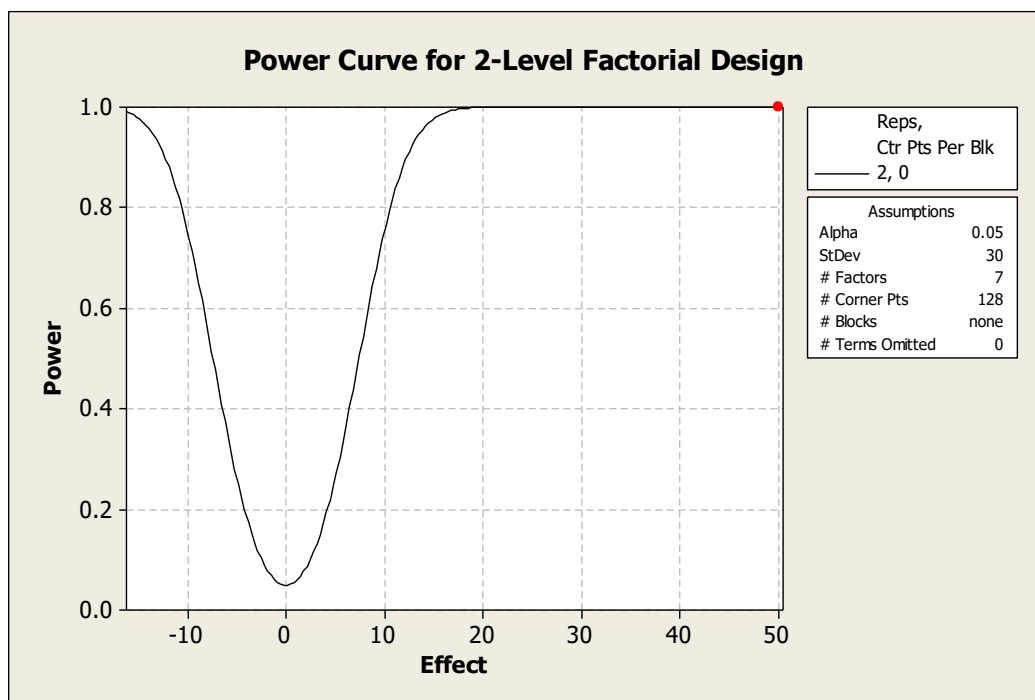
Number of factor = 7 จากปัจจัยที่กำหนด

Number of corner point = 128 จาก 2^7

Effect = 50 ค่า Tolerance ของมาตรฐานการผลิต

Power value = 0.95 จากค่าที่ทางโรงงานตัวอย่างใช้อยู่

Standard deviation = 30 มาจากข้อมูลเก่าของการผลิตจริง



ภาพที่ 3-38 การกำหนดจำนวนการทำซ้ำ (Replicate)

โดยผู้วิจัยได้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง และได้เพิ่มจุดกึ่งกลาง (Center point) จำนวน 5 จุด ดังนั้น จำนวนการทดลองจึงเท่ากับ 261 หน่วยการทดลองสามารถออกแบบตารางเก็บข้อมูลในการผลิตได้ดังตารางที่ 3-2 โดยรายละเอียดข้อมูลทั้งหมดแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3-2 การทดลองเป็นชนิด 2^k Factorial design แบบ Full factorial และบันทึกผล

Run Order	Factor Level							Tread Weight
	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	ความเร็วของสายการผลิต	
1	42	42	31	65	85	55	33.3	
2	50	42	39	75	95	65	33.3	
3	50	34	39	75	85	55	33.3	
4	50	42	31	75	85	55	33.3	
5	42	42	39	75	85	65	31.3	
.	
.	
.	
256	42	42	39	75	95	55	31.3	
257	46	38	35	70	90	60	32.3	
258	46	38	35	70	90	60	32.3	
259	46	38	35	70	90	60	32.3	
260	46	38	35	70	90	60	32.3	
261	46	38	35	70	90	60	32.3	

5. นำผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม Minitab มาเขียนสมการถดถอย
6. นำสมการที่ได้มาทดสอบกับการใช้งานจริง
7. จัดทำโปรแกรม Visual basic เพื่อควบคุมระดับของปัจจัย

8. จัดทำโปรแกรม PLC เพื่อเชื่อมต่อกับ Visual basic
9. ทดลองนำโปรแกรม ไปใช้งานจริงเพื่อเปรียบเทียบผลกับการทดลอง
10. สรุปผล
 - 10.1 สรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาน้ำหนักดอกยาง
 - 10.2 สรุปผลการปรับปรุงเมื่อควบคุมระดับของปัจจัยเปรียบเทียบกับก่อนการแก้ไข
 - 10.3 ความสามารถของโปรแกรมในการควบคุมระดับของปัจจัย
 - 10.4 โอกาสในการขยายผลไปยัง โครงสร้างดอกยางชนิดอื่น ๆ

บทที่ 4

ผลการดำเนินการวิจัย

ผลการทดลอง

จากขั้นตอนวิธีการดำเนินการวิจัยที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ซึ่งได้แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับวิธีการดำเนินการวิจัยในขั้นตอนต่าง ๆ ในบทนี้จะแสดงผลลัพธ์ที่ได้ ดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบ

หลักจากได้ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อปัญหาน้ำหนักของดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐานแล้ว ขั้นตอนต่อมา คือ การเตรียมวัตถุดิบสำหรับการทดลอง โดยการคัดเลือกจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตในกระบวนการปกติซึ่งจะแยกตามค่าที่ต้องการที่ใช้ในการทดลอง โดยผลการทดลองจะใช้น้ำหนักของดอกยางเส้นที่ 3 เนื่องจากจะมีโครงสร้างที่สมบูรณ์แล้วส่วนเส้นที่ 1 และ 2 บางครั้งจะพบ โครงสร้างที่ยังไม่สมบูรณ์ซึ่งจะส่งผลต่อความแปรปรวนของน้ำหนักดอกยางได้

1.1 Cap compound (T798) Viscosity 42 และ 50 Mooney

1.2 Wing compound (W346) Viscosity 34 และ 42 Mooney

1.3 Under tread compound (K005A) Viscosity 31 และ 39 Mooney



ภาพที่ 4-1 Compound ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลอง

2. การดำเนินการทดลองตามตารางที่ 3-2

หลังจากได้วัตถุดิบตามที่กำหนดแล้ว ทดลองผลิตโดยการแปรค่าของตัวแปรที่ 1 ถึงตัวแปรที่ 7 โดยลำดับการผลิตใช้ตามตารางที่ 3-2 ในบทที่ 3 ได้ข้อมูลดังแสดงในตารางที่ 4-1 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดจำนวน 261 รวม Center point 5 ค่า การทดลองแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-1 ผลการทดลอง

Run Order	Factor Level							Line speed	Tread Weight
	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A			
1	42	42	31	65	85	55	33.3	3320	
2	50	42	39	75	95	65	33.3	3290	
3	50	34	39	75	85	55	33.3	3275	
4	50	42	31	75	85	55	33.3	3305	
5	42	42	39	75	85	65	31.3	3300	
.	
.	
.	
257	46	38	35	70	90	60	32.3	3340	
258	46	38	35	70	90	60	32.3	3320	
259	46	38	35	70	90	60	32.3	3320	
260	46	38	35	70	90	60	32.3	3340	
261	46	38	35	70	90	60	32.3	3340	

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ตามลำดับการทดลองในตารางที่ 4-1 นำค่าที่ได้จากการทดลองซึ่ง คือน้ำหนักของดอกยางมาวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักดอกยางที่ทำให้เกิดของเสีย (หรือปัจจัยที่มีนัยสำคัญ) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.025 ($\alpha = 0.025$) โดยการวิเคราะห์ผลอาศัยโปรแกรมทางสถิติ Minitab version 16 มาวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

1. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลองเป็นการตรวจสอบความเหมาะสมและความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยใช้การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) ซึ่งต้องเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$ คือ ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยใกล้เคียง 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวซึ่งจะทำให้ข้อมูลมีค่าถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบ 3 ขั้นตอน คือ

ขั้นตอนที่ 1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)

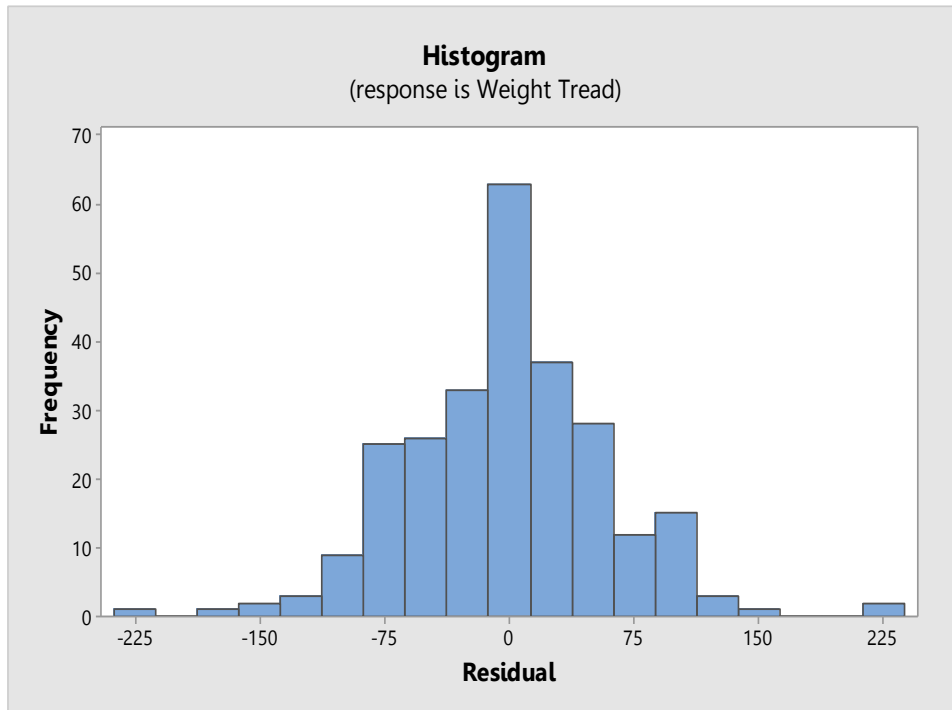
ขั้นตอนที่ 2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) ของส่วนตกค้าง

ขั้นตอนที่ 3 การตรวจสอบความเสถียรของ σ^2 (Variance stability)

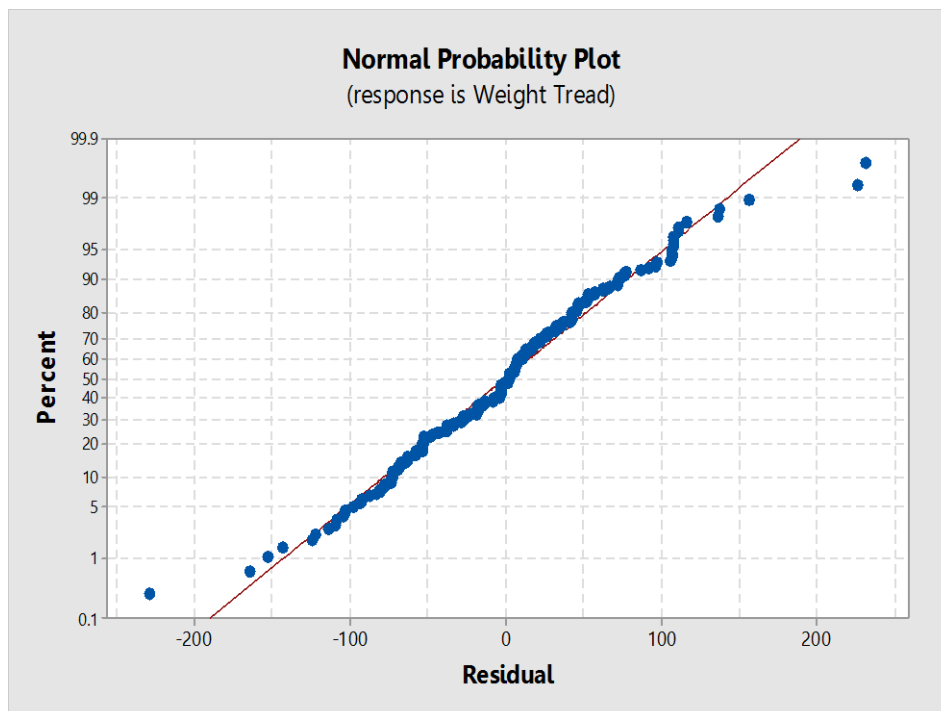
ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้แสดงได้ ดังนี้

1.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution) ของค่าส่วนตกค้าง (Residuals)

จากการพิจารณาการกระจายของค่าส่วนตกค้าง โดยนำข้อมูลจากผลการทดลองในตารางที่ 4-1 มาสร้างเป็นฮิสโตแกรม ดังภาพที่ 4-2 พบว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการกระจายในลักษณะรูประฆังคว่ำ และนำผลการทดลองมาสร้างเป็นแผนภูมิ ดังภาพที่ 4-3 พบว่าค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ซึ่งทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ



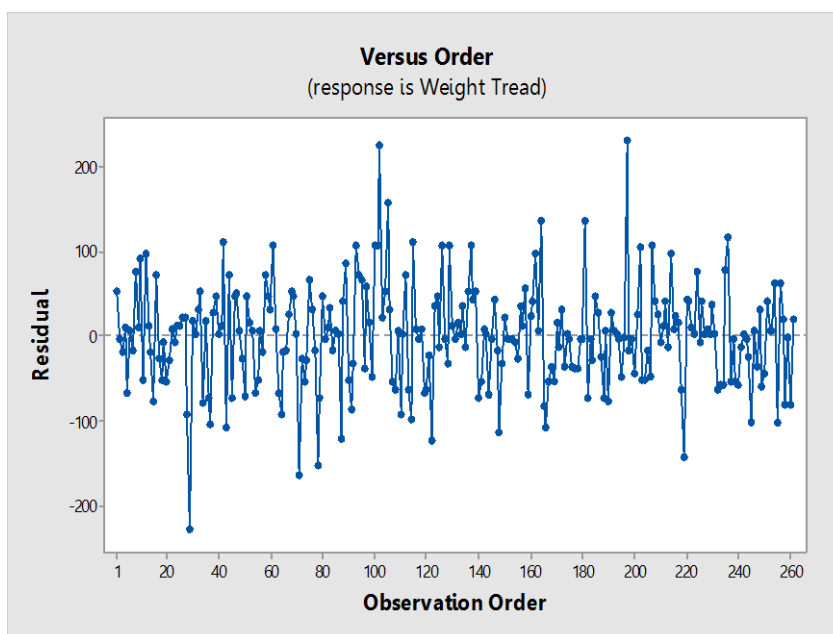
ภาพที่ 4-2 ฮิสโตแกรมค่าส่วนตกค้าง (Residuals)



ภาพที่ 4-3 แผนภูมิค่าส่วนตกค้าง (Residuals)

1.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Residual)

เมื่อพิจารณาการกระจายของข้อมูลพบว่า การกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Residual) มีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ แสดงให้เห็นว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence) ดังแสดงในภาพที่ 4-4 เมื่อทำการทดสอบโดยวิธีการ Runs test เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของสัดส่วนตกค้าง โดยพิจารณาค่า P-value ที่ได้ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4-5 ก็สามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน



ภาพที่ 4-4 แผนภูมิการกระจายตัวของสัดส่วนตกค้าง (Residuals)

Runs Test: RESI1

Runs test for RESI1

Runs above and below K = 4.983055E-13

The observed number of runs = 119

The expected number of runs = 131.176

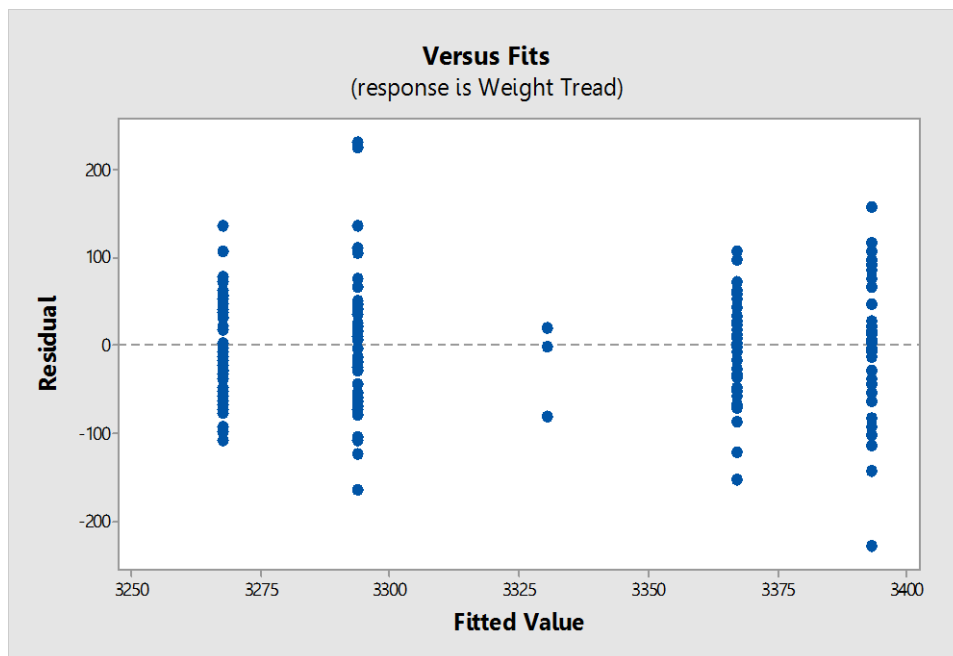
137 observations above K, 124 below

P-value = 0.130

ภาพที่ 4-5 ผล Runs test เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของสัดส่วนตกค้าง

1.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance)

โดยพิจารณาแผนภูมิการกระจายของความคลาดเคลื่อนในภาพที่ 4-6 ที่แสดงการกระจายของค่าพารามิเตอร์แต่ละตัว พบว่าส่วนตกค้าง (Residual) ในแต่ละระดับของแต่ละปัจจัยที่กระจายตัวในด้านบวกและด้านลบมีความสมดุลกัน ซึ่งทำให้ประมาณได้ว่าค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้าง (Residual) มีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับศูนย์ ข้อมูลมีความอิสระและมีความผันแปรคงที่ในรูปแบบของความเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน เมื่อทำการทดสอบด้วยวิธีการ Test of equal variances เพื่อตรวจสอบความเสถียรของสัดส่วนตกค้าง โดยพิจารณาค่า P-value ที่ได้ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 4-7 ก็สามารถสรุปได้ว่าสัดส่วนตกค้างมีการกระจายข้อมูลสม่ำเสมอ



ภาพที่ 4-6 แผนภูมิการกระจายตัวของสัดส่วนตกค้าง (Residuals)

Test for Equal Variances: RES11 versus Viscosity of T798, Line speed

Method

Null hypothesis All variances are equal
 Alternative hypothesis At least one variance is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

95% Bonferroni Confidence Intervals for Standard Deviations

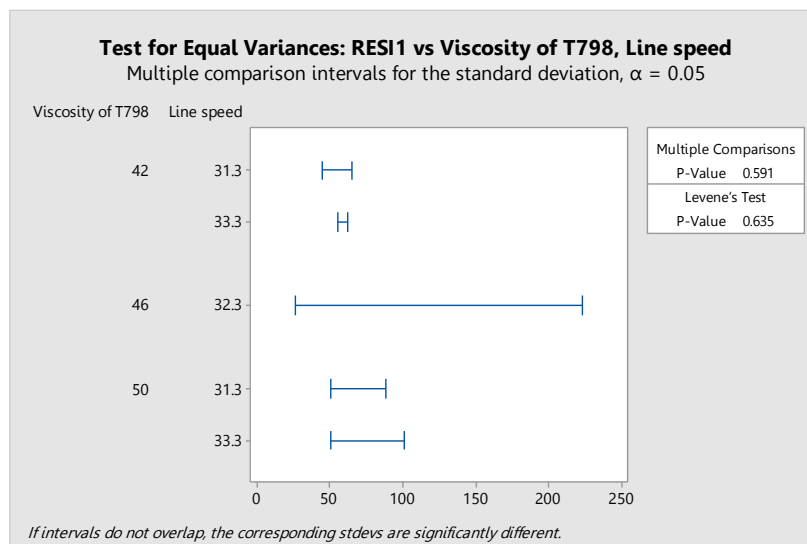
Viscosity of T798	Line speed	N	StDev	CI
42	31.3	64	52.7587	(41.0384, 70.670)
42	33.3	64	57.3302	(48.3231, 70.868)
46	32.3	5	51.7687	(22.7253, 243.238)
50	31.3	64	65.0702	(48.1260, 91.669)
50	33.3	64	70.0789	(50.5612, 101.204)

Individual confidence level = 99%

Tests

Method	Test Statistic	P-Value
Multiple comparisons	-	0.591
Levene	0.64	0.635

ภาพที่ 4-7 ผล Test of equal variances เพื่อตรวจสอบความเสถียรของสัดส่วนตกค้าง



ภาพที่ 4-8 แผนภูมิการ Test of equal variances ของสัดส่วนตกค้าง

การวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคำนวณสำเร็จรูป

เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรม MINITAB16 ได้ผลดังตารางที่ 4-2 สำหรับข้อมูลทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-2 ข้อมูลวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16

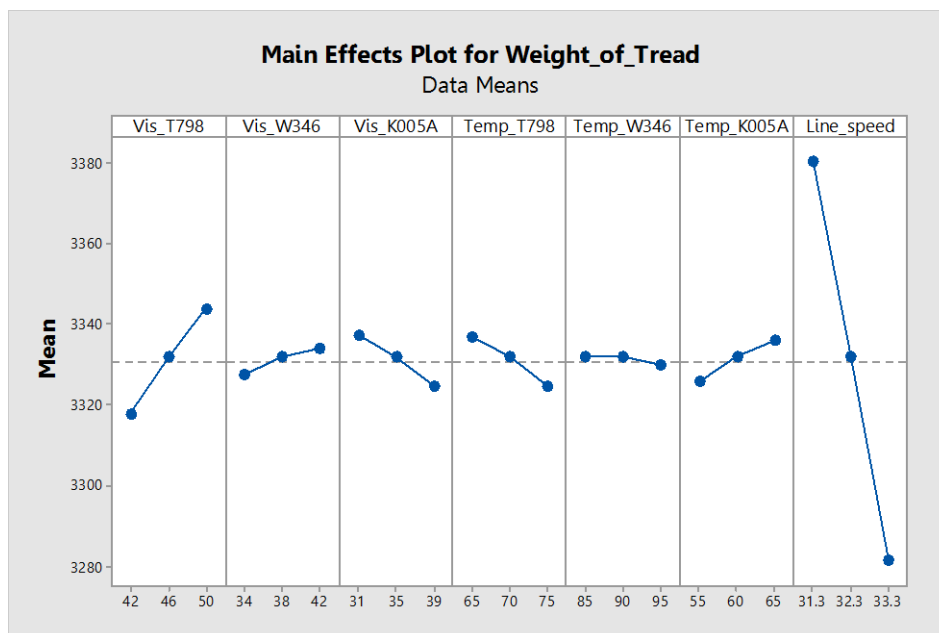
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	128	1394608	10895	5.62	0.000
Linear	7	704012	100573	51.88	0.000
Vis_T798	1	43446	43446	22.41	0.000
Vis_W346	1	2789	2789	1.44	0.232
Vis_K005A	1	9813	9813	5.06	0.026
Temp_T798	1	9567	9567	4.94	0.028
Temp_W346	1	216	216	0.11	0.739
Temp_K005A	1	6652	6652	3.43	0.066
Line_speed	1	631528	631528	325.78	0.000
2-Way Interactions	21	159461	7593	3.92	0.000
Vis_T798*Vis_W346	1	3129	3129	1.61	0.206
Vis_T798*Vis_K005A	1	11091	11091	5.72	0.018
.
.
.
7-Way Interactions	1	295	295	0.15	0.697
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	295	295	0.15	0.697
Curvature	1	3026	3026	1.56	0.214
Error	132	255883	1939		
Total	260	1650490			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
44.0284	84.50%	69.46%	39.57%		

ตารางที่ 4-2 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-value	VIF	
Constant		3330.84	2.75	1210.43	0.000		
Vis_T798	26.05	13.03	2.75	4.73	0.000	1	
Vis_W346	6.60	3.30	2.75	1.20	0.232	1	
Vis_K005A	-12.38	-6.19	2.75	-2.25	0.026	1	
Temp_T798	-12.23	-6.11	2.75	-2.22	0.028	1	
Temp_W346	-1.84	-0.92	2.75	-0.33	0.739	1	
Temp_K005A	10.20	5.10	2.75	1.85	0.066	1	
Line_speed	-99.34	-49.67	2.75	-18.05	0.000	1	
.
.
.
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	2.15	1.07	2.75	0.39	0.697	1	
Ct Pt		-24.80	19.9	-1.25	0.214	1	

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของพารามิเตอร์ทั้ง 7 ตัว พบว่า 2 ตัว ได้แก่ Viscosity of T798 และ Line speed มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) ส่วนค่า Standard deviation จากผลที่ได้ คือ 44.03 มีค่าสูงกว่าค่า Standard deviation จากภาพที่ 3-37 เกิดจากการทดลองใช้ Line การผลิตเดียวในการเก็บข้อมูลแต่ข้อมูลจากภาพที่ 3-37 เป็นข้อมูลในอดีตที่มาจาก 4 Line การผลิต

จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์เพื่อหา Main effect โดยการ Plot ระหว่าง ปัจจัย และตัวแปรตอบสนองได้ผลดังภาพที่ 4-9



ภาพที่ 4-9 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

จากภาพที่ 4-9 พบว่าปัจจัยที่มีผลให้น้ำหนักของดอกยางเปลี่ยนแปลงไปอย่างมาก ได้แก่ Viscosity of T798 และ Line speed เมื่อนำผลการวิเคราะห์ทั้ง 2 ชนิด ในข้างต้นมาพิจารณาเทียบกับโครงสร้างของดอกยางดังภาพที่ 3-4 จะพบว่าส่วนประกอบของดอกยางชนิด Cap-wing มีส่วนประกอบหลัก คือ Cap compound หรือ T798 ถึง 90% ในขณะที่ Wing compound หรือ W346 และ Under tread compound หรือ K005A มีเพียง 3% และ 2% ตามลำดับ ด้วยสัดส่วนที่น้อยของ Wing และ Under tread จึงส่งผลกระทบต่อน้ำหนักดอกยางในระดับที่ต่ำทั้งค่า Viscosity และอุณหภูมิของคอมพาวด์ทั้ง 2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความเกี่ยวเนื่องกัน

Factorial Regression: Weight_of_Tread versus Vis_T798, Line_speed						
Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Model	2	674974	337487	89.26	0.000	
Linear	2	674974	337487	89.26	0.000	
Vis_T798	1	43446	43446	11.49	0.001	
Line_speed	1	631528	631528	167.02	0.000	
Error	258	975516	3781			
Curvature	1	3026	3026	0.80	0.372	
Lack-of-Fit	125	716608	5733	2.96	0.000	
Pure Error	132	255882	1939			
Total	260	1650490				
Model Summary						
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
	61.4904	40.90%	40.44%	39.51%		
Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		3330.36	3.81	874.99	0.000	
Vis_T798	26.05	13.03	3.84	3.39	0.001	1.00
Line_speed	-99.34	-49.67	3.84	-12.92	0.000	1.00
Regression Equation in Uncoded Units						
Weight_of_Tread = 4785 + 3.257 Vis_T798 - 49.67 Line_speed						

ภาพที่ 4-10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลังจากการลดรูปสมการ

ผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนหลังจากตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อค่าน้ำหนักของดอกยางดังภาพที่ 4-10 พบว่า R^2 มีค่าเท่ากับ 40.90% ลดลงจากก่อนลดรูป คือ 84.50% เนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่มีผลนั้นมีจำนวนหลายปัจจัย

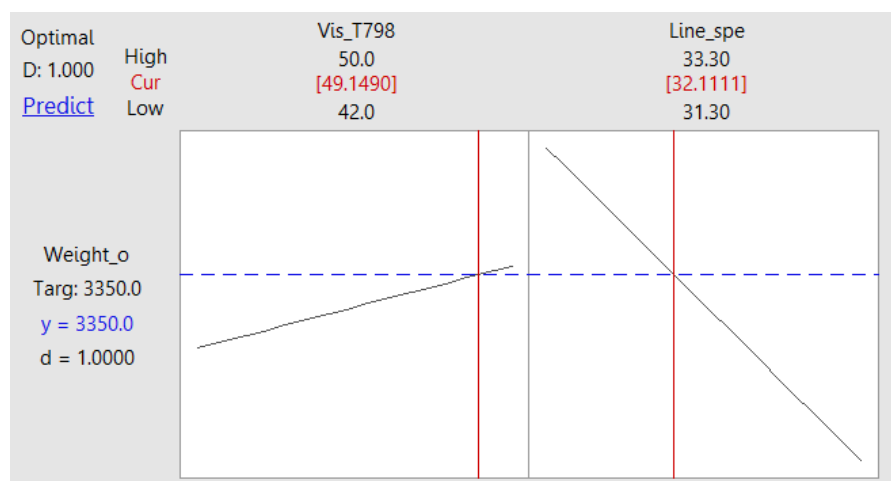
การวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 โดยการกำหนดเป้าหมายที่ 3,350 กรัม ขอบเขตบนที่ 3,450 กรัม และขอบเขตล่างที่ 3,250 กรัม ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 4-11

Response Optimization: Weight_of_Tread						
Parameters						
Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Weight_of_Tread	Target	3250	3350	3450	1	1
Solution						
Solution	Vis_T798	Line_speed	Weight_of_Tread	Composite		
1	49.1490	32.1111	3350	Fit Desirability	1	
Multiple Response Prediction						
Variable	Setting					
Vis_T798	49.1490					
Line_speed	32.1111					
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI		
Weight_of_Tread	3350.00	4.92	(3340.32, 3359.68)	(3228.53, 3471.47)		

ภาพที่ 4-11 ผลการวิเคราะห์ระดับที่เหมาะสมของปัจจัยโดยใช้โปรแกรม Minitab 16

ค่าที่ดีที่สุดที่จะทำให้น้ำหนักดอกยางเข้าใกล้เป้าหมายที่สุด คือ ความหนืดของ T798 ต้องอยู่ที่ 49.15 และ Line speed ต้องอยู่ที่ 32.11 เมตรต่อนาที จะได้น้ำหนักดอกยางที่ 3,350 กรัม ซึ่งเท่ากับน้ำหนักเป้าหมายดังภาพที่ 4-12

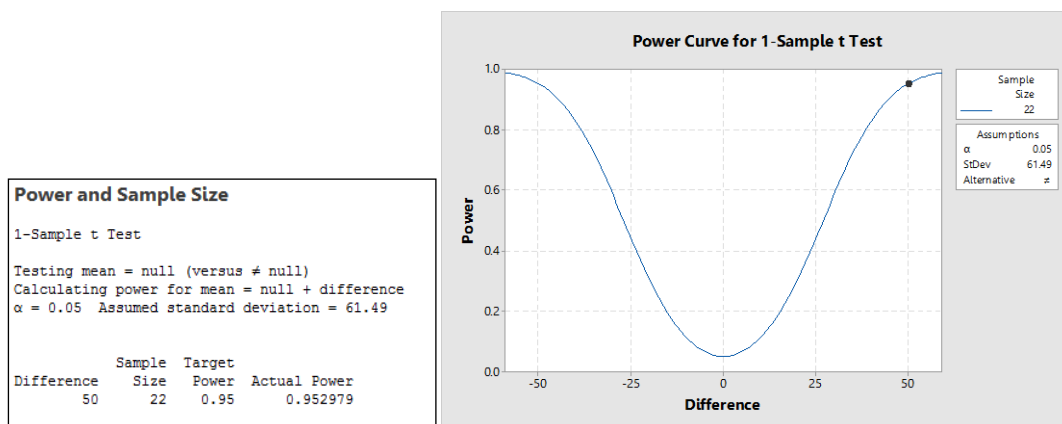


ภาพที่ 4-12 ระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Minitab 16

การทวนสอบความถูกต้องของสมการ

เพื่อทวนสอบความถูกต้องของสมการเชิงเส้นที่ได้ จึงทำการทดสอบโดยการผลิตจริง โดยใช้ค่า Viscosity of T798 และ Line speed ที่ดีที่สุดที่ได้จากคำนวณ คือ Viscosity 49.15 แต่ในการทดลองจริงเครื่องวัดค่า Viscosity วัดได้เฉพาะจำนวนเต็ม จึงปรับขึ้นเป็น 50.00 ตามตารางที่ 4-3 โดยการเลือกจากคอมปาวด์ที่ใช้ผลิตงานปกติที่มีค่าตามที่กำหนด ส่วน Line speed ใช้ที่ 32.11 เมตร/ นาที และทำซ้ำ 30 ครั้ง ตามตารางที่ 4-4 (โดยรายละเอียดทั้งหมดอยู่ในภาคผนวก ก) โดยใช้ดอกยาง Code เดิม ซึ่งมีน้ำหนักเป้าหมายอยู่ที่ 3350 ± 100 กรัม จากนั้นทำการตรวจสอบการกระจายตัวของการทดลองทำซ้ำในรูปแบบกราฟฮิสโตแกรม แสดงดังภาพที่ 4-14 ส่วนตัวแปรอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับควบคุม ดังนี้ Viscosity ของ Wing และ Undertread เลือกค่ากลางจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตจริง ส่วนอุณหภูมิใช้ค่าต่ำสุด เพื่อประหยัดพลังงาน

การคำนวณเพื่อหาจำนวนตัวอย่างได้จาก Minitab โดยการกำหนดส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ 61.49 ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการคำนวณ โดยใช้สมการแบบลดรูปโดยค่า Difference ใช้ค่า 50 กรัม ซึ่งเป็นค่าน้ำหนักที่เครื่องชั่งตัวที่ 3 สามารถอ่านค่าได้จะได้จำนวนตัวอย่างการทดลองอยู่ที่ 22 ตัวอย่าง ดังภาพที่ 4-13 แต่ในการทดลองจริงผู้วิจัยเลือกจำนวนตัวอย่างการทดลองที่ 30 ตัวอย่าง



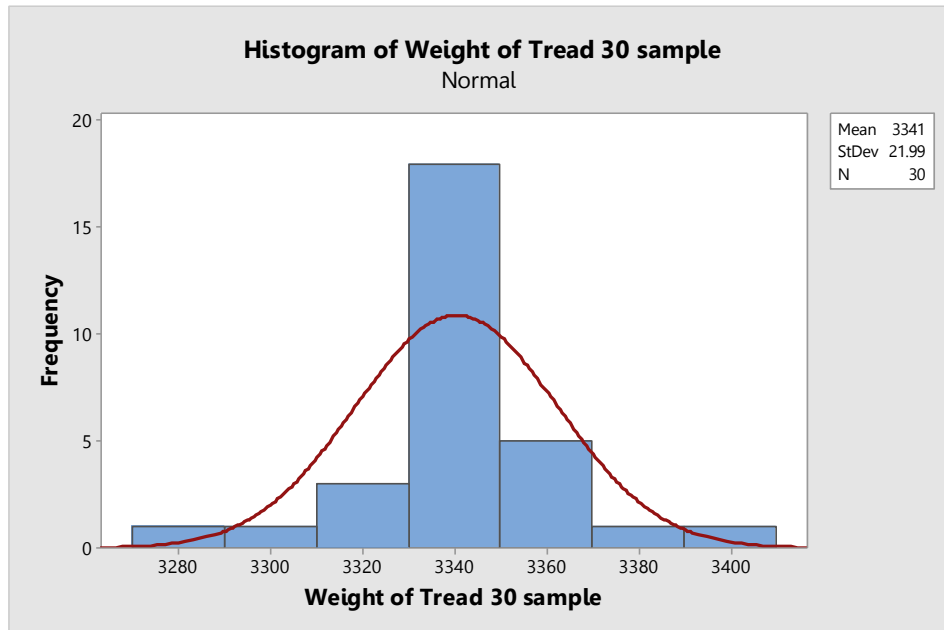
ภาพที่ 4-13 ผลการหาขนาดตัวอย่างการทดลองซ้ำ

ตารางที่ 4-3 ระดับของปัจจัย

ปัจจัย	ค่าควบคุม	หน่วย
1. Viscosity ของ Cap Compound (T798)	50	Mooney
2. Viscosity ของ Wing Compound (W346)	38	Mooney
3. Viscosity ของ Under Tread Compound (K005A)	35	Mooney
4. อุณหภูมิ ของ Cap Compound (T798)	65	Mooney
5. อุณหภูมิ ของ Wing Compound (W346)	85	องศาเซลเซียส
6. อุณหภูมิ ของ Under Tread Compound (K005A)	55	องศาเซลเซียส
7. Line speed	32.11	องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4-4 ผลการทดลองทำซ้ำ

ลำดับ	น้ำหนักดอกยาง (กรัม)
1	3330
2	3300
3	3330
4	3320
.	.
.	.
29	3345
30	3360



ภาพที่ 4-14 การกระจายตัวของการทดลองทำซ้ำ

ทดลองผลิตจริงโดยการคำนวณค่า Viscosity of T798 และ Line speed ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ดอกยางเข้าใกล้ค่าเป้าหมายที่สุด โดยใช้ค่าเป้าหมายเดิมที่ 3350 ± 100 กรัม ซึ่งจากสมการเชิงเส้นจะได้ค่าของ Viscosity of T798 อยู่ที่ 49.15 และ Line speed อยู่ที่ 32.11 เมตร/นาที่ ซึ่งจะให้ได้ค่าน้ำหนักดอกยางเส้นที่ 3 อยู่ที่ 3343 ± 27.60 กรัม

หลังจากได้สมการ Regression และตัวแปรที่มีผลต่อน้ำหนักดอกยางแล้วขั้นตอนต่อไปคือการนำสมการไปใช้งานจริงกับดอกยาง Size อื่นที่มีโครงสร้างชนิด Cap wing

การวิเคราะห์การถดถอยของสมการ (Regression) ของน้ำหนักดอกยาง การพิจารณาในการเลือกสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อใช้หาจุดเหมาะสมของค่าตอบสนอง ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิติเชิงวิศวกรรม และข้อสรุปจากการทดลองโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งการเลือกรูปแบบสมการจากผลการวิเคราะห์จะพิจารณาจาก

ค่าความมีนัยสำคัญของการถดถอยของสมการ (Regression) คือ การทดสอบเพื่อที่จะตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าตอบสนองและตัวแปรถดถอย สมมุติฐานที่เหมาะสม คือ

$$H_0 : \mu_1 = 3,350$$

$$H_1 : \mu_1 \neq 3,350 \text{ for at least one } i : \text{กำหนด } \alpha = 0.05$$

โดยที่ μ_1 คือ ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักดอกยางที่อยู่ในค่าที่กำหนด

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนถ้าเรายอมรับสมมติฐานหลัก ($P\text{-Value} > \alpha$) และสรุปว่าฟังก์ชันการถดถอยไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้น สมการทางคณิตศาสตร์ที่กำลังพิจารณาอยู่ก็ไม่ควรจะถูกนำมาพิจารณาอีกต่อไป และหากมีการปฏิเสธสมมติฐานหลัก ($P\text{-value} < \alpha$) จะบอกให้เราทราบว่าอย่างน้อยที่สุดตัวแปรถดถอยหนึ่งตัวจะมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อแบบจำลองของสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการทดสอบสมมติฐานโดยใช้วิธีการ t-test สำหรับตัวอย่างการทดลองที่ 30 ตัวอย่าง

และเพื่อยืนยันความถูกต้องของสมการในกรณีที่ใช้งานปกติโดยใช้สมการแปรผันตามค่า Viscosity และทดลองจำนวน 300 ตัวอย่างโดยใช้ z-test สำหรับทดสอบสมมติฐาน

One-Sample T: Weight of Tread 30 sample						
Test of $\mu = 3350$ vs $\neq 3350$						
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	
Weight of Tread 30 sampl	30	3340.50	21.99	4.01	(3332.29, 3348.71)	
Variable	T	P				
Weight of Tread 30 sampl	-2.37	0.025				
One-Sample Z: Weight of Tread 300 sample						
Test of $\mu = 3350$ vs $\neq 3350$						
The assumed standard deviation = 61.49						
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	
Weight of Tread 300 samp	300	3342.13	18.64	3.55	(3335.18, 3349.09)	
Variable	Z	P				
Weight of Tread 300 samp	-2.22	0.027				

ภาพที่ 4-15 ผลการทดสอบ t-test และ z-test

จากค่า P-value ของผลการทดสอบ t-test และ z-test เท่ากับ 0.025 และ 0.027 ตามลำดับ ซึ่ง $< \alpha$ (0.05) เราจึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก จึงสรุปว่าสมการถดถอยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ส่วนค่า Standard deviation จากผลที่ได้ คือ 61.49 ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Standard deviation จากตารางที่ 4-2 เกิดจากการลดรูปสมการซึ่งตัดปัจจัยที่ไม่เกี่ยวข้องอย่างมีนัยสำคัญออกไป

โดยมีโมเดลของสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$Y = 4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed}$$

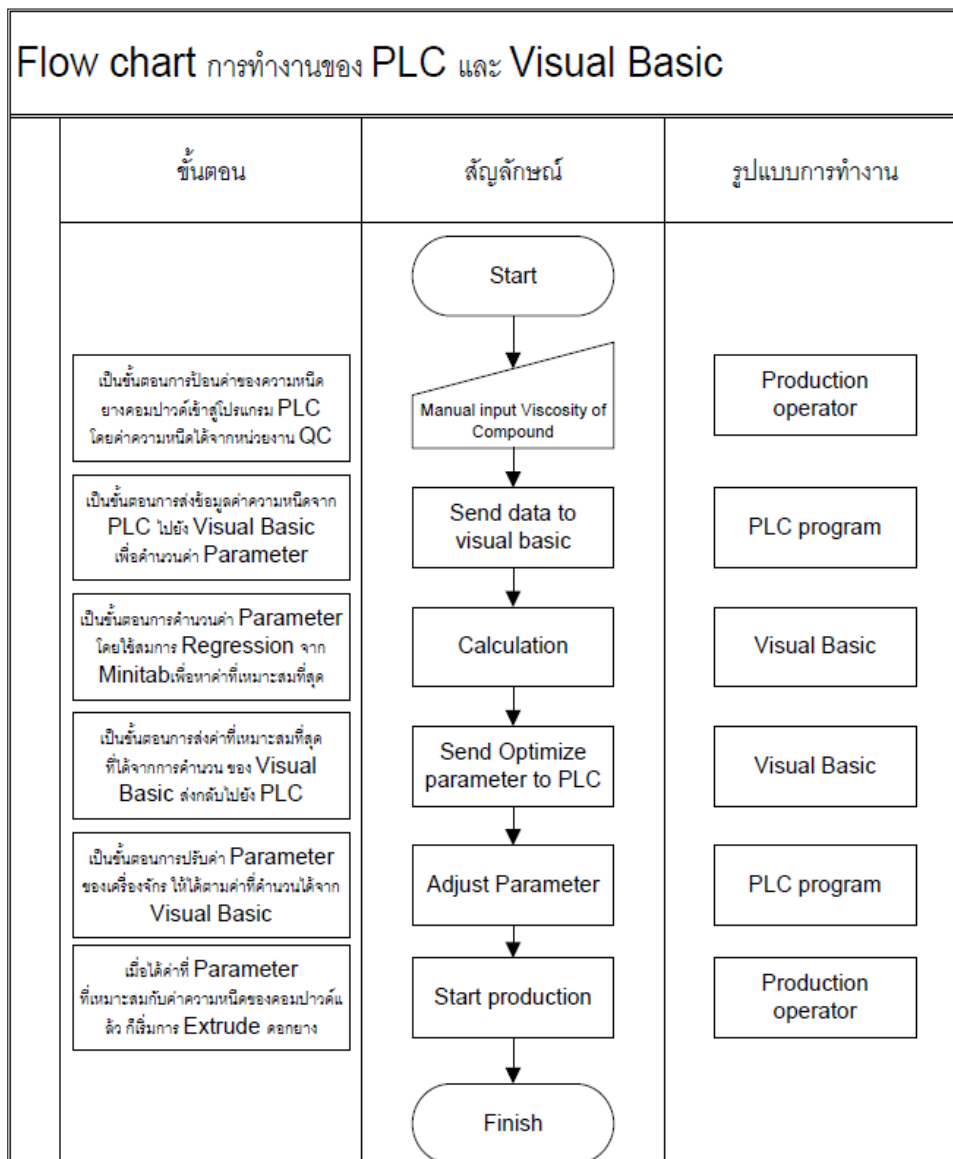
โดยมีข้อจำกัด คือ

$$31.3 \leq \text{Line speed} \leq 33.3$$

$$42.0 \leq \text{Viscosity of T798} \leq 50.0$$

การใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมระดับของปัจจัย

เมื่อ ได้สมการ Regression ที่สามารถใช้งานได้จริงแล้ว นำสมการดังกล่าวมาเขียนในโปรแกรมคำนวณโดยใช้ Visual basic โดยมีลำดับขั้นตอน ดังนี้ ในการออกแบบระบบควบคุมทางผู้ทำวิจัยได้ให้ทางโรงงานตัวอย่างเป็นผู้ช่วยในการจัดทำ และได้กำหนดตัวแปรทั้ง 3 ตัว ในการออกแบบในครั้งแรก เพื่อง่ายต่อการแก้ไขในขั้นต่อไปและลดเวลาในการขยายผลไปยังหน่วยผลิตอื่น ๆ



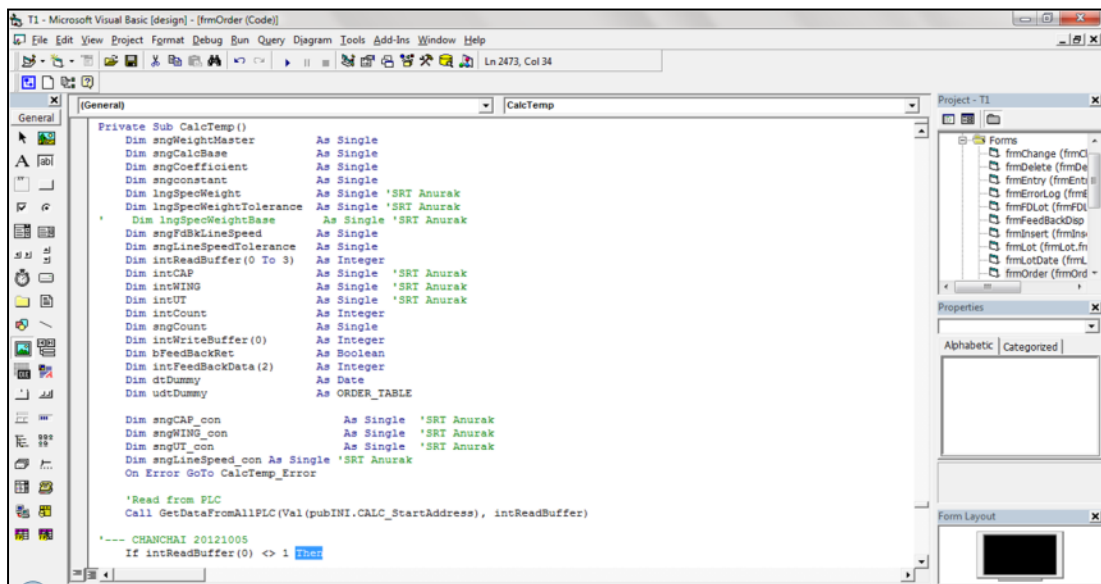
ภาพที่ 4-16 ขั้นตอนการเขียน โปรแกรม

1. การเขียน โปรแกรม

การเขียน โปรแกรม Visual basic 6.0 ได้รับความช่วยเหลือจากทีมงานของโรงงาน ตัวอย่างโดยละเอียดได้สรุปดังแสดงในภาพที่ 4-16, 4-17 และ 4-18



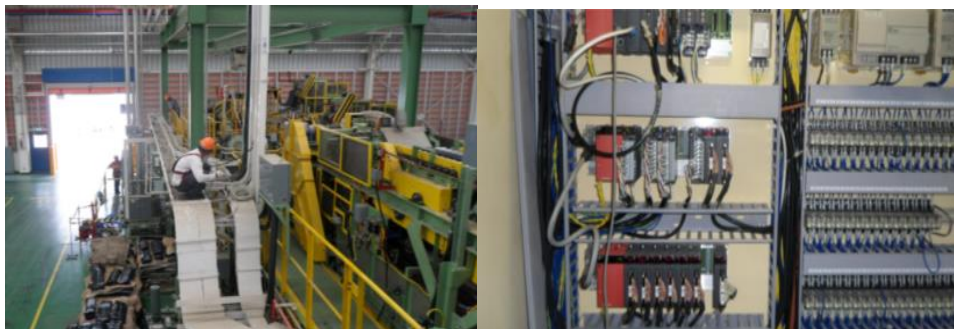
ภาพที่ 4-17 โปรแกรมที่ใช้



ภาพที่ 4-18 หน้าข้อมูลและค่าควบคุมที่ใช้ในการเขียนโปรแกรม

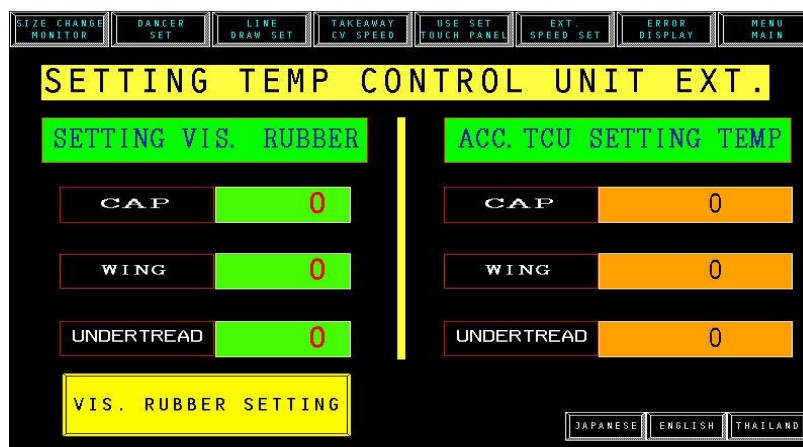
2. ขั้นตอนการติดตั้งตัวปรับค่า Parameter ในเครื่องจักร
เดินสายควบคุมจากตู้ควบคุมหลักเข้ากับชุด PLC เพื่อใช้ในการควบคุมความเร็วของ
เครื่องจักร เนื่องจากการใช้การควบคุมความเร็วของเครื่องจักรในช่วงต้นของการผลิต
จึงจำเป็นต้องแยกชุดควบคุมออกจากระบบปกติเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้น ได้จากการส่ง

ค่าความเร็วช่วงเริ่มการผลิตและช่วงที่เป็นการควบคุมโดยชุดชั่งน้ำหนัก จึงต้องติดตั้งสายสัญญาณใหม่และติดตั้งชุด Module ใหม่ดังแสดงในภาพที่ 4-19



ภาพที่ 4-19 การติดตั้งสายส่งสัญญาณ

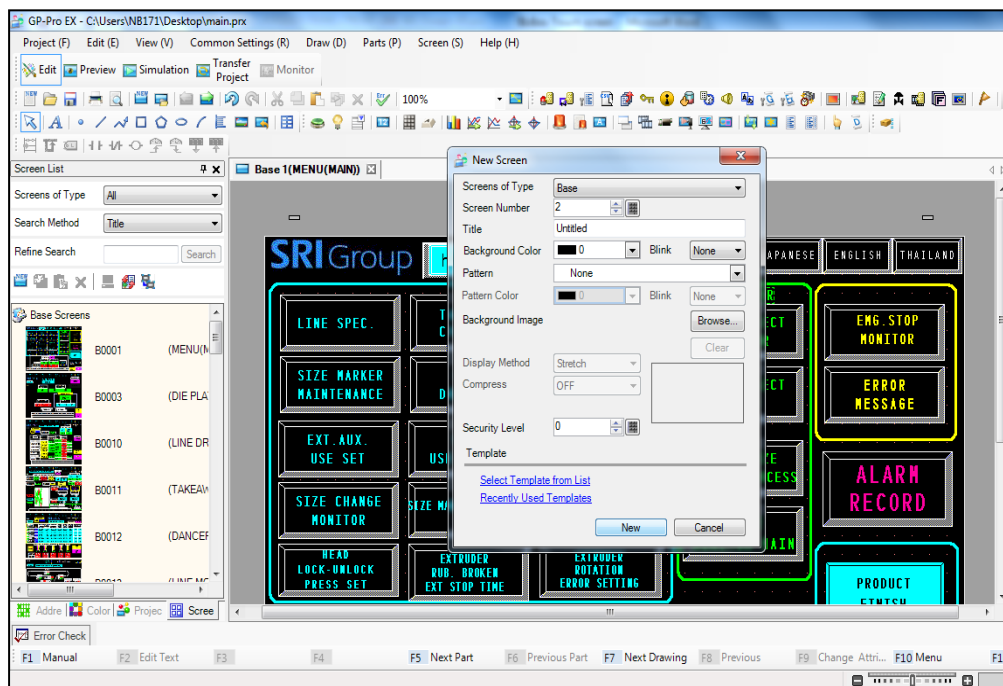
3. การสร้าง Touch screen สำหรับรับค่า เพื่อส่งให้ PLC จำนวน
 ทำการสร้าง Touch screen เพื่อรับข้อมูลความหนืดของคอมพาวด์ส่งไปยัง PLC ดังภาพ
 ที่ 4-20 โดยโปรแกรมที่ใช้คือ GP-Pro EX โดยรายละเอียดของการสร้างมี ดังนี้



ภาพที่ 4-20 หน้าจอ Touch screen การรับข้อมูลเข้า PLC

สำหรับการสร้าง Touch screen นี้เป็นการเพิ่มเมนูในหน้าต่างหลัก เพื่อใช้ในการรับข้อมูลจากผู้ปฏิบัติงาน โดยทำการเพิ่มเมนูที่ชื่อว่า Setting temp control unit ext. ขั้นตอนการสร้าง Touch screen มี ดังนี้

3.1 สร้างหน้าต่าง (Screen) ใหม่โดยคลิกที่ Screen จากนั้นคลิก New screen แล้วคลิก New ดังภาพที่ 4-21



ภาพที่ 4-21 การสร้างหน้าต่าง (Screen) ใหม่

3.2 ทำการสร้าง Change screen switch ซึ่งมีลำดับขั้นตอนย่อย ดังนี้

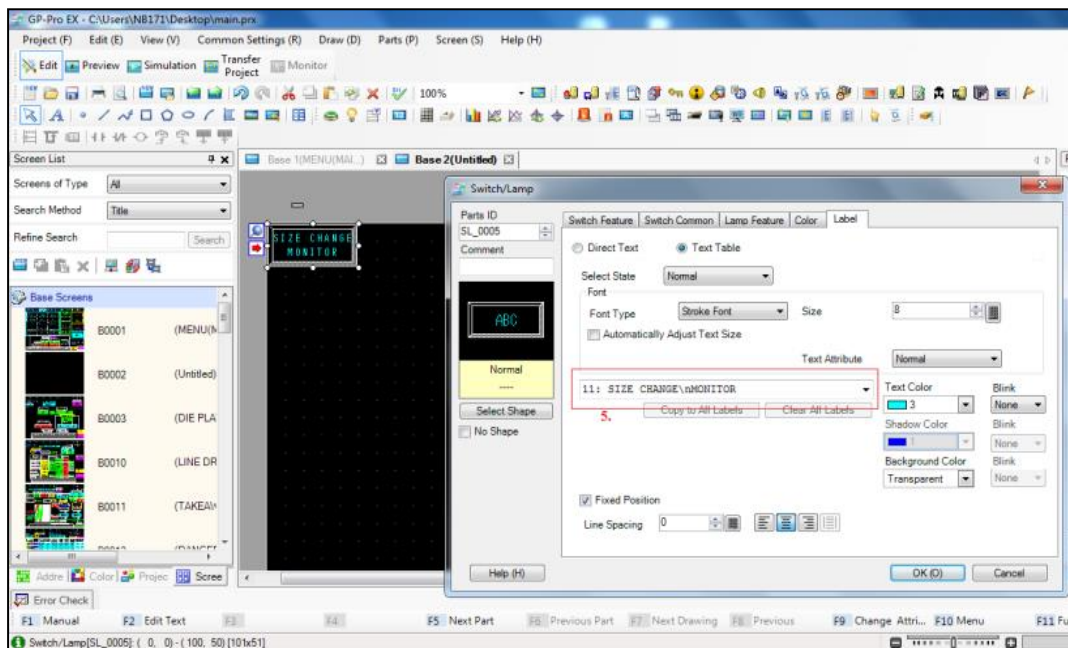
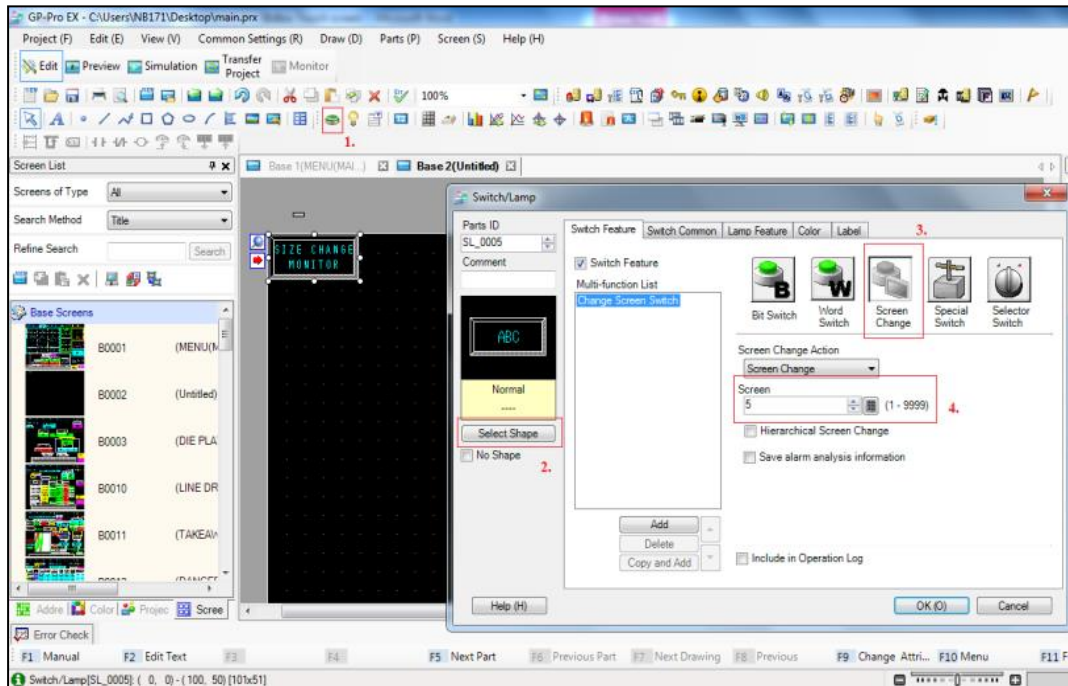
3.2.1 คลิกที่ปุ่มสร้าง Switch จากนั้นวาดกรอบลงในหน้าจอแล้วดับเบิ้ลคลิก แล้วคลิกที่ Add จากนั้นเลือก Change screen switch

3.2.2 เลือกรูปร่างตามต้องการโดยคลิกที่ Select shape

3.2.3 คลิกเลือก Screen change (ในกรณีที่ต้องการให้สวิตช์เชื่อมต่อกับหน้าต่างอื่น ๆ)

3.2.4 เปลี่ยนค่า Screen ที่ต้องการให้แสดงเมื่อกดสวิตช์

3.2.5 พิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบนสวิตช์ โดยคลิกเลือก Label แล้วพิมพ์อักษรลงในช่องสี่เหลี่ยม จากนั้นคลิก OK

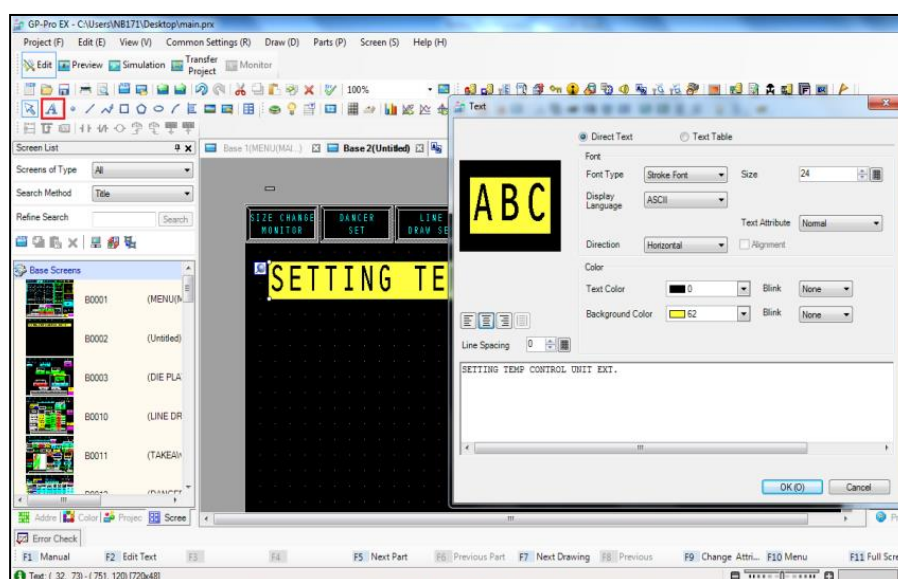


ภาพที่ 4-22 การสร้าง Change screen switch สำหรับข้อที่ 3.2.1-3.2.5

3.2.6 กรณีที่พิมพ์อักษรลงไม่ได้ ให้คลิกที่ Common settings จากนั้นคลิก Text table แล้วพิมพ์อักษรลงในตารางช่องที่ 2 ก่อน จากนั้นกลับไปพิมพ์ลงในหน้า Switch/ Lamp แล้วคลิกที่ Label อีกครั้ง

3.3 การสร้างกล่องข้อความ

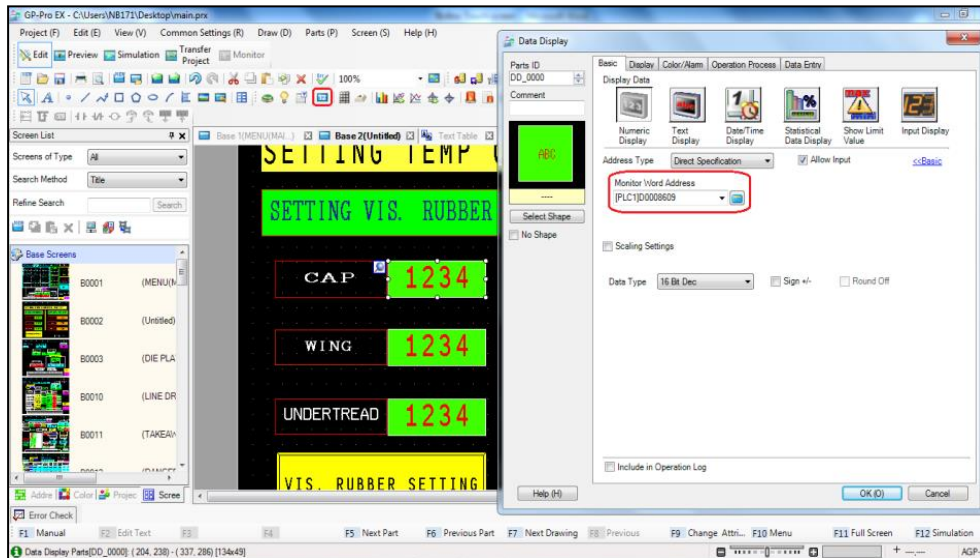
การสร้างกรอบสี่เหลี่ยมโดยคลิกที่ Text จากนั้นวาดกรอบลงในหน้าจอ แล้วทำการพิมพ์อักษรลงในกรอบสี่เหลี่ยม ดังภาพที่ 4-23



ภาพที่ 4-23 การสร้างกล่องข้อความ

3.4 การนำค่าจาก PLC มาแสดงบนจอ

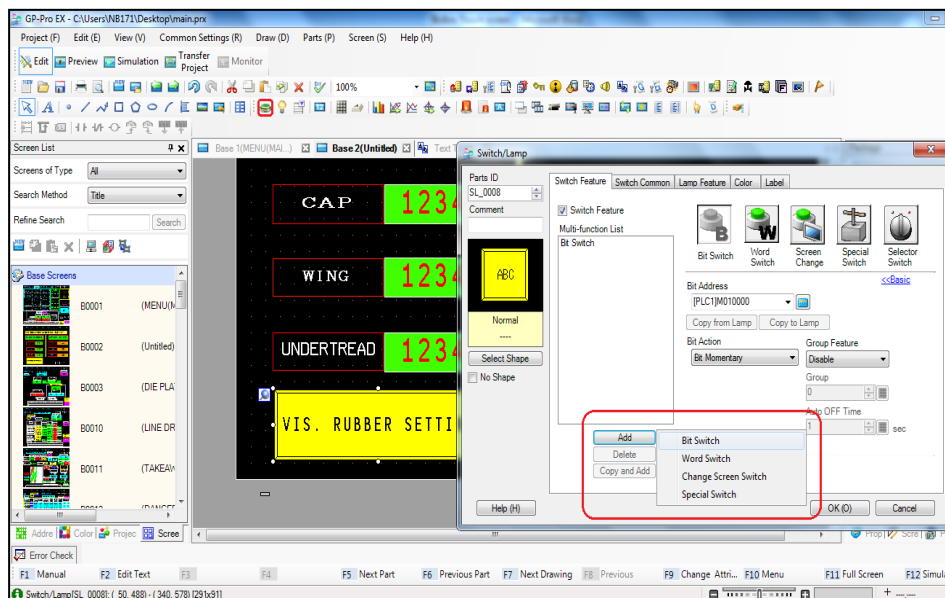
ทำได้โดยการคลิกที่ Data display จากนั้นป้อนข้อมูล Address ของ PLC ที่ต้องการแสดงผลลงใน Monitor word address แล้วคลิก OK ดังภาพที่ 4-24



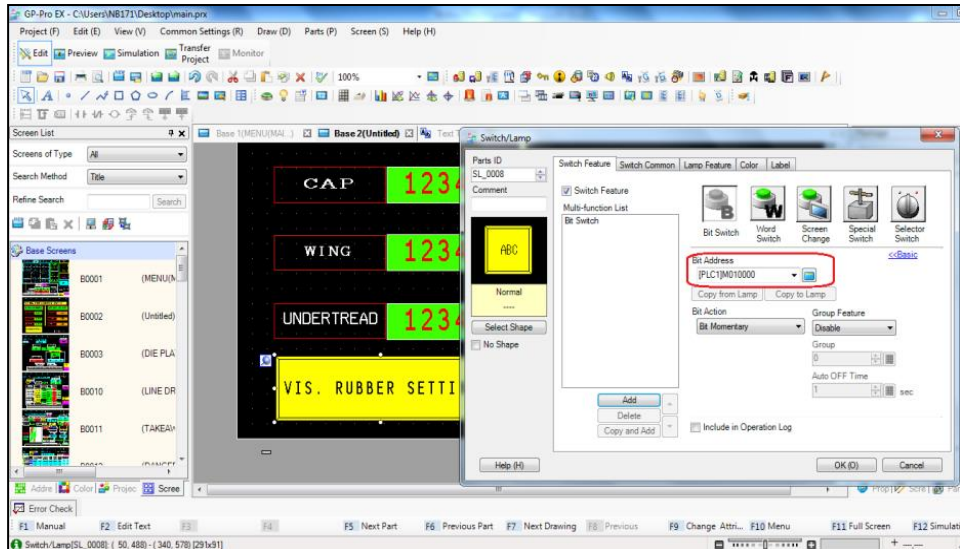
ภาพที่ 4-24 การนำค่าจาก PLC มาแสดงบนจอ

3.5 การสร้าง Bit switch

ทำได้โดยคลิกที่ปุ่มสร้าง Switch จากนั้นวาดกรอบลงในหน้าจอแล้วดับเบิลคลิกแล้วคลิกที่ Add จากนั้นเลือก Bit switch ดังภาพที่ 4-25 จากนั้นป้อนข้อมูล Address ของ PLC ที่ต้องการใน Bit address ดังภาพที่ 4-26

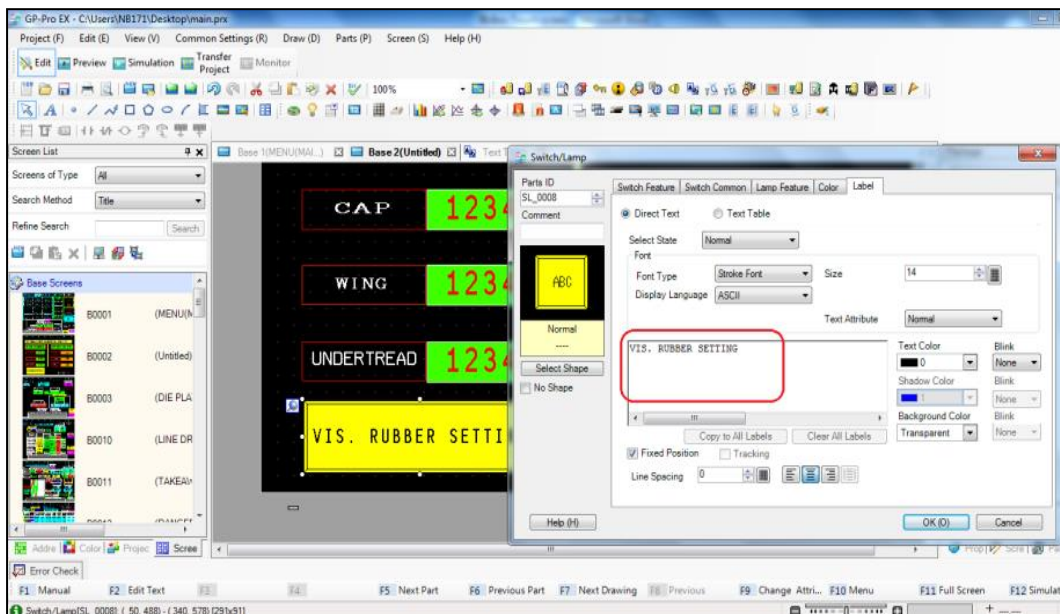


ภาพที่ 4-25 การสร้าง Bit switch



ภาพที่ 4-26 การป้อนข้อมูล Address ของ PLC ใน Bit address

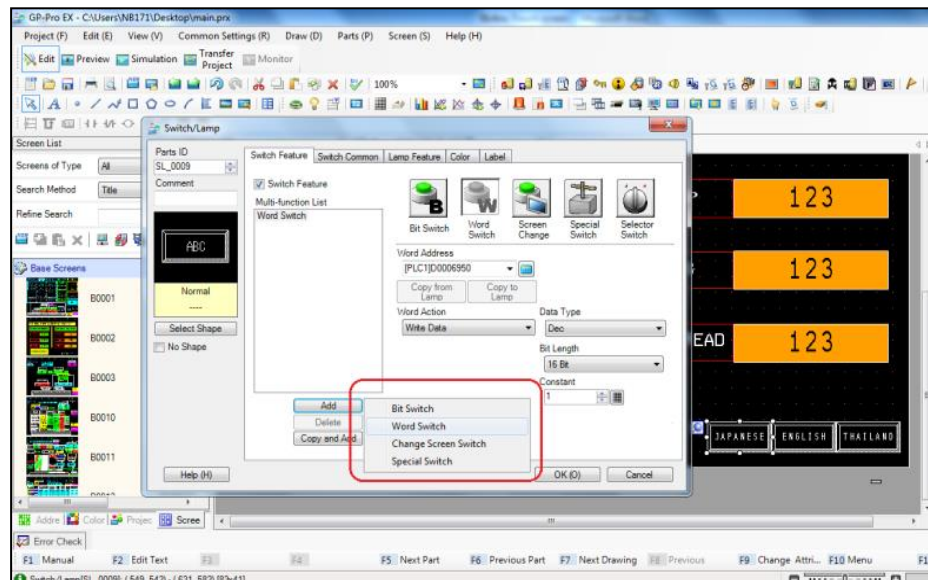
หลังจากนั้นพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบนสวิตช์ โดยคลิกเลือก Label แล้วพิมพ์อักษรลงในช่องสี่เหลี่ยม จากนั้นคลิก OK ดังภาพที่ 4-27



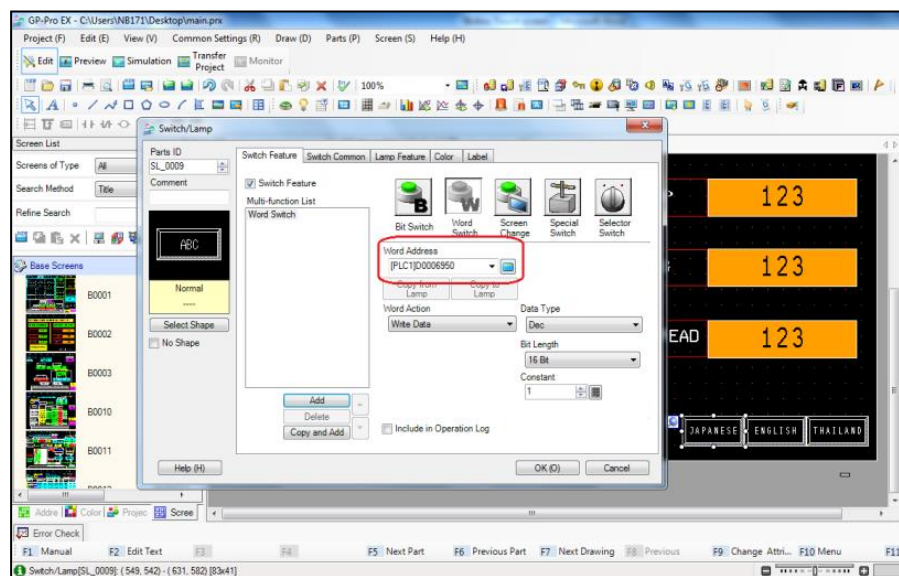
ภาพที่ 4-27 การพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบน Bit switch

3.6 การสร้าง Word switch

ได้โดยคลิกที่ปุ่มสร้าง Switch จากนั้นวาดกรอบลงในหน้าจอแล้วดับเบิลคลิกแล้วคลิกที่ Add จากนั้นเลือก Word switch ดังภาพที่ 4-28 จากนั้นป้อนข้อมูล Address ของ PLC ที่ต้องการใน Word switch ดังภาพที่ 4-29

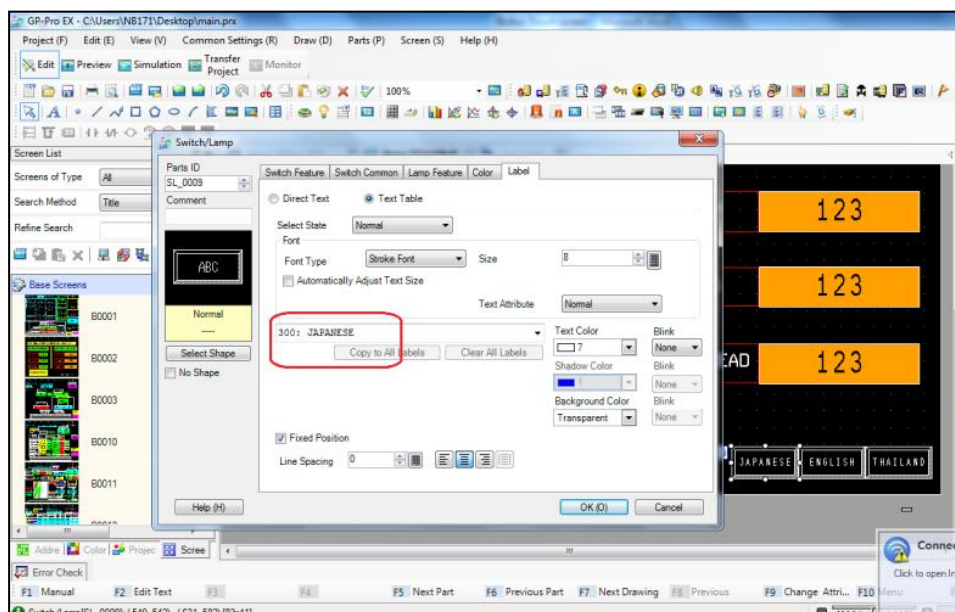


ภาพที่ 4-28 การสร้าง Word switch



ภาพที่ 4-29 การป้อนข้อมูล Address ของ PLC ใน Word address

หลังจากนั้นพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบนสวิตช์ โดยคลิกเลือก Label แล้วพิมพ์อักษรลงในช่องสี่เหลี่ยม จากนั้นคลิก OK ดังภาพที่ 4-30



ภาพที่ 4-30 การพิมพ์ตัวอักษรที่ต้องการให้แสดงบน Word switch

4. ขั้นตอนการเขียน PLC สำหรับการคำนวณค่าต่าง ๆ

ทำการเขียน โปรแกรม PLC เพื่อรองรับการป้อนค่าความหนืดของคอมพาวด์ โดยโปรแกรมที่ใช้ในการเขียน คือ MELSOFT series GX Developer สำหรับหัวข้อของการเขียนโปรแกรมมี ดังนี้

4.1 หัวข้อ Setting viscosity rubber

เพื่อรับค่า Viscosity ของ Compound แล้วส่งข้อมูลให้ PLC คำนวณค่า ซึ่งหัวข้อ Setting viscosity rubber เป็นลักษณะของหน้าต่างที่ให้ผู้ใช้งานก็ยค่า Viscosity ของยาง เพื่อให้โปรแกรมนำไปคำนวณอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งค่าที่ก็ยจะเข้าไปใน Address ของ PLC โดย Address ของ CAP ใช้ Address D8609 ส่วน WING ใช้ Address D8610 และ UNDERTREAD

ใช้ Address D8611 โดยค่า Viscosity ที่ผู้ใช้งานทำการคีย์เข้ามา ข้อมูลจะถูกส่งไปให้ Factory automation คำนวณค่าเมื่อคำนวณเสร็จข้อมูลจะส่งกลับไปที่ ACC. TCU SETTING TEMP ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับค่า Viscosity นั้น ๆ

4.2 หัวข้อ ACC. TCU SETTING TEMP

หรือเป็นค่า Actual ที่เหมาะสมกับ Viscosity ของยางขณะนั้น ซึ่งหัวข้อ ACC. TCU SETTING TEMP. เป็นลักษณะของหน้าต่างที่ใช้ในการแสดงค่า Setting ของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในกรณีที่ว่า Viscosity มีความแตกต่างจากขั้นตอนการเปลี่ยนล้อตกรการผลิต หรือการเปลี่ยนชนิดการผลิต โดยค่าที่แสดง Address ของ PLC ของ CAP ใช้ Address D8605 ส่วน WING ใช้ Address D8606 และ UNDERTREAD ใช้ Address D8607 โดยค่าของ ACC. TCU SETTING TEMP. จะนำไปคำนวณหาค่าของสัญญาณที่จะส่งให้ TCU โดยขั้นตอนการทำงานของ Ladder ของแต่ละ Address มีรายละเอียด ดังนี้

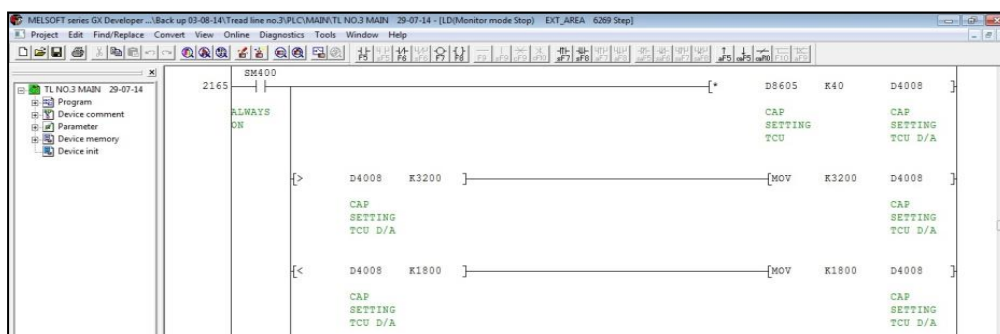
4.2.1 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ CAP (ภาพที่ 4-31)

4.2.1.1 D8605 x K40 จากนั้น นำผลลัพธ์ที่ได้ไปที่ D4008

4.2.1.2 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4008 กับ K3200 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4008 มากกว่า K3200 ให้ทำการนำค่าของ K3200 ไปที่ D4008

4.2.1.3 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4008 กับ K1800 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4008 น้อยกว่า K1800 ให้ทำการนำค่าของ K1800 ไปที่ D4008

4.2.1.4 นำค่าของ D4008 ไปเป็นสัญญาณควบคุมอุณหภูมิของ TCU



ภาพที่ 4-31 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ CAP

4.2.2 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ CAP (ภาพที่ 4-32)

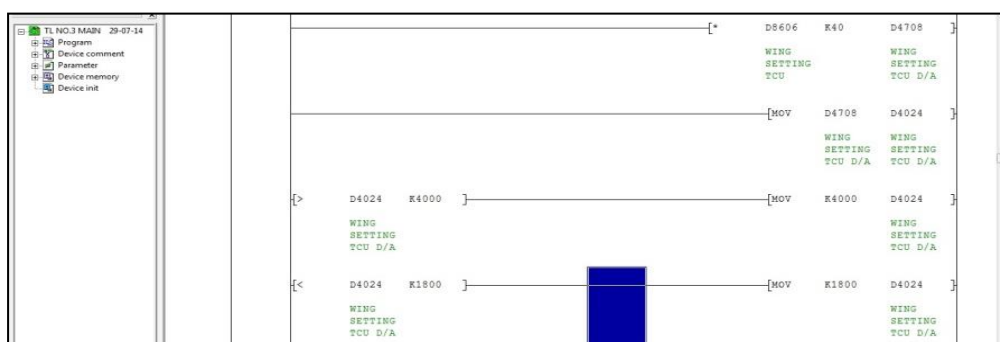
4.2.2.1 D8606 x K40 จากนั้น นำผลลัพธ์ที่ได้ไปที่ D4708

4.2.2.2 นำค่าของ D4708 ไปที่ D4024

4.2.2.3 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4024 กับ K4000 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4024 มากกว่า K4000 ให้ทำการนำค่าของ K4000 ไปที่ D4024

4.2.2.4 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4024 กับ K1800 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4024 น้อยกว่า K1800 ให้ทำการนำค่าของ K1800 ไปที่ D4024

4.2.2.5 นำค่าของ D4024 ไปเป็นสัญญาณควบคุมอุณหภูมิของ TCU



ภาพที่ 4-32 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ WING

4.2.3 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ UNDERTREAD (ภาพที่ 4-33)

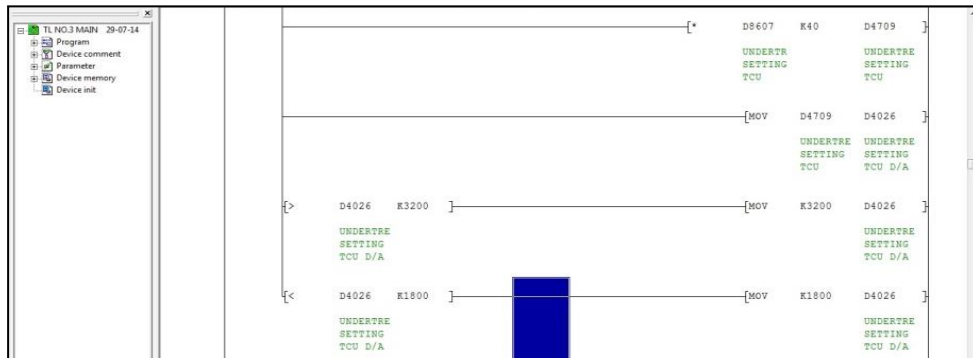
4.2.3.1 D8607 x K40 จากนั้น นำผลลัพธ์ที่ได้ไปที่ D4709

4.2.3.2 นำค่าของ D4709 ไปที่ D4026

4.2.3.3 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4026 กับ K3200 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4026 มากกว่า K3200 ให้ทำการนำค่าของ K3200 ไปที่ D4026

4.2.3.4 ทำการเปรียบเทียบค่าของ D4026 กับ K1800 โดยมีเงื่อนไข คือ ถ้า D4026 น้อยกว่า K1800 ให้ทำการนำค่าของ K1800 ไปที่ D4026

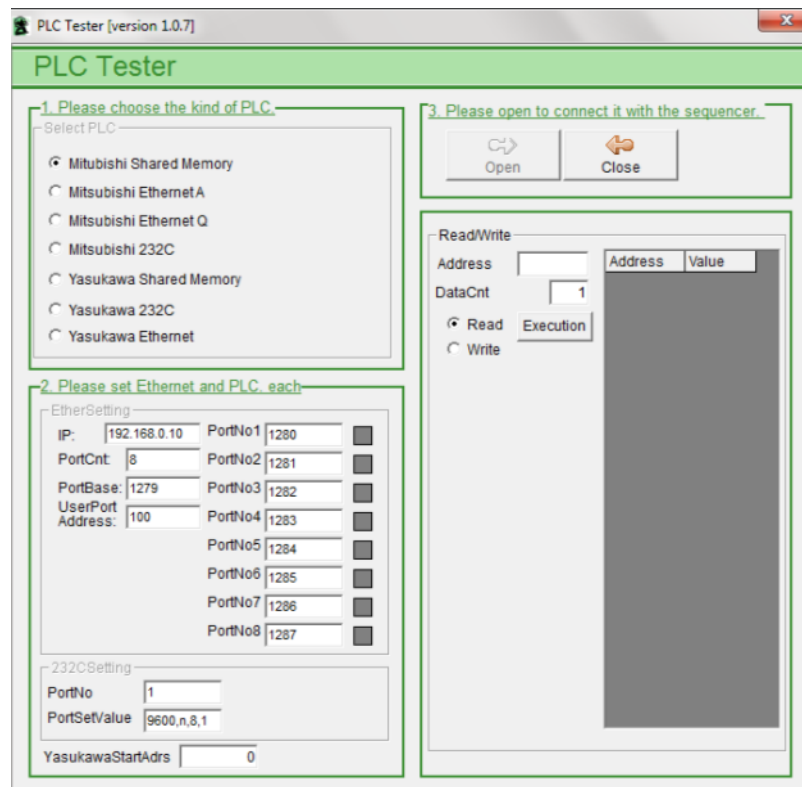
4.2.3.5 นำค่าของ D4026 ไปเป็นสัญญาณควบคุมอุณหภูมิของ TCU



ภาพที่ 4-33 ขั้นตอนการทำงานของ Ladder สำหรับ UNDERTREAD

5. การทดสอบการทำงานของโปรแกรม

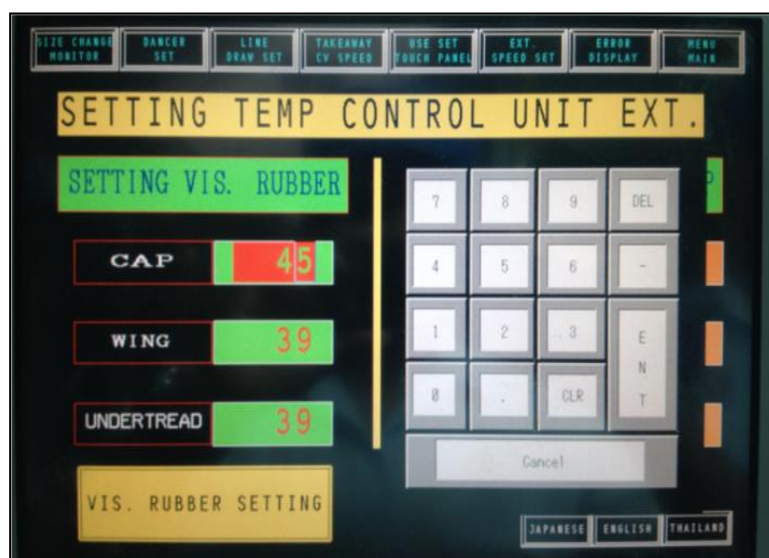
เมื่อได้โปรแกรม PLC และ Visual basic แล้วจำเป็นต้องทำการทดสอบการทำงานของโปรแกรมโดยใช้ PLC tester แสดงดังภาพที่ 4-34



ภาพที่ 4-34 การใช้ PLC tester ทดสอบการทำงานของโปรแกรม

การทดลองใช้ Program ควบคุมแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนการทดลองเพื่อทวนสอบความถูกต้องของโปรแกรมในการควบคุมน้ำหนักของดอกยางให้ได้ตามที่กำหนด เริ่มจากการป้อนค่าความหนืดของยางคอมพาวด์ โดยจะป้อนเฉพาะค่าความหนืดของ Cap คอมพาวด์ ดังภาพที่ 4-35



ภาพที่ 4-35 การป้อนค่าความหนืดของ Cap คอมพาวด์

ผลการทดสอบความสมบูรณ์ของโปรแกรมโดยใช้ Size code มาตรฐาน ผลปรากฏว่าสามารถผลิตดอกยางโดยที่น้ำหนักได้ตามมาตรฐานที่กำหนด ตั้งแต่เส้นที่ 2 ดังนั้น ขั้นตอนต่อไปคือการขยายผลไปยัง Size code ที่มีโครงสร้าง Cap-wing เหมือนกัน สิ่งที่เป็นปัญหา คือ สมการ Regression ที่ใช้สำหรับ Size code มาตรฐาน คือ $Y = 4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed}$ โดยที่ Y คือ Target weight ซึ่งของ Size code มาตรฐาน คือ 3350 ± 100 กรัม ซึ่งไม่สามารถใช้ได้กับ Size code อื่น ๆ ที่ค่า Target weight ต่างจาก Size code มาตรฐาน

การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้โดยคัดเลือกกลุ่มของดอกยางชนิด Cap-wing ที่มีสัดส่วนของโครงสร้างเหมือนกันต่างกันเฉพาะน้ำหนักรวมแล้วเทียบมาตราส่วน เพื่อหาสมการที่จะใช้คำนวณค่า Line speed ที่เหมาะสม โดยการทดลองกับ 100 Size code ที่มีสัดส่วนโครงสร้างเหมือนกัน ดังแสดงในตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าสัดส่วนน้ำหนักเทียบกับ Size code มาตรฐาน

No	Size Code	Target weight Y (กรัม)	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	สมการที่ใช้ในการคำนวณ ค่า Line speed
0	4525	3350	1.00	$Y = 4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed}$
1	4752	3630	1.08	$1.08Y = 1.08 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
2	5715	4041	1.21	$1.21Y = 1.21 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
3	4460	3322	0.99	$0.99Y = 0.99 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
4	4745	3386	1.01	$1.01Y = 1.01 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
5	5216	3495	1.04	$1.04Y = 1.04 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
6	4238	3939	1.18	$1.18Y = 1.18 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
-	-	-	-	
99	4141	3870	1.16	$1.16Y = 1.16 * (4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$

100	5221	3288	0.98	$0.98Y=0.98*(4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed})$
-----	------	------	------	--

หลังจากได้สัดส่วนของ Target weight เพื่อใช้คำนวณสมการที่เหมาะสมกับแต่ละน้ำหนักของแต่ละ Size code แล้ว ได้ทดลองใช้สมการใหม่เพื่อทดสอบว่าค่าน้ำหนักที่ได้สามารถผลิตดอกยางโดยที่ค่าน้ำหนักของดอกยางผ่านเกณฑ์ตั้งแต่เส้นที่ 2 หรือไม่ ผลการทดลองจากได้ผลดังตารางที่ 4-6 โดยรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4-6 ผลของการทดลอง

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอกยางที่เริ่มผ่านเกณฑ์
1	4752	1.08	2
2	5715	1.21	2
3	4460	0.99	3
4	4745	1.01	2
5	5216	1.04	2
6	4328	1.18	3
-	-	-	-
-	-	-	-
98	4599	0.95	3
99	4141	1.16	2
100	5221	0.98	2

จากการทดลองทำให้สามารถสรุปได้ว่า ค่าการเทียบสัดส่วนจาก Size code มาตรฐาน สามารถใช้ในการคำนวณในสมการ Regression ได้ เมื่อดอกยางเป็น โครงสร้างชนิด Cap-wing และมีสัดส่วนในโครงสร้างของดอกยางเท่ากัน

ผลหลังจากทดลองใช้งานในการผลิตแบบ Mass production พบว่าปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงต้นของการผลิตลดลง อย่างมากดังแสดงในภาพที่ 4-36 และเมื่อแยกรายละเอียดออกเป็นเฉพาะ โครงสร้าง Cap-wing พบว่า ลดลงได้มากถึง 85% เมื่อเทียบกับเดือนก่อนปรับปรุง ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาผลิตใหม่ในปี 2555 ได้ ดังนี้

จากข้อมูล

1. ลดจำนวนเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงต้นของการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 13 เส้นต่อครั้งในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

2. จำนวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเฉลี่ย ในปี 2555 เท่ากับ 10 ครั้ง

3. น้ำหนักยางเฉลี่ยเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อเส้น

4. จำนวนวันการผลิต 1 เดือน เท่ากับ 30 วัน

5. ราคาการจัดการเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 40 บาทต่อกิโลกรัม สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาผลิตใหม่ในปี 2555 ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ราคาการจัดการเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน} &= (13 \times 10) \times 3 \times 30 \times 40 \\ &= 468,000 \text{ บาทต่อเดือน} \end{aligned}$$

นอกจากนี้ในปี 2558 มีจำนวนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทั้งจำนวน Size code และจำนวนเส้นในแผนการผลิตทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาผลิตใหม่ในปี 2558 เพิ่มขึ้นได้ ดังนี้

จากข้อมูล

1. ลดจำนวนเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงต้นของการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 13 เส้นต่อครั้งในการเปลี่ยนรุ่นการผลิต

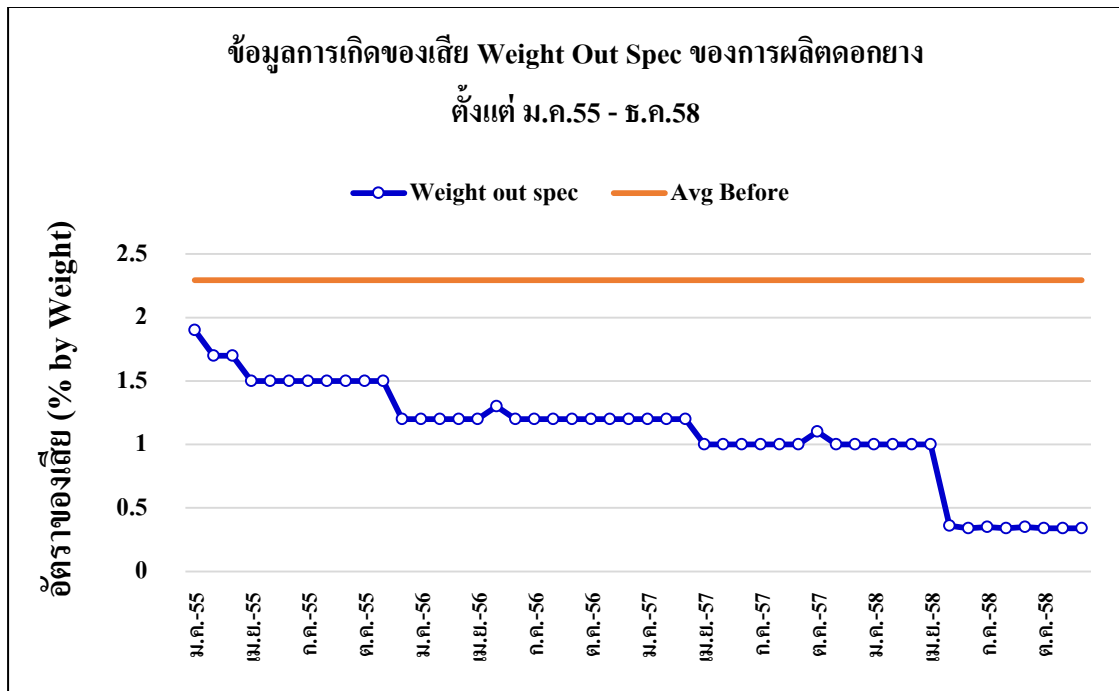
2. จำนวนการเปลี่ยนรุ่นการผลิตเฉลี่ย ในปี 2558 เท่ากับ 18 ครั้ง

3. น้ำหนักยางเฉลี่ยเท่ากับ 3 กิโลกรัมต่อเส้น

4. จำนวนวันการผลิต 1 เดือน เท่ากับ 30 วัน

5. ราคาการจัดการเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 40 บาทต่อกิโลกรัม สามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการนำกลับมาผลิตใหม่ในปี 2555 ได้ ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ราคาการจัดการเส้นดอกยางที่ไม่ได้ตามมาตรฐาน} &= (13 \times 18) \times 3 \times 30 \times 40 \\ &= 842,400 \text{ บาทต่อเดือน} \end{aligned}$$



ภาพที่ 4-36 ปัญหาน้ำหนักดอกยางไม่ได้ตามมาตรฐานหลังการปรับปรุง

บทที่ 5

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

เมื่อผู้วิจัยได้วิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ผ่านมาเป็นที่เรียบร้อยแล้ว ในบทนี้ผู้วิจัยสรุปผลการดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงข้อเสนอแนะ ดังต่อไปนี้

สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยได้เลือกโรงงานผลิตยางรถยนต์แห่งหนึ่งเป็นกรณีศึกษาซึ่งพบว่า มีปัญหาด้านคุณภาพที่ทำให้เกิดเป็นของเสียในขณะการเริ่มต้นการผลิตดอกยางหรือ Tread โดยของเสียดังกล่าวต้องนำกลับมาผลิตใหม่ ซึ่งมีจำนวนสูงถึง 15 เส้น ต่อการผลิตหนึ่งล้อหรือคิดเป็น 7-11% สาเหตุหลัก ๆ มาจากการที่ไม่สามารถควบคุมค่าต่าง ๆ ของวัตถุดิบให้มีความเสถียรมากพอ อันเกิดมาจากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นยางธรรมชาติ ทำให้ยากในการควบคุมให้ได้ค่าที่ต้องการ รวมทั้งค่า Parameter ของเครื่องจักรซึ่งมีการปรับตั้ง โดยอาศัยข้อมูลจากการชั่งน้ำหนักที่ผ่านเครื่องชั่งหรือผ่านการผลิตมาแล้วนั่นเอง ส่งผลโดยตรงให้ดอกยางเกิดปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงแรก

ผู้วิจัยได้นำวิธีการออกแบบการทดลอง มาประยุกต์ใช้เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาดอกยางไม่ได้ตามค่ามาตรฐานในช่วงต้นของการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลองใช้ Factorial design ชนิด 2^k โดยใช้แบบ Full factorial ซึ่งมีปัจจัยที่คัดเลือกมาทั้งหมด 7 ปัจจัยด้วยกัน อันประกอบไปด้วย

1. Viscosity ของ Cap คอมพาวด์ (T798)
2. Viscosity ของ Wing คอมพาวด์ (W346)
3. Viscosity ของ Under tread คอมพาวด์ (K005A)
4. อุณหภูมิของ Cap คอมพาวด์ (T798)
5. อุณหภูมิของ Wing คอมพาวด์ (W346)
6. อุณหภูมิ ของ Under tread คอมพาวด์ (K005A)
7. ความเร็วของสายการผลิต

ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ (MINITAB 16) การวิเคราะห์ผลการคำนวณจะใช้ความน่าจะเป็นเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัยมีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้น ๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ในทางตรงกันข้ามหากค่าต่ำกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้น ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยในการทำวิจัยครั้งนี้ใช้ระดับ α ที่ 0.05 ซึ่งจะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีทั้งหมดที่เหลือเฉพาะปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของพารามิเตอร์ทั้ง 7 ตัวพบว่า 2 ตัว ได้แก่ Viscosity of T798 และความเร็วของสายการผลิตมีค่าน้อยกว่า 0.05 คือ 0.000 และ 0.000 ซึ่งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) จากนั้นผู้วิจัยสร้างแบบจำลองการถดถอยโดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติจนได้สมการ Regression คือ

$$Y = 4785 + 3.257 \text{ Viscosity of T798} - 49.67 \text{ Line speed}$$

เมื่อ Y คือ Target weight ของน้ำหนักดอกยาง

เมื่อนำสมการดังกล่าว มาคำนวณหาความเร็วของสายการผลิตที่เหมาะสมเมื่อค่าความหนืดของ Cap คอมพาวด์เปลี่ยนไป พบว่าสมการดังกล่าวให้ค่าความเร็วของสายการผลิตซึ่งนำไปผลิตเป็นดอกยางและทำให้ปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานซึ่งเกิดมากถึง 15 เส้น เหลือเพียง 2 เส้น เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลก่อนการปรับปรุงพบว่าสามารถลดลงได้ถึง 85% หรือคิดเป็นค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการผลิตใหม่ลดลงได้ 468,000 บาท ต่อเดือน ในปี 2555 และเพิ่มขึ้นเป็น 842,400 บาทต่อเดือน ในปี 2558 เนื่องจากจำนวนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทั้งจำนวน Size code และจำนวนเส้นในแผนการผลิต

แต่เนื่องจากการผลิตจริงมี Size code จำนวนมาก และต้องผลิตแบบอัตโนมัติเพื่อป้องกันการผิดพลาดของพนักงานฝ่ายผลิต ดังนั้น การคำนวณค่าความเร็วของสายการผลิตที่เหมาะสมและใช้การควบคุมความเร็วของสายการผลิตแบบ Manual จึงไม่เหมาะกับการผลิตจริง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทดลองใช้ Visual basic ร่วมกับโปรแกรม PLC เพื่อใช้คำนวณค่าความเร็วของสายการผลิตที่เหมาะสมของแต่ละ Size code และใช้ PLC ในการควบคุมความเร็วของสายการผลิตแบบอัตโนมัติ ซึ่งผลที่ได้สามารถแทนการปรับแบบ Manual ได้เป็นอย่างดี รวมทั้งการแก้ปัญหา Target weight ของแต่ละ Size code ซึ่งไม่เท่ากัน ทางผู้วิจัยใช้การเปรียบเทียบสัดส่วนกับ Size

มาตรฐานแล้วเอาค่าคงที่ไปใช้ปรับค่าในสมการ Regression ซึ่งผลที่ได้สามารถใช้งานสมการ Regression ได้เป็นอย่างดี

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อน้ำหนักคอกยางใน โครงสร้างอื่น ๆ ที่เหลือ ที่ยังมีการผลิตอยู่และยังพบปัญหาน้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานในช่วงเริ่มการผลิตเช่นกัน อันได้แก่ โครงสร้างแบบ Cap-wing, Cap-base
2. ทำการขยายผลการใช้การออกแบบการทดลอง เพื่อใช้หาปัจจัยที่มีผลต่อปัญหาคุณภาพของชิ้นส่วนอื่น ๆ ที่ใช้กระบวนการผลิตแบบเอ็กทราเตอร์ ซึ่งประกอบไปด้วย Side wall, Inner liner เป็นต้น

บรรณานุกรม

- ชัยวัฒน์ ทวีจันทร์. (2553) *Advanced Visual Basic 6.0 ควบคุมอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ Simplify, หน้า 243-272.
- ชวลิต ต่อประสิทธิ์กุล (2545). *การวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับปรุงหัวฟันสีแบบบรณะง ในอุตสาหกรรมรถยนต์*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ประเสริฐ หุมปัญญา. (2554). *การศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการขึ้นรูปด้วยระบบสูญญากาศสำหรับพลาสติกชนิดโพลีไวนิลคลอไรด์*. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร, ปีที่ 5 ฉบับที่ 2 (ก.ย. 54), หน้า 33-45.
- ปราโมทย์ ลาภวงศ์. (2552). *การลดปริมาณงานซ้ำเนื่องจากสีเพี้ยนในกระบวนการคาเลนเดอร์กรณีศึกษาโรงงาน บริษัทรีดแผ่นพลาสติก ตัวอย่าง*. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- พรสุดา อรัญวงศ์. (2559). *การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพการผลิตขึ้นส่วนเฟืองเพลาช้อเหียง*. งานนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยบูรพา.
- พลวริน พลยิ่ง. (2551). *การพัฒนาเทียนหอมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พีรพรรณ วีร์ศวิน. (2547). *การพัฒนาระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมติดตามผลการผลิตแบบต่อเนื่องและการสอบกลับได้ของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิต*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- มะลิ แซ่อึ้ง. (2544). *การศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความหนาของผิวเคลือบในกระบวนการเคลือบผิวไฟฟ้า*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วารสารณ์ จจรไปชยกุล. (2552). *ผลิตภัณฑ์ยาง: กระบวนการผลิตและเทคโนโลยี*. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, หน้า 52-104.

วิทยา รุ่งเจริญวัฒนา. (2550). *การใช้การออกแบบการทดลองในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียในขบวนการผลิตชิ้นส่วน C/M/C P-CAR*. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

วิชาญ วรรณ. (2545). *ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่องโดยวิธีการออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สายใจ ชัยศิริน. (2550). *การพัฒนาคุณภาพของการผลิตซาฟรั้งโดยแนวทางการออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

สุพลชัย ทองไชย. (2548). *ศึกษาตัวแปรควบคุมเครื่อง Extruder ที่มีผลต่อคุณภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์พีวีซีคอมพาวด์ โดยใช้วิธี Full Factorial Design 2^k*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

อภิชาติ ภู่วัฒน. (2546). *การเขียน โปรแกรมติดต่อและควบคุมฮาร์ดแวร์ด้วย Visual basic*. กรุงเทพฯ: หน้า 129-172.

อัจฉรา เตชawangศ์. (2551). *การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้สารเร่งปฏิกิริยา สองชนิดสำหรับกระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกความหนาแน่นสูง*. สารนิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอก ศิลาวิเศษฤทธิ. (2543). *เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมกระบวนการที่รีแอกเตอร์ในกระบวนการผลิตผงเมลามีน โดยวิธีออกแบบการทดลอง*. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาการจัดการทางวิศวกรรม, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Ashim roy & Prasad. (1998). *Reduction of Gold-Plating Thickness Variation*. Indian Statistical Institute, Bangalore, India.

Montgomery.D.C. (2009). *Design and Analysis of Experiments 7th*. Edition New York: Wiley,

p.101-104, 207-26.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางภาคผนวก ก-1 การทดลองเป็นชนิด 2^k Factorial design แบบ Full factorial และบันทึกผล

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
195	1	1	1	42	42	31	65	85	55	33.3	
256	2	1	1	50	42	39	75	95	65	33.3	
78	3	1	1	50	34	39	75	85	55	33.3	
204	4	1	1	50	42	31	75	85	55	33.3	
47	5	1	1	42	42	39	75	85	65	31.3	
154	6	1	1	50	34	31	75	95	55	31.3	
93	7	1	1	42	34	39	75	95	55	33.3	
92	8	1	1	50	42	31	75	95	55	33.3	
202	9	1	1	50	34	31	75	85	55	33.3	
44	10	1	1	50	42	31	75	85	65	31.3	
1	11	1	1	42	34	31	65	85	55	31.3	
157	12	1	1	42	34	39	75	95	55	31.3	
57	13	1	1	42	34	31	75	95	65	31.3	
104	14	1	1	50	42	39	65	85	65	33.3	
105	15	1	1	42	34	31	75	85	65	33.3	
87	16	1	1	42	42	39	65	95	55	33.3	
183	17	1	1	42	42	39	65	95	65	31.3	
205	18	1	1	42	34	39	75	85	55	33.3	
109	19	1	1	42	34	39	75	85	65	33.3	

58	20	1	1	50	34	31	75	95	65	31.3
12	21	1	1	50	42	31	75	85	55	31.3
39	22	1	1	42	42	39	65	85	65	31.3
38	23	1	1	50	34	39	65	85	65	31.3
21	24	1	1	42	34	39	65	95	55	31.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
9	25	1	1	42	34	31	75	85	55	31.3	
4	26	1	1	50	42	31	65	85	55	31.3	
148	27	1	1	50	42	31	65	95	55	31.3	
125	28	1	1	42	34	39	75	95	65	33.3	
30	29	1	1	50	34	39	75	95	55	31.3	
135	30	1	1	42	42	39	65	85	55	31.3	
136	31	1	1	50	42	39	65	85	55	31.3	
203	32	1	1	42	42	31	75	85	55	33.3	
181	33	1	1	42	34	39	65	95	65	31.3	
108	34	1	1	50	42	31	75	85	65	33.3	
199	35	1	1	42	42	39	65	85	55	33.3	
114	36	1	1	50	34	31	65	95	65	33.3	
240	37	1	1	50	42	39	75	85	65	33.3	
25	38	1	1	42	34	31	75	95	55	31.3	
99	39	1	1	42	42	31	65	85	65	33.3	
115	40	1	1	42	42	31	65	95	65	33.3	
177	41	1	1	42	34	31	65	95	65	31.3	
90	42	1	1	50	34	31	75	95	55	33.3	
112	43	1	1	50	42	39	75	85	65	33.3	

147	44	1	1	42	42	31	65	95	55	31.3
253	45	1	1	42	34	39	75	95	65	33.3
66	46	1	1	50	34	31	65	85	55	33.3
226	47	1	1	50	34	31	65	85	65	33.3
120	48	1	1	50	42	39	65	95	65	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
41	49	1	1	42	34	31	75	85	65	31.3	
129	50	1	1	42	34	31	65	85	55	31.3	
106	51	1	1	50	34	31	75	85	65	33.3	
34	52	1	1	50	34	31	65	85	65	31.3	
80	53	1	1	50	42	39	75	85	55	33.3	
233	54	1	1	42	34	31	75	85	65	33.3	
239	55	1	1	42	42	39	75	85	65	33.3	
76	56	1	1	50	42	31	75	85	55	33.3	
82	57	1	1	50	34	31	65	95	55	33.3	
189	58	1	1	42	34	39	75	95	65	31.3	
188	59	1	1	50	42	31	75	95	65	31.3	
103	60	1	1	42	42	39	65	85	65	33.3	
27	61	1	1	42	42	31	75	95	55	31.3	
179	62	1	1	42	42	31	65	95	65	31.3	
143	63	1	1	42	42	39	75	85	55	31.3	
83	64	1	1	42	42	31	65	95	55	33.3	
214	65	1	1	50	34	39	65	95	55	33.3	
113	66	1	1	42	34	31	65	95	65	33.3	
128	67	1	1	50	42	39	75	95	65	33.3	

245	68	1	1	42	34	39	65	95	65	33.3
229	69	1	1	42	34	39	65	85	65	33.3
155	70	1	1	42	42	31	75	95	55	31.3
84	71	1	1	50	42	31	65	95	55	33.3
37	72	1	1	42	34	39	65	85	65	31.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
182	73	1	1	50	34	39	65	95	65	31.3	
119	74	1	1	42	42	39	65	95	65	33.3	
60	75	1	1	50	42	31	75	95	65	31.3	
227	76	1	1	42	42	31	65	85	65	33.3	
185	77	1	1	42	34	31	75	95	65	31.3	
13	78	1	1	42	34	39	75	85	55	31.3	
219	79	1	1	42	42	31	75	95	55	33.3	
194	80	1	1	50	34	31	65	85	55	33.3	
197	81	1	1	42	34	39	65	85	55	33.3	
196	82	1	1	50	42	31	65	85	55	33.3	
7	83	1	1	42	42	39	65	85	55	31.3	
171	84	1	1	42	42	31	75	85	65	31.3	
22	85	1	1	50	34	39	65	95	55	31.3	
20	86	1	1	50	42	31	65	95	55	31.3	
141	87	1	1	42	34	39	75	85	55	31.3	
75	88	1	1	42	42	31	75	85	55	33.3	
160	89	1	1	50	42	39	75	95	55	31.3	
67	90	1	1	42	42	31	65	85	55	33.3	
5	91	1	1	42	34	39	65	85	55	31.3	

35	92	1	1	42	42	31	65	85	65	31.3
48	93	1	1	50	42	39	75	85	65	31.3
213	94	1	1	42	34	39	65	95	55	33.3
220	95	1	1	50	42	31	75	95	55	33.3
73	96	1	1	42	34	31	75	85	55	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
131	97	1	1	42	42	31	65	85	55	31.3	
54	98	1	1	50	34	39	65	95	65	31.3	
175	99	1	1	42	42	39	75	85	65	31.3	
247	100	1	1	42	42	39	65	95	65	33.3	
174	101	1	1	50	34	39	75	85	65	31.3	
228	102	1	1	50	42	31	65	85	65	33.3	
230	103	1	1	50	34	39	65	85	65	33.3	
61	104	1	1	42	34	39	75	95	65	31.3	
156	105	1	1	50	42	31	75	95	55	31.3	
111	106	1	1	42	42	39	75	85	65	33.3	
178	107	1	1	50	34	31	65	95	65	31.3	
14	108	1	1	50	34	39	75	85	55	31.3	
200	109	1	1	50	42	39	65	85	55	33.3	
164	110	1	1	50	42	31	65	85	65	31.3	
187	111	1	1	42	42	31	75	95	65	31.3	
79	112	1	1	42	42	39	75	85	55	33.3	
77	113	1	1	42	34	39	75	85	55	33.3	
211	114	1	1	42	42	31	65	95	55	33.3	
218	115	1	1	50	34	31	75	95	55	33.3	

163	116	1	1	42	42	31	65	85	65	31.3
158	117	1	1	50	34	39	75	95	55	31.3
55	118	1	1	42	42	39	65	95	65	31.3
97	119	1	1	42	34	31	65	85	65	33.3
236	120	1	1	50	42	31	75	85	65	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
65	121	1	1	42	34	31	65	85	55	33.3	
244	122	1	1	50	42	31	65	95	65	33.3	
96	123	1	1	50	42	39	75	95	55	33.3	
252	124	1	1	50	42	31	75	95	65	33.3	
221	125	1	1	42	34	39	75	95	55	33.3	
51	126	1	1	42	42	31	65	95	65	31.3	
62	127	1	1	50	34	39	75	95	65	31.3	
193	128	1	1	42	34	31	65	85	55	33.3	
49	129	1	1	42	34	31	65	95	65	31.3	
40	130	1	1	50	42	39	65	85	65	31.3	
210	131	1	1	50	34	31	65	95	55	33.3	
116	132	1	1	50	42	31	65	95	65	33.3	
123	133	1	1	42	42	31	75	95	65	33.3	
248	134	1	1	50	42	39	65	95	65	33.3	
8	135	1	1	50	42	39	65	85	55	31.3	
3	136	1	1	42	42	31	65	85	55	31.3	
191	137	1	1	42	42	39	75	95	65	31.3	
17	138	1	1	42	34	31	65	95	55	31.3	
151	139	1	1	42	42	39	65	95	55	31.3	

94	140	1	1	50	34	39	75	95	55	33.3
24	141	1	1	50	42	39	65	95	55	31.3
173	142	1	1	42	34	39	75	85	65	31.3
149	143	1	1	42	34	39	65	95	55	31.3
206	144	1	1	50	34	39	75	85	55	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
28	145	1	1	50	42	31	75	95	55	31.3	
53	146	1	1	42	34	39	65	95	65	31.3	
251	147	1	1	42	42	31	75	95	65	33.3	
144	148	1	1	50	42	39	75	85	55	31.3	
89	149	1	1	42	34	31	75	95	55	33.3	
249	150	1	1	42	34	31	75	95	65	33.3	
50	151	1	1	50	34	31	65	95	65	31.3	
146	152	1	1	50	34	31	65	95	55	31.3	
6	153	1	1	50	34	39	65	85	55	31.3	
169	154	1	1	42	34	31	75	85	65	31.3	
165	155	1	1	42	34	39	65	85	65	31.3	
212	156	1	1	50	42	31	65	95	55	33.3	
10	157	1	1	50	34	31	75	85	55	31.3	
71	158	1	1	42	42	39	65	85	55	33.3	
254	159	1	1	50	34	39	75	95	65	33.3	
161	160	1	1	42	34	31	65	85	65	31.3	
231	161	1	1	42	42	39	65	85	65	33.3	
46	162	1	1	50	34	39	75	85	65	31.3	
102	163	1	1	50	34	39	65	85	65	33.3	

81	164	1	1	42	34	31	65	95	55	33.3
142	165	1	1	50	34	39	75	85	55	31.3
255	166	1	1	42	42	39	75	95	65	33.3
118	167	1	1	50	34	39	65	95	65	33.3
31	168	1	1	42	42	39	75	95	55	31.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
16	169	1	1	50	42	39	75	85	55	31.3	
246	170	1	1	50	34	39	65	95	65	33.3	
186	171	1	1	50	34	31	75	95	65	31.3	
107	172	1	1	42	42	31	75	85	65	33.3	
137	173	1	1	42	34	31	75	85	55	31.3	
69	174	1	1	42	34	39	65	85	55	33.3	
18	175	1	1	50	34	31	65	95	55	31.3	
29	176	1	1	42	34	39	75	95	55	31.3	
64	177	1	1	50	42	39	75	95	65	31.3	
217	178	1	1	42	34	31	75	95	55	33.3	
180	179	1	1	50	42	31	65	95	65	31.3	
166	180	1	1	50	34	39	65	85	65	31.3	
238	181	1	1	50	34	39	75	85	65	33.3	
95	182	1	1	42	42	39	75	95	55	33.3	
56	183	1	1	50	42	39	65	95	65	31.3	
126	184	1	1	50	34	39	75	95	65	33.3	
42	185	1	1	50	34	31	75	85	65	31.3	
2	186	1	1	50	34	31	65	85	55	31.3	
232	187	1	1	50	42	39	65	85	65	33.3	

124	188	1	1	50	42	31	75	95	65	33.3
132	189	1	1	50	42	31	65	85	55	31.3
223	190	1	1	42	42	39	75	95	55	33.3
170	191	1	1	50	34	31	75	85	65	31.3
68	192	1	1	50	42	31	65	85	55	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
162	193	1	1	50	34	31	65	85	65	31.3	
250	194	1	1	50	34	31	75	95	65	33.3	
201	195	1	1	42	34	31	75	85	55	33.3	
43	196	1	1	42	42	31	75	85	65	31.3	
100	197	1	1	50	42	31	65	85	65	33.3	
167	198	1	1	42	42	39	65	85	65	31.3	
190	199	1	1	50	34	39	75	95	65	31.3	
242	200	1	1	50	34	31	65	95	65	33.3	
234	201	1	1	50	34	31	75	85	65	33.3	
110	202	1	1	50	34	39	75	85	65	33.3	
209	203	1	1	42	34	31	65	95	55	33.3	
127	204	1	1	42	42	39	75	95	65	33.3	
59	205	1	1	42	42	31	75	95	65	31.3	
15	206	1	1	42	42	39	75	85	55	31.3	
241	207	1	1	42	34	31	65	95	65	33.3	
207	208	1	1	42	42	39	75	85	55	33.3	
224	209	1	1	50	42	39	75	95	55	33.3	
168	210	1	1	50	42	39	65	85	65	31.3	
153	211	1	1	42	34	31	75	95	55	31.3	

198	212	1	1	50	34	39	65	85	55	33.3
216	213	1	1	50	42	39	65	95	55	33.3
176	214	1	1	50	42	39	75	85	65	31.3
23	215	1	1	42	42	39	65	95	55	31.3
139	216	1	1	42	42	31	75	85	55	31.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
26	217	1	1	50	34	31	75	95	55	31.3	
140	218	1	1	50	42	31	75	85	55	31.3	
52	219	1	1	50	42	31	65	95	65	31.3	
63	220	1	1	42	42	39	75	95	65	31.3	
98	221	1	1	50	34	31	65	85	65	33.3	
70	222	1	1	50	34	39	65	85	55	33.3	
133	223	1	1	42	34	39	65	85	55	31.3	
172	224	1	1	50	42	31	75	85	65	31.3	
11	225	1	1	42	42	31	75	85	55	31.3	
101	226	1	1	42	34	39	65	85	65	33.3	
134	227	1	1	50	34	39	65	85	55	31.3	
19	228	1	1	42	42	31	65	95	55	31.3	
145	229	1	1	42	34	31	65	95	55	31.3	
235	230	1	1	42	42	31	75	85	65	33.3	
243	231	1	1	42	42	31	65	95	65	33.3	
184	232	1	1	50	42	39	65	95	65	31.3	
91	233	1	1	42	42	31	75	95	55	33.3	
33	234	1	1	42	34	31	65	85	65	31.3	
215	235	1	1	42	42	39	65	95	55	33.3	

36	236	1	1	50	42	31	65	85	65	31.3
122	237	1	1	50	34	31	75	95	65	33.3
150	238	1	1	50	34	39	65	95	55	31.3
208	239	1	1	50	42	39	75	85	55	33.3
225	240	1	1	42	34	31	65	85	65	33.3

ตารางภาคผนวก ก-1 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
88	241	1	1	50	42	39	65	95	55	33.3	
237	242	1	1	42	34	39	75	85	65	33.3	
72	243	1	1	50	42	39	65	85	55	33.3	
86	244	1	1	50	34	39	65	95	55	33.3	
32	245	1	1	50	42	39	75	95	55	31.3	
74	246	1	1	50	34	31	75	85	55	33.3	
45	247	1	1	42	34	39	75	85	65	31.3	
121	248	1	1	42	34	31	75	95	65	33.3	
222	249	1	1	50	34	39	75	95	55	33.3	
192	250	1	1	50	42	39	75	95	65	31.3	
117	251	1	1	42	34	39	65	95	65	33.3	
130	252	1	1	50	34	31	65	85	55	31.3	
138	253	1	1	50	34	31	75	85	55	31.3	
85	254	1	1	42	34	39	65	95	55	33.3	
152	255	1	1	50	42	39	65	95	55	31.3	
159	256	1	1	42	42	39	75	95	55	31.3	

ตารางภาคผนวก ก-2 ผลการทดลอง

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
195	1	1	1	42	42	31	65	85	55	33.3	3320
256	2	1	1	50	42	39	75	95	65	33.3	3290
78	3	1	1	50	34	39	75	85	55	33.3	3275
204	4	1	1	50	42	31	75	85	55	33.3	3305
47	5	1	1	42	42	39	75	85	65	31.3	3300
154	6	1	1	50	34	31	75	95	55	31.3	3400
93	7	1	1	42	34	39	75	95	55	33.3	3250
92	8	1	1	50	42	31	75	95	55	33.3	3370
202	9	1	1	50	34	31	75	85	55	33.3	3305
44	10	1	1	50	42	31	75	85	65	31.3	3485
1	11	1	1	42	34	31	65	85	55	31.3	3315
157	12	1	1	42	34	39	75	95	55	31.3	3465
57	13	1	1	42	34	31	75	95	65	31.3	3380
104	14	1	1	50	42	39	65	85	65	33.3	3275
105	15	1	1	42	34	31	75	85	65	33.3	3190
87	16	1	1	42	42	39	65	95	55	33.3	3340
183	17	1	1	42	42	39	65	95	65	31.3	3340
205	18	1	1	42	34	39	75	85	55	33.3	3215

109	19	1	1	42	34	39	75	85	65	33.3	3260
58	20	1	1	50	34	31	75	95	65	31.3	3340
12	21	1	1	50	42	31	75	85	55	31.3	3365
39	22	1	1	42	42	39	65	85	65	31.3	3375
38	23	1	1	50	34	39	65	85	65	31.3	3385
21	24	1	1	42	34	39	65	95	55	31.3	3380

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
9	25	1	1	42	34	31	75	85	55	31.3	3380
4	26	1	1	50	42	31	65	85	55	31.3	3415
148	27	1	1	50	42	31	65	95	55	31.3	3415
125	28	1	1	42	34	39	75	95	65	33.3	3175
30	29	1	1	50	34	39	75	95	55	31.3	3165
135	30	1	1	42	42	39	65	85	55	31.3	3385
136	31	1	1	50	42	39	65	85	55	31.3	3395
203	32	1	1	42	42	31	75	85	55	33.3	3300
181	33	1	1	42	34	39	65	95	65	31.3	3420
108	34	1	1	50	42	31	75	85	65	33.3	3215
199	35	1	1	42	42	39	65	85	55	33.3	3285
114	36	1	1	50	34	31	65	95	65	33.3	3220
240	37	1	1	50	42	39	75	85	65	33.3	3190
25	38	1	1	42	34	31	75	95	55	31.3	3395
99	39	1	1	42	42	31	65	85	65	33.3	3315
115	40	1	1	42	42	31	65	95	65	33.3	3270
177	41	1	1	42	34	31	65	95	65	31.3	3380
90	42	1	1	50	34	31	75	95	55	33.3	3405

112	43	1	1	50	42	39	75	85	65	33.3	3185
147	44	1	1	42	42	31	65	95	55	31.3	3440
253	45	1	1	42	34	39	75	95	65	33.3	3195
66	46	1	1	50	34	31	65	85	55	33.3	3340
226	47	1	1	50	34	31	65	85	65	33.3	3345
120	48	1	1	50	42	39	65	95	65	33.3	3300

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
41	49	1	1	42	34	31	75	85	65	31.3	3340
129	50	1	1	42	34	31	65	85	55	31.3	3295
106	51	1	1	50	34	31	75	85	65	33.3	3340
34	52	1	1	50	34	31	65	85	65	31.3	3410
80	53	1	1	50	42	39	75	85	55	33.3	3300
233	54	1	1	42	34	31	75	85	65	33.3	3200
239	55	1	1	42	42	39	75	85	65	33.3	3215
76	56	1	1	50	42	31	75	85	55	33.3	3300
82	57	1	1	50	34	31	65	95	55	33.3	3275
189	58	1	1	42	34	39	75	95	65	31.3	3440
188	59	1	1	50	42	31	75	95	65	31.3	3440
103	60	1	1	42	42	39	65	85	65	33.3	3300
27	61	1	1	42	42	31	75	95	55	31.3	3475
179	62	1	1	42	42	31	65	95	65	31.3	3375
143	63	1	1	42	42	39	75	85	55	31.3	3300
83	64	1	1	42	42	31	65	95	55	33.3	3175
214	65	1	1	50	34	39	65	95	55	33.3	3275
113	66	1	1	42	34	31	65	95	65	33.3	3250

128	67	1	1	50	42	39	75	95	65	33.3	3320
245	68	1	1	42	34	39	65	95	65	33.3	3320
229	69	1	1	42	34	39	65	85	65	33.3	3315
155	70	1	1	42	42	31	75	95	55	31.3	3370
84	71	1	1	50	42	31	65	95	55	33.3	3130
37	72	1	1	42	34	39	65	85	65	31.3	3340

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
182	73	1	1	50	34	39	65	95	65	31.3	3340
119	74	1	1	42	42	39	65	95	65	33.3	3240
60	75	1	1	50	42	31	75	95	65	31.3	3460
227	76	1	1	42	42	31	65	85	65	33.3	3300
185	77	1	1	42	34	31	75	95	65	31.3	3350
13	78	1	1	42	34	39	75	85	55	31.3	3215
219	79	1	1	42	42	31	75	95	55	33.3	3195
194	80	1	1	50	34	31	65	85	55	33.3	3340
197	81	1	1	42	34	39	65	85	55	33.3	3265
196	82	1	1	50	42	31	65	85	55	33.3	3305
7	83	1	1	42	42	39	65	85	55	31.3	3400
171	84	1	1	42	42	31	75	85	65	31.3	3350
22	85	1	1	50	34	39	65	95	55	31.3	3400
20	86	1	1	50	42	31	65	95	55	31.3	3395
141	87	1	1	42	34	39	75	85	55	31.3	3245
75	88	1	1	42	42	31	75	85	55	33.3	3310
160	89	1	1	50	42	39	75	95	55	31.3	3480
67	90	1	1	42	42	31	65	85	55	33.3	3215

5	91	1	1	42	34	39	65	85	55	31.3	3280
35	92	1	1	42	42	31	65	85	65	31.3	3335
48	93	1	1	50	42	39	75	85	65	31.3	3500
213	94	1	1	42	34	39	65	95	55	33.3	3340
220	95	1	1	50	42	31	75	95	55	33.3	3360
73	96	1	1	42	34	31	75	85	55	33.3	3230

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
131	97	1	1	42	42	31	65	85	55	31.3	3425
54	98	1	1	50	34	39	65	95	65	31.3	3410
175	99	1	1	42	42	39	75	85	65	31.3	3320
247	100	1	1	42	42	39	65	95	65	33.3	3375
174	101	1	1	50	34	39	75	85	65	31.3	3500
228	102	1	1	50	42	31	65	85	65	33.3	3520
230	103	1	1	50	34	39	65	85	65	33.3	3315
61	104	1	1	42	34	39	75	95	65	31.3	3420
156	105	1	1	50	42	31	75	95	55	31.3	3550
111	106	1	1	42	42	39	75	85	65	33.3	3300
178	107	1	1	50	34	31	65	95	65	31.3	3340
14	108	1	1	50	34	39	75	85	55	31.3	3330
200	109	1	1	50	42	39	65	85	55	33.3	3300
164	110	1	1	50	42	31	65	85	65	31.3	3300
187	111	1	1	42	42	31	75	95	65	31.3	3370
79	112	1	1	42	42	39	75	85	55	33.3	3340
77	113	1	1	42	34	39	75	85	55	33.3	3205
211	114	1	1	42	42	31	65	95	55	33.3	3170

218	115	1	1	50	34	31	75	95	55	33.3	3405
163	116	1	1	42	42	31	65	85	65	31.3	3375
158	117	1	1	50	34	39	75	95	55	31.3	3390
55	118	1	1	42	42	39	65	95	65	31.3	3375
97	119	1	1	42	34	31	65	85	65	33.3	3200
236	120	1	1	50	42	31	75	85	65	33.3	3230

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
65	121	1	1	42	34	31	65	85	55	33.3	3245
244	122	1	1	50	42	31	65	95	65	33.3	3170
96	123	1	1	50	42	39	75	95	55	33.3	3330
252	124	1	1	50	42	31	75	95	65	33.3	3340
221	125	1	1	42	34	39	75	95	55	33.3	3255
51	126	1	1	42	42	31	65	95	65	31.3	3475
62	127	1	1	50	34	39	75	95	65	31.3	3390
193	128	1	1	42	34	31	65	85	55	33.3	3235
49	129	1	1	42	34	31	65	95	65	31.3	3475
40	130	1	1	50	42	39	65	85	65	31.3	3405
210	131	1	1	50	34	31	65	95	55	33.3	3290
116	132	1	1	50	42	31	65	95	65	33.3	3310
123	133	1	1	42	42	31	75	95	65	33.3	3270
248	134	1	1	50	42	39	65	95	65	33.3	3330
8	135	1	1	50	42	39	65	85	55	31.3	3380
3	136	1	1	42	42	31	65	85	55	31.3	3420
191	137	1	1	42	42	39	75	95	65	31.3	3475
17	138	1	1	42	34	31	65	95	55	31.3	3410

151	139	1	1	42	42	39	65	95	55	31.3	3420
94	140	1	1	50	34	39	75	95	55	33.3	3220
24	141	1	1	50	42	39	65	95	55	31.3	3340
173	142	1	1	42	34	39	75	85	65	31.3	3375
149	143	1	1	42	34	39	65	95	55	31.3	3370
206	144	1	1	50	34	39	75	85	55	33.3	3225

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
28	145	1	1	50	42	31	75	95	55	31.3	3390
53	146	1	1	42	34	39	65	95	65	31.3	3410
251	147	1	1	42	42	31	75	95	65	33.3	3250
144	148	1	1	50	42	39	75	85	55	31.3	3280
89	149	1	1	42	34	31	75	95	55	33.3	3235
249	150	1	1	42	34	31	75	95	65	33.3	3290
50	151	1	1	50	34	31	65	95	65	31.3	3390
146	152	1	1	50	34	31	65	95	55	31.3	3390
6	153	1	1	50	34	39	65	85	55	31.3	3390
169	154	1	1	42	34	31	75	85	65	31.3	3360
165	155	1	1	42	34	39	65	85	65	31.3	3340
212	156	1	1	50	42	31	65	95	55	33.3	3330
10	157	1	1	50	34	31	75	85	55	31.3	3405
71	158	1	1	42	42	39	65	85	55	33.3	3325
254	159	1	1	50	34	39	75	95	65	33.3	3225
161	160	1	1	42	34	31	65	85	65	31.3	3390
231	161	1	1	42	42	39	65	85	65	33.3	3310
46	162	1	1	50	34	39	75	85	65	31.3	3490

102	163	1	1	50	34	39	65	85	65	33.3	3300
81	164	1	1	42	34	31	65	95	55	33.3	3405
142	165	1	1	50	34	39	75	85	55	31.3	3310
255	166	1	1	42	42	39	75	95	65	33.3	3160
118	167	1	1	50	34	39	65	95	65	33.3	3240
31	168	1	1	42	42	39	75	95	55	31.3	3330

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
16	169	1	1	50	42	39	75	85	55	31.3	3340
246	170	1	1	50	34	39	65	95	65	33.3	3310
186	171	1	1	50	34	31	75	95	65	31.3	3380
107	172	1	1	42	42	31	75	85	65	33.3	3300
137	173	1	1	42	34	31	75	85	55	31.3	3330
69	174	1	1	42	34	39	65	85	55	33.3	3270
18	175	1	1	50	34	31	65	95	55	31.3	3390
29	176	1	1	42	34	39	75	95	55	31.3	3330
64	177	1	1	50	42	39	75	95	65	31.3	3355
217	178	1	1	42	34	31	75	95	55	33.3	3230
180	179	1	1	50	42	31	65	95	65	31.3	3390
166	180	1	1	50	34	39	65	85	65	31.3	3390
238	181	1	1	50	34	39	75	85	65	33.3	3430
95	182	1	1	42	42	39	75	95	55	33.3	3195
56	183	1	1	50	42	39	65	95	65	31.3	3390
126	184	1	1	50	34	39	75	95	65	33.3	3265
42	185	1	1	50	34	31	75	85	65	31.3	3440
2	186	1	1	50	34	31	65	85	55	31.3	3420

232	187	1	1	50	42	39	65	85	65	33.3	3270
124	188	1	1	50	42	31	75	95	65	33.3	3220
132	189	1	1	50	42	31	65	85	55	31.3	3400
223	190	1	1	42	42	39	75	95	55	33.3	3190
170	191	1	1	50	34	31	75	85	65	31.3	3420
68	192	1	1	50	42	31	65	85	55	33.3	3300

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
162	193	1	1	50	34	31	65	85	65	31.3	3395
250	194	1	1	50	34	31	75	95	65	33.3	3290
201	195	1	1	42	34	31	75	85	55	33.3	3220
43	196	1	1	42	42	31	75	85	65	31.3	3365
100	197	1	1	50	42	31	65	85	65	33.3	3525
167	198	1	1	42	42	39	65	85	65	31.3	3350
190	199	1	1	50	34	39	75	95	65	31.3	3390
242	200	1	1	50	34	31	65	95	65	33.3	3250
234	201	1	1	50	34	31	75	85	65	33.3	3320
110	202	1	1	50	34	39	75	85	65	33.3	3400
209	203	1	1	42	34	31	65	95	55	33.3	3215
127	204	1	1	42	42	39	75	95	65	33.3	3215
59	205	1	1	42	42	31	75	95	65	31.3	3350
15	206	1	1	42	42	39	75	85	55	31.3	3320
241	207	1	1	42	34	31	65	95	65	33.3	3375
207	208	1	1	42	42	39	75	85	55	33.3	3310
224	209	1	1	50	42	39	75	95	55	33.3	3320
168	210	1	1	50	42	39	65	85	65	31.3	3385

153	211	1	1	42	34	31	75	95	55	31.3	3380
198	212	1	1	50	34	39	65	85	55	33.3	3335
216	213	1	1	50	42	39	65	95	55	33.3	3280
176	214	1	1	50	42	39	75	85	65	31.3	3490
23	215	1	1	42	42	39	65	95	55	31.3	3375
139	216	1	1	42	42	31	75	85	55	31.3	3390

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
26	217	1	1	50	34	31	75	95	55	31.3	3410
140	218	1	1	50	42	31	75	85	55	31.3	3330
52	219	1	1	50	42	31	65	95	65	31.3	3250
63	220	1	1	42	42	39	75	95	65	31.3	3410
98	221	1	1	50	34	31	65	85	65	33.3	3335
70	222	1	1	50	34	39	65	85	55	33.3	3305
133	223	1	1	42	34	39	65	85	55	31.3	3370
172	224	1	1	50	42	31	75	85	65	31.3	3470
11	225	1	1	42	42	31	75	85	55	31.3	3360
101	226	1	1	42	34	39	65	85	65	33.3	3310
134	227	1	1	50	34	39	65	85	55	31.3	3395
19	228	1	1	42	42	31	65	95	55	31.3	3375
145	229	1	1	42	34	31	65	95	55	31.3	3370
235	230	1	1	42	42	31	75	85	65	33.3	3305
243	231	1	1	42	42	31	65	95	65	33.3	3270
184	232	1	1	50	42	39	65	95	65	31.3	3330
91	233	1	1	42	42	31	75	95	55	33.3	3210
33	234	1	1	42	34	31	65	85	65	31.3	3310

215	235	1	1	42	42	39	65	95	55	33.3	3345
36	236	1	1	50	42	31	65	85	65	31.3	3510
122	237	1	1	50	34	31	75	95	65	33.3	3240
150	238	1	1	50	34	39	65	95	55	31.3	3390
208	239	1	1	50	42	39	75	85	55	33.3	3240
225	240	1	1	42	34	31	65	85	65	33.3	3210

ตารางภาคผนวก ก-2 (ต่อ)

Std	Run	CenterPt	Blocks	Viscosity of T798	Viscosity of W346	Viscosity of K005A	Temperature of T798	Temperature of W346	Temperature of K005A	Line speed	Tread Weight
88	241	1	1	50	42	39	65	95	55	33.3	3280
237	242	1	1	42	34	39	75	85	65	33.3	3270
72	243	1	1	50	42	39	65	85	55	33.3	3290
86	244	1	1	50	34	39	65	95	55	33.3	3270
32	245	1	1	50	42	39	75	95	55	31.3	3290
74	246	1	1	50	34	31	75	85	55	33.3	3300
45	247	1	1	42	34	39	75	85	65	31.3	3330
121	248	1	1	42	34	31	75	95	65	33.3	3300
222	249	1	1	50	34	39	75	95	55	33.3	3235
192	250	1	1	50	42	39	75	95	65	31.3	3350
117	251	1	1	42	34	39	65	95	65	33.3	3310
130	252	1	1	50	34	31	65	85	55	31.3	3400
138	253	1	1	50	34	31	75	85	55	31.3	3400
85	254	1	1	42	34	39	65	95	55	33.3	3330
152	255	1	1	50	42	39	65	95	55	31.3	3290
159	256	1	1	42	42	39	75	95	55	31.3	3430
257	257	0	1	46	38	35	70	90	60	32.3	3340
258	258	0	1	46	38	35	70	90	60	32.3	3320

259	259	0	1	46	38	35	70	90	60	32.3	3320
260	260	0	1	46	38	35	70	90	60	32.3	3340
261	261	0	1	46	38	35	70	90	60	32.3	3340

ตารางภาคผนวก ก-3 ข้อมูลวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	128	1394608	10895	5.62	0.000
Linear	7	704012	100573	51.88	0.000
Vis_T798	1	43446	43446	22.41	0.000
Vis_W346	1	2789	2789	1.44	0.232
Vis_K005A	1	9813	9813	5.06	0.026
Temp_T798	1	9567	9567	4.94	0.028
Temp_W346	1	216	216	0.11	0.739
Temp_K005A	1	6652	6652	3.43	0.066
Line_speed	1	631528	631528	325.78	0.000
2-Way Interactions	21	159461	7593	3.92	0.000
Vis_T798*Vis_W346	1	3129	3129	1.61	0.206
Vis_T798*Vis_K005A	1	11091	11091	5.72	0.018
Vis_T798*Temp_T798	1	16496	16496	8.51	0.004
Vis_T798*Temp_W346	1	42410	42410	21.88	0.000
Vis_T798*Temp_K005A	1	641	641	0.33	0.566
Vis_T798*Line_speed	1	3199	3199	1.65	0.201
Vis_W346*Vis_K005A	1	1203	1203	0.62	0.432
Vis_W346*Temp_T798	1	363	363	0.19	0.666
Vis_W346*Temp_W346	1	4770	4770	2.46	0.119
Vis_W346*Temp_K005A	1	1942	1942	1.00	0.319
Vis_W346*Line_speed	1	1526	1526	0.79	0.377
Vis_K005A*Temp_T798	1	11624	11624	6.00	0.016
Vis_K005A*Temp_W346	1	579	579	0.30	0.586

Vis_K005A*Temp_K005A	1	6858	6858	3.54	0.062
Vis_K005A*Line_speed	1	4104	4104	2.12	0.148
Temp_T798*Temp_W346	1	4770	4770	2.46	0.119
Temp_T798*Temp_K005A	1	919	919	0.47	0.492
Temp_T798*Line_speed	1	11223	11223	5.79	0.018

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346	1	35	35	0.02	0.893
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_K005A	1	7278	7278	3.75	0.055
Vis_T798*Vis_K005A*Line_speed	1	3713	3713	1.92	0.169
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346	1	16018	16018	8.26	0.005
Vis_T798*Temp_T798*Temp_K005A	1	919	919	0.47	0.492
Vis_T798*Temp_T798*Line_speed	1	82	82	0.04	0.837
Vis_T798*Temp_W346*Temp_K005A	1	19338	19338	9.98	0.002
Vis_T798*Temp_W346*Line_speed	1	16496	16496	8.51	0.004
Vis_T798*Temp_K005A*Line_speed	1	2789	2789	1.44	0.232
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798	1	82	82	0.04	0.837
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346	1	8499	8499	4.38	0.038
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K005A	1	14475	14475	7.47	0.007
Vis_W346*Vis_K005A*Line_speed	1	881	881	0.45	0.501
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346	1	16177	16177	8.34	0.005
Vis_W346*Temp_T798*Temp_K005A	1	7711	7711	3.98	0.048
Vis_W346*Temp_T798*Line_speed	1	1430	1430	0.74	0.392
Vis_W346*Temp_W346*Temp_K005A	1	2407	2407	1.24	0.267
Vis_W346*Temp_W346*Line_speed	1	881	881	0.45	0.501
Vis_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	2789	2789	1.44	0.232
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	1	8499	8499	4.38	0.038
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A	1	17309	17309	8.93	0.003
Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	1	2724	2724	1.40	0.238
Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A	1	35	35	0.02	0.893

Vis_K005A*Temp_W346*Line_speed	1	181	181	0.09	0.761
Vis_K005A*Temp_K005A*Line_speed	1	12169	12169	6.28	0.013
Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	1	5302	5302	2.73	0.101
Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	1	0	0	0.00	0.994
Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	1	22220	22220	11.46	0.001

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	774	774	0.40	0.529
4-Way Interactions	35	219709	6277	3.24	0.000
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T7 98	1	1077	1077	0.56	0.457
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W 346	1	254	254	0.13	0.718
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K0 05A	1	1160	1160	0.60	0.441
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Line_spee d	1	1	1	0.00	0.983
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_W 346	1	9690	9690	5.00	0.027
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_K0 05A	1	6251	6251	3.22	0.075
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Line_spee d	1	12446	12446	6.42	0.012
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Temp_K 005A	1	2227	2227	1.15	0.286
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Line_spe ed	1	8384	8384	4.32	0.039
Vis_T798*Vis_W346*Temp_K005A*Line_sp eed	1	4348	4348	2.24	0.137

Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	1	18479	18479	9.53	0.002
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A	1	2789	2789	1.44	0.232
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	1	7067	7067	3.65	0.058

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A	1	13153	13153	6.79	0.010
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Line_speed	1	12586	12586	6.49	0.012
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_K005A*Line_speed	1	957	957	0.49	0.483
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	1	2659	2659	1.37	0.244
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	1	25102	25102	12.95	0.000
Vis_T798*Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	1	10570	10570	5.45	0.021
Vis_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	43	43	0.02	0.882
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	1	996	996	0.51	0.475
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A	1	1160	1160	0.60	0.441
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	1	1	1	0.00	0.983
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A	1	5121	5121	2.64	0.106

Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346*Line_s peed	1	21116	21116	10.89	0.001
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K005A*Line_ speed	1	6350	6350	3.28	0.073
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346*Temp_ K005A	1	3059	3059	1.58	0.211

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346*Line_s peed	1	181	181	0.09	0.761
Vis_W346*Temp_T798*Temp_K005A*Line_ speed	1	11759	11759	6.07	0.015
Vis_W346*Temp_W346*Temp_K005A*Line _speed	1	4184	4184	2.16	0.144
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp _K005A	1	1833	1833	0.95	0.333
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Line_ speed	1	18309	18309	9.45	0.003
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A*Line _speed	1	134	134	0.07	0.793
Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A*Lin e_speed	1	12	12	0.01	0.938
Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Lin e_speed	1	6251	6251	3.22	0.075
5-Way Interactions	21	58633	2792	1.44	0.111
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T7 98*Temp_W346	1	549	549	0.28	0.595
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T7 98*Temp_K005A	1	3488	3488	1.80	0.182

Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T7 98*Line_speed	1	2856	2856	1.47	0.227
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W 346*Temp_K005A	1	2	2	0.00	0.972
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W 346*Line_speed	1	1430	1430	0.74	0.392

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K0 05A*Line_speed	1	94	94	0.05	0.826
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_W 346*Temp_K005A	1	164	164	0.08	0.772
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_W 346*Line_speed	1	2923	2923	1.51	0.222
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_K0 05A*Line_speed	1	1887	1887	0.97	0.326
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Temp_K 005A*Line_speed	1	3563	3563	1.84	0.178
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_ W346*Temp_K005A	1	3945	3945	2.04	0.156
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_ W346*Line_speed	1	1780	1780	0.92	0.340
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K 005A*Line_speed	1	9204	9204	4.75	0.031
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_ K005A*Line_speed	1	8384	8384	4.32	0.039
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*Temp_ K005A*Line_speed	1	82	82	0.04	0.837

Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	1	413	413	0.21	0.645
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	1	438	438	0.23	0.635
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	1	5862	5862	3.02	0.084
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	2346	2346	1.21	0.273

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	8731	8731	4.50	0.036
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	492	492	0.25	0.615
6-Way Interactions	7	20243	2892	1.49	0.175
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	1	11759	11759	6.07	0.015
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	1	413	413	0.21	0.645
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	1	774	774	0.40	0.529
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	22	22	0.01	0.915
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	7172	7172	3.70	0.057
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	43	43	0.02	0.882
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	61	61	0.03	0.859
7-Way Interactions	1	295	295	0.15	0.697

Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T7 98*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	1	295	295	0.15	0.697
Curvature	1	3026	3026	1.56	0.214
Error	132	255883	1939		
Total	260	1650490			
Model Summary					
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)		
44.0284	84.50%	69.46%	39.57%		

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Constant		3330.84	2.75	1210.43	0.000		
Vis_T798	26.05	13.03	2.75	4.73	0.000	1	
Vis_W346	6.60	3.30	2.75	1.20	0.232	1	
Vis_K005A	-12.38	-6.19	2.75	-2.25	0.026	1	
Temp_T798	-12.23	-6.11	2.75	-2.22	0.028	1	
Temp_W346	-1.84	-0.92	2.75	-0.33	0.739	1	
Temp_K005A	10.20	5.10	2.75	1.85	0.066	1	
Line_speed	-99.34	-49.67	2.75	-18.05	0.000	1	
Vis_T798*Vis_W346	-6.99	-3.50	2.75	-1.27	0.206	1	
Vis_T798*Vis_K005A	-13.16	-6.58	2.75	-2.39	0.018	1	
Vis_T798*Temp_T798	16.05	8.03	2.75	2.92	0.004	1	
Vis_T798*Temp_W346	-25.74	-12.87	2.75	-4.68	0.000	1	
Vis_T798*Temp_K005A	3.16	1.58	2.75	0.57	0.566	1	
Vis_T798*Line_speed	7.07	3.54	2.75	1.28	0.201	1	
Vis_W346*Vis_K005A	-4.34	-2.17	2.75	-0.79	0.432	1	
Vis_W346*Temp_T798	2.38	1.19	2.75	0.43	0.666	1	
Vis_W346*Temp_W346	-8.63	-4.32	2.75	-1.57	0.119	1	
Vis_W346*Temp_K005A	-5.51	-2.75	2.75	-1.00	0.319	1	
Vis_W346*Line_speed	-4.88	-2.44	2.75	-0.89	0.377	1	

Vis_K005A*Temp_T798	-13.48	-6.74	2.75	-2.45	0.016	1
Vis_K005A*Temp_W346	3.01	1.50	2.75	0.55	0.586	1
Vis_K005A*Temp_K005A	10.35	5.18	2.75	1.88	0.062	1
Vis_K005A*Line_speed	8.01	4.00	2.75	1.46	0.148	1
Temp_T798*Temp_W346	8.63	4.32	2.75	1.57	0.119	1
Temp_T798*Temp_K005A	3.79	1.89	2.75	0.69	0.492	1
Temp_T798*Line_speed	-13.24	-6.62	2.75	-2.41	0.018	1
Temp_W346*Temp_K005A	-14.57	-7.29	2.75	-2.65	0.009	1

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Temp_W346*Line_speed	-15.51	-7.75	2.75	-2.82	0.006	1
Temp_K005A*Line_speed	-7.54	-3.77	2.75	-1.37	0.173	1
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A	-1.21	-0.61	2.75	-0.22	0.826	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798	-0.43	-0.21	2.75	-0.08	0.938	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346	23.55	11.78	2.75	4.28	0.000	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_K005A	4.80	2.40	2.75	0.87	0.384	1
Vis_T798*Vis_W346*Line_speed	-0.82	-0.41	2.75	-0.15	0.882	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798	3.71	1.86	2.75	0.67	0.501	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346	-0.74	-0.37	2.75	-0.13	0.893	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_K005A	10.66	5.33	2.75	1.94	0.055	1
Vis_T798*Vis_K005A*Line_speed	-7.62	-3.81	2.75	-1.38	0.169	1
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346	15.82	7.91	2.75	2.87	0.005	1
Vis_T798*Temp_T798*Temp_K005A	3.79	1.89	2.75	0.69	0.492	1
Vis_T798*Temp_T798*Line_speed	1.13	0.57	2.75	0.21	0.837	1
Vis_T798*Temp_W346*Temp_K005A	-17.38	-8.69	2.75	-3.16	0.002	1
Vis_T798*Temp_W346*Line_speed	16.05	8.03	2.75	2.92	0.004	1
Vis_T798*Temp_K005A*Line_speed	-6.60	-3.30	2.75	-1.20	0.232	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798	1.13	0.57	2.75	0.21	0.837	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346	11.52	5.76	2.75	2.09	0.038	1

Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K005A	-15.04	-7.52	2.75	-2.73	0.007	1
Vis_W346*Vis_K005A*Line_speed	3.71	1.86	2.75	0.67	0.501	1
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346	15.90	7.95	2.75	2.89	0.005	1
Vis_W346*Temp_T798*Temp_K005A	-10.98	-5.49	2.75	-1.99	0.048	1
Vis_W346*Temp_T798*Line_speed	-4.73	-2.36	2.75	-0.86	0.392	1
Vis_W346*Temp_W346*Temp_K005A	6.13	3.07	2.75	1.11	0.267	1
Vis_W346*Temp_W346*Line_speed	-3.71	-1.86	2.75	-0.67	0.501	1
Vis_W346*Temp_K005A*Line_speed	6.60	3.30	2.75	1.20	0.232	1

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE	T- Coef	P- Value	VIF	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	-11.52	-5.76	2.75	-2.09	0.038	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A	16.45	8.22	2.75	2.99	0.003	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	-6.52	-3.26	2.75	-1.19	0.238	1	
Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A	0.74	0.37	2.75	0.13	0.893	1	
Vis_K005A*Temp_W346*Line_speed	1.68	0.84	2.75	0.31	0.761	1	
Vis_K005A*Temp_K005A*Line_speed	-13.79	-6.89	2.75	-2.51	0.013	1	
Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	-9.10	-4.55	2.75	-1.65	0.101	1	
Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	-0.04	-0.02	2.75	-0.01	0.994	1	
Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	-18.63	-9.32	2.75	-3.39	0.001	1	
Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	3.48	1.74	2.75	0.63	0.529	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798	4.10	2.05	2.75	0.75	0.457	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346	1.99	1.00	2.75	0.36	0.718	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K005A	-4.26	-2.13	2.75	-0.77	0.441	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Line_speed	0.12	0.06	2.75	0.02	0.983	1	
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346	12.30	6.15	2.75	2.24	0.027	1	
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_K005A	-9.88	-4.94	2.75	-1.80	0.075	1	
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Line_speed	-13.95	-6.97	2.75	-2.53	0.012	1	
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Temp_K005A	-5.90	-2.95	2.75	-1.07	0.286	1	

Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Line_speed	11.45	5.72	2.75	2.08	0.039	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_K005A*Line_speed	-8.24	-4.12	2.75	-1.50	0.137	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	-16.99	-8.50	2.75	-3.09	0.002	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005	6.60	3.30	2.75	1.20	0.232	1
A						
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	10.51	5.25	2.75	1.91	0.058	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005	14.34	7.17	2.75	2.60	0.010	1
A						

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Line_speed	14.02	7.01	2.75	2.55	0.012	1	
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_K005A*Line_speed	3.87	1.93	2.75	0.70	0.483	1	
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A	-6.45	-3.22	2.75	-1.17	0.244	1	
Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*Line_speed	19.80	9.90	2.75	3.60	0.000	1	
Vis_T798*Temp_T798*Temp_K005A*Line_speed	-12.85	-6.43	2.75	-2.34	0.021	1	
Vis_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	0.82	0.41	2.75	0.15	0.882	1	
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346	-3.95	-1.97	2.75	-0.72	0.475	1	
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A	-4.26	-2.13	2.75	-0.77	0.441	1	
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Line_speed	0.12	0.06	2.75	0.02	0.983	1	

Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346* Temp_K005A	8.95	4.47	2.75	1.63	0.106	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346* Line_speed	18.16	9.08	2.75	3.30	0.001	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_K005A* Line_speed	-9.96	-4.98	2.75	-1.81	0.073	1
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346* Temp_K005A	6.91	3.46	2.75	1.26	0.211	1

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346*Lin e_speed	-1.68	-0.84	2.75	-0.31	0.761	1	
Vis_W346*Temp_T798*Temp_K005A*Li ne_speed	-13.55	-6.78	2.75	-2.46	0.015	1	
Vis_W346*Temp_W346*Temp_K005A*L ine_speed	8.09	4.04	2.75	1.47	0.144	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Te mp_K005A	-5.35	-2.68	2.75	-0.97	0.333	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Li ne_speed	-16.91	-8.46	2.75	-3.07	0.003	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_K005A*L ine_speed	-1.45	-0.72	2.75	-0.26	0.793	1	
Vis_K005A*Temp_W346*Temp_K005A* Line_speed	-0.43	-0.21	2.75	-0.08	0.938	1	
Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A* Line_speed	9.88	4.94	2.75	1.80	0.075	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ T798*Temp_W346	2.93	1.46	2.75	0.53	0.595	1	

Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ T798*Temp_K005A	-7.38	-3.69	2.75	-1.34	0.182	1
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ T798*Line_speed	6.68	3.34	2.75	1.21	0.227	1
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ W346*Temp_K005A	0.20	0.10	2.75	0.04	0.972	1
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ W346*Line_speed	4.73	2.36	2.75	0.86	0.392	1

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_ p_K005A*Line_speed	-1.21	-0.61	2.75	-0.22	0.826	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_ mp_W346*Temp_K005A	1.60	0.80	2.75	0.29	0.772	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_ mp_W346*Line_speed	6.76	3.38	2.75	1.23	0.222	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Temp_ mp_K005A*Line_speed	-5.43	-2.71	2.75	-0.99	0.326	1
Vis_T798*Vis_W346*Temp_W346*Temp_ mp_K005A*Line_speed	7.46	3.73	2.75	1.36	0.178	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_ mp_W346*Temp_K005A	-7.85	-3.93	2.75	-1.43	0.156	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_ mp_W346*Line_speed	5.27	2.64	2.75	0.96	0.340	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_ mp_K005A*Line_speed	11.99	6.00	2.75	2.18	0.031	1
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_W346*Temp_ mp_K005A*Line_speed	11.45	5.72	2.75	2.08	0.039	1

Vis_T798*Temp_T798*Temp_W346*T emp_K005A*Line_speed	1.13	0.57	2.75	0.21	0.837	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*T emp_W346*Temp_K005A	2.54	1.27	2.75	0.46	0.645	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*T emp_W346*Line_speed	-2.62	-1.31	2.75	-0.48	0.635	1
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*T emp_K005A*Line_speed	9.57	4.79	2.75	1.74	0.084	1

ตารางภาคผนวก ก-3 (ต่อ)

Coded Coefficients							
Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF	
Vis_W346*Vis_K005A*Temp_W346*T emp_K005A*Line_speed	6.05	3.03	2.75	1.10	0.273	1	
Vis_W346*Temp_T798*Temp_W346* Temp_K005A*Line_speed	11.68	5.84	2.75	2.12	0.036	1	
Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346* Temp_K005A*Line_speed	-2.77	-1.39	2.75	-0.50	0.615	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Tem p_T798*Temp_W346*Temp_K005A	-13.55	-6.78	2.75	-2.46	0.015	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Tem p_T798*Temp_W346*Line_speed	2.54	1.27	2.75	0.46	0.645	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Tem p_T798*Temp_K005A*Line_speed	3.48	1.74	2.75	0.63	0.529	1	
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Tem p_W346*Temp_K005A*Line_speed	0.59	0.29	2.75	0.11	0.915	1	
Vis_T798*Vis_W346*Temp_T798*Tem p_W346*Temp_K005A*Line_speed	10.59	5.29	2.75	1.92	0.057	1	
Vis_T798*Vis_K005A*Temp_T798*Te mp_W346*Temp_K005A*Line_speed	0.82	0.41	2.75	0.15	0.882	1	

Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	-0.98	-0.49	2.75	-0.18	0.859	1
Vis_T798*Vis_W346*Vis_K005A*Temp_T798*Temp_W346*Temp_K005A*Line_speed	2.15	1.07	2.75	0.39	0.697	1
Ct Pt		-24.80	19.9	-1.25	0.214	1

ตารางภาคผนวก ก-4 ผลการทดลองทำซ้ำ

ลำดับ	น้ำหนักดอกยาง (กรัม)
1	3330
2	3300
3	3330
4	3320
5	3360
6	3360
7	3345
8	3330
9	3360
10	3315
11	3345
12	3405
13	3285
14	3315
15	3330
16	3345
17	3340
18	3370

19	3345
20	3340
21	3335
22	3345
23	3340
24	3360
25	3340
26	3335
27	3345

ตารางภาคผนวก ก-4 (ต่อ)

ลำดับ	น้ำหนักดอกยาง (กรัม)
28	3340
29	3345
30	3360

ตารางภาคผนวก ก-5 ผลของการทดลอง

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอกยางที่เริ่มผ่านเกณฑ์
1	4042	1.16	2
2	5215	0.95	2
3	5216	1.02	3
4	4745	1.12	2
5	4460	0.97	2
6	5715	1.18	2
7	4525	1.00	2
8	4752	1.06	2
9	4238	1.15	3

10	4045	1.03	2
11	4141	1.13	2
12	5221	0.96	3
13	5321	1.20	2
14	4787	1.08	2
15	4553	1.10	3
16	4122	0.98	2
17	5756	1.03	2
18	5566	1.20	2

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอกลายที่เริ่มผ่านเกณฑ์
19	3876	0.97	2
20	4532	1.26	2
21	5645	1.04	3
22	5790	1.01	3
23	4003	1.15	2
24	3215	1.08	3
25	3389	1.05	2
26	4422	1.18	2
27	5765	1.02	2
28	4338	1.15	2
29	4657	0.95	2
30	5089	1.02	2
31	5734	0.93	2
32	5880	1.21	3
33	4586	1.09	2
34	3421	1.10	3
35	4153	1.04	2
36	5859	1.05	2

37	4499	1.00	2
38	5648	0.94	2
39	4321	1.20	3
40	5881	1.03	2
41	5715	1.18	2
42	4525	1.00	2
43	4752	1.06	2
44	4238	1.15	3
45	4045	1.03	2

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอกลายที่เริ่มผ่านเกณฑ์
46	4422	1.18	2
47	5765	1.02	2
48	4338	1.15	2
49	4657	0.95	2
50	5089	1.02	2
51	5645	1.04	3
52	5790	1.01	3
53	4003	1.15	2
54	3215	1.08	3
55	3389	1.05	2
56	3310	1.03	3
57	3420	1.14	2
58	4599	1.18	3
59	5834	0.98	2
60	5988	1.01	2
61	4042	1.16	2
62	5215	0.95	2

63	5216	1.02	3
64	4745	1.12	2
65	4460	0.97	2
66	4122	0.98	2
67	5756	1.03	2
68	5566	1.20	2
69	3876	0.97	2
70	4532	1.26	2
71	5734	0.93	2

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอกลายที่เริ่มผ่านเกณฑ์
72	5880	1.21	3
73	4586	1.09	2
74	3421	1.10	3
75	4153	1.04	2
76	4122	0.98	2
77	5756	1.03	2
78	5566	1.20	2
79	3876	0.97	2
80	4532	1.26	2
81	4141	1.13	2
82	5221	0.96	3
83	5321	1.20	2
84	4787	1.08	2
85	4553	1.10	3
86	5859	1.05	2
87	4499	1.00	2

88	5648	0.94	2
89	4321	1.20	3
90	5881	1.03	2
91	4400	1.00	2
92	4120	1.23	3
93	4398	1.19	2
94	5757	1.06	2
95	6093	0.99	2
96	3310	1.03	3

ตารางภาคผนวก ก-5 (ต่อ)

No	Size Code	สัดส่วนเทียบกับ Size code มาตรฐาน	จำนวนเส้นดอogyangที่เริ่มผ่านเกณฑ์
97	3420	1.14	2
98	4599	1.18	3
99	5834	0.98	2
100	5988	1.01	2