



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูงแรงดึง
และการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติก PC/ABS ที่ผสมเขม่าดำ

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE (EMI) SHIELDING EFFECTIVENESS, TENSILE
AND ELECTROSTATIC DISCHARGE OF PC/ABS-CARBON BLACK COMPOSITES

นายวิภู ศรีสีบสาย

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

1. ชื่อโครงการ (ภาษาไทย)...ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความต้านทานแรงดึงและการประทุ
ของไฟฟ้าสถิตของพลาสติก PC/ABS ที่ผสมเขม่าดำ.....
แหล่งเงิน งบประมาณเงินได้คณะวิศวกรรมศาสตร์.....
ประจำปีงบประมาณ..... 2556..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน..... 80,000..... บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย..... 1 ปี..... ปี ตั้งแต่ ค.ศ.55..... ถึง ก.ย.56.....
ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด
นายวิภู ศรีสืบสาย...สาขาวิชาวิศวกรรมศาสตร์...สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) และสมบัติในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ของพลาสติกผสมระหว่างพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะครีโลไนล์-ไตรส-บิวทาไดอิน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ทำการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป (Injection molding) หนา 4 มิลลิเมตร พร้อมทั้งออกแบบการทดลองส่วนผสม (Mixture design) ด้วยวิธี D-optimal เพื่อหาอัตราส่วนของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด โดยจำกัดขอบเขตของปริมาณคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เนื่องจากในการทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D1238 พบว่า อัตราส่วนที่ปริมาณคาร์บอนแบล็คเกิน 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถขึ้นรูปได้ หลังจากนั้นทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 800 ถึง 3,000 MHz ตามมาตรฐานการทดสอบ MIL-STD-285 พบว่าแนวโน้มของค่า SE จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้น และขนาดอนุภาคมีผลต่อค่า SE ค่อนข้างน้อย เนื่องจากวิธีการผสมผงคาร์บอนแบล็ค (ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า) สารตัวเติมดังกล่าวกระจายตัวในเนื้อของพลาสติกผสมได้ไม่ดี จึงให้ค่า SE ใกล้เคียงกับค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบที่เติมคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ ซึ่งจากผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การประยุกต์ใช้งานพลาสติกเชิงประกอบที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจจะยังมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับวัสดุจำพวกโลหะ และทำการทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกผสม PC/ABS/CB ที่อัตราส่วนต่างๆ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D257 เพื่อศึกษาสมบัติในการลดผลกระทบจากการประทุของไฟฟ้าสถิตพบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม จะมีค่าเท่ากับ 10^{12} Ω/square และเมื่อทำการเติมสารตัวเติมในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง $10^6 - 10^{11}$ Ω/square ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการป้องกันจากการประทุของไฟฟ้าสถิต ซึ่งต้องการวัสดุที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวในช่วง 10^4 ถึง 10^{11} Ω/square ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในงานด้านบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ได้

Research Title: Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness, Tensile and Electrostatic Discharge of PC/ABS-carbon black composites

Researcher:.....MR.WIPOO .SRISEUBSAI.....

Faculty:Engineering.....Department: Industrial Engineering.....

ABSTRACT

Objective of this research was to study the electromagnetic shielding effectiveness (SE) and dissipation of electrostatic discharge (ESD) of polymer blends between polycarbonate (PC) and acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) filled with carbon black powder (CBp) and carbon black masterbatch (CBm). The mixtures of PC/ABS/CB composites were prepared for the injection molding that produced the specimens with thickness of 4 mm. The D-optimal mixture design which was the constrained mixture designs was applied with this experiment. The experiments were performed with limitation of carbon black which could not exceeding 17 percent by weight due to the melt flow rate of mixture. The EMI SE was measured between the frequency ranges of 800 to 3,000 MHz according to the MIL-STD-285. The result showed that the trend of the SE values increases with increasing amount of the filler. The particle sizes had little effect on the SE values due to the mixing method. Carbon black powder which smaller particle sizes is not dispersed well in the plastic matrix. The SE values of PC/ABS/CBp is close with the SE values of PC/ABS that filled with carbon black masterbatch. The results of the performance testing for shielding electromagnetic waves showed that there were limitations of these composited material applications because the electromagnetic shielding effectiveness was not high enough when compared to metal materials. The surface resistivity of the PC/ABS/CB composites was determined according to the ASTM D257 for studying and dissipation the effects of electrostatic discharge (ESD). It was found that the surface resistivity of the plastic with no additives was 10^{12} Ω /square. When the amount of fillers was increased, the trend of surface resistivity of plastic composites decreased to the range of 10^6 - 10^{11} Ω /square, which was suitable for the application in the dissipation of electrostatic discharge which require materials with a surface resistivity in the range 10^4 to 10^{11} Ω /square. This plastic composite can be used in the electronic packaging.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความอนุเคราะห์จากน.ส. อาสลิลา ทิพย์ไกรสร และ รศ.ดร. อธิธิพล แจ่มชัด ที่ได้ให้คำแนะนำ เพื่อหาแนวทางในการศึกษา และเข้าถึงแหล่งความรู้เพื่อการค้นคว้า อีกทั้งยังสละเวลาอันมีค่าในการให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ เพื่อให้การศึกษาครั้งนี้สำเร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. กรรณชัย กัลยาศิริ ในการให้คำปรึกษา และให้คำแนะนำต่างๆ ในการวิเคราะห์ และแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกๆ ท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร. บุญชัย เตชะอำนาจ อาจารย์สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดสอบชิ้นงาน

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์, ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (PTEC) ที่ให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือและอุปกรณ์เพื่อใช้ในการทดสอบชิ้นงาน

วิญ ศรีสีบสาย

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	XII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 วัตถุประสงค์.....	3
1.2 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.3 ขั้นตอนการศึกษา.....	4
1.4 สมมติฐานของการวิจัย.....	5
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 พลาสติก.....	7
2.1.1 ความเป็นมาของพลาสติก.....	7
2.1.2 แหล่งกำเนิดของพลาสติก สามารถแบ่งออกเป็นแหล่งใหญ่ๆ ได้ 5 แหล่ง คือ.....	7
2.1.3 ประเภทของพลาสติก.....	8
2.1.3.1 แบ่งตามลักษณะเฉพาะของการแปรรูป.....	8
2.1.3.2 แบ่งตามลักษณะการประยุกต์ใช้งาน.....	9
2.1.4 พอลิคาร์บอเนต.....	10
2.1.5 อะครีโลไนไตรต์ บิวตะไดอิน สไตรีน.....	11
2.1.6 สารเติมแต่งสำหรับพลาสติก.....	13
2.1.7 สารเติมแต่งที่เป็นสี.....	13
2.1.7.1 สีผง.....	13
2.1.7.2 สีย้อม.....	13
2.1.8 การผสมและการคอมปาวด์พลาสติก.....	14
2.1.8.1 กระบวนการผสม.....	14
2.1.8.2 กระบวนการคอมปาวด์.....	14
2.1.9 กระบวนการแปรรูปพลาสติก.....	14
2.1.9.1 การฉีดขึ้นรูปพลาสติก.....	15
2.1.9.2 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก.....	15

2.1.9.3	ระยะเวลาในการฉีดพลาสติกต่อวัฏจักร.....	15
2.2	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.2.1	สเปกตัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	16
2.2.1.1	คลื่นวิทยุ.....	17
2.2.1.2	คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ.....	17
2.2.1.3	รังสีอินฟราเรด.....	18
2.2.1.4	แสง.....	18
2.2.1.5	รังสีอัลตราไวโอเล็ต.....	18
2.2.1.6	รังสีเอกซ์.....	18
2.2.1.7	รังสีแกมมา.....	18
2.2.2	คลื่น.....	19
2.2.2.1	สมบัติของคลื่น.....	19
2.2.3	การรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	20
2.2.4	การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	23
2.3	วัสดุคอมโพสิต.....	31
2.3.1	ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต.....	32
2.3.2	พอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้า.....	33
2.4	คาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำ.....	34
2.4.1	ชนิดของคาร์บอนแบล็ค.....	35
2.4.1.1	คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส.....	35
2.4.1.2	คาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอล.....	35
2.4.1.3	คาร์บอนแบล็คชนิดชั้นแนล.....	35
2.4.2	การแบ่งเกรดและการเรียกชื่อของคาร์บอนแบล็ค.....	36
2.4.3	สมบัติของคาร์บอนแบล็ค.....	38
2.4.3.1	โครงสร้าง.....	38
2.4.3.2	ขนาดอนุภาค.....	39
2.4.3.3	ลักษณะทางกายภาพของผิว.....	39
2.4.3.4	ลักษณะทางเคมีของผิว.....	39
2.4.3.5	ความเป็นรูพรุนของอนุภาค.....	39
2.4.3.6	การนำไฟฟ้าและความร้อน.....	39
2.5	ไฟฟ้าสถิต.....	40
2.5.1	ประจุไฟฟ้า.....	40
2.5.2	อันตรายของไฟฟ้าสถิตที่มีต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์.....	40

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2.1 ลักษณะความเสียหาย.....	40
2.5.2.2 ปรากฏการณ์ ESD แบบพื้นฐาน	41
2.5.3 สาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิต	41
2.5.3.1 ไทโรโบอิเล็กทรอนิกส์หรือไทโรโบชาร์จ	41
2.5.3.2 การสะสมประจุไฟฟ้าที่เกิดโดยการเหนี่ยวนำ.....	42
2.5.3.3 การสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุตัวนำโดยการสัมผัส	43
2.5.3.4 การสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวน.....	43
2.5.4 ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุในงานควบคุมการประจุของไฟฟ้าสถิต	43
2.5.4.1 ฉนวนไฟฟ้า.....	44
2.5.4.2 ตัวนำไฟฟ้า	44
2.5.4.3 ตัวกระจายไฟฟ้าสถิต.....	44
2.6 สมบัติทางไฟฟ้า	44
2.6.1 สภาพนำไฟฟ้า	44
2.6.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	47
2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	48
2.8 การออกแบบการทดลอง	50
2.8.1 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง.....	51
2.8.1.1 เรพลิเคชัน	51
2.8.1.2 แรนดอมไมเซชัน.....	51
2.8.1.3 บล็อกกิง	51
2.8.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง	52
2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม.....	52
2.8.4 การออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal.....	57
2.8.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	58
2.8.6 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถดถอย.....	59
2.8.6 แบบจำลองการถดถอย	60
2.8.6.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Mixture design.....	60
2.8.6.2 การเลือกแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม.....	61
2.8.6.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ	64
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	68
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	69
3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	69
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	71

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

3.2	วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ.....	71
3.3	การออกแบบการทดลองโดยอาศัยวิธีทางสถิติวิศวกรรม.....	74
3.4	การทดสอบค่าอัตราการใช้ของพลาสติก.....	76
3.5	วัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า.....	77
3.6	การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	79
3.7	การทดสอบค่าความสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	80
3.8	การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CB ด้วยเทคนิค SEM.....	82
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล.....		83
4.1	ค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	83
4.1.1	พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz.....	85
4.1.1.1	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm).....	90
4.1.1.2	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือผงคาร์บอนแบล็ค (CBp).....	95
4.1.2	พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz.....	100
4.1.2.1	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz โดยมีสารตัวเติมคือคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm).....	101
4.1.2.2	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz โดยมีสารตัวเติมคือผงคาร์บอนแบล็ค (CBp).....	106
4.1.3	พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz.....	111
4.1.3.1	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz โดยมีสารตัวเติมคือคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm).....	112
4.1.3.2	วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz โดยมีสารตัวเติมคือผงคาร์บอนแบล็ค (CBp).....	116
4.2	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	122

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.1 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm).....	123
4.2.2 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black powder, CBp).....	124
4.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	125
4.3.1 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm).....	127
4.3.1.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความต้านทาน ไฟฟ้าเชิงพื้นผิว โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์ (CBm).....	128
4.3.2 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ก (Carbon black powder, CBp).....	130
4.3.2.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความต้านทาน ไฟฟ้าเชิงพื้นผิว โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ก (CBp).....	131
4.4 การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	132
4.4.1 พลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบทช์.....	133
4.4.1.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz.....	133
4.4.1.2 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz.....	134
4.4.1.2 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz.....	135
4.4.2 พลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ก.....	136
4.4.1.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz.....	136
4.4.1.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz.....	137
4.4.1.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz.....	138
4.5 นำสัดส่วนของปัจจัยที่ดีที่สุดไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์.....	139
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	143
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	143
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	145
เอกสารอ้างอิง.....	146
ภาคผนวก.....	152
ภาคผนวก ก บทความทงวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	153
ภาคผนวก ข ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	164
ภาคผนวก ค ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก.....	173
ภาคผนวก ง ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	192
ประวัติผู้เขียน.....	ผิดพลาด! ไม่ได้กำหนดที่คั่นหน้า

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ปริมาณความต้องการใช้เม็ดพลาสติก	1
1.2 ระดับความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต.....	2
2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของคาร์บอนแบล็คชนิดต่างๆ.....	36
2.3 การจำแนกเกรดคาร์บอนแบล็ค	37
2.4 ชนิดของอนุกรมไทรโบอีเล็กทริก	42
2.5 ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุประเภทต่างๆ	46
3.1 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนตเกรด PC 110	70
3.2 คุณสมบัติของอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน เกรด PA 707	70
3.3 สมบัติทางกายภาพของผงคาร์บอนแบล็คที่ใช้ในงานวิจัย	70
3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท เกรด PLASBLAK® UN2014	70
3.5 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็ค ในคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทที่ใช้ในงานวิจัย	71
3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเม็ดพลาสติก แต่ละอัตราส่วน.....	72
3.7 ค่าอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน	72
3.8 การออกแบบการทดลองส่วนผสม แบบ D-optimal.....	76
4.1 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	91
4.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	92
4.3 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	92
4.4 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	95
4.5 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz.....	96
4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz.....	97
4.7 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz	97
4.8 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz	100
4.9 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	101
4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	102

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.11 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	103
4.12 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	106
4.13 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz.....	106
4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz	107
4.15 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz	108
4.16 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz.....	111
4.17 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz	112
4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz.....	113
4.19 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz	113
4.20 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz.....	116
4.21 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz	117
4.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	118
4.23 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	118
4.24 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	121
4.25 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp	124
4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp	124
4.27 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	127
4.28 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ PC/ABS/CBm.....	129
4.29 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วนต่างๆ.....	130
4.30 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ PC/ABS/CBp	132
4.31 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz	134

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.32 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz.....	135
4.33 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz.....	136
4.34 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz.....	137
4.35 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz.....	138
4.36 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ทดสอบ 2540 MHz.....	139
4.37 อัตราส่วนของ PC/ABS/CBm ที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบ.....	139
4.38 อัตราส่วนของ PC/ABS/CBp ที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบ.....	140
4.39 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBm ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่า SE.....	140
4.40 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBm ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	140
4.41 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBp ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่า SE.....	141
4.42 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBp ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว.....	141
4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์ การปิดกั้น.....	142

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ (Chains molecule).....	8
2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแห (Net molecule)	9
2.3 การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น.....	11
2.4 สูตรโครงสร้างของเอบีเอส	12
2.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก	16
2.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า	16
2.7 สเปกตรัมของคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.8 ส่วนประกอบหลักที่ทำให้เกิดการรบกวนทางคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	21
2.9 การเกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกระบบ	22
2.10 การเกิดสัญญาณรบกวนจากภายในระบบ	22
2.11 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์	23
2.12 ปรัชญาการทางวิทยาศาสตร์ที่จะเกิดขึ้นระหว่างคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุปิดกั้น.....	24
2.13 กลไกการกำบังคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า	25
2.14 (a) การป้องกันการปล่อยคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด (b) การป้องกันวัสดุที่รับคลิ่นแม่เหล็กไฟฟ้า	25
2.15 แผนภาพแสดงการผลิตเขม่าดำ ชนิดเฟอร์เนส (Furnace black).....	36
2.16 TEM micrograph กำลิ่งขยายต่ำ.....	37
2.17 TEM micrograph กำลิ่งขยายสูงแสดงรูปร่างของคาร์บอนแบล็ค	37
2.18 (ก) ภาพวาดลักษณะของอนุภาคหรือโนดูลของคาร์บอนแบล็ค และ (ข) แอ็กกรีเกตที่เกิดจากโนดูลหลอมติดกัน (Fused nodules).....	38
2.19 (ก) คาร์บอนแบล็คโครงสร้างต่ำ และ (ข) คาร์บอนแบล็คโครงสร้างสูง.....	39
2.20 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากกาสะสมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ.....	43
2.21 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุตัวนำโดยการสัมผัส.....	43
2.22 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวน.....	43
2.23 (a) ลักษณะของอิเล็กโทรดที่เป็นวงกลม และ (b) ลักษณะการวางชิ้นงานทดสอบกับอิเล็กโทรด	46
2.24 สารไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้า.....	48
2.25 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน.....	48
2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด	49
2.26 ส่วนประกอบหลัก และการทำงานของ SEM.....	50
2.28 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM).....	50
2.29 แบบจำลองของกระบวนการ	51

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.30 ลักษณะสิ่งทดลองที่เป็นแบบ Non-mixture และ Mixture.....	53
2.31 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี 3 ส่วนผสม.....	53
2.32 ระบบโคออร์ดิเนตแกนสามเส้น.....	54
2.33 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แล็คทิส.....	54
2.34 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แล็คทิส ที่มี 3 ตัวแปร.....	55
2.35 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์เซนทรอยด์.....	55
2.36 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล.....	56
2.37 การกำหนดจุดการทดลองด้วยการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal.....	58
3.1 ขั้นตอนในการศึกษา.....	68
3.1(ต่อ) ขั้นตอนในการศึกษา.....	69
3.2 เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น BSA.....	72
3.3 (ก) เครื่องอบแห้งเม็ดพลาสติก Hopper Dryers ของ PAECO รุ่น PHD-12 (ข) เครื่องฉีดพลาสติก TOSHIBA รุ่น IS 80 EPN.....	73
3.4 (ก) ปากกาจับชิ้นงาน (ข) แผ่นเหล็ก 2 แผ่น (ค) วางแผ่นเหล็ก 2 แผ่นบนปากกาจับชิ้นงาน.....	73
3.5 เครื่องตัดอัตโนมัติ.....	73
3.6 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ สำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	74
3.7 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมสำหรับ 3 ปัจจัย.....	75
3.8 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.....	77
3.9 เครื่องกำเนิดและรับสัญญาณ (Network Analyzer รุ่น hp 8449B OPT H02).....	78
3.10 หัวส่งสัญญาณ (a) แบบแนวนอน (Horizontal) (b) แบบแนวตั้ง (Vertical).....	79
3.11 การติดตั้งหัวส่งสัญญาณกับกล่องรับสัญญาณ.....	79
3.12 ลักษณะของอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	81
3.13 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และชิ้นงานในการทดสอบ.....	81
3.14 การอ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ.....	82
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) กับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ที่ความถี่ทดสอบต่างๆ.....	84
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) กับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ที่ความถี่ทดสอบต่างๆ.....	85
4.3 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz ของพลาสติก เชิงประกอบนำไฟฟ้า PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) ที่ปริมาณต่างๆ ของสารตัวเติม.....	86

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วน 0.42/0.42/0.16 จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	87
4.5 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วน 0.69/0.23/0.08 จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	88
4.6 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วน 0.42 /0.42/0.16 จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	89
4.7 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วน 0.69/0.23/0.08 จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า.....	90
4.8 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	93
4.9 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	94
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz.....	94
4.11 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz.....	98
4.12 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz.....	99
4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz.....	99
4.14 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz ของพลาสติก และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) ที่ปริมาณต่างๆ ของสารตัวเติม.....	101
4.15 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	104
4.16 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	104
4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz.....	105
4.18 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz.....	109
4.19 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz.....	109



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าความต้านทานแรงดึง
และการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติก PC/ABS ที่ผสมเขม่าดำ

ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE (EMI) SHIELDING EFFECTIVENESS, TENSILE
AND ELECTROSTATIC DISCHARGE OF PC/ABS-CARBON BLACK COMPOSITES

นายวิภู ศรีสีบสาย

RCH
๑๖๖๑ ๗
๒๕๕๖

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 138164
รับเดือนปี 18 ก.ย. 2558

b. 12707661
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2556

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz.....	110
4.21 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz ของพลาสติก เชิงประกอบนำไฟฟ้า PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) ที่ปริมาณต่างๆ ของสารตัวเติม	111
4.22 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz.....	114
4.23 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz.....	115
4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz	115
4.25 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	119
4.26 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	120
4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz.....	120
4.28 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ PC/ABS/CBm และ PC/ABS/CBp ที่มีปริมาณสารตัวเติมแตกต่างกัน	123
4.29 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm และ PC/ABS/CBp ที่มีปริมาณสารตัวเติมแตกต่างกัน	125
4.30 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีปริมาณ CBm แตกต่างกัน.....	128
4.31 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีปริมาณ CBp แตกต่างกัน	131
4.32 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour Plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง	134
4.33 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง	135
4.34 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง	136
4.35 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง.....	137
4.36 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง.....	138

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่

หน้า

4.37 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง	139
---	-----

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันนี้พลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมทั้งงานบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้วย เห็นได้จากปริมาณความต้องการใช้เม็ดพลาสติก ดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยปกติอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีคุณสมบัติในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งอาจจะรบกวนต่อการทำงานของวัสดุอื่นๆ หรือสามารถที่จะถูกรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากวัสดุอื่นๆ ด้วยเช่นกัน ดังนั้นพลาสติกที่นำมาใช้ประโยชน์ในด้านของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และงานบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ จึงต้องมีการปรับปรุงคุณสมบัติของพลาสติก เพื่อให้สามารถป้องกันการเกิดการรบกวนเนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference, EMI) ซึ่งช่วงความถี่ของสัญญาณที่มีการใช้งานมากที่สุด คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 790 – 3,000 MHz เพราะเป็นย่านความถี่ที่สามารถรองรับเทคโนโลยีใหม่ๆ ได้ดี โดยเฉพาะความต้องการใช้งานด้านบริการบรอดแบนด์ ซึ่งอาศัยคุณสมบัติการแพร่กระจายของคลื่น นอกจากนี้ปัจจุบันนี้ชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็กลง และมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น การมีวงจรไฟฟ้ามากขึ้น ขณะที่ขนาดของชิ้นงานเล็กลง จะส่งผลให้ชิ้นงานยิ่งไวต่อไฟฟ้าสถิตมากขึ้น ไฟฟ้าสถิตจะถูกส่งจากคนงานในสายการผลิต เครื่องมือ และอุปกรณ์อื่นๆ ไปยังชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์ ทั้งในระหว่างการเก็บรักษาและการขนส่ง ซึ่งมีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของชิ้นงานเหล่านั้นเปลี่ยนไป อาจจะเป็นการลดคุณภาพลงหรือทำลายชิ้นงาน ซึ่งเป็นการสร้างความเสียหายให้กับชิ้นงานอิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากความเสียหายของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จากการประทุของไฟฟ้าสถิตมีประมาณ 8-33% ซึ่งมีมูลค่าอยู่ในช่วงพันล้านต่อปี[1] ดังแสดงในตารางที่ 1.2 จึงต้องพัฒนาพลาสติกที่ใช้ในงานบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ให้มีความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ซึ่งวัสดุที่ใช้ในการควบคุมการประทุของไฟฟ้าสถิตควรจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) อยู่ในช่วง 10^4 ถึง 10^{11} Ω /square[2]

ตารางที่ 1.1 ปริมาณความต้องการใช้เม็ดพลาสติก[3]

กลุ่มอุตสาหกรรม	2006		2007		2008	
	ตัน/ปี	สัดส่วน (%)	ตัน/ปี	สัดส่วน (%)	ตัน/ปี	สัดส่วน (%)
Grand Total	4,713,939	101	4,731,888	100	4,429,202	100
Agriculture	75,565	2	70,434	2	111,826	3
Automotive	248,323	5	272,150	6	401,912	9
Construction	471,182	10	477,628	10	463,946	11
Electrical & Electronics	318,216	7	315,953	7	426,997	10
Others	595,744	13	547,952	12	215,063	5
Packaging	2,079,399	44	2,199,291	47	2,154,094	49
Textile	925,510	20	848,480	18	655,364	15

ตารางที่ 1.2 ระดับความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต[4]

รายงานความเสียหายที่เกิดจากไฟฟ้าสถิต			
ชนิด	อัตราความเสียหาย		อัตราความเสียหายเฉลี่ย
	ต่ำ	สูง	
ส่วนประกอบ จากโรงงาน	4%	97%	16-22%
ผู้ค้ารายย่อย	3%	70%	9-15%
ตัวแทนจำหน่าย	2%	35%	8-14%
ผู้ใช้	5%	70%	27-33%

ดังนั้นในการนำพลาสติก ซึ่งโดยปกติมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว $> 10^{12}$ Ω/square)[2] มาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมดังกล่าว จึงต้องมีการพัฒนาพลาสติกให้มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าสูงขึ้น (Conductivity) ซึ่งทำได้โดยการเคลือบสารนำไฟฟ้าที่เป็นโลหะบนพลาสติก (Conductive coating on plastics) ด้วยเทคนิคต่างๆ เช่น Electroplating, Vacuum metallization เป็นต้น แต่เนื่องจากวิธีนี้มีข้อจำกัดสำหรับพลาสติกบางชนิด ซึ่งอาจจะไม่สามารถใช้วิธีนี้ได้ นอกจากนั้นวิธีดังกล่าวยังเป็นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนในการผลิต เนื่องจากต้องทำการเตรียมผิวหน้าชิ้นงานพลาสติกสำหรับเคลือบ อีกวิธีหนึ่งคือ ใช้พอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Intrinsically conducting polymers, ICPs) โดยที่พอลิเมอร์เหล่านี้จะสามารถนำไฟฟ้าได้ จะต้องผ่านกระบวนการโด๊ป (Doping reaction) ก่อน ดังนั้นจึงมีราคาค่อนข้างสูง แต่เหมาะกับการใช้งานที่ต้องการความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับสารเติมแต่งจำพวกโลหะ[5] แต่มีราคาที่ถูกลง และสำหรับวิธีที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้คือ การผสมสารตัวเติมที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Conducting additive) ลงในพลาสติก ซึ่งได้แก่ เส้นใย[6] [7] หรือผงโลหะ[8] [9] (Metal fibre or metal power) และคาร์บอนแบล็คนำไฟฟ้า (Carbon black)[10] [11] [12] ซึ่งวิธีนี้จะสะดวกในการขึ้นรูปชิ้นงาน และสามารถผลิตชิ้นงานได้ในจำนวนมาก เหมาะกับการผลิตแบบต่อเนื่อง สามารถผลิตเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ง่าย โดยสารตัวเติมนำไฟฟ้าที่นิยมใช้งาน คือ สารตัวเติมในกลุ่มของคาร์บอน (Electrically conductive carbonaceous fillers) สารตัวเติมในกลุ่มนี้มีหลายชนิด แตกต่างกันตามลักษณะของโครงสร้าง (Structure) และรูปแบบโครงสร้าง (Allotropic forms) ปัจจุบันคาร์บอนถูกค้นพบในหลายรูปแบบตามลักษณะของการจัดเรียงตัวของเวเลนต่ออิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ผงคาร์บอนแบล็ค เส้นใยคาร์บอน และท่อนาโนคาร์บอน และในปัจจุบันได้มีการผลิต carbon black masterbatch ซึ่งเป็นการผสมแม่สีผงหรือสารตัวเติมเข้มข้นให้กระจายตัวในเนื้อพลาสติก เพื่อใช้ในการขึ้นรูปพลาสติก โดยข้อได้เปรียบของ carbon black masterbatch คือ สะดวกในการนำมาผสมกับเม็ดพลาสติกอื่นๆ และง่ายต่อการขึ้นรูป ไม่ต้องทำการเตรียมเองโดยใช้ผงคาร์บอนแบล็คผสมกับเม็ดพลาสติก แต่มีราคาที่สูงกว่า เนื่องจากต้องผ่านขั้นตอนในการรีดตัดเป็นเม็ด

ซึ่งโดยปกติพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปสำหรับอุตสาหกรรมดังกล่าว คือ พลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) พลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมดังกล่าว และมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี ซึ่ง ABS เป็นพลาสติกที่สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี ผิวชิ้นงานที่ได้จะสวยงาม เช็ดทำความสะอาดได้ง่าย และมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารเคมีต่างๆ และต้านทานต่อการถูกร่อน เมื่อนำมาผสมกับพลาสติก PC ที่มีคุณสมบัติเด่น คือ ทนทานต่อความร้อนดี ก็จะช่วยเพิ่มคุณสมบัติของพลาสติก ABS นอกจากนั้นการผสม PC กับ ABS เข้าด้วยกันยัง

เป็นการเพิ่มความสามารถในการทนต่อสารเคมีต่างๆ ให้กับพลาสติก PC และช่วยให้สามารถขึ้นรูปพลาสติก PC ได้ง่ายขึ้นด้วย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะเตรียมพอลิเมอร์เชิงประกอบที่มีสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference shielding) และมีสมบัติในการกระจายไฟฟ้าสถิต (Dissipation of electrostatic) จากพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ซึ่ง PC/ABS/CBp, CBm ที่เตรียมได้จะถูกนำไปทดสอบสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัดได้จากค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ซึ่งพิจารณาจากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ของวัสดุ โดยข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุ เพื่อนำไปใช้งานในงานด้านชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และงานบรรจุภัณฑ์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและนำเสนอแนวทางในการวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสติกเชิงประกอบ ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต โดยมีจุดประสงค์และจุดมุ่งหมาย ดังนี้

1. ศึกษาการเพิ่มสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบที่ได้จากพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)
2. ศึกษาคุณสมบัติการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge, ESD) ของพลาสติกเชิงประกอบที่ได้จากพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)
3. ศึกษาผลจากปัจจัยด้านปริมาณของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ PC, ABS และสารตัวเติม ที่มีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic Discharge, ESD)
4. เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และสมบัติในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตระหว่างพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติม คือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) กับคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

1.2 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังต่อไปนี้

1. ศึกษาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ช่วงความถี่ 800-3,000 MHz เนื่องจากเป็นช่วงความถี่ที่ใช้งานในด้านการติดต่อสื่อสาร และมีการใช้งานมากที่สุด โดยเลือกใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณทั้ง 3 ปัจจัยในพลาสติกเชิงประกอบระหว่างพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate, PC) และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) เกรด PC 110 และเกรด PA 707 ตามลำดับ และสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (Carbon black masterbatch, CBm) เกรด PLASBLAK® UN2014 ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนแบล็ค 50%wt และผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) เกรด N220

2. ศึกษาผลทางไฟฟ้า ได้แก่ การลดการประทุของไฟฟ้าสถิต โดยสามารถวัดได้จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว หรือค่าการนำไฟฟ้า

3. ตรวจสอบสัณฐานวิทยาของพลาสติกเชิงประกอบด้วยกล้องอิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM)

4. เปรียบเทียบความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมแตกต่างกัน คือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (Carbon black masterbatch, CBm)

1.3 ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนในการดำเนินการศึกษามีดังนี้

1. ศึกษาความเป็นไปได้ของการเพิ่มคุณสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบ และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต โดยทำการสืบค้นข้อมูล ศึกษาจากหนังสือ รวมทั้งทฤษฎีและบทความงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2. เมื่อทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ของการเพิ่มคุณสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference shielding) และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ของพลาสติกเชิงประกอบแล้ว หลังจากนั้นทำการเลือกกรอบและขอบเขตการศึกษาที่เหมาะสม โดยการวางขอบเขตของการศึกษาในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตจากการเติมคาร์บอนแบล็คทั้งที่เป็นแบบผง และแบบมาสเตอร์แบท ลงไปในพลาสติกเชิงประกอบ ระหว่างพอลิคาร์บอนเนต (Polycarbonate, PC) และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) และตัวแปรที่ใช้ในการศึกษาได้แก่ ปริมาณของปัจจัยเชิงปริมาณทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนของ PC, ABS และสารตัวเติม CB ของน้ำหนักทั้งหมด และเปรียบเทียบความสามารถดังกล่าวระหว่างสารตัวเติมที่เป็นผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (Carbon black masterbatch, CBm) นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว พร้อมทั้งตรวจสอบสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) สำหรับแต่ละอัตราส่วนทดสอบ

3. หลังจากดำเนินการวางขอบเขตงานวิจัยจึงได้ทำการจัดเตรียมเครื่องมือและวัสดุที่ใช้สำหรับทำการทดลอง พร้อมทั้งศึกษาขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานและวิธีการวัดค่าต่างๆ ในการทดลอง

4. ทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูล และนำข้อมูลไปวิเคราะห์ผล

5. สรุปผลที่ได้จากการวิจัยและทดลอง พร้อมทั้งนำเสนอแนะแนวทางอื่นๆ เพื่อใช้สำหรับการปรับปรุงพัฒนางานวิจัยต่อไป

1.4 สมมติฐานของการวิจัย

ณ ปัจจุบันการพัฒนาและวิจัยวัสดุที่นำมาใช้ในการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุที่เป็นของแข็งจำพวกโลหะ เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง อาทิเช่น ทองแดง และโลหะเงิน เป็นต้น ทำให้มีราคาค่อนข้างสูง และยังมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปที่ค่อนข้างยาก ซึ่งหากสามารถประยุกต์ใช้วัสดุจำพวกพอลิเมอร์ที่มีคุณลักษณะเบาและมีความยืดหยุ่นสูงกว่า และราคาค่อนข้างต่ำกว่าโลหะก็จะสามารถช่วยในเรื่องของการลดต้นทุนและเพิ่มทางเลือกในด้านการใช้งานได้ แต่อย่างไรก็ตามวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ยังมีข้อจำกัดในด้านการนำไฟฟ้าที่ต่ำ ซึ่งจะส่งผลต่อการประสิทธิภาพปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ต่ำด้วย ดังนั้นการที่จะทำให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ดี สามารถทำได้โดยการนำวัสดุพอลิเมอร์มาทำการขึ้นรูปร่วมกับสารตัวเติมจำพวกโลหะที่มีสมบัติในด้านการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งในอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์สำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุที่นำมาใช้นอกจากจะต้องมีความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ยังต้องสามารถลดการประทุของไฟฟ้าสถิตได้ด้วย เนื่องจากการประทุของไฟฟ้าสถิตสามารถสร้างความเสียหายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุที่นำมาใช้ในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตจำเป็นต้องมีคุณสมบัติอยู่ระหว่างวัสดุนำไฟฟ้ากับวัสดุที่เป็นฉนวน ดังนั้นชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมในงานวิจัยนี้ น่าจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ทั้งในงานด้านการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference shielding) และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge)

แต่อย่างไรก็ตามการผสมสารตัวเติมที่เป็นสารจำพวกคาร์บอน ในพลาสติกประกอบจะมีข้อจำกัดในการขึ้นรูปชิ้นงานดังกล่าว และมีผลต่อต้นทุนในการผลิต ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณพลาสติกทั้งสองชนิด และปริมาณของสารตัวเติมในพลาสติกเชิงประกอบ นอกจากนั้นยังศึกษาชนิดของสารตัวเติมที่เป็นแบบผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต (Carbon black masterbatch, CBm) ที่มีผลต่อคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เกิดความรู้พื้นฐานในการเพิ่มประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการใช้พลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต (Carbon black masterbatch, CBm) ในการศึกษา และทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการลดลงของการประทุของไฟฟ้าสถิต และนำไปพัฒนางานด้านบรรจุภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

2. สามารถเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคุณสมบัติในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อื่นๆต่อไป

3. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้เพื่อพัฒนาการใช้งานพลาสติกในอุตสาหกรรมต่างๆ

4. เกิดการเชื่อมโยงแนวคิดในงานวิจัยอื่นๆที่เกี่ยวกับพอลิเมอร์เพื่อนำไปพัฒนาเพิ่มองค์ความรู้และก่อให้เกิดประโยชน์ต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลาสติก

พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้แทนวัสดุธรรมชาติ บางชนิดเมื่อเย็นจะแข็งตัว เมื่อถูกความร้อนจะอ่อนตัว บางชนิดก็แข็งตัวถาวร ซึ่งพลาสติกเป็นสารสังเคราะห์มาจากเซลลูโลสซึ่งมีอยู่ในธรรมชาติ เช่น น้ำมันดิบ ยางไม้ เซลลูโลสประกอบด้วยธาตุคาร์บอน ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจนและคลอรีน นำมาสังเคราะห์โดยขบวนการที่เรียกว่า "พอลิเมอไรเซชัน"

บางครั้งพบว่ามีการใช้คำว่า "พลาสติก" และ "พอลิเมอร์" ในความหมายเดียวกันหรือใกล้เคียงกัน แต่คำว่า "พอลิเมอร์" มักหมายถึงวัสดุประเภทพลาสติก ยาง เส้นใยและกาว ส่วนคำว่า

"พลาสติก" จะหมายถึงสารผสมระหว่างพอลิเมอร์และสารเติมแต่ง เช่น สี สารพลาสติกไซเซอร์ สารเพิ่มเสถียรภาพ และฟิลเลอร์ ที่ถูกนำมาใช้งานเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปโดยการขึ้นรูปให้มีรูปร่างต่างๆ เช่น ถัง จาน และช้อน เป็นต้น

หากแปลตามรากศัพท์คำว่า พอลิเมอร์ หรือ polymer มาจากคำกรีก 2 คำ คือคำว่า poly แปลว่ามาก และคำว่า mer แปลว่าหน่วย พอลิเมอร์จึงแปลว่า สารที่ไม่มีเลขกลประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันต่อกันเป็นสายยาวๆ

2.1.1 ความเป็นมาของพลาสติก

ในปี ค.ศ.1868 John Wesley Hyatt ช่างพิมพ์ชาวอเมริกัน ได้ค้นพบพลาสติกชนิดแรกชื่อ เซลลูลอยด์ (Celluloid หรือ Cellulose nitrate) โดยการนำเอาไพโรกซีลีน (Pyroxylin) ซึ่งทำจากฝ้ายกับกรดไนตริกผสมการบูร (Solid camphor) ทำเป็นลูกบิลเลียดแทนการใช้น้ำมัน ซึ่งเกิดขาดแคลนมากในระยะนั้น ขณะเดียวกันที่อังกฤษได้นำไพโรกซีลีนไปทำเป็นแลคเกอร์ และวัสดุเคลือบผิว (Coating materials) อื่นๆ ต่อมาได้มีผู้นำเอาเซลลูลอยด์ดัดแปลงไปใช้ทำหมวกกันน็อก (สกีหมวก) แทนการใช้ยางแข็ง หลังจากนั้นได้นำเอาไปใช้ทำกระจกรถยนต์ในปี ค.ศ.1909 Leo Hendrik Baekeland ได้ค้นพบพลาสติกชื่อ ฟีนอล-ฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde) โดยการผสมฟีนอลกับฟอร์มัลดีไฮด์เข้าด้วยกัน พลาสติกชนิดนี้เรารู้จักกันดีในชื่อ Bakelite ซึ่งใช้ทำด้ามกะทะ หูหม้อและอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่นๆ

สมาคมวิศวกรพลาสติก (SPE) และสมาคมอุตสาหกรรมพลาสติก (SPI) แห่งสหรัฐอเมริกาได้จำกัดความของพลาสติกไว้ดังนี้ "พลาสติกคือวัสดุที่ประกอบด้วยสารหลายอย่างมีน้ำหนักโมเลกุลสูงลักษณะอ่อนตัวขณะทำการผลิต ซึ่งโดยมากใช้กรรมวิธีการผลิตด้วยความร้อนหรือแรงอัดหรือทั้งสองอย่าง"

2.1.2 แหล่งกำเนิดของพลาสติก สามารถแบ่งออกเป็นแหล่งใหญ่ๆ ได้ 5 แหล่ง คือ

2.1.2.1 แหล่งผลิตผลทางเกษตร เช่น เซลลูโลสไนเตรต (Cellulose nitrate) เซลลูโลสอะซิเตต (Cellulose acetate) เซลลูโลสอะซิเตต บรูไทเรท (Cellulose acetate butyrate) เอธิลเซลลูโลส เคซีน (Ethyl cellulose casein)

2.1.2.2 แหล่งผลิตผลทางเกษตรและน้ำมัน

2.1.2.3 แหล่งน้ำมันและถ่านหิน เป็นแหล่งที่ใช้ผลิตพลาสติกชนิดต่าง ๆ ได้มากที่สุด เช่น พอลิสไตรีน (Polystyrene) ฟีนอลฟอร์มัลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde) เมลานิน-พอมัลดีไฮด์

(Melamine formaldehyde) พอลิเอทซีรีน (Polyethylene) ยูเรีย-ฟอมาลดีไฮด์ (Urea-formaldehyde) ไนลอน (Nylon) พอลิเอสเทอร์ (Polyester) อะครีลิก (Acrylic) และอีพอกซี (Epoxy) เป็นต้น

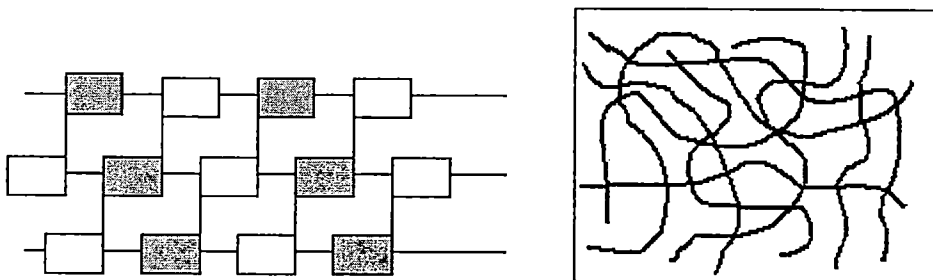
2.1.2.4 แหล่งน้ำมันและสินแร่ เช่น พอลิไวนิลบรูไทราล (Polyvinyl butyral) พอลิไวนิลอะซีเตท (Polyvinylacetate) พอลิไวนิลคาร์บาซอล (Polyvinylcarbazole) พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol) ซิลิโคน (Silicone) พอลิไวนิลอะซีเตทคลอไรด์ (Polyvinyl- acetate - chloride) และพอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride) เป็นต้น

2.1.2.5 สินแร่ เช่น แคลเซียม (Calcium) อลูมิเนียมซิลิเกต (Aluminium silicate)

2.1.3 ประเภทของพลาสติก

2.1.3.1 เมื่อแบ่งตามลักษณะเฉพาะของการแปรรูป หรือพฤติกรรมในกระบวนการแปรรูปเมื่อได้รับความร้อน และลักษณะการยึดเกาะตัวของโครงสร้างโมเลกุล พลาสติกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) หรือเรซิน หรือพลาสติกประเภทคั้นรูป เป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุดในโลก ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัว สามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้ โครงสร้างโมเลกุล ประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวเกาะตัวแบบต่อแขนยาวออกเป็นเส้นด้าย หรือแบบโซ่ตรงยาว (Filament or chain) มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมาก จึงสามารถหลอมเหลว หรือเมื่อผ่านการอัดแรงมากจะไม่ทำลายโครงสร้างเดิม

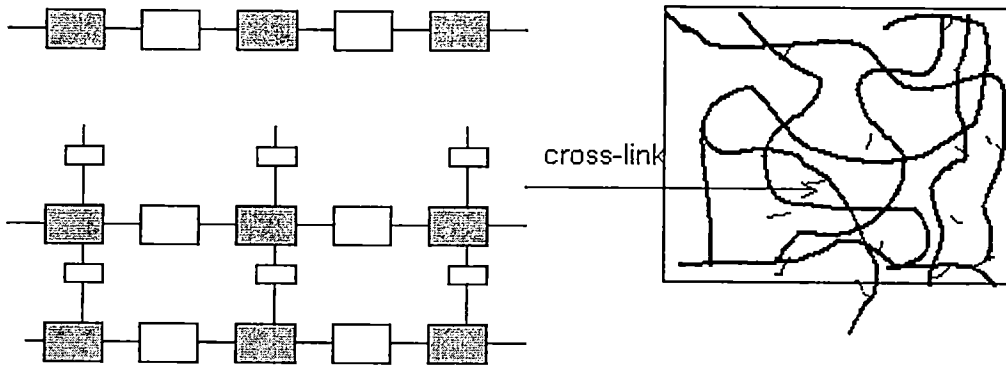


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบลูกโซ่ (Chains molecule)[13]

ตัวอย่างพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก ได้แก่ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) อะคริโลไนไตรน์ บิวตาไดอีน สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) และไนลอน (Nylon) เป็นต้น

สมบัติพิเศษของเทอร์โมพลาสติก คือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้

2. เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting plastic) หรือพลาสติกประเภทคั่งรูป พลาสติกประเภทนี้ โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแห (Net) จับกันแน่น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวใหม่ได้ กล่าวคือ เมื่อได้รับความร้อนจะไม่เกิดการยึดหรือหดตัว แต่จะเกิดการเชื่อมต่อน้ำเชื่อมไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของพอลิเมอร์ (Cross linking among polymer chains) ดังนั้นหลังจากพลาสติกเกิดการเย็นจนแข็งตัวแล้ว จะไม่สามารถทำให้อ่อนตัวได้อีกโดยใช้ความร้อน หากแต่จะสลายตัวทันทีที่อุณหภูมิสูงถึงระดับ การจะทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่างๆ ต้องใช้ความร้อนสูง และโดยมากต้องการแรงอัดด้วย



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแห (Net molecule)[13]

ตัวอย่างเทอร์โมเซตติงพลาสติก ได้แก่ เมลามีน ฟอรัมาลดีไฮด์ (Melamine formaldehyde) ฟีนอล ฟอรัมาลดีไฮด์ (Phenol-formaldehyde) พอลิเอสเตอร์ (Polyester) อีพ็อกซี (Epoxy) และพอลิยูรีเทน (Polyurethane) เป็นต้น

สมบัติพิเศษของเทอร์โมเซตติงพลาสติก คือ ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและทนปฏิกิริยาเคมีได้ดี เกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก คงรูปหลังการผ่านความร้อนหรือแรงดันเพียงครั้งเดียว เมื่อเย็นลงจะแข็งมาก ทนความร้อนและความดัน ไม่อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตกและไหม้เป็นซีเถ้าสีดำ

2.1.3.2 การแบ่งประเภทของเทอร์โมพลาสติก ตามลักษณะการประยุกต์ใช้งาน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิด ดังนี้

1. พลาสติกใช้งานในปริมาณสูง (Commodity thermoplastics) ซึ่งปริมาณการใช้พลาสติกในกลุ่มนี้สูงมาก ประมาณ 80-85% ของปริมาณการใช้งานพลาสติกทั้งหมด โดยใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่จำเป็นต่อชีวิตประจำวันรูปแบบต่างๆ เช่น ถังพลาสติก ก่องและฟิล์มสำหรับบรรจุอาหาร ของเล่นเด็ก ท่อแข็งและอ่อน และขวดบรรจุของเหลวชนิดต่างๆ เช่น ขวดบรรจุน้ำดื่ม น้ำอัดลม ยา และน้ำมันพืช เป็นต้น

พลาสติกชนิดนี้จึงไม่ต้องมีสมบัติเชิงกล (เช่น การทนต่อแรงดึง การทนทานต่อแรงกระแทก) สูงมากนัก

ตัวอย่างของพลาสติกชนิดนี้ คือ พอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) พอลิสไตรีน (Polystyrene, PS) และพอลิโพรไพลีน (Polypropylene, PP) เป็นต้น

2. พลาสติกวิศวกรรม (Engineering thermoplastics) เป็นกลุ่มพลาสติกที่มีสมบัติเชิงกลที่ดี และมีความทนทานที่อุณหภูมิสูง นิยมนำมาใช้แทนชิ้นส่วนโลหะชนิดต่างๆ เช่น เฟือง เกียร์ ตัวรองเพลลา และใช้เป็นส่วนปกปิดภายนอกของเครื่องยนต์ เป็นต้น เกณฑ์ทั่วไปในการพิจารณาว่า พลาสติกใดเป็นพลาสติกวิศวกรรม มีดังนี้

- มีความแข็งและความแข็งแรงสูง ใกล้เคียงกับโลหะ แต่พลาสติกจะมีน้ำหนักเบากว่าโลหะ ดังนั้นเพื่อให้ได้สมบัติในด้านความแข็งและความแข็งแรงที่เหมาะสมกับการใช้งานมักจะทำการเสริมแรง (Reinforcement) พลาสติกด้วยวัสดุอื่นๆ

- มีสมบัติเชิงกลคงที่ในช่วงอุณหภูมิกว้าง โดยเฉพาะที่อุณหภูมิสูง
- มีความเหนียวสูง พอที่จะทนทานต่อแรงกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างการใช้งาน
- มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลงรูปทรง (Dimensional stability) สูง ตลอดช่วงอุณหภูมิและเวลาในการใช้งาน

- มีความสามารถในการทนทานต่อสภาพแวดล้อมในการใช้งาน เช่น สภาวะไอน้ำ

สภาวะที่มีตัวทำละลายหรือสารเคมีต่างๆ ทนทานต่อแสงอัลตราไวโอเลตและออกซิเจน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเลือกใช้ชนิดของพลาสติกวิศวกรรมให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เนื่องจากไม่มีพลาสติกใดที่จะทนต่อทุกสภาวะได้

- แปรรูปได้ง่าย แม้ว่าชิ้นงานจะมีรูปทรงที่ซับซ้อน พลาสติกจะมีข้อได้เปรียบกว่าโลหะ ในการแปรรูปเป็นชิ้นงานที่มีความซับซ้อน ซึ่งสำหรับโลหะ จะต้องมีการขึ้นตอนในการทำหลายขั้นตอน และจะต้องทำหลายชิ้น แล้วนำมาประกอบเป็นชิ้นงานสำเร็จทีหลัง แต่สำหรับพลาสติก สามารถแปรรูปเป็นชิ้นงานสำเร็จได้ในครั้งเดียว โดยการฉีดเข้าแม่แบบ หรือการอัดเข้า เป็นต้น

นอกจากสมบัติของพลาสติกวิศวกรรมที่กล่าวมาแล้วนั้น ยังมีคุณสมบัติอื่นๆ ซึ่งมีการใช้งานเฉพาะทาง เช่น การทนทานต่อการสึกหรอ ทนต่อความล้า มีความลื่นมัน และราคาต้นทุน เป็นต้น

ตัวอย่างพลาสติกที่ใช้ในงานวิศวกรรม เช่น ไนลอน พอลิคาร์บอเนต (PC) พอลิอะซิเตล (POM) และพอลิไทลีนเทอเรพทาเลท (PBT) เป็นต้น

3. พลาสติกใช้งานในสมรรถนะสูง (High Performance Thermoplastics) เป็นกลุ่มที่มีความแข็งแรง และสามารถใช้งานในสภาวะที่มีความรุนแรงกว่าพลาสติกวิศวกรรม เช่น สามารถใช้งานที่อุณหภูมิต่ำมากหรือสูงมาก สภาวะที่มีความเค้นสูง หรือในสภาวะที่มีสารเคมีที่มีฤทธิ์กัดกร่อนรุนแรงมาก เป็นต้น นิยมนำไปใช้กับงานเฉพาะทางที่ต้องการสมบัติเชิงกลที่ดีเยี่ยม ซึ่งพอลิเมอร์ในกลุ่มนี้จะมีราคาแพงมาก ดังนั้นจึงนำไปใช้งานในปริมาณน้อย มักจะใช้งานที่ต้องการสมบัติเฉพาะ

โดยทั่วไปโครงสร้างของพลาสติกสมรรถนะสูง จะมีวงแหวนเบนซีนเป็นส่วนประกอบหลักบนสายโซ่ โมเลกุล หรืออาจจะมีวงแหวนเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ เกิดการเชื่อมโยงหรือเกิดพันธะเคมีกับอะตอมหรือหมู่ฟังก์ชันอื่นๆ การที่โครงสร้างของพลาสติกชนิดนี้มีวงแหวนเบนซีนปริมาณมาก ทำให้มีความแข็งแรงสูง ทนต่อสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงมาก ทนทานต่อการกระแทกสูง ตัดไฟยาก และทนทานต่อตัวทำละลายชนิดต่างๆ

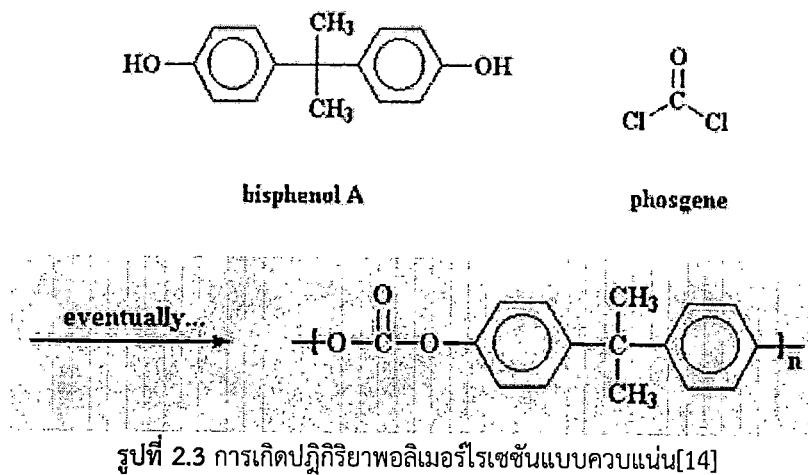
พลาสติกสมรรถนะสูงส่วนใหญ่ มักจะถูกใช้งานในรูปแบบของพอลิเมอร์เชิงประกอบ โดยใช้พลาสติกเป็นเฟสต่อเนื่อง หรือเมทริกซ์ (Matrix) และใช้วัสดุเสริมแรง (Reinforcement) ประเภทที่เป็นเส้นใยชนิดยาว เช่น เส้นใยแก้ว หรือเส้นใยคาร์บอน

ตัวอย่างพลาสติกในกลุ่มนี้ เช่น พอลิอีเทอร์อีเทอร์คีโตน (Polyether ether ketone, PEEK) พอลิอีเทอร์อิมิด (Polyether imide, PEI) และพอลิผลึกเหลว (Liquid crystal polymer, LCP) เป็นต้น

2.1.4 พอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC)

เตรียมจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น โดยโมโนเมอร์ที่นิยมให้กันมากที่สุด ได้แก่ บิสฟีนอล เอ (Bis-phenol A) กับฟอสจีน (Phosgene) ดังรูปที่ 2.3

โครงสร้างของหน่วยซ้ำของพอลิคาร์บอเนตมีความซับซ้อน เนื่องจากการมีหมู่เมทิลอิสระ ส่งผลให้พอลิเมอร์ชนิดนี้เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน มีความใส และเนื่องจากมีวงแหวนเบนซีนอยู่ในโครงสร้างหลักจำนวนมาก และการมีหมู่คาร์บอเนตที่มีสภาพเป็นขั้ว ทำให้ PC มีความแข็งแรง เกือบจะใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ที่มีผลึกสูง เช่น ไนลอน หรืออะซิเตล แต่ PC จะมีความเหนียวสูงกว่าและทนทานต่อการกระแทกสูงกว่า เนื่องจากเมื่อโมเลกุลได้รับแรง จะสามารถยึดตัวตามแรงได้ระดับหนึ่ง เพราะ PC เป็นพอลิเมอร์อสัณฐาน นอกจากนี้อุณหภูมิหลอมเหลว และอุณหภูมิในการใช้งานของ PC จะสูงกว่าของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่กล่าวข้างต้น ซึ่งสามารถใช้งานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 135 °C นอกจากนี้ PC ยังสามารถทนทานต่อการคืบ (Creep resistance) สูง ในช่วงอุณหภูมิกว้าง จึงส่งผลให้ PC มีการคงทนต่อรูปทรงดี



สมบัติเด่นที่สุดของพอลิคาร์บอเนต คือ ความเหนียว ความใส และอุณหภูมิการอ่อนตัวภายใต้แรงกดสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้งาน PC จึงเน้นใช้งานตามคุณสมบัติเด่นดังกล่าวเป็นเกณฑ์

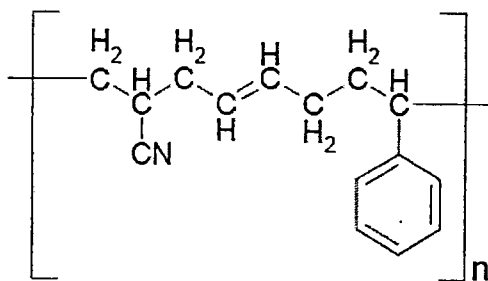
แต่ข้อด้อยของพอลิคาร์บอเนตก็คือ ไม่ทนทานต่อการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสงอัลตราไวโอเล็ต ทำให้เปลี่ยนจากสีใสเป็นสีเหลือง และสูญเสียสมบัติทางกล เกิดรอยขีดข่วนได้ง่าย ซึ่งจะมีผลต่อการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับความใส เช่น ทำกระจกนาฬิกา หรือเลนส์แว่นตา เป็นต้น ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ไขได้โดยการเคลือบวัสดุอื่นที่ทนทานต่อการขีดข่วนมากกว่า PC นอกจากนี้ PC ยังว่องไวต่อตัวทำละลายประเภทอะโรมาติกส์ คลอริเนท และตัวทำละลายที่มีขั้วบางตัว ไม่ทนต่อสารละลายที่เป็นต่างแก ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นรอยแตกเล็กๆ แต่คุณสมบัติที่ PC ว่องไวต่อการละลาย มีข้อดีคือ สามารถเชื่อมหรือต่อชิ้นงานที่เป็น PC โดยการใช้อุณหภูมิที่ละลายในตัวทำละลายชนิดต่างๆได้ดี

ในทางอุตสาหกรรม กระบวนการแปรรูป PC ใช้กระบวนการแปรรูปทั่วๆไปที่ใช้ในการแปรรูปเทอร์โมพลาสติก ซึ่งก็คือ การเอ็กซ์ทรูด การฉีดเข้าเบ้า การทำเทอร์โมฟอร์ม และการเป่า เป็นต้น พอลิคาร์บอเนต มีค่าอุณหภูมิหลอมเหลว, T_m สูง (200-267 °C) จึงทำให้ทำการแปรรูปได้ยาก แต่ พอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่ว่องไวต่อการเสื่อมสภาพ เนื่องจากความร้อน ดังนั้นจึงสามารถเพิ่มอุณหภูมิ เพื่อให้พอลิเมอร์หลอมไหลดีขึ้นได้ แต่ก่อนที่จะทำการแปรรูปต้องทำการอบ ที่อุณหภูมิประมาณ 120°C เป็นเวลาประมาณ 4 ชั่วโมง

การประยุกต์ใช้งาน PC และพอลิเมอร์เบลนด์ มักใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตรถยนต์ (เช่น ทำแถบสะท้อนแสง ไฟหน้า เลนส์ครอบไฟ ฝาครอบล้อ และฝาครอบสัญญาณไฟจราจร เป็นต้น) ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (เช่น ตัวครอบจอคอมพิวเตอร์ และครอบเครื่องถ่ายเอกสาร) และในอุตสาหกรรมอื่นๆ (เช่น ตัวรองรับโซลาร์เซลล์ เลนส์ของหลอดไฟชนิดต่างๆ หมวกกันน็อก และเลนส์แว่นตา เป็นต้น)

2.1.5 อะคริโลไนไตรด์ บิวตะไดอิน สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS)

เอบีเอสจัดเป็นเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ที่มีพื้นฐานวิทยาเป็นอสัณฐาน(Amorphous) มีสูตรโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 สูตรโครงสร้างของเอบีเอส[15]

เอบีเอสได้จากการทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ของมอนอเมอร์ 3 ชนิด คือ สไตรีน (Styrene) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) และบิวตะไดอีน (Butadiene) ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์ 3 ชนิด เรียกว่า เทอร์พอลิเมอร์ (Terpolymer) มอนอเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้เป็นวัตถุดิบสังเคราะห์เอบีเอสชิ้นมานั้นล้วนมีผลต่อสมบัติของพลาสติกทั้งสิ้น อะครีโลไนไตรล์มีผลต่อสมบัติการทนความร้อนและสารเคมี บิวตะไดอีนมีผลต่อสมบัติความทนกระแทก (Impact strength) และสไตรีน มีผลทำให้พลาสติกมีพื้นผิวเป็นเงา ตัดแต่งวัสดุได้ง่าย

เอบีเอสเป็นพลาสติกที่มีความสมดุลทั้งในเรื่องความแข็ง (Hardness) และความเหนียว (Toughness) ทำให้พลาสติกมีสมบัติความต้านทานแรงกระแทกดี นอกจากนี้เอบีเอสยังมีสมบัติเด่นอีกหลายด้าน เช่น ทนต่อแรงเสียดสี (Abrasion) คงสภาพรูปร่างได้ดี (Dimension stability) ทนความร้อน มีช่วงอุณหภูมิใช้งานกว้าง และสามารถขึ้นรูปได้หลายวิธี และเนื่องจากเป็นเทอร์โมพลาสติกจึงนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การเตรียมที่นิยมใช้ในทางอุตสาหกรรมมี 2 วิธี คือ

(1) แบบผสม (Blending) โดยนำเอาสไตรีน-อะครีโลไนไตรล์โคพอลิเมอร์ กับยางอะครีโลไนไตรล์-บิวตะไดอีน มาผสมกัน

(2) แบบต่อกิ่ง (Grafting) ดิกว่าวิธีการแรก ทำโดยเอาอะครีโลไนไตรล์ และสไตรีนมา พอลิเมอร์ในพอลิบิวตะไดอีนลาเท็กซ์ ใช้อุณหภูมิประมาณ 50°C ผลผลิตจะให้เป็นของแข็งเม็ดเล็กๆ แยกออกมาได้ง่าย โครงสร้างจะเป็นแบบกิ่ง ถ้าปริมาณบิวตะไดอีนมาก จะเพิ่มความต้านทานแรงกระแทก ถ้ามีอะครีโลไนไตรล์มากจะเพิ่มความทนทานต่อสารเคมี ความทนต่อแรงดึงมากขึ้น ทนต่อการดองและด่างอ่อนได้ดี ละลายในสารประกอบพวกแอลกอฮอล์ คีโตน เอสเทอร์ ไม่ละลายในแอลกอฮอล์ สามารถชุบเคลือบผิวโลหะได้ จึงนิยมใช้ทำปุ่มหมุนวิทยุ โทรทัศน์ ใช้ทำหมวกกันน็อค ชิ้นส่วนพัดลม เครื่องดูดฝุ่น แผงเครื่องปรับอากาศ ส่วนประกอบตู้เย็น และอื่นๆ เป็นต้น เนื่องจาก สไตรีน-อะครีโลไนไตรล์ มีลักษณะแข็งเปราะจึงปรับปรุงให้มีความแข็งแรงต่อแรงกระแทกให้ดีขึ้น ครั้งแรกได้มีการเพิ่มยางไนไตรล์เข้าไป ต่อมาได้มีการใช้อีลาสโตเมอร์ เพิ่มลงไปโคพอลิเมอร์ จากนั้นจึงปรับปรุงโดยใช้พอลิเมอร์แบบกิ่ง หรือโคพอลิเมอร์ ในอีลาสโตเมอร์จนได้เป็นเอบีเอส

ค่าความทนต่อความร้อนจะขึ้นอยู่กับปริมาณยางในโคพอลิเมอร์ นั่นคือปริมาณยางน้อยค่าความทนต่อความร้อนจะเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความต้านทานแรงกระแทกจะลดลง นอกจากนี้ยังทำให้มีความแข็งตึง (Stiffness) เพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูงๆ ด้วย โดยทั่วไปมักผสมแอลฟา-เมทิล สไตรีน (α -Methylstyrene) ในเมทริกซ์เพื่อเพิ่มค่าอุณหภูมิสภาพคล้ายแก้ว (Glass transition temperature, T_g)

สมบัติเด่นของ ABS คือ สามารถทนแรงกระแทกได้ดี มีความแข็งแรงดี และง่ายต่อการขึ้นรูป ซึ่งพลาสติก ABS ประกอบด้วยพอลิเมอร์สามประเภทคือ

1) อะครีโลไนไตรล์ (Acrylonitrile) ประมาณ 15-35 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีหน้าที่ให้ความทนทานต่อความร้อนและสารเคมีและให้ความเหนียว

2) บิวตาไดอีน (Butadiene) ประมาณ 5-30 เปอร์เซ็นต์ มีหน้าที่ให้ความทนทานต่อแรงกระแทก แต่มีความเสถียรต่ำ

3) สไตรีน (Styrene) ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ มีหน้าที่ให้ความแข็ง และทำให้ผิวชิ้นงานเป็นมัน

นอกจากนี้ยังสามารถนำ ABS ไปผสมกับยางสังเคราะห์บิวตาไดอีนเพื่อเพิ่มความทนทานต่อแรงกระแทก แต่ความแข็งแรงและความทนต่อความร้อนลดลง ใช้ทำพวกท่อ ส่วนประกอบรถยนต์เครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น ที่บูประตุตู้เย็น เครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ เครื่องคิดเลข อุปกรณ์กันการรบกวนของแม่เหล็กไฟฟ้าและความถี่วิทยุ เป็นต้น

2.1.6 สารเติมแต่งสำหรับพลาสติก

การผสมพอลิเมอร์ต่างชนิดกันเข้าด้วยกัน เรียกว่า พอลิเมอร์เบลนด์หรืออัลลอยด์ (Polymer blend หรือ Polymer alloys) ส่วนการผสมพอลิเมอร์กับวัสดุชนิดอื่นๆ เรียกว่า พอลิ-เมอร์เชิงประกอบ (Composite polymer) ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาสารเติมแต่ง (Additives) ชนิดต่างๆเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในอุตสาหกรรมการผลิตเม็ดพลาสติก และการแปรรูปพลาสติกมีการใช้สารเติมแต่ง เพื่อพัฒนาคุณสมบัติของพลาสติกให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานในสภาวะต่างๆ

สารเติมแต่ง คือ สารเคมีที่เติมหรือผสมในพอลิเมอร์ เพื่อปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกล สมบัติเชิงฟิสิกส์ และสมบัติเชิงเคมี ให้เหมาะสมกับรูปแบบการใช้งานมากยิ่งขึ้น โดยสารเติมแต่งที่ผสมลงไปจะทำหน้าที่ปกป้องพอลิเมอร์จากการเสื่อมสภาพ เนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น แสง ความร้อนจากแบคทีเรีย นอกจากนั้นยังมีสมบัติอื่นๆ ที่สามารถปรับปรุงได้จากการเติมสารเติมแต่ง ก็คือ ความหนาแน่น ความทนทานต่อการติดไฟ ลดการขยายตัวเนื่องจากความร้อน ทำให้พอลิเมอร์มีคุณสมบัติเฉพาะ เช่น ถูกย่อยสลายได้โดยชีวภาพ (Biodegradability) หรือเพิ่มคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) และเพิ่มการทนไฟ เป็นต้น

2.1.7 สารเติมแต่งที่เป็นสี (Colourant) สำหรับพลาสติก

เป็นสารเติมแต่งที่ผสมลงในพลาสติก เพื่อทำให้เกิดความสวยงาม และช่วยป้องกันการเสื่อมสภาพเนื่องจากแสง นอกจากนี้สีบางชนิดยังมีส่วนช่วยให้เทอร์โมพลาสติกบางชนิดเกิดผลึกได้ดียิ่งขึ้น สามารถแบ่งชนิดของสีตามความสามารถในการละลายได้ 2 ชนิด คือ

2.1.7.1 สีผง (Pigment)

เป็นสีที่ไม่ละลายในพลาสติก แต่จะกระจายตัว (Disperse) เป็นอนุภาคเล็กๆ สีผงสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังนี้

- สีผงอนินทรีย์ (Inorganic pigment) ให้สีที่ค่อนข้างทึบ เช่น ทิทาเนียมไดออกไซด์ ซิงค์-ซัลไฟด์ (ให้สีขาว) ออกไซด์ของเหล็ก (ให้สีแดง เหลือง น้ำตาล หรือดำ) โครเมียมออกไซด์ (ให้สีเขียว) เป็นต้น

- สีผงอินทรีย์ (Organic pigment) มีสีใสสว่าง และมีหลากหลาย แต่มีข้อเสียคือ สามารถกระจายตัวในเรซินได้ยาก มักจะเกิดการจับตัวเป็นก้อน ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการสูญเสียสมบัติทางกล ตัวอย่างสีผงอินทรีย์ คือ สีเหลือง ได้จาก Isoindolinone, monoazo pigment สีม่วง ได้จาก Quinacridones สีเขียวหรือสีน้ำเงิน ได้จาก Cu-Phthalocyanide เป็นต้น

2.1.7.2 สีย้อม (Dyes)

เป็นสีที่ละลายในพลาสติกได้ เป็นสารประกอบอินทรีย์ (Organic-based colourants) ให้ความโปร่งใสมากกว่าสีผง เช่น สารประกอบในกลุ่ม Azo, Perinone, Quinoline และ Anthraquinone

2.1.8 การผสมและการคอมปาวด์พลาสติก

โดยทั่วไปสามารถแบ่งวิธีการผสมสารเติมแต่งกับพลาสติก ออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1.8.1 กระบวนการผสม (Mixing)

เป็นการผสมให้สารเติมแต่งกระจายตัวในพลาสติก โดยไม่ทำให้พลาสติกรับแรงเฉือนมากนัก ส่วนใหญ่มักจะเป็นการผสมของแข็งหลายชนิดเข้าด้วยกัน เครื่องผสมมีลักษณะเป็นแบบแบช (Batch mixer) ซึ่งทำให้อุณหภูมิเกิดการเคลื่อนที่และคลุกเคล้ากันระหว่างผสม กระบวนการผสมสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. การผสมแบบเย็น (Cold mixing)

เป็นการผสมที่อุณหภูมิห้อง มักจะใช้ผสมพลาสติกกับสารเติมแต่งที่มีขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน ตัวอย่างของเครื่องผสมชนิดนี้ เช่น เครื่องผสมแบบถังหมุน (Drum tumbler) เครื่องผสมแบบกรวยที่มีสกรูภายใน (Conical screw mixer) เป็นต้น

2. การผสมแบบร้อน (Hot mixing)

เป็นการผสมที่มีการให้ความร้อนกับวัสดุขณะผสม สารเติมแต่งบางชนิดอาจจะเกิดการหลอม แล้วกระจายตัวเข้ากับพลาสติก ซึ่งยังคงมีสถานะเป็นของแข็ง ตัวอย่างเครื่องผสมชนิดนี้ คือ เครื่องผสมเทอร์บูแลนต์ (Turbulent mixer)

2.1.8.2 กระบวนการคอมปาวด์ (Compounding)

เป็นวิธีการผสมสารเติมแต่งชนิดต่างๆ กับพลาสติก โดยการหลอมพลาสติกและทำการนวดผสมองค์ประกอบต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งเทคนิคการคอมปาวด์สามารถแบ่งออกเป็น 2 เทคนิค คือ

1. การคอมปาวด์แบบแบช (Batch compounding)

เป็นการผสมพลาสติกกับสารเติมแต่ง โดยการใช้เครื่องผสมหลัก 2 ชนิด คือ เครื่องผสมแบบสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) ซึ่งใช้ลูกกลิ้งที่ทำจากเหล็กหล่อที่มีการเคลือบผิวให้แข็งและสั่นในการหมุนเพื่อหลอมละลายพลาสติกกับสารเติมแต่งเข้าด้วยกัน และเครื่องผสมแบบปิด (Internal mixer) อาศัยการหมุนของโรเตอร์ (Rotor) เพื่อผสมสารเติมแต่งกับพลาสติกเข้าด้วยกัน ซึ่งลักษณะผิวของโรเตอร์จะไม่ราบเรียบเหมือนผิวของลูกกลิ้ง ทำให้ขณะหมุน เกิดแรงเฉือนภายในของผสมสูงกว่า ส่งผลให้สารเติมแต่งเกิดการกระจายตัวในพลาสติกดีกว่า และใช้เวลาในการผสมน้อยกว่า

2. การคอมปาวด์แบบต่อเนื่อง (Continuous compounding)

เป็นการคอมปาวด์พลาสติกโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูด ซึ่งเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในการคอมปาวด์พลาสติกมีอยู่ 3 ชนิด คือ เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยว (Single screw extruder) เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูคู่ (Twin Screw Extruder) และเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบหลายสกรู (Multi screw extruder) โดยทั่วไปในการคอมปาวด์พลาสติกจะใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูคู่เป็นหลัก แต่ในบางกรณีที่ไม่ต้องการความพิถีพิถันในการคอมปาวด์มากนัก ก็สามารถใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวได้ ส่วนเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบหลายสกรู นิยมใช้กับการคอมปาวด์พลาสติกในกรณีพิเศษเท่านั้น

2.1.9 กระบวนการแปรรูปพลาสติก (Plastic processing)

กระบวนการแปรรูปพลาสติกมีด้วยกันหลายชนิด เช่นในงานวิจัยของ คุณาลยา และคณะ [1] Tzeng and Chang[7] Mohammed H. and Uttandaraman [10] ใช้กระบวนการอัดขึ้นรูป (Compression molding) ในการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ และ Alexandar Chandra, et.al.[16] ศึกษาค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป

พลาสติกที่มีผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบ PC/CNT พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นรูปสูง และความเร็วในการฉีดต่ำ จะให้ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุที่มีค่าสูง ซึ่งกระบวนการแปรรูปพลาสติกสำหรับงานวิจัยนี้ คือ การฉีดขึ้นรูป (Injection moulding)

2.1.9.1 การฉีดขึ้นรูปพลาสติก (Injection moulding)

การแปรรูปพลาสติกโดยวิธีการฉีดนั้น จะทำจากสารพลาสติกที่เป็นเม็ดหรือเป็นผง ซึ่งอาจจะเป็นเทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตติงหรืออีลาสโตเมอร์ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของเครื่องฉีดที่จะดัดแปลงให้เหมาะสมกับพลาสติกชนิดต่างๆ สำหรับเทอร์โมพลาสติกนั้นเมื่อได้รับความร้อนจะอ่อนตัวและเหลวสามารถนำไปแปรรูปได้หลายครั้ง ตามท้องตลาดจะมีทั้งเป็นสีธรรมชาติของพลาสติกเองและแบบผสมสี พร้อมทั้งเติมสารผสมหรือสารนำร่องที่แตกต่างกันก็อยู่ที่โครงสร้างของพลาสติกนั่นเองส่วนเทอร์โมเซตติง เมื่อได้รับความร้อนแล้วจะแข็งตัวละไม่สามารถนำไปหลอมให้เหลวได้อีกและราคาเครื่องฉีดชนิดนี้ราคาจะสูงกว่าเครื่องฉีดแบบเทอร์โมพลาสติก

2.1.9.2 การทำงานของเครื่องฉีดพลาสติก

ดังรูปที่ 2.5 ในช่วงแรกเม็ดหรือผงพลาสติกที่อยู่ในกรวยเติมจะถูกเกลี่ยวนหมุนส่งไปยังด้านหน้าของกระบอกสูบ ซึ่งมีแผ่นความร้อนหรือน้ำมันร้อนหุ้มอยู่ จึงทำให้พลาสติกเกิดการหลอมเหลว จากนั้นจะเคลื่อนที่เกลี่ยวนอนให้ดันพลาสติกเหลวผ่านหัวฉีดเข้าสู่แม่พิมพ์ซึ่งเปิดอยู่

แม่พิมพ์จะมีระบบหล่อเย็นทำให้ชิ้นงานเย็นและแข็งตัว และเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงานออก ซึ่งในขณะที่พลาสติกเหลวเริ่มมีการแข็งตัวก่อนเปิดแม่พิมพ์จะมีการหมุนเกลี่ยวนอนพร้อมกับถอยหลังเพื่อทำการหลอมพลาสติกไว้สำหรับงานฉีดในครั้งต่อไป

2.1.9.3 ระยะเวลาในการฉีดพลาสติกต่อวัฏจักร

1. ช่วงเวลาฉีด (t_c) เริ่มที่ช่วงเกลี่ยวนอนทำหน้าที่เป็นลูกสูบ เริ่มอัดพลาสติกเข้าแม่พิมพ์จนถึงระยะสุดด้านหน้า

2. ช่วงเวลาการอัดย้า (t_h) เป็นการใส่ความดันอัดย้า (Holding pressure) พลาสติกเหลวที่ฉีดเข้าไปในแม่พิมพ์เอาไว้เพื่อไม่ให้พลาสติกเหลวไหลย้อนกลับออกจากแบบ และเพื่อดันอัดเนื้อพลาสติกไว้ให้เข้าไปซัดเซยใน ส่วนที่เกิดการหดตัว ขณะที่พลาสติกเหลวเย็นตัว จนกว่าพลาสติกเหลวจะแข็งตัว

ในช่วงที่ดันเนื้อพลาสติกเหลวให้เข้าไปตั้งแต่เริ่มต้นจนเต็มเบ้าพอดี้ เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงการเติมเบ้าแบบ (Filling phase) และหลังจากนั้นความดันจะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นการอัดเนื้อพลาสติกเข้าไปในเบ้าแบบได้อีกประมาณ 15% เรียกช่วงนี้ว่า ช่วงเพิ่มความดัน และหลังจากนี้จะเป็นการอัดย้าเพื่อชดเชยการหดตัวของเนื้อพลาสติก ซึ่งจะ เป็นช่วงที่มีเนื้อพลาสติกถูกอัดเข้าไปอีกประมาณ 25%

3. ช่วงเวลาหลอมพลาสติก เมื่อพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์แข็งตัวแล้วก็จะลดความดันในกระบอกและแม่พิมพ์ลง และในช่วงนี้จะเกิดการหลอมพลาสติกขึ้น โดยการหมุนเกลี่ยวนอนพร้อมทั้งถอยหลังให้พลาสติก หลอมเหลวไปรวมตัวอยู่ด้านหน้าของเกลี่ยวนอน

4. ช่วงเวลาถอยชุดฉีดกลับ เพื่อให้เกิดความสะดวกในการปลดชิ้นงานและการตัดชิ้นงานออก รวมทั้ง ยังเป็นการป้องกันผลกระทบจากการสั่นสะเทือนในจังหวะเปิด-ปิดแม่พิมพ์ จึงจำเป็นต้องถอยหัวฉีดหรือชุดฉีดทั้งชุดให้ออกห่างจากแม่พิมพ์

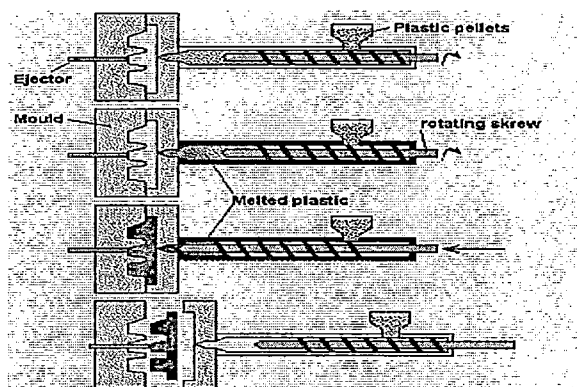
5. ช่วงเวลาเปิดแม่พิมพ์ จะเริ่มทันทีที่มีการถอยหัวฉีดให้ออกห่างจากแม่พิมพ์

6. ช่วงเวลาปลดชิ้นงาน เป็นการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เมื่อแม่พิมพ์เปิดออก โดยใช้ระบบกลไกต่างๆผลักดันให้ชิ้นงานหลุดออกมาจากแม่พิมพ์ ในช่วงนี้ควรใช้เวลาให้น้อยที่สุด

7. ช่วงเวลาปิดแม่พิมพ์ เมื่อทำการปลดชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้ว แม่พิมพ์จะเคลื่อนที่มาประกบกันเพื่อรอจังหวะฉีดต่อไป

8. ช่วงเวลาเดินหัวฉีดเข้า เมื่อแม่พิมพ์ปิดสนิทแล้ว จะเดินหัวฉีดเข้าหาแม่พิมพ์ เพื่อเริ่มการฉีดในจังหวะต่อไปได้ทันที

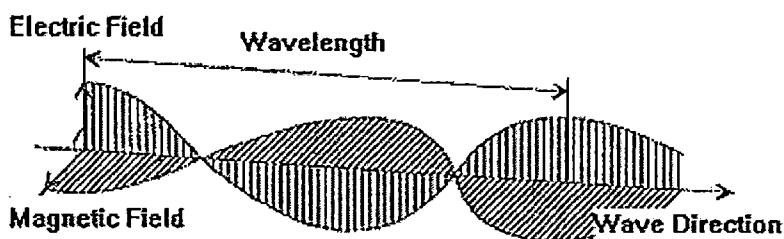
9. ช่วงเวลาหล่อเย็น (t_c) โดยปกติแล้วแม่พิมพ์จะมีการหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลา เพื่อรักษาอุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้คงที่ ทันทีที่พลาสติกเหลววิ่งเข้าแม่พิมพ์ การระบายความร้อนออกจากพลาสติกจะเริ่มขึ้น และจะสิ้นสุดเมื่อพลาสติกคงตัวแล้ว พร้อมทั้งจะเปิดแม่พิมพ์เพื่อปลดชิ้นงานออก



รูปที่ 2.5 กระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก[17]

2.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) เกิดจากการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic disturbance) โดยการทำให้สนามไฟฟ้า หรือสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อสนามไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก หรือถ้าสนามแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลงก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวางที่มีทิศทางการแผ่ตั้งฉากกับสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก แสดงดังรูปที่ 2.6 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่มีอาศัยตัวกลาง จึงสามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้

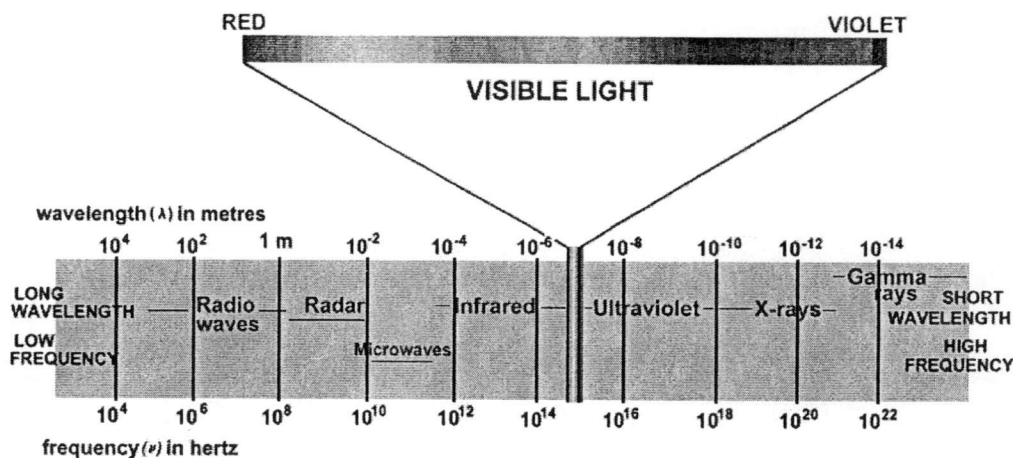


รูปที่ 2.6 ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[18]

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกปล่อยออกมาจะถูกดูดกลืนได้โดยสสาร นอกจากนั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังสามารถเกิดการแทรกสอด สะท้อน หักเหต และเลี้ยวเบนได้เหมือนกับคลื่นทั่วไป

2.2.1 สเปกตรัม (Spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงความถี่ของคลื่นกว้างมาก นอกจากนั้นยังมีความถี่ และความยาวคลื่นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีการแบ่งแยกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกเป็นความถี่ หรือความยาวคลื่นต่างๆ ซึ่งเรียกว่าสเปกตรัม (Spectrum) ได้แก่ คลื่นแสงที่ตามองเห็น, อัลตราไวโอเล็ต, อินฟราเรด, คลื่นวิทยุ, คลื่นโทรทัศน์, คลื่นไมโครเวฟ, รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[19]

แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงมีประโยชน์มากมายในหลายๆด้าน เช่น การสื่อสาร การโทรคมนาคม เครื่องเรดาร์สำหรับตรวจหาระยะหรือตำแหน่งของวัตถุด้วยคลื่นจุลภาค และทางการแพทย์ เป็นต้น

การจำแนกสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.2.1.1 คลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง $10^4 - 10^9$ Hz ใช้ประโยชน์ในด้านการสื่อสาร คลื่นวิทยุมีการส่งสัญญาณ 2 ระบบคือ

1. ระบบเอเอ็ม (A.M. = Amplitude modulation)

ระบบเอเอ็ม มีความถี่อยู่ในช่วง 530 - 1600 kHz สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้าไปกับคลื่นวิทยุเรียกว่า "คลื่นพาหะ" โดยแอมพลิจูดของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียง ในการส่งคลื่นระบบ A.M. นอกจากจะใช้ความถี่ขนาด 530-1600 kHz แล้ว ยังมีช่วงความถี่ต่ำกว่านี้เรียกว่า คลื่นยาว และที่มีความถี่สูงกว่านี้เรียกว่า คลื่นสั้น โดยการส่งคลื่นสามารถส่งคลื่นได้ทั้งคลื่นดินเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับผิวโลกและคลื่นฟ้าโดยคลื่นจะไปสะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แล้วสะท้อนกลับลงมา จึงไม่ต้องใช้สายอากาศตั้งสูงรับ

2. ระบบเอฟเอ็ม (F.M. = Frequency modulation)

ระบบเอฟเอ็ม มีความถี่อยู่ในช่วง 88 - 108 MHz สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นพาหะ โดยความถี่ของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียงในการส่งคลื่นระบบ F.M. ส่งคลื่นได้เฉพาะคลื่นดินอย่างเดียว ถ้าต้องการส่งให้คลุมพื้นที่ต้องมีสถานีถ่ายทอดและเครื่องรับต้องตั้งเสาอากาศสูงๆ รับ

2.2.1.2 คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ

คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง $10^8 - 10^{12}$ Hz มีประโยชน์ในการสื่อสาร แต่จะไม่สะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่จะทะลุผ่านชั้นบรรยากาศไปนอกโลก ในการถ่ายทอดสัญญาณโทรทัศน์จะต้องมีสถานีถ่ายทอดเป็นระยะ ๆ เพราะสัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรง และผิวโลกมีความโค้ง ดังนั้นสัญญาณจึงไปได้ไกลสุดเพียงประมาณ 80 กิโลเมตรบนผิวโลก อาจใช้คลื่นไมโครเวฟนำสัญญาณจากสถานีส่งไปยังดาวเทียม แล้วให้ดาวเทียมนำสัญญาณส่งต่อไปยังสถานีรับที่อยู่ไกลๆ เนื่องจากไมโครเวฟจะสะท้อนกับผิวโลหะได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจหาตำแหน่งของอากาศยาน เรียกอุปกรณ์ดังกล่าวว่า เรดาร์ โดยส่งสัญญาณไมโครเวฟออกไปกระทบอากาศยาน และรับคลื่นที่สะท้อนกลับจากอากาศยาน ทำให้ทราบระยะห่างระหว่างอากาศยานกับแหล่งส่งสัญญาณไมโครเวฟได้ โดยหลักการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับเรดาร์จะอาศัยการรับส่งคลื่นที่ไปกระทบวัตถุ เพื่อตรวจหาระยะตำแหน่งของวัตถุนั้น

2.2.1.3 รังสีอินฟราเรด (Infrared rays)

รังสีอินฟราเรดจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงความถี่ $10^{11} - 10^{14}$ Hz หรือความยาวคลื่นตั้งแต่ $10^{-3} - 10^6$ เมตร ซึ่งมีช่วงความถี่คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟ วัตถุร้อนจะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความถี่คลื่นสั้นกว่า 10^4 เมตร ออกมา โดยที่มนุษย์มีประสาทสัมผัสสามารถรับรังสีอินฟราเรดได้ รังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านเมฆหรือหมอกหนาเกินกว่าแสงธรรมดาส่งสามารถผ่านได้ ดังนั้นจึงนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านภาพถ่ายทางดาวเทียม ใช้เป็นการควบคุมระยะไกล หรือรีโมทคอนโทรลกับเครื่องรับโทรทัศน์ได้

2.2.1.4 แสง (Light)

แสงมีช่วงความถี่ 10^{15} Hz หรือความยาวคลื่น $4 \times 10^{-7} - 7 \times 10^{-7}$ เมตร เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ประสาทตาของมนุษย์รับได้ จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดเดียวกับคลื่นวิทยุ ซึ่งอาจสามารถใช้เป็นคลื่นเพื่อการสื่อสารได้แต่ข้อจำกัดของแสงคือ แสงที่เกิดจากวัตถุร้อนเป็นคลื่นพาหะ เพราะแสงเหล่านี้มีความถี่และเฟสของคลื่นที่ไม่แน่นอน ซึ่งปัจจุบันมีเครื่องกำเนิดเลเซอร์เป็นต้นกำเนิดอาพันธ์ที่ให้แสงโดยไม่อาศัยความร้อน โดยได้มีการนำเลเซอร์ไปประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การใช้เป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ การผ่าตัดต้อตา ในวงการแพทย์ เป็นต้น

2.2.1.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet rays)

รังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือ รังสีเหนือม่วง จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง $10^{15} - 10^{18}$ Hz เป็นรังสีตามธรรมชาติส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ ซึ่งรังสีอัลตราไวโอเล็ตเป็นตัวทำให้เกิดประจุอิสระและไอออนในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ รังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถเดินทางผ่านสิ่งกีดขวางที่มีขนาดหนาๆ ได้ ในวงการแพทย์ได้นำรังสีอัลตราไวโอเล็ตไปใช้ในการรักษาโรค เพราะสามารถทำให้เชื้อโรคบางชนิดตายได้ แต่รังสีอัลตราไวโอเล็ตมีอันตรายต่อผิวหนังและตาคน หากได้รับเวลานานๆ ซึ่งดวงอาทิตย์มีการแผ่คลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตปริมาณมากแต่ด้วยชั้นบรรยากาศของโลกดูดกลืนคลื่นรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้บางส่วน ปริมาณที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่สามารถทะลุผ่านมายังโลกได้จึงมีปริมาณที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2.2.1.6 รังสีเอกซ์ (X-rays)

รังสีเอกซ์ จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วง $10^{16} - 10^{22}$ Hz มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $10^{-8} - 10^{-13}$ เมตร ซึ่งสามารถทะลุสิ่งกีดขวางหนา ๆ ได้ หลักการสร้างรังสีเอกซ์คือ การเปลี่ยนความเร็วของอิเล็กตรอน มีการนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในทางการแพทย์ รังสีเอกซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพเพื่อตรวจดูความผิดปกติของอวัยวะภายในร่างกายในทางอุตสาหกรรมใช้ในการตรวจหารอยร้าวภายในชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่ เป็นต้น

2.2.1.7 รังสีแกมมา (Gamma ray)

รังสีแกมมามีช่วงความยาวคลื่นสั้นกว่ารังสีเอกซ์ (X-ray) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-13} ถึง 10^{-17} หรือคลื่นที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 10^{-13} การที่ความยาวคลื่นสั้นหมายถึงความถี่ที่สูง และพลังงาน

ก็จะสูงตามไปด้วย มีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้าเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์และสามารถกระตุ้นปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ มีอำนาจทะลุทะลวงสูง โดยในปัจจุบันถึงแม้ว่ารังสีแกมมาจะไม่เป็นที่รู้จักและใช้งานอย่างแพร่หลายทั่วไป แต่ด้วยคุณสมบัติพิเศษในเรื่องของพลังงานที่สูงกว่าคลื่นชนิดอื่นๆ จึงได้มีการนำไปใช้ประโยชน์ในทางเฉพาะเช่น ทางด้านพันธุกรรม หรือด้านการถนอมอาหาร เป็นต้น

2.2.2 คลื่น (Wave)

คือ ลักษณะของการถูกรบกวน ที่มีการแผ่กระจาย เคลื่อนที่ออกไป ในลักษณะของการ กว้างแวง หรือ กระเพื่อม และมักจะมีการส่งถ่ายพลังงานไปด้วย

ชนิดของคลื่น ซึ่งจำแนกตามลักษณะการอาศัยตัวกลาง

- คลื่นกล (Mechanical wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยอาศัยตัวกลาง ซึ่งอาจจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ตัวอย่างคลื่นกลได้แก่ คลื่นเสียง คลื่นที่ผิวหน้า เป็นต้น
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง สามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ เช่น คลื่นแสง คลื่นวิทยุและโทรทัศน์ รังสีแกมมา เป็นต้น

2.2.2.1 สมบัติของคลื่น

คลื่นจะแพร่เป็นเส้นตรง (Rectilinear propagation) เมื่อผ่านตัวกลางที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่ถ้าเกิดการเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกัน อาจส่งผลให้ความเร็วของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หรือคลื่นอาจไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีกจากตรงรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง ซึ่งถ้าคลื่นไม่ดูดกลืน (Absorb) ด้วยตัวกลางดังกล่าวจนหมด คลื่นก็อาจจะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยสมบัติที่แตกต่างไปจากเดิมอย่างน้อย 3 ลักษณะ ซึ่งแต่ละลักษณะ มีดังนี้

1. การสะท้อนของคลื่น (Reflection)

เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังรอยต่อของอีกตัวกลางหนึ่ง และคลื่นดังกล่าวเกิดการเคลื่อนที่ย้อนกลับมาในตัวกลางเดิม ซึ่งทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นจะเปลี่ยนไปตามแนวของคลื่นสะท้อน สำหรับคลื่นที่สะท้อนจากรอยต่อของตัวกลางที่เรียบ คลื่นที่สะท้อนกลับมามีลักษณะเป็นระเบียบ แต่ถ้าสะท้อนจากรอยต่อตัวกลางที่ไม่เรียบ คลื่นจะมีลักษณะการสะท้อนที่ไม่เป็นระเบียบ

2. การหักเห (Refraction)

เป็นปรากฏการณ์ที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางเข้าไปในตัวกลางใหม่ คลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างไปจากเดิม และมีทิศทางการเคลื่อนที่เปลี่ยนไป การที่คลื่นเกิดการหักเหขึ้น เนื่องจากความเร็วของคลื่นในตัวกลางทั้งสองไม่เท่ากัน ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย คลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วช้ากว่าในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก

3. การแพร่กระจายคลื่น (Diffraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเล็กๆ บนฉากกัน ลักษณะของคลื่นจะไม่คมชัดเจน และจะมีบางส่วนของคลื่นจะโค้งผ่านสันหรือขอบของช่อง

4. การแทรกสอด (Interference)

เกิดจากการซ้อนทับกันของคลื่น เมื่อคลื่นวิ่งมาต่อกัน

2.2.3 การรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference, EMI)

เทคโนโลยีด้านอิเล็กทรอนิกส์ จัดเป็นเทคโนโลยีที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทั้งในระบบสื่อสาร คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์และระบบควบคุม อย่างไรก็ตามการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้มีความไว (Susceptibility) และอาจมีการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference, EMI) จากแหล่งภายนอก เป็นผลให้อุปกรณ์ และระบบอิเล็กทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด และอาจส่งผลให้เกิดความเสียหาย ตั้งแต่เพียงเล็กน้อยจนถึงมูลค่ามหาศาล นอกจากนี้ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยังมีการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถรบกวนการทำงานของอุปกรณ์และระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ใกล้เคียงอีกด้วย

ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility, EMC) คือ ความสามารถของผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถทำงานได้ โดยไม่ก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า และในขณะเดียวกันก็ต้องทนต่อการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งภายนอก และไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานด้อยลง ในปัจจุบันปัญหาการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference, EMI) เกิดขึ้นอย่างมาก เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของจำนวนของอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ และมีการแบ่งปันย่านความถี่มากขึ้น โดยมีการใช้งานครอบคลุมเกือบทุกความถี่ เช่น ความถี่วิทยุ โทรทัศน์ ดาวเทียม การทหาร และอื่นๆ นอกจากนี้ ปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก และซับซ้อนมากยิ่งขึ้นส่งผลให้ปัญหาการรบกวนมีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์ของปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น ปัญหาการรบกวนของคลื่นโทรศัพท์มือถือต่อหน้าจอคอมพิวเตอร์ หรือการรบกวนของคอมพิวเตอร์ต่อโทรทัศน์ ซึ่งสังเกตได้จากการเกิดคลื่นรบกวนบนหน้าจอ เป็นต้น ดังนั้นในการส่งออกผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ จึงมีมาตรฐานในระดับสากล เช่น CISPR Comitee international special des perturbations radioelectriques or Speaial international committee on radio interference) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าได้กำหนดค่าระดับความแรงของสัญญาณรบกวนที่ยอมรับได้ไว้ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์หรือผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าที่จะได้รับการรับรองตามมาตรฐานด้านความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า ต้องไม่สร้างสัญญาณรบกวนออกมาเกินขีดจำกัดที่มาตรฐานกำหนดไว้

นอกจากในระดับสากล มาตรฐานความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้ายังถูกจำแนกออกตามภูมิภาค ซึ่งสามารถแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆ เช่น

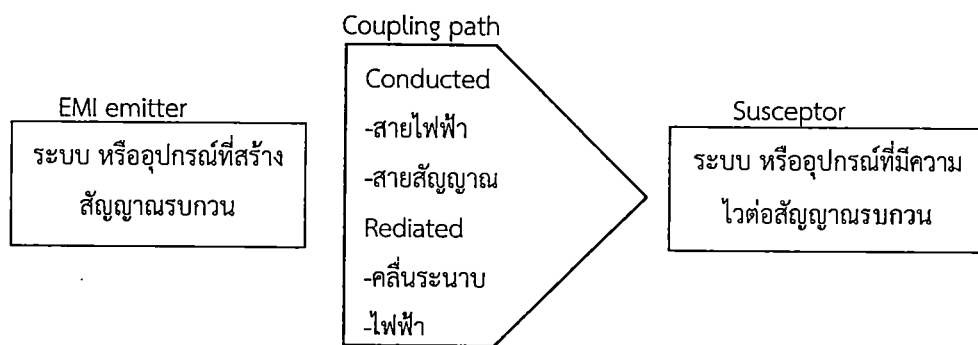
- กลุ่มสหภาพยุโรปมี Comie European de Noemalisation Electronique (CENELEC) เป็นผู้รับผิดชอบ เช่น EN55022, EN55011 เป็นต้น
- กลุ่มอเมริกาเหนือ มีหน่วยงานรับผิดชอบ ได้แก่ The Federal Communications Commission (FCC) และ The American National Standards Institute (ANSI)
- กลุ่มประเทศในทวีปออสเตรเลียมีองค์กรที่รับผิดชอบ คือ Australian Standard and New Zealand Standard (AS/NZS)
- ประเทศอื่นๆเช่น ญี่ปุ่น, เยอรมัน, อังกฤษ ได้อิงกับมาตรฐานยุโรป

ดังนั้น การส่งออกสินค้าไปยังประเทศคู่ค้าที่สำคัญ เช่น สหภาพยุโรป หรืออเมริกา จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงมาตรฐานต่างๆเหล่านี้ด้วย

การรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน แสดงดังรูปที่ 2.8 คือ

- แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Source or EMI emitter)
- ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Victim or susceptor) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความไวต่อสัญญาณ
- ส่วนเชื่อมต่อ (Coupling path) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก

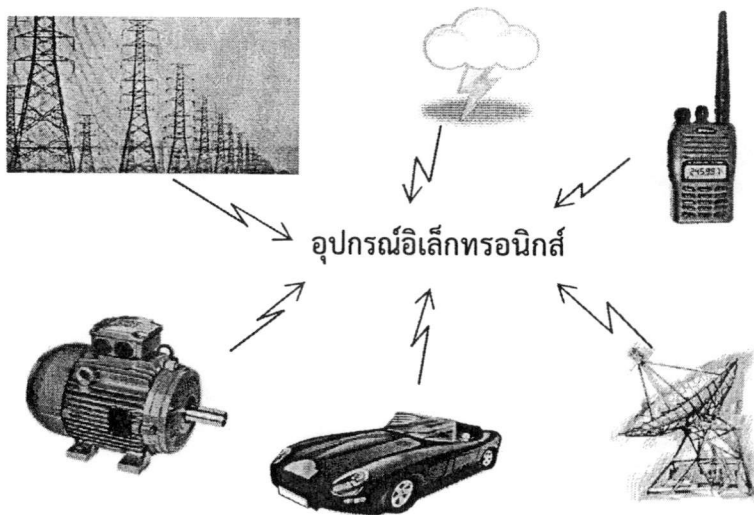
โดยสัญญาณรบกวนในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ มีเส้นทางเดินจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังตัวรับผลกระทบ แบ่งออกเป็นสองรูปแบบ คือ การแผ่กระจาย (Radiated emission, RE) หรือการเชื่อมต่อโดยใช้แม่เหล็กไฟฟ้า ผ่านอากาศหรือวัตถุอื่นๆ และอีกรูปแบบหนึ่งคือ การแพร่ผ่านทางสายตัวนำ (Conducted emission, CE) ที่มีกระแสไหลผ่าน โดยการแผ่สัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแทนให้อยู่ในรูปของไฟฟ้า (Electrically) คือ แทนให้อยู่ในรูปของตัวเก็บประจุ (Capacitor) ในรูปของแม่เหล็ก (Magnetically) หรือแทนในรูปของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบหลักที่ทำให้เกิดการรบกวนทางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[20]

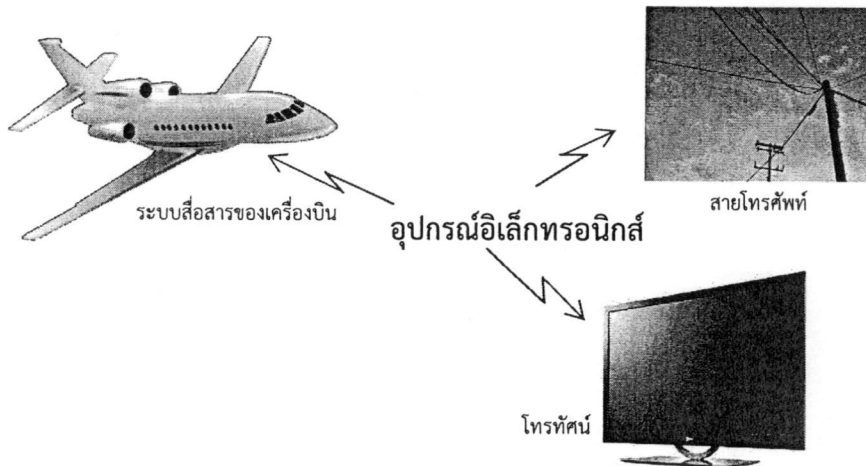
ตัวอย่างการเกิดสัญญาณรบกวน แสดงดังรูปที่ 2.9 โดยสมมติให้มีเครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์ 1 เครื่อง พบว่าเป็นไปได้ที่จะเกิดสัญญาณรบกวนจากที่ต่างๆ เข้ามารบกวนเครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์ได้ ซึ่งจากรูปที่ 2.9 มีถึง 6 อย่างด้วยกันที่ทำการรบกวนเครื่องรับวิทยุหรือโทรทัศน์ คือ

1. มอเตอร์ เนื่องจากการเสียดสีของแปรงถ่านกับคอมมิวเตเตอร์ (Commutator) ทำให้เกิดประกายไฟขึ้นในอัตราสม่ำเสมอ ทำให้เข้าไปรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้า
2. รถยนต์ การจุดหัวเทียนเพื่อเผาไหม้เชื้อเพลิง ซึ่งจะทำให้เกิดประกายไฟที่หัวหัวเทียน
3. วิทยุเคลื่อนที่ คลื่นจากวิทยุเคลื่อนที่ที่สามารถรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ เมื่อเครื่องส่งมีความแรงมากพอหรือเข้ามาใกล้อุปกรณ์ไฟฟ้าเหล่านั้น
4. สถานีส่งสัญญาณวิทยุหรือโทรทัศน์มีกำลังการส่งสัญญาณที่สูงมาก ดังนั้นถ้าอยู่บริเวณที่ใกล้ หรือมีกำลังสัญญาณที่สูงก็จะทำการรบกวนอุปกรณ์ไฟฟ้าได้ด้วยเช่นกัน
5. พายุฟ้า ในขณะที่ยาฟ้าจะเกิดการถ่ายเทประจุในอากาศอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นบ่อเกิดของการเสียดสีทำให้เกิดสัญญาณรบกวน
6. แนวสายไฟฟ้าแรงสูง ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา



รูปที่ 2.9 การเกิดสัญญาณรบกวนจากภายนอกระบบ[21]

ซึ่งเมื่อพิจารณาในทางกลับกัน จะเห็นว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์บางประเภทก็สามารถก่อบุญหาสัญญาณรบกวนให้กับระบบอื่นๆ ได้เหมือนกัน ดังรูปที่ 2.10 โดยสัญญาณรบกวนที่ถูกปล่อยออกมาจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะถูกส่งไปรบกวนทิศ ทำให้เกิดการรบกวนต่อการทำงานของระบบอื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกำลังของสัญญาณรบกวนนั้นด้วย



รูปที่ 2.10 การเกิดสัญญาณรบกวนจากภายในระบบ[21]

กลไกการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท[22] ดังนี้

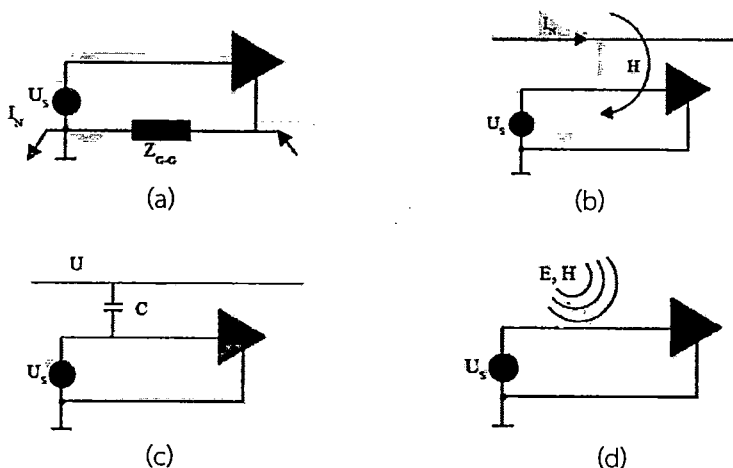
- Common ground impedance coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากความต่างศักย์ระหว่างกราวด์ของระบบ ซึ่งโดยปกติแล้วระบบหลายๆ ระบบที่นำมาต่อกัน เพื่อทำงานร่วมกัน จะใช้กราวด์ของตัวเอง ดังนั้นเมื่อมีการแยกหรือการใช้งานกราวด์คนละระบบ เมื่อนำมาต่อเชื่อมกันจะทำให้เกิดความต่างศักย์

คร่อมระหว่างกราวด์ขึ้น ผลของความต่างศักย์ของระบบกราวด์นี้เองทำให้เกิดการรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11(a)

- Inductive coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากกระแสสูงๆ เมื่อกระแสไหลผ่านเส้นลวดตัวนำจะเกิดสนามแม่เหล็กขึ้นโดยรอบตัวนำตามแนวรัศมี ผลของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการไหลของกระแสบนตัวนำ หรือวงจรที่อยู่ใกล้เคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.11(b)

- Capacitive coupling การรบกวนประเภทนี้สาเหตุมาจากแรงดันที่อยู่ข้างเคียง เมื่อนำแหล่งกำเนิดที่มีแรงดันสูงๆ มาวางใกล้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อากาศซึ่งมีค่าความซึมซาบแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ระหว่างแหล่งกำเนิดและวงจรอิเล็กทรอนิกส์ จะประพฤติตัวเป็นเสมือนตัวเก็บประจุขนาดเล็ก และสามารถส่งถ่ายพลังงานจากแหล่งกำเนิดมายังวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ดังแสดงในรูปที่ 2.11(c)

- Radiate field coupling การรบกวนประเภทนี้มีสาเหตุมาจากคลื่นระนาบ (Plane Wave) ซึ่งประกอบด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปรบกวนการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ข้างเคียง ดังแสดงในรูปที่ 2.11(d) จากปรากฏการณ์ทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 2 แหล่งคือ จากแหล่งกำเนิดทางธรรมชาติ เช่น พายุฟ้าผ่า สนามแม่เหล็กจากดวงอาทิตย์ และสนามแม่เหล็กโลก และแหล่งกำเนิดจากมนุษย์สร้างขึ้น เช่น เครื่องรับ-ส่งวิทยุ เครื่องใช้ไฟฟ้า รถยนต์ เครื่องบิน เป็นต้น



รูปที่ 2.11 กลไกการเกิดสัญญาณรบกวนแม่เหล็กไฟฟ้าบนอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์[22]

เนื่องจากการเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดจากส่วนประกอบหลักที่สำคัญ 3 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน (Source) ส่วนที่ได้รับผลการรบกวน (Victim) และส่วนเชื่อมต่อ (Coupling) สัญญาณรบกวนระหว่างสองส่วนแรก ซึ่งจะทำหน้าที่นำพาสัญญาณรบกวนดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นการป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถทำได้โดย

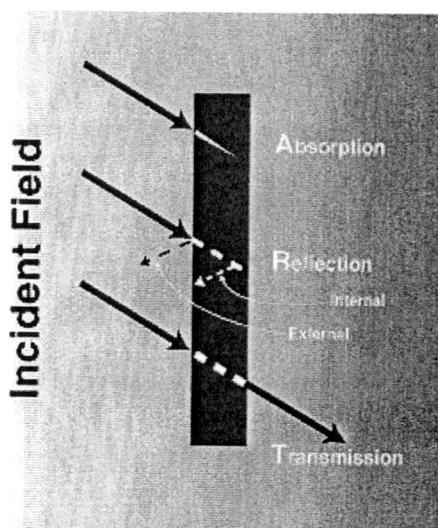
1. กำจัดหรือลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน
2. ตัวรับสัญญาณต้องไม่มีความไวในการรับสัญญาณรบกวน โดยเพิ่มภูมิคุ้มกันต่อสัญญาณรบกวน (Immunity) ให้กับตัวรับสัญญาณ
3. พยายามลดหรือกำจัดช่องเชื่อมโยงระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

2.2.4 การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding)

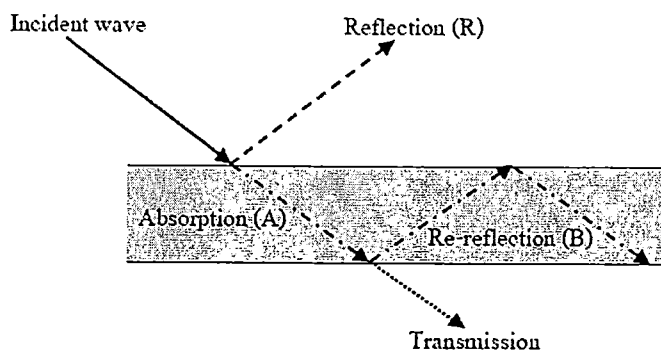
นอกจากการออกแบบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้า และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อเพิ่มความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding) เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่จะลดปัญหาสัญญาณรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ โดยการนำชิ้นส่วนวัสดุที่เป็นโลหะหรือเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการปิดกั้นวางกันระหว่างช่องว่างของสองพื้นผิว โดยจะควบคุมการกระจายของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจากพื้นผิวด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง

หลักการในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำได้โดยทำให้อิมพีแดนซ์ (Impedance) ของเส้นทางในการแพร่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต่อเนื่อง ซึ่งปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่จะเกิดขึ้น เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบกับวัสดุแสดงดังรูปที่ 2.12 และกลไกในการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแสดงในรูปที่ 2.13 ซึ่งมีกลไกดังนี้

- การสะท้อนกลับ (Reflection, R) เป็นการสะท้อนกลับของพลังงาน เมื่อคลื่นมาตกกระทบบนวัสดุที่ใช้ปิดกั้น ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากทางด้านหน้า และด้านหลังของผิววัสดุ
- การดูดกลืน (Absorption, A) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไว้ในวัสดุกำบัง (Shielding material) และเกิดเป็นพลังงานสูญเสีย โดยพลังงานที่สูญเสียดังกล่าวจะถูกแปลงเป็นพลังงานความร้อน ซึ่งการดูดกลืนจะเกิดในปริมาณที่สูงหรือไม่ ขึ้นอยู่กับความหนาและคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุปิดกั้น
- คลื่นบางส่วนจะทะลุผ่าน (Transmission) วัสดุปิดกั้น
- คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนอยู่ภายในวัสดุปิดกั้น ภายในความหนาของวัสดุและจะทะลุผ่านออกมาที่ผิวด้านหลังของวัสดุ (Re-reflection)



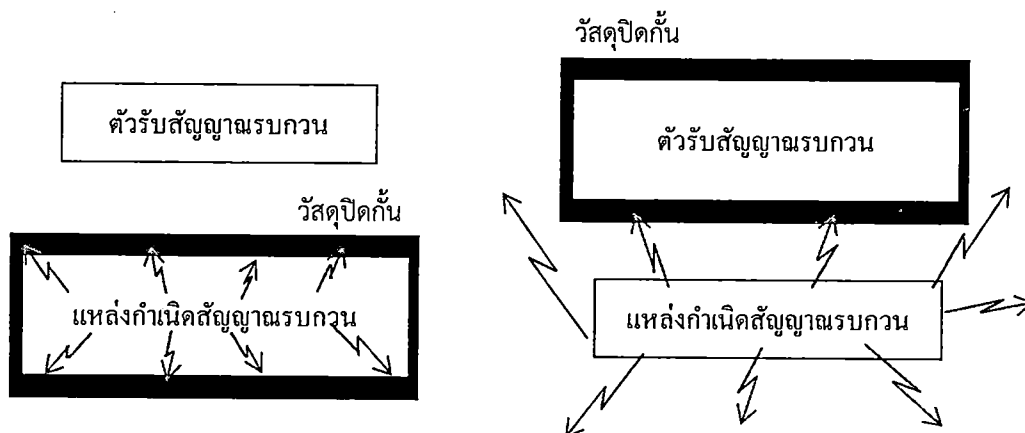
รูปที่ 2.12 ปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์ที่จะเกิดขึ้นระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับวัสดุปิดกั้น[23]



รูปที่ 2.13 กลไกการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[24]

ซึ่งกลไกของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับแหล่งที่ต้องการจะป้องกันการรบกวน คือ

- ถ้าต้องการป้องกันการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด กลไกการปิดกั้นจะต้องเป็นแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยปกคลุมรอบแหล่งกำเนิด จะเป็นการป้องกันอุปกรณ์ภายนอกไม่ให้ถูกรบกวนจากตัวกำเนิดสัญญาณดังรูปที่ 2.14(a)
- ถ้าต้องการป้องกันวัสดุที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นจะมีกลไกแบบการสะท้อนกลับและการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยปกคลุมตัวรับสัญญาณ จะเป็นการป้องกันแบบเฉพาะส่วนภายใต้พื้นที่ที่มีการปิดกั้นนั้นๆ แสดงดังรูปที่ 2.14(b)



รูปที่ 2.14 (a) การป้องกันการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งกำเนิด

(b) การป้องกันวัสดุที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[21]

หลักการปิดกั้นจึงเหมือนกับหลักการของตัวกรองสัญญาณ (Filter) คือ การทำให้อิมพีแดนซ์ของสัญญาณรบกวนในตัวกลางไม่ต่อเนื่อง ซึ่งการปิดกั้นคลื่นจะนำไปใช้ในการป้องกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งจากภายในออกสู่ภายนอก และจากภายนอกเข้าสู่ภายใน ซึ่งประสิทธิภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) สามารถแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการลดพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไปรบกวนการทำงานของอุปกรณ์รอบข้าง ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีประโยชน์ในการหาวัสดุปิดกั้นที่ดี โดยวัสดุที่สามารถปิดกั้นคลื่นได้ดี จะมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่มาก โดยวัดได้จากความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบเปรียบเทียบกับความแรงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านวัสดุกำบังออกมา ดังสมการที่ 2.1

$$SE = 20 \log \frac{E_1}{E_2} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} \quad (2.1)$$

เมื่อ SE คือ ประสิทธิภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หน่วย เดซิเบล (dB)

E_1 และ E_2 คือ ความแรงของสนามไฟฟ้าตกกระทบ และของสนามไฟฟ้าที่ผ่านออกจากวัสดุปิดกั้น ตามลำดับ หน่วย V/m

H_1 และ H_2 คือ ความแรงของสนามแม่เหล็กตกกระทบ และของสนามแม่เหล็กที่ผ่านออกจากวัสดุปิดกั้น ตามลำดับ หน่วย H/m

ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะพิจารณาจากตัวแปรที่สูญเสียใน 3 รูปแบบคือ การสูญเสียจากการสะท้อน (Reflection loss) การสูญเสียจากการดูดซับ (Absorption loss) และการสูญเสียจากการสะท้อนกลับ (Re-reflection loss) ซึ่งการสูญเสียทั้ง 3 แบบแสดงดังรูปที่ 2.13

การหาค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงขึ้นอยู่กับความสามารถในการสะท้อน การดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการสะท้อนกลับของวัสดุปิดกั้น ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ 2.2

$$SE = R + A + B \quad (2.2)$$

เมื่อ R คือ การสูญเสียจากการสะท้อน

A คือ การสูญเสียจากการดูดซับ

B คือ การสะท้อนกลับ (Re-Reflection) ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการปิดกั้น เมื่อการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (A) ของวัสดุกำบังมีค่าน้อยกว่า 10 dB

- การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนและการสะท้อนกลับ (Reflection loss and Re-reflection loss)

เกิดจากการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านวัสดุตัวกลางที่มีผิวสัมผัสต่างกัน (มีค่าอิมพีแดนซ์ต่างกัน) จึงทำให้คลื่นบางส่วนเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเกิดการสะท้อนกลับได้มาก เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และวัสดุปิดกั้นมีอิมพีแดนซ์แตกต่างกันมาก โดยมีความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 2.3

$$R = 20 \log \frac{Z_1}{4Z_2} \quad (2.3)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\omega \times \mu}{\sigma}} \quad (2.4)$$

เมื่อ R = การสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับ หน่วย เดซิเบล (dB)

Z_1, Z_2 = อิมพีแดนซ์ของคลื่นตกกระทบและอิมพีแดนซ์ของวัสดุกำบังตามลำดับ หน่วย V/m

μ = ค่าความซึบซาบแม่เหล็ก (Impedance permeability) หน่วย V·s/A/m

σ = ค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุปิดกั้น หน่วย S/m

$\omega = 2\pi f$

f = ความถี่ของคลื่น หน่วย Hz

- การสูญเสียเนื่องจากการดูดซับ (Absorption loss)

การดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแพร่ทะลุผ่านเข้ามาในวัสดุปิดกั้น ซึ่งจะ
ทำให้ขนาดของแอมพลิจูดลดลงแบบเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) เนื่องจากมีการเปลี่ยนพลังงานของคลื่น
แม่เหล็กไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อน

โดยความสามารถในการดูดซับคลื่นของวัสดุปิดกั้น ขึ้นกับค่าการนำไฟฟ้า ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก และ
ความหนาของวัสดุกำบัง ดังสมการที่ 2.5

$$A = 20 \log e^{t/\delta} = 20 \left(\frac{t}{\delta} \right) \log(e) = 8.69 \left(\frac{t}{\delta} \right) \text{dB} \quad (2.5)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \times \mu \times \sigma}} \quad (2.6)$$

เมื่อ A = การสูญเสียเนื่องจากการดูดซับ หน่วย เดซิเบล (dB)

δ = ความลึกของผิว (Skin depth)

t = ความหนาของวัสดุกำบัง หน่วย เมตร

จากสมการที่ 2.5 พบว่า การสูญเสียเนื่องจากการดูดซับในแผ่นวัสดุปิดกั้นของ 1 ช่วงความถี่ผิวจะมี
ค่าประมาณ 9 dB ซึ่งถ้าแผ่นวัสดุกันมีความหนามากขึ้นก็จะทำให้เกิดการสูญเสียได้เพิ่มขึ้นเช่นกัน ก็จะเป็นการปิด
กั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงการแพร่ความร้อนที่จะเกิดขึ้นด้วย

ลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[25] ควรมีลักษณะดังนี้

- เป็นวัสดุที่ดูดกลืน หรือสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบให้มีความเข้มข้นน้อยกว่าคลื่นที่มาตก
กระทบ
- วัสดุที่มีความหนามาก ก็จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้นด้วย
- มีค่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์สูง เนื่องจากจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้น
- วัสดุต้องมีค่าการนำไฟฟ้าสูง หรือความต้านทานไฟฟ้าต่ำ (โดยทั่วไป ความต้านทานไฟฟ้า ควรอยู่
ในช่วง $10^1 - 10^4$ ohm/cm) ซึ่งจะส่งผลให้การสะท้อน และการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดี
- ควรมีสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ที่ดี ทั้งนี้เนื่องจากวัสดุปิดกั้น มักจะถูกผลิตในรูปของ
แผ่น (Sheet) หรือฝาครอบ (Cover) ที่ติดอยู่กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรืออาจอยู่ในรูปของกล่องปิดกั้น (Shield
box)
- วัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นควรที่จะต้องทนทานต่ออุณหภูมิต่างๆ ได้ในช่วงกว้าง เพื่อที่จะสามารถนำไป
ประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวางขึ้น

ดังนั้นโดยทั่วไป วัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามักผลิตจากโลหะ เนื่องจากโลหะมีค่าการนำ
ไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามการใช้งานของโลหะยังมีข้อจำกัดอยู่หลายประการ[26] เช่น น้ำหนักสูง ซึ่งส่งผลต่อราคา
ขนส่ง และความสะดวกในการใช้งาน การขึ้นรูปทำได้ยาก ปัญหาเรื่องการกัดกร่อน มีข้อจำกัดในการประยุกต์ใช้งาน
และที่สำคัญคือ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่ำๆ ยังไม่ดีนัก ดังนั้นวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ (พลาสติกและ
ยางธรรมชาติ) จึงเป็นวัสดุทางเลือกที่สำคัญ เพื่อนำมาใช้ทดแทนโลหะ แม้ว่าพอลิเมอร์ส่วนใหญ่จะมีสมบัติด้าน
ความต้านทานไฟฟ้าสูง (ความสามารถในการนำไฟฟ้าต่ำ) แต่ยังมีพอลิเมอร์บางชนิดที่สามารถนำไฟฟ้าได้ดี เช่น

PPy, PANI, หรือ Polypyrrole เป็นต้น ดังนั้นจากสมบัติที่สำคัญของพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จึงเป็นเรื่องที่ทำให้เกิดความสนใจแก่ผู้ต้องการศึกษาวัสดุทางเลือกที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้มีรายงานการรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Intrinsically conducting polymers, ICPs) อันได้แก่ พอลิไพโรล (Polypyrrole, PPy) และพอลิอะนิลีน (Polyaniline, PANI) โดยวัสดุเชิงประกอบดังกล่าวให้ประสิทธิภาพการกำบังที่ดีในย่านความถี่ต่างๆ (สูงถึง 70 dB ในช่วงความถี่ 1 MHz ถึง 3 GHz) ซึ่งจากงานวิจัยของวไลพร และศิริศาส[5] การเติมเขม่าดำนำไฟฟ้าและอนุภาค PPy ส่งผลให้ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่อนุภาค PPy จะให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า Yangyong Wang and Xinli Jing[27] ก็ศึกษาการประยุกต์ใช้ พอลิเมอร์นำไฟฟ้าจำพวกพอลิไพโรล (Polypyrrole, PPy) และพอลิอะนิลีน (Polyaniline) ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกัน และบทสรุปของการศึกษาก็คพบว่า ความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เมื่อเทียบกับการใช้วัสดุจำพวกโลหะ ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก นอกจากนี้ยังได้มีผู้ทำการวิจัยในเรื่องการนำไฟฟ้าโดยศึกษาการพอลิไพโรลผสมกับ AgPd เคลือบลงบนเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (Polyethylene terephthalate, PET) เพื่อใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและได้ระบุว่าความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพความนำไฟฟ้า[28] นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอการศึกษาเรื่องการทำพอลิเมอร์โรเซชันบนผ้าพอลิเอสเตอร์ โดยทำให้วัสดุมีความต้านทานไฟฟ้าลดลงพร้อมระบุว่า ค่าประสิทธิภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเมื่อความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุมีค่าลดลง[29] ทั้งนี้แม้ว่าวัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะมีความสามารถในการช่วยลดทอนและปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี แต่วัสดุพอลิเมอร์นำไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดในด้านราคาที่ยังค่อนข้างสูง ดังนั้นการเลือกวัสดุดังกล่าวไปใช้งานในลักษณะการใช้งานเพื่อปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงทำให้มีการนำใช้งานอยู่ในวงที่จำกัด ซึ่งเมื่อมีการนำพอลิเมอร์นำไฟฟ้ามาใช้งานในด้านดังกล่าว จะเป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับกระบวนการผลิต เนื่องจากในการผลิตพอลิเมอร์นำไฟฟ้าจะต้องผ่านกระบวนการสังเคราะห์หรือกระตุ้น (Doping) เพื่อให้พอลิเมอร์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว (Conjugated bonds) เพื่อให้สามารถนำไฟฟ้าได้

จากข้อจำกัดดังกล่าวจึงทำให้เกิดการคิดค้น เพื่อพัฒนาวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่สูงขึ้น โดยทำให้อยู่ในรูปลักษณะประเภทวัสดุผสมที่จัดเป็นวัสดุตัวนำแบบซูโดแอคทีฟ (Pseudo active) ซึ่งการพัฒนาพลาสติกให้มีค่าการนำไฟฟ้าสูงขึ้น (Metallization) ทำได้โดยการนำพลาสติกมาขึ้นรูปร่วมกับโลหะในรูปแบบต่างๆ[26] เช่น การเคลือบผิวพลาสติกด้วยโลหะ (Conducting painting or Electroplating) หรือการหลอมผสมสารเติมแต่งนำไฟฟ้า (Conducting additive) ลงในพลาสติก ซึ่งได้แก่ เส้นใยหรือผงโลหะ (Metal fibre or metal power) อะลูมิเนียม ทองแดง เงิน และเขม่าดำนำไฟฟ้า (Carbon black) เป็นต้น โดยสมบัติทางด้านการนำไฟฟ้าไม่ได้มาจากวัสดุหลัก แต่มาจากวัสดุที่เป็นสารตัวเติม (Filler) ส่วนพอลิเมอร์ที่เป็นฉนวน จะทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์ (Matrix) โดยที่ความสามารถในด้านการนำไฟฟ้าและการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้น จะขึ้นอยู่กับสมบัติการนำไฟฟ้าของสารตัวเติม ปริมาณความเข้มข้น รูปร่าง ขนาดของอนุภาค ความเป็นรูพรุนบริเวณผิว การกระจายตัว และการเรียงตัวกันของอนุภาค[30] ดังนั้นจึงเกิดงานวิจัยด้านการศึกษาการเพิ่มความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ มาผลิตเป็นวัสดุที่ใช้งานในด้านการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยในงานวิจัยของ อรรถพล[25] ได้ศึกษาความสามารถของวัสดุป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำจากยางธรรมชาติ โดยเติมด้วยสารตัวเติมนำไฟฟ้า คือ ผงโลหะ (อะลูมิเนียมขนาด 13 ไมโครเมตรและ 30 ไมโครเมตร และดีบุกขนาด 30 ไมโครเมตร) เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และใช้ทั้งสองชนิดร่วมกัน ที่ช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12 GHz พบว่า ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของผงโลหะ ปริมาณเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และเมื่อมีความหนาเพิ่มขึ้น ซึ่ง

ค่า SE ของยางผสมเขม่าดำนำไฟฟ้าให้ค่าสูงกว่ายางผสมผงโลหะ เนื่องจากเขม่าดำนำไฟฟ้ามีความหนาแน่นน้อยกว่า ดังนั้นเมื่อใส่ในปริมาณที่เท่ากันจะทำให้ปริมาณของเขม่าดำนำไฟฟ้ามีมากกว่าปริมาณของผงโลหะ ส่งผลให้เกิดการเชื่อมต่อกันเป็นโครงสร้างแบบร่างแห และการใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าร่วมกันทำให้ยางมีค่า SE สูงกว่าเมื่อใช้สารตัวเติมเพียงชนิดเดียว ปรวีย์[31] ทำการศึกษาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางธรรมชาติ (Natural rubber, NR) โดยมีสารตัวเติมคือ ทังสเดน ดิบุก และคาร์บอนแบล็ค โดยทำการศึกษา ปริมาณของสารตัวเติม (50, 150 phr) และขนาดอนุภาคของสารตัวเติม (ดิบุก 45,125 ไมโครเมตร ทังสเดน 45, 100 ไมโครเมตร และคาร์บอนแบล็ค 22(N220), 28(N326) นาโนเมตร) ที่มีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 8.5, 10.5 และ 12 GHz พบว่า ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่เล็กกว่า และเมื่อใช้ปริมาณสารตัวเติมมาก จะส่งผลให้ค่า SE มีค่าสูงขึ้น สำหรับสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด รวมถึงงานการศึกษาของ P.B. JANA และคณะ[32] ซึ่งทำการศึกษาการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางพอลิ-คลอโรพรีนที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นที่ระบุว่าจะปัจจัยด้านปริมาณของเส้นใยคาร์บอนที่ผสมลงไปไปยังพอลิคลอโรพรีนและความหนาขึ้นงานทดสอบที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นที่สูงขึ้นและอีกทั้งยังส่งผลทำให้ค่าความต้านทานของวัสดุต่ำลงด้วย ซึ่งเหมาะที่จะนำไปเป็นวัสดุปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการใช้ยางบิวทิล (Butly rubber, IIR) ผสมกับโบรอนด์คาร์ไบด์ด้วยเครื่องผสมแบบบดสองลูกกลิ้ง (Two roll mill) ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาว่าประสิทธิภาพของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทั้งปริมาณสารตัวเติมและความถี่ที่ใช้ในการทดสอบ[33] และยังมีงานวิจัยที่ทำการศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุผสม Polypropylene (PP) Polystyrene (PS) Styrene-butadiene-styrene (SBS) และเขม่าดำโครงสร้างสูง เพื่อใช้สำหรับปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 100-1,000 MHz ที่ทำการเติมเขม่าดำ 10 Vol% โดยระบุถึงความผันแปรของอัตราส่วนผสมระหว่าง PP กับ PS และ SBS ซึ่งในการตรวจสอบโครงสร้างพบว่าเขม่าดำจะอยู่ใกล้กับเฟสของ PS มากเป็นพิเศษ และปริมาณส่วนผสมระหว่าง PP/PS ที่ปริมาณ 75/25 ถึง 25/75 นั้น ความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าของวัสดุดังกล่าวจะแสดงผลเป็นอิสระ กล่าวคือไม่เป็นเส้นตรงหรือแสดงพฤติกรรมแนวโน้ม โดยอัตราส่วนผสมของ PP/PS ที่ (100/0) - (10/90) กับเขม่าดำ 10 Vol% นั้นเพียงพอต่อการประยุกต์ใช้ในการปิดกั้นคลื่นที่มาจากคอมพิวเตอร์ได้[10] และในงานวิจัยของ Quinton J.[11] ทำการศึกษาการปิดกั้นการแทรกสอดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นวิทยุ โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนนำไฟฟ้า อนุภาคแกรไฟต์ และเส้นใยคาร์บอน โดยใช้พอลิเมอร์ 2 ชนิดคือ ไนลอน 6,6 และพอลิคาร์บอนเนต ทำการศึกษาทั้งกรณีที่เติมสารตัวเติมชนิดเดียว และหลายชนิดรวมกัน พบว่าคาร์บอนแบล็คส่งผลกระทบต่อการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด และการใช้สารตัวเติมมากกว่าหนึ่งชนิดร่วมกันทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นที่สูงกว่าการใช้สารตัวเติมเพียงตัวเดียว และค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกพอลิคาร์บอนเนตที่ผสมสารตัวเติมให้ค่าสูงกว่าไนลอน 6,6 ที่ผสมสารตัวเติมเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Pramanik et.al.[34] ได้ศึกษาการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางไนไตร์คอมโพสิตที่ใช้สารตัวเติม 3 ชนิดคือ เส้นใยคาร์บอนแบบสั้น เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า(Conductex® 900) และสารตัวเติมที่ผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า ทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ในช่วงความถี่สองช่วงคือ 200-1,000 MHz และ 8-12 GHz(x-ray band) พบว่า ค่า SE มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อใช้ความถี่สูงขึ้น เติมสารตัวเติมมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงาน ซึ่งเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนแบบสั้นให้ค่า SE ดีที่สุด มีค่า SE ประมาณ 22 ถึง 27 dB ในช่วงความถี่ 8-12 GHz

ต่อมา Varij and Mehra[9] ได้ทำการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าทั้งด้านความนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ high-density polyethylene (HDPE) ที่ถูกเติมด้วย Graphite ซึ่งทำการเตรียมชิ้นงานได้จากการอัดขึ้นรูปร้อน ซึ่งผลการศึกษาระบุว่าที่ปริมาณ Graphite

0.029% นั้นสารตัวเติม Graphite จะเริ่มเกิดการเชื่อมโยงกันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านความต้านทานไฟฟ้าของพอลิเมอร์ เช่นเดียวกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่จะเริ่มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ Graphite เท่ากับ 0.029% และจากการวัดค่าการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ 8-12 GHz (X-Band) พบว่าค่าการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณ Graphite ที่สูงขึ้น ซึ่งมีงานวิจัยของ Rajendra and Amol[35] ที่ให้ผลสอดคล้องกัน ซึ่งจากการศึกษาการเตรียมวัสดุประกอบ Polyphenylene Sulphide ผสมกับ Graphite เพื่อศึกษาสมบัติทางการนำไฟฟ้า ได้แก่ การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก รวมทั้งการกระจายตัวของ Graphite ในเนื้อสารประกอบ พบว่า วัสดุประกอบจะเริ่มแสดงพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงด้านการนำไฟฟ้าอย่างรวดเร็ว ณ จุดวิกฤติ (Percolation threshold) ที่ปริมาณ Graphite 5% wt และค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีปริมาณสูงขึ้นเมื่อปริมาณ Graphite สูงขึ้น แต่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแสดงพฤติกรรมลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อความถี่ที่ใช้ทดสอบสูงขึ้น โดยค่าการนำไฟฟ้าและการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณของ Graphite สูงขึ้น ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจากการเติม Graphite 8 %wt โดยวัดที่ความถี่ 1 MHz พบว่า จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงกว่าเมื่อไม่เติม Graphite ลงไปและเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างการกระจายตัวแสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณ Graphite ในเนื้อพอลิเมอร์สูงขึ้น ระยะห่างระหว่างอนุภาคของ Graphite จะลดลงและชิดกันมากขึ้นเกิดเป็นโครงร่างแหซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัยของวัชรพันธ์[36] พบว่า ความสามารถด้านการนำไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารตัวเติม โครงสร้างสารตัวเติม รวมถึงขนาดอนุภาคของสารตัวเติมด้วย โดยอนุภาคขนาดเล็กจะให้การนำไฟฟ้าที่ดีกว่า เนื่องจากขนาดอนุภาคสารตัวเติมเมื่อมีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลต่อการเข้าเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างอนุภาคสารตัวเติมกับเนื้อพอลิเมอร์ โดยจะทำให้เข้ากันได้ลดลง

นอกจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้นที่ได้มีผู้ทำการศึกษาอย่างต่อเนื่องถึงปัจจัยที่มีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการนำไฟฟ้าของวัสดุพอลิเมอร์โดยตรงแล้วนั้น ซึ่งโดยหลักๆจะพบว่าการกระจายตัวของสารตัวเติมที่ดีและการชิดกันหรือเชื่อมโยงกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมที่อยู่ในเนื้อพอลิเมอร์นั้น จะช่วยส่งผลทำให้พอลิเมอร์มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีและทั่วถึง ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของวัสดุที่เหมาะสมจะนำมาประยุกต์ใช้งานในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และได้มีนักวิจัยบางส่วนที่ได้มีการพัฒนาประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดย Huang and Chiou[6] ได้ศึกษาลักษณะการผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่ใช้เส้นใยคาร์บอนแบล็คนำไฟฟ้า (Conductive carbon black fibre) ผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด กำหนดความเร็วรอบของลูกกึ่งบิดเท่ากับ 30 รอบ/นาที โดยพบว่าหลังจากเพิ่มความเร็วรอบในการผสมให้มีความเร็วมากขึ้น เมื่อนำวัสดุผสมดังกล่าวไปทดสอบการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพบว่าความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วรอบในการผสมที่เร็วขึ้นจะทำให้สารตัวเติม (เส้นใยคาร์บอนแบล็คนำไฟฟ้า) เกิดการแตกหักจึงส่งผลต่อการไม่ต่อเนื่องกันระหว่างอนุภาคเส้นใยคาร์บอนแบล็คนำไฟฟ้า และจากงานวิจัยของ CHIANG and CHENG[37] ได้ทำการศึกษาสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติก ABS ซึ่งมีการผสมเส้นใยคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductive carbon fiber, CF) โดยทำการผสมเส้นใยคาร์บอนนำไฟฟ้ากับ ABS ที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 240 °C และใช้ความเร็วรอบ 60 rpm พบว่าโครงสร้างของเส้นใยคาร์บอนนำไฟฟ้าจะเชื่อมต่อกันได้ดี เมื่อมีการใส่สารหล่อลื่น เนื่องจากลดความเสียหายให้กับเส้นใยไม่ให้เกิดการแตกหักขณะที่ทำการผสม และเพิ่มความสามารถในการกระจายตัวของเส้นใย แต่พบว่าเมื่อมีการเติมเส้นใยนำไฟฟ้ามากกว่า 40 phr ค่าความยาวเฉลี่ยของเส้นใยจะสั้นลง โดยในงานวิจัยนี้การเติม CF ปริมาณ 30 phr จะให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุด คือ 30 dB

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Kan-Sen Chou, et al.[8] ทำการศึกษาเพิ่มเติมเรื่องลักษณะของการผสมพอลิเมอร์กับสารตัวเติมที่มีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่าง นิกเกิล (Ni) กับอะซิโตนไทร-บิวทไดอิน-สไตรีน (ABS) โดยทำการศึกษาด้วยวิธีการขึ้นรูป 2 แบบ คือ แบบปิด (brabender) และแบบ

ลูกกลิ้ง (Ball mill) โดยระบุว่าผลการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุผสมระหว่าง ABS และมีปริมาณผงนิเกิล 7 Vol.% การผสมแบบลูกกลิ้งสามารถให้ค่าการปิดกั้นคลื่นได้ 36 dB แต่วิธีการผสมแบบปิดต้องใช้ผงนิเกิลถึง 20 vol.% จึงจะให้ค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยวิธีการผสมแบบลูกกลิ้งจะช่วยทำให้รวมกลุ่มอนุภาคและเกิดโครงร่างแหได้ดีตั้งแต่ปริมาณน้อย และการผสมด้วยนิเกิลแบบเส้นจะให้ค่าการปิดกั้นคลื่นได้ดีกว่าแบบผง

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษามาข้างต้นนั้นทำให้สามารถทราบลักษณะของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแนวทางในการเพิ่มสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ที่มีสมบัติในด้านความเป็นฉนวน ซึ่งสิ่งสำคัญที่จะบอกได้ถึงคุณสมบัติของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้สูงและดีนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีของวัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัสดุพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าที่ต่ำ ดังนั้นการที่จะเพิ่มสมบัติในการนำไฟฟ้าให้กับพอลิเมอร์จึงจำเป็นต้องทำการเติมสารตัวเติมที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดีอย่างเช่น สารตัวเติมจำพวกโลหะลงไปในพอลิเมอร์เพื่อจะช่วยให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์นั้นดีขึ้น แต่ทั้งนี้ความสามารถในการนำไฟฟ้าเองยังขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติม โดยเมื่อปริมาณสารตัวเติมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้อนุภาคของสารตัวเติมชิดกันมากขึ้นจึงมีโอกาสที่จะเกิดการสัมผัสระหว่างผิวของอนุภาคมากขึ้นและจะส่งผลให้เกิดความต่อเนื่องของสายโซ่โมเลกุลเป็นร่างแหเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าดีขึ้นนั่นเอง[34] ซึ่งจะมีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีขึ้นเช่นกัน ขนาดอนุภาคเองก็มีผลต่อความสามารถในการนำไฟฟ้าและการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกัน โดยขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากโอกาสการสัมผัสกันระหว่างอนุภาคก็มีมากขึ้น นอกจากนั้นการกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์พอลิเมอร์ก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถ้าสารตัวเติมมีการกระจายตัวในเนื้อเมทริกซ์ดี และสม่ำเสมอก็จะทำให้ความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุนั้นๆ ดีด้วย นอกจากนั้นจากการศึกษาของงานวิจัยก่อนหน้ายังพบว่า การใช้สารตัวเติมที่เป็นเส้นใย แม้ว่าจะให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดี แต่จะมีข้อจำกัดในเรื่องของการผสม และปริมาณที่ใช้ เนื่องจากถ้าใช้ความเร็วรอบในการผสมมาก หรือใช้เวลานานก็จะส่งผลให้เส้นใยเกิดการแตกหัก หรือถ้าใส่ปริมาณเส้นใยในจำนวนมาก ก็จะทำให้เกิดการแตกหักของเส้นใยด้วยเช่นกัน ซึ่งความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องทำให้วัสดุมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดี ซึ่งการจะเพิ่มความสามารถดังกล่าว เส้นใยที่ผสมเข้าไปจะต้องมีการเชื่อมโยงกันเป็นโครงข่ายที่ใหญ่ และกระจายทั่ววัสดุ จึงจะทำให้วัสดุมีการนำไฟฟ้าที่ดี และทั่วถึง และส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีด้วย

2.3 วัสดุคอมโพสิต (Composites)

วัสดุคอมโพสิต (Composites) คือวัสดุที่มีองค์ประกอบทางเคมีหรือโครงสร้างแตกต่างกันตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมาผสมกัน ซึ่งวัสดุผสมที่ได้จะมีลักษณะและคุณสมบัติเฉพาะ และเหมาะสมกับรูปแบบที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานมากขึ้น

วัสดุคอมโพสิต ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก ดังนี้

1. วัสดุที่เป็นเนื้อหลัก หรือเมทริกซ์ (Matrix)
2. ส่วนที่เป็นวัสดุเสริมแรง (Reinforcement materials) ซึ่งจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อวัสดุหลัก โดยวัสดุเสริมแรงอาจมีลักษณะเป็นเส้น ก้อน อนุภาค หรือเกล็ดก็ได้ ซึ่งบางครั้งอาจมีการใช้สารตัวเติม (Fillers) ร่วมด้วย โดยวัสดุที่เป็นเนื้อหลัก จะทำหน้าที่เป็นตัวรองรับวัสดุเสริมแรงให้อยู่ในรูปร่างที่กำหนด ขณะที่วัสดุเสริมแรงจะเป็นส่วนช่วยเพิ่ม หรือปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่เป็นเนื้อหลักให้ดีขึ้น

ปัจจุบันวัสดุคอมโพสิต สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามวัสดุที่ทำหน้าที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก หรือเมทริกซ์ ดังนี้

- พอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer matrix composites, PMCs)

เป็นวัสดุคอมโพสิตที่มีพลาสติก หรือยางเป็นเนื้อวัสดุหลัก และใช้วัสดุเสริมแรงได้หลายชนิด เช่น แก้ว คาร์บอน เส้นลวดโลหะ เป็นต้น

- เซรามิกคอมโพสิต (Ceramic matrix composites, CMCs)

วัสดุเนื้อหลักของคอมโพสิตชนิดนี้ คือ เซรามิก และใช้วัสดุเสริมแรงได้ทั้งในรูปแบบอนุภาคหรือเส้นใย ตัวอย่างวัสดุคอมโพสิตในกลุ่มนี้คือ คอนกรีต และคอนกรีตเสริมแรง

- เมทัลคอมโพสิต (Metal matrix composites, MMCs)

มีโลหะ หรือโลหะผสมเป็นเนื้อวัสดุหลัก เช่น อะลูมิเนียม เป็นต้น ส่วนวัสดุเสริมแรงสามารถเป็นได้ทั้งอนุภาค หรือเส้นใย ทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง

แต่ถ้ามีการเสริมแรงด้วยอนุภาคเซรามิก จำพวกออกไซด์ โบไรด์ คาร์ไบด์ หรืออลูมินา จะเรียกว่า Ceramic-metal composite

นอกจากนั้นคอมโพสิต สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของวัสดุเสริมที่ผสมเข้าไปในเนื้อวัสดุหลัก ดังนี้

- คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาค (Particle-reinforced composite)

คือ คอมโพสิตที่มีอนุภาคของวัสดุเสริมแรง ซึ่งมีรูปร่างเป็นแผ่นบาง (Flake) อนุภาคกลม (Particle) หรือเป็นเม็ดขนาดใหญ่ (Filler) เป็นต้น กระจายตัวอยู่ในเมทริกซ์ เพื่อทำหน้าที่เสริมแรง

คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคสามารถแบ่งได้อีก 2 ประเภท คือ คอมโพสิตเสริมแรงด้วยอนุภาคขนาดใหญ่ (Large-particle composite) และคอมโพสิตที่เพิ่มความแข็งแรงด้วยการกระจายตัวของอนุภาค (Dispersion-strengthened composite)

- คอมโพสิตเสริมแรงด้วยเส้นใย (Fibre-reinforcement composite)

เป็นคอมโพสิตที่เกิดจากเส้นใยเสริมแรงในเมทริกซ์ ซึ่งเส้นใยอาจจะเส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว เส้นใยอะรามิต และเส้นใยธรรมชาติ เป็นต้น

- คอมโพสิตโครงสร้าง (Structural composite)

เป็นคอมโพสิตที่สามารถประกอบขึ้นจากวัสดุเนื้อเดียว และคอมโพสิต โดยสมบัติของคอมโพสิตโครงสร้างขึ้นอยู่กับสมบัติของวัสดุเริ่มต้น และรูปแบบของวัสดุที่นำมาประกอบกัน สามารถแบ่งคอมโพสิตโครงสร้างได้ 2 ประเภท คือ คอมโพสิตแบบชั้น (Laminar composite) และผลิตภัณฑ์แผ่นประกอบแบบแซนด์วิช (Sandwich panel)

2.3.1 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต

1. สมบัติของเส้นใยเสริมแรง

2. สมบัติของพอลิเมอร์ (ที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก)

3. สัดส่วนของเส้นใยเสริมแรง (Fibre volume fraction, FVF) เนื่องจากวัสดุที่ทำการเสริมแรงด้วยเส้นใย มักจะมีคุณสมบัติเชิงกลที่สูงกว่าพอลิเมอร์ทั่วไป ดังนั้นปริมาณเส้นใยเสริมแรงที่มากขึ้น จะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่สูง แต่จะมีขีดจำกัดในการผสม เพราะเส้นใยควรมีพอลิเมอร์ห่อหุ้มอยู่โดยรอบ จึงจะทำให้มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี

4. การจัดเรียงตัว (Orientation) ของเส้นใยในคอมโพสิต เนื่องจากเส้นใยเสริมแรงจะให้ค่าสมบัติเชิงกลตามแนวยาวสูงกว่าแนวขวาง ดังนั้นหากในการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถทำให้เส้นใยมีการจัดเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน ก็จะส่งผลให้สมบัติเชิงกลของคอมโพสิตดังกล่าวแตกต่างกันตามแนวแรงที่กระทำ ดังนั้นในการจัดเรียงเส้นใยจำเป็นจะต้องทราบทิศทางของแรงที่กระทำต่อวัสดุก่อนว่าเป็นแรงดึง แรงกดอัด แรงเฉือน หรือแรงดัด เพื่อจัดวางตำแหน่งเส้นใยเสริมแรงให้เหมาะสม ตรงตามรูปแบบการใช้งานที่ต้องการ

2.3.2 พอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้า (Electrically conductive polymer composites, ECPCs)

เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ให้ความสนใจปัญหาในเรื่องความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic compatibility, EMC) เพิ่มมากขึ้น จึงได้มีการออกแบบวิธีการในการลดปัญหาการรบกวนที่เกิดขึ้น ซึ่งวิธีที่สำคัญและให้ประสิทธิภาพที่ดี คือ การปิดกั้น (Shielding) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้ทำการพัฒนาวัสดุ เพื่อให้มีความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ วัสดุจำพวกโลหะ เนื่องจากมีความสามารถในการนำไฟฟ้า แต่เนื่องจากวัสดุจำพวกโลหะมีน้ำหนักมาก ราคาค่อนข้างสูง และมีข้อจำกัดในการขึ้นรูป[4] ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิต ซึ่งใส่สารตัวเติมที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เพื่อให้พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้จริง

โดยทั่วไปพอลิเมอร์ มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulating material) คือ ไม่มีประจุพาอิสระ (Free electric charges) เคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องในสนามไฟฟ้า ดังนั้นจึงไม่มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น แต่มีบางกรณีที่พอลิเมอร์สามารถนำไฟฟ้าได้ เช่น กรณีของพอลิเมอร์นำไฟฟ้า (Conducting polymer) ที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมีประกอบด้วยพันธะคู่สลับพันธะเดี่ยว (Conjugated bonds) เมื่อมีการผ่านกระบวนการสังเคราะห์หรือกระตุ้น (Doping) ก็จะสามารถนำไฟฟ้าได้ หรือกรณีที่มีการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้า (Electrically conductive fillers) ลงไปผสม ได้เป็นพอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ตัวอย่างพอลิเมอร์นำไฟฟ้า เช่น พอลิอะซิไทลีน (Polyacetylene, PA) พอลิไทโอฟีน (Polythiophene, PT) พอลิไพโรล (Polypyrrole, PPy) พอลิอะนิลีน (Polyaniline, PANI) เป็นต้น

พอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้า เป็นวัสดุที่ได้จากการผสมกันระหว่างวัสดุพอลิเมอร์ทั้งชนิดเทอร์โมพลาสติก และชนิดเทอร์โมเซตติง ซึ่งทำหน้าที่เป็นเนื้อวัสดุหลัก หรือเมทริกซ์ และมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า (Insulator) กับสารตัวเติม (Fillers) ที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้า เช่น ผงเขม่าดำ (Carbon black) แกรไฟต์ (Graphite) ท่อนาโนคาร์บอน (Carbon nanotube) เส้นใยคาร์บอน (Carbon fibre) และผงโลหะ (Metal) โดยเมื่อวัสดุทั้งสองชนิดผสมกันแล้ว จะได้วัสดุคอมโพสิตที่มีสมบัติในการนำไฟฟ้า ซึ่งค่าการนำไฟฟ้าของคอมโพสิตดังกล่าวขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อกันของแต่ละอนุภาคของสารตัวเติม และค่าความต้านทานที่ผิวสัมผัส (Contact resistance) ระหว่างแต่ละอนุภาคที่อยู่ใกล้กัน และระหว่างอนุภาคกับเมทริกซ์

โดยกระบวนการขึ้นรูปวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้า ต้องทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระอย่างต่อเนื่องในโครงสร้างโมเลกุลของอนุภาคนำไฟฟ้า และเกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้นในวัสดุพอลิเมอร์คอมโพสิตดังกล่าว ซึ่งปริมาณสารตัวเติมที่ต้องใส่ในคอมโพสิตต้องใส่ในปริมาณค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 20-80% โดยปริมาตร หรือ 70% โดยน้ำหนัก เพื่อให้เกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องของโมเลกุล จนทำให้เกิดการเรียงตัวเป็นโครงร่างตาข่ายของอนุภาคนำไฟฟ้า (Conductive network) ทั่วพอลิเมอร์เมทริกซ์ โดยปริมาณของสารตัวเติมที่เติมลงไปผสมในเมทริกซ์ต้องมีปริมาณเกินกว่าสัดส่วนวิกฤติ (Critical volume fraction) ที่เรียกว่า สัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาค (The percolation threshold) ซึ่งเป็นจุดที่วัสดุคอมโพสิตจะเปลี่ยนสมบัติจาก

ฉนวนไฟฟ้า เป็นตัวนำไฟฟ้า และจะส่งผลให้ความต้านทานของคอมโพสิตลดลงอย่างรวดเร็ว การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิตสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีที่ชื่อว่า Percolation[38] และเรียกบริเวณที่นำไฟฟ้าว่า บริเวณของ percolation ซึ่งความสามารถในการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อมีปริมาณของอนุภาคสารตัวเติมนำไฟฟ้าน้อย จะทำให้อนุภาคแยกออกจากกันส่งผลให้ค่าการนำไฟฟ้าต่ำ[39] เมื่อเทียบกับกรณีที่มีการเติมสารคาร์บอนแบล็คในปริมาณมาก อนุภาคของคาร์บอนแบล็คจะมีระยะที่ชิดกันมากขึ้น และสามารถต่อกันเป็นสายโซ่ยาวต่อเนื่องตลอดภายในเนื้อของคอมโพสิต ดังผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยของ Zhang and Chen[12] Pramanik[34] และ Chiang and Chiang[40]

ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าการนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต มีหลายปัจจัย ดังนี้

1. สมบัติของสารตัวเติมนำไฟฟ้าที่ใช้ เช่น สารตัวเติมในกลุ่มคาร์บอน (Carbonaceous fillers) โดยคาร์บอนแต่ละรูปแบบก็จะมีค่าการนำไฟฟ้าแตกต่างกัน คือ
 - ผงเขม่าดำ มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^2 S/cm
 - เส้นใยคาร์บอนจากพอลิอะไครโลไนไตรล์ (PAN-based carbon fiber) มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^3 S/cm
 - เส้นใยคาร์บอนจาก Pitch (Pitch-based carbon fiber) มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^4 S/cm
 - แกรไฟต์ (Graphite) มีค่าการนำไฟฟ้าประมาณ 10^5 S/cm
2. ขนาดของอนุภาค (Particle size) คือ อนุภาคทรงกลม (Spherical particles) ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า และมีค่า Aspect ratio (1/d) มากกว่า เช่นในกรณีของเส้นใย จะมีสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า (Lower percolation threshold)
3. กระบวนการขึ้นรูปคอมโพสิต เนื่องจากมีผลต่อการจัดเรียงตัวของอนุภาคสารตัวเติม ซึ่งมีผลต่อทิศทางของการนำไฟฟ้าของคอมโพสิต
4. สมบัติของผิวหน้า (Surface properties) ของสารตัวเติมและพอลิเมอร์เมทริกซ์ เนื่องจากพลังงานอิสระของผิวหน้า (Surface free energies) ของสารตัวเติมและเมทริกซ์มีอิทธิพลต่อการสัมผัสกันระหว่างวัสดุทั้งสอง โดยวัสดุที่มีค่าพลังงานผิวหน้าอิสระต่างกันน้อย จะทำให้สามารถสัมผัสเข้ากันได้ดีกว่า ทำให้มีค่าสัดส่วนที่ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันของอนุภาคต่ำกว่า

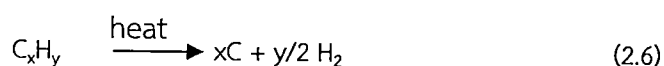
2.4 คาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำ (Carbon black)

คาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำ (Carbon black) เป็นสารตัวเติมนำไฟฟ้า (Electrically conductive filler) เนื่องจากมีอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่อง เมื่อผสมสารตัวเติมนี้ในพอลิ-เมอร์จะช่วยให้พอลิเมอร์นั้นมีสมบัตินำไฟฟ้าได้

สารตัวเติมนำไฟฟ้าได้ในกลุ่มของคาร์บอน (Electrically conductive carbonaceous fillers) มีหลายชนิดซึ่งจะแตกต่างกันที่ลักษณะของโครงสร้าง (Structure) และรูปแบบโครงสร้าง(Allotropic forms) ปัจจุบันคาร์บอนถูกค้นพบในหลายรูปแบบตามลักษณะของการจัดเรียงตัวของเวเลนต้อิเล็กตรอนที่แตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น แกรไฟต์ ผงเขม่าดำ เส้นใยคาร์บอน ฟูลเลอร์รีน(Fullerenes) และท่อนาโนคาร์บอน

คาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำ ได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ (Partial combustion) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสถานะเป็นก๊าซ หรือของเหลวในที่อับอากาศ ซึ่งจะได้ควันสีดำและอนุภาคของผงเขม่าดำที่มี

ขนาดเล็ก นอกจากนี้อาจผลิตได้จากการแตกตัว เนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซธรรมชาติ ฯลฯ ดังสมการที่ 2.6 โดยที่สารไฮโดรคาร์บอนที่ใช้จะอยู่ในสถานะแก๊ส อาจเป็นมีเทน (Methane) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน แต่ถ้าใช้อะเซทิลีน (Acetylene) จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนสูง ส่วนการสลายตัวของพวกที่มีวงแหวนอะโรมาติก ในกระบวนการเตาเผา น้ำมัน เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อนเล็กน้อย ดังนั้นจึงอาจสรุปได้ว่าพลังงานที่ใช้ในปฏิกิริยาจริงๆ จะขึ้นกับกระบวนการผลิต อุณหภูมิเฉลี่ยของปฏิกิริยาการเกิดผงคาร์บอนแบล็ค ความร้อนที่สูญเสียขณะเกิดปฏิกิริยา ปริมาณของความร้อนที่กลับคืนมาและความบริสุทธิ์ของแก๊สที่ใช้



ดังนั้น ในการใช้งานคาร์บอนแบล็คหรือเขม่าดำ จะต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมี สมบัติด้านสี ขนาดของอนุภาค พื้นที่ผิว ลักษณะทางเคมีของผิว รูปแบบและโครงสร้าง (Morphology) และความเป็นรูพรุน ซึ่งในอุตสาหกรรมพลาสติกนิยมใช้คาร์บอนแบล็คเป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสี และเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าให้กับพลาสติก

2.4.1 ชนิดของคาร์บอนแบล็ค

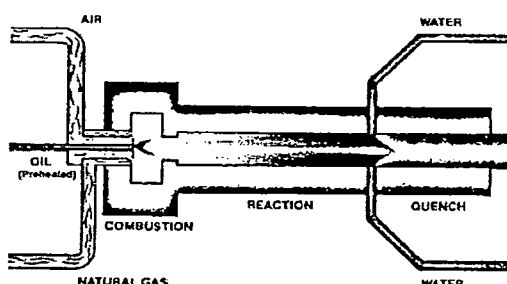
2.4.1.1 คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส (Furnace black) เป็นชนิดที่นิยมใช้กันแพร่หลายทั่วไป และมีปริมาณการใช้งานมากที่สุด คาร์บอนแบล็คชนิดนี้ผลิตได้จากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของสารไฮโดรเจน กระบวนการผลิตคาร์บอนแบล็คสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.15 เชื้อเพลิงคือ ก๊าซหรือน้ำมันเชื้อเพลิง เผาไหม้ภายใต้บรรยากาศที่มีออกซิเจนที่มากเกินไป (Excess air) เกิดเป็นอากาศร้อนหมุนวนภายใต้เตาเผาบริเวณเผาไหม้ น้ำมันวัตถุดิบนิยมใช้เป็นน้ำมันหนักที่เหลือจากกระบวนการกลั่นน้ำมัน (Refinery heavy oil) ที่มีสารอะโรมาติก (Aromatic) ปริมาณมาก จะถูกฉีดเข้าไปเกิดการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ กลายเป็นกากคาร์บอน ลักษณะเป็นก้อนคาร์บอนแบล็คปริมาณมาก ซึ่งถูกทำให้เย็นอย่างรวดเร็ว (Quench) ด้วยน้ำ คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนสจะมีโครงสร้างเป็นก้อนกลมติดกันเป็นก้อนกลมขนาดใหญ่ที่เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregates) มีโครงสร้างสูง ขนาดเล็ก ประมาณ (10-100 nm) มีปริมาณออกซิเจนต่ำ (มักจะน้อยกว่า 1%) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบนพื้นผิวเกิดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีหมู่ฟังก์ชันอะตอมออกซิเจนบางประเภท หรือ ออกซิไฮโดรคาร์บอน (Oxyhydrocarbons) ปริมาณเล็กน้อย พื้นผิวคาร์บอนแบล็คเป็นกลางหรือเป็นด่างเล็กน้อย (pH ประมาณ 8)

2.4.1.2 คาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอล (Thermal black) คาร์บอนแบล็คชนิดนี้เกิดจากการแตกตัว (Cracking) ของน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติ ภายใต้บรรยากาศที่ปราศจากออกซิเจนที่บริเวณผิวร้อนภายในเตาเผา อุณหภูมิสูง ได้เป็นคาร์บอนแบล็คที่ไม่ถูกออกซิไดซ์ คาร์บอนแบล็คชนิดนี้จะมีขนาดใหญ่ (ประมาณ 100-500 nm) ลักษณะเป็นก้อนกลม โครงสร้างน้อย ไม่มีรูพรุน และมีพื้นผิวจำเพาะที่น้อยเมื่อเทียบกับคาร์บอนแบล็คชนิดอื่นๆ

2.4.1.3 คาร์บอนแบล็คชนิดชันแนล (Channel black) ขบวนการผลิตคาร์บอนแบล็คชนิดนี้ค่อนข้างเก่าและล้าสมัย จึงไม่เป็นที่นิยมใช้ เกิดจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติที่เตาเผา (Burner) ทำให้เกิดเขม่าดำเกาะสะสมที่ผิวภายในท่อเหล็ก (Channel iron) เย็นที่ต่อยาวไปมาเป็นอนุกรม ทำให้ได้คาร์บอนแบล็คชนิดชันแนล มีพื้นผิวที่ถูกลอกออกซิไดซ์ มีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 1-3 nm) การใช้คาร์บอนแบล็คชนิดนี้จะมีผลห่วงวฏิกิริยาการเชื่อมโยงเนื่องจากมีความเป็นกรดค่อนข้างสูง

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบลักษณะของคาร์บอนแบล็คชนิดต่างๆ[41]

ลักษณะ	Furnace	Thermal	Chanel
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle Size) (nm)	10-100	100-500	1-3
พื้นที่ผิว (Surface area (N ₂)) (m ² /g)	27-145	7-11	100-1125
การดูดซับน้ำมัน (Oil absorption) (ml/g)	0.67-1.55	0.32-0.47	1.0-6.0
ปริมาณสารระเหยได้ (Volatile matter)(%)	0.3-2.8	0.1-1.0	3.5-16.0
ปริมาณเถ้า (Ash) (%)	0.1-1.0	0.2-0.5	0-0.1
ปริมาณกำมะถัน (Sulfur)(%)	0.5-1.5	10 ppm	0-0.1
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	5.0-9.5	7-9	3-6



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการผลิตเขม่าดำ ชนิดเฟอร์เนส (Furnace black)[41]

2.4.2 การแบ่งเกรดและการเรียกชื่อของคาร์บอนแบล็ค

ในอดีตได้มีการแบ่งเกรดและเรียกชื่อคาร์บอนแบล็คต่างๆ มากมาย โดยมากจะเรียกตามชนิดและความสามารถในการปรับปรุงสมบัติของยาง เช่น

Furnace black แบ่งตามขนาดอนุภาค ได้ดังนี้

- SAF (Super abrasion furnace black) มีขนาดอนุภาค 200 A°
- ISAF (Intermediate super abrasion furnace black) มีขนาดอนุภาค 240 A°
- HAF (High abrasion furnace) มีขนาดอนุภาค 300 A°
- FEF (Fast extension furnace black) มีขนาดอนุภาค 400 A°
- GPF (General purpose furnace black) มีขนาดอนุภาค 600 A°
- SRF (Semi-reinforcing furnace black) มีขนาดอนุภาค 700 A°
- SCF (Super conductive furnace black) มีขนาดอนุภาค 200 A°

ปัจจุบันมาตรฐาน ASTM D1765 ได้แบ่งเกรดคาร์บอนแบล็คตามขนาดอนุภาคเฉลี่ย (Average particle size) และระดับการออกซิเดชันบนพื้นผิว (Degree of surface oxidation) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อความเร็วในการเชื่อมโยงยาง โดยใช้อักษร N หรือ S แล้วตามด้วยเลขสามหลัก เช่น N110 N660 S330 เป็นต้น ซึ่งหลักการเรียกชื่อนี้ดังนี้

อักษรนำ N ย่อมาจาก Normal-curing เกิดการเชื่อมโยงปกติ ใช้คาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนส (Furnace black) และคาร์บอนแบล็คชนิดเทอร์มอล (Thermal black)

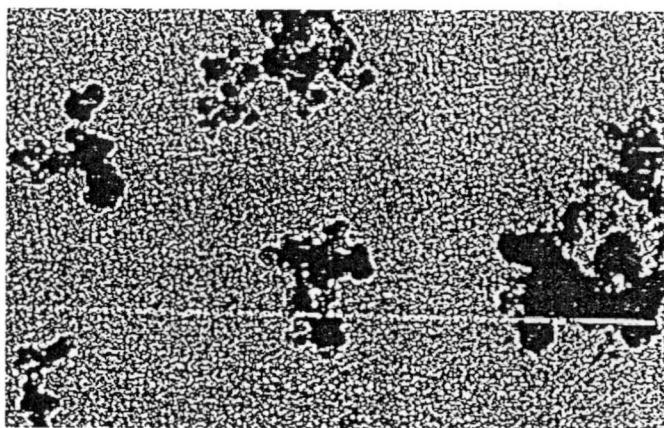
อักษร S ย่อมาจาก Slow-curing เกิดการเชื่อมโยงช้า ใช้เรียกคาร์บอนแบล็คชนิดชันแนล (Channel black) และคาร์บอนแบล็คชนิดเฟอร์เนสที่ถูกออกไซด์ (Oxidized furnace black)

ตัวเลขหลักแรก แสดงถึง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ตัวเลขน้อยใช้แทนอนุภาคขนาดเล็ก ตัวเลขมากใช้แทนอนุภาคขนาดใหญ่ แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 2.3

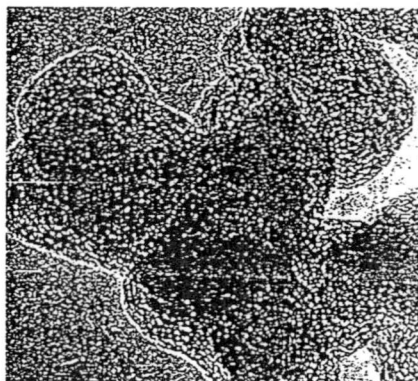
ตัวเลขหลักที่ 2 และ 3 แสดงถึง ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ตัวเลขน้อยใช้แทนคาร์บอนแบล็คโครงสร้างต่ำ ตัวเลขมากใช้แทนคาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างสูง การใช้ตัวเลขไม่มีหลักการที่แน่นอน

ตารางที่ 2.3 การจำแนกเกรดคาร์บอนแบล็คตามมาตรฐาน ASTM D1765[41]

Range of ASTM number	Average particle diameter	Old classification
900-999	201-500	MT
800-899	101-200	FT
700-799	61-100	SRF
600-699	49-60	FPF, HMF
500-599	40-48	FEF
400-499	31-39	FF
300-399	26-30	HAF,EPC
200-299	20-25	ISAF
100-199	11-19	SAF
000-099	1-10	-



รูปที่ 2.16 TEM micrograph กำลังขยายต่ำ[42]

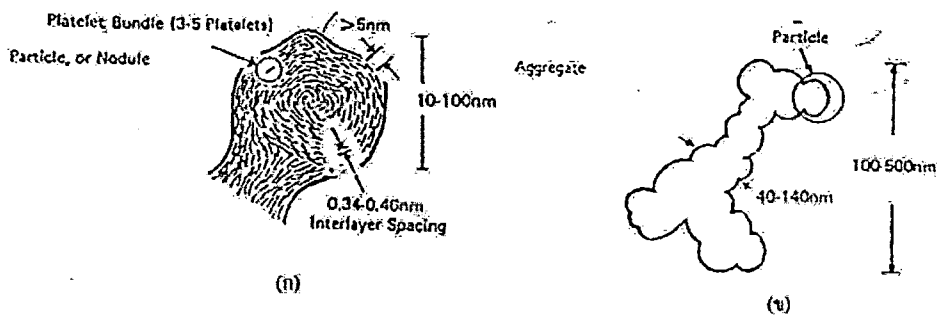


รูปที่ 2.17 TEM micrograph กำลังขยายสูงแสดงรูปร่างของคาร์บอนแบล็ค (แท่งแสดงขนาด 10nm[42])

2.4.3 สมบัติของคาร์บอนแบล็ค

2.4.3.1 โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค

จากรูปที่ 2.16 และ 2.17 แสดงสัณฐานวิทยาของคาร์บอนแบล็คที่ถ่ายด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscope, TEM) ที่กำลังขยายต่ำและกำลังขยายสูงตามลำดับ จะเห็นได้ว่าคาร์บอนแบล็คมีลักษณะเป็นกลุ่มก้อนกลมติดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ มีรูปร่างคล้ายฟององุ่น กลุ่มก้อนของอนุภาคที่ติดกันนี้เรียกว่า แอ็กกรีเกต (Aggregate) เกิดจากการหลอมติดของอนุภาคเล็กๆ ที่เรียกว่า โหนด (Nodule) ซึ่งเป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์บอนแบล็ค แต่ละโหนดเกิดจากการเรียงตัวกันหลายๆ ชั้นของแกรไฟต์ (Graphitic layer planes) เป็นผลึกเรียงเป็นวงขยายออกตามแนวรัศมี โครงสร้างผลึกของคาร์บอนแบล็ค จะไม่เป็นระเบียบเหมือนแกรไฟต์ เช่นมีระยะห่างระหว่างชั้นมากกว่า ประมาณ 3.5 \AA มีอะตอมที่หายไป อาจอยู่ในหมู่ฟังก์ชันหรืออะตอมของธาตุอื่นๆ ด้วย เช่น ออกซิเจน รูปวาดแสดงโครงสร้างของคาร์บอนแบล็คแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 (ก) ภาพวาดลักษณะของอนุภาคหรือโหนดของคาร์บอนแบล็ค และ (ข) แอ็กกรีเกตที่เกิดจากโหนดหลอมติดกัน (Fused nodules)[42]

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็ค คือ ความไม่เป็นระเบียบ หรือความเกะกะ (Bulkiness) ของแอ็กกรีเกต (Aggregates) หรือกลุ่มก้อนที่ติดกันของโหนด ดังรูปที่ 2.19 บ่งบอกถึงลักษณะการเกาะกลุ่มกันของอนุภาค โดยทั่วไปโครงสร้างของผงคาร์บอนแบล็คสามารถแบ่งตามระดับการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน ดังนี้

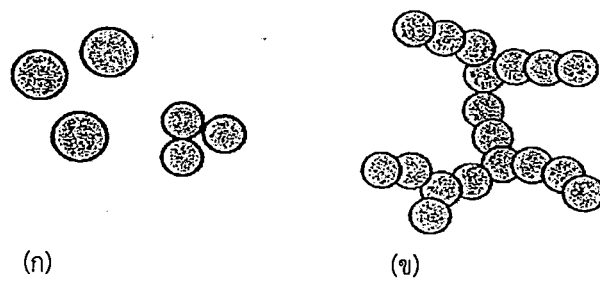
- คาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างต่ำ (Low structure) หมายถึง คาร์บอนแบล็คที่มีอนุภาคปฐมภูมิมาเกาะกันเป็นก้อนอย่างแน่นหนา ทำมีรูพรุนหรือช่องว่างภายในน้อย รูปร่างค่อนข้างกลม ไม่มีกิ่งก้านมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ก)

- คาร์บอนแบล็คโครงสร้างสูง (High structure) หมายถึง คาร์บอนแบล็คที่จำนวนโหนดต่อหนึ่งแอ็กกรีเกตมาก เกาะติดกันเป็นรูปร่างไม่เป็นระเบียบ เป็นกิ่งก้านสาขามาก เกะกะมาก จะมีความหนาแน่นต่ำ สามารถดูดซับสารเติมแต่งจำพวกน้ำมันได้มาก เช่น สารหล่อลื่น มีรูพรุนภายในมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.19(ข)

โครงสร้างของคาร์บอนแบล็คอาจแบ่งได้เป็น 2 ระดับ คือ

- โครงสร้างปฐมภูมิ (Primary structure) เป็นโครงสร้างพื้นฐานมีขนาดเล็ก เกิดจากโหนดเกาะติดกันเป็น แอ็กกรีเกต (Aggregates)

- โครงสร้างทุติยภูมิ (Secondary structure) เป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ เกิดจากโครงสร้างปฐมภูมิ ซึ่งเกิดเนื่องจากการชนกันของคาร์บอนแบล็คหรือในระหว่างการเก็บก่อนการใช้งาน แอ็กกรีเกตคาร์บอนแบล็คมักจับตัวเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ด้วยแรงทุติยภูมิ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals force) เกิดเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า แอ็กโกลเมอเรต (Agglomerates) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่เสถียร ถูกทำลายได้ง่ายด้วยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผสม โดยทั่วไปผงคาร์บอนแบล็คจะมีการกระจายตัวของทั้งจำนวนอนุภาค (ต่อ 1 แอ็กกรีเกต)



รูปที่ 2.19 (ก) คาร์บอนแบล็คโครงสร้างต่ำ และ (ข) คาร์บอนแบล็คโครงสร้างสูง[42]

2.4.3.2 ขนาดอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค จะแปรผกผันกับพื้นที่ผิวจำเพาะ กล่าวคือ สารตัวเติมของแข็งที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวจำเพาะมาก สารตัวเติมขนาดใหญ่จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อย[13] เป็นที่ทราบกันว่าสารตัวเติมชนิดเสริมแรงจะต้องมีขนาดอนุภาคเล็กประมาณเล็กกว่า 1 ไมครอน สารตัวเติมยังมีขนาดเล็กประสิทธิภาพด้านการเสริมแรงยิ่งสูงขึ้น จะทำให้ยางมีความแข็งแรงสูงขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น อย่างไรก็ตามคาร์บอนแบล็คขนาดเล็ก การผสมคาร์บอนแบล็คให้เข้ากันกับยางจะยิ่งสามารถทำได้ยากขึ้น

2.4.3.3 ลักษณะทางกายภาพของผิว การจัดตัวของอะตอมคาร์บอน ในคาร์บอนแบล็คจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ คาร์บอนที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดเรียงของอะตอมคาร์บอนเรียงตัวขนานกันอย่างมีระเบียบ ซึ่งสำหรับคาร์บอนแบล็คที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบ และถ้าคาร์บอนแบล็คยังมีขนาดอนุภาคเล็ก การจัดตัวของอะตอมคาร์บอนจะยิ่งเรียงตัวไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น

2.4.3.4 ลักษณะทางเคมีของผิว ปกติคาร์บอนแบล็ค ประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอน ประมาณ 90-95 % ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ ได้แก่ ไฮโดรเจน และออกซิเจน ที่เกาะกันด้วยพันธะโค-วาเลนต์ ไฮโดรเจนมาจากไฮโดรคาร์บอนเดิม (น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) ซึ่งจะกระจายตัวตลอดทั้งอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค ส่วนออกซิเจนได้มาจากการเผาไหม้ในขณะการผลิต ออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่บริเวณผิวของคาร์บอนแบล็ค โดยออกซิเจนที่อยู่บนผิว จะ เกิด การ จับ ตัว ใน รูป ของ หมู่ ฟีนอลิก คีโตนิก คาร์บอกซิลิก และแลคโตน เป็นผลให้ลักษณะทางเคมีของพื้นผิวคาร์บอนแบล็คจึงค่อนข้างแตกต่างกันมาก เนื่องจากพื้นผิวของคาร์บอนแบล็คประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันเคมีมากมาย และการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้บนพื้นผิวก็แตกต่างกันด้วย นอกจากนี้ในคาร์บอนแบล็คยังมีกำมะถันปนอยู่ด้วย ซึ่งปริมาณของกำมะถันขึ้นอยู่กับปริมาณของกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ในการผลิตคาร์บอนแบล็ค

2.4.3.5 ความเป็นรูพรุนของอนุภาค พื้นผิวของคาร์บอนแบล็คจะไม่เรียบ เนื่องจากในกระบวนการผลิตคาร์บอนแบล็ค ทำโดยการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันทำให้เกิดรูพรุนขึ้นในอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค การวัดระดับความเป็นรูพรุนของคาร์บอนแบล็คสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็คที่ได้จาก (1) การคำนวณจากขนาดอนุภาคที่วัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดยตั้งสมมติฐานว่าอนุภาคมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม และ (2) การดูดซับก๊าซไนโตรเจน หรือที่เรียกว่าเทคนิค BET

2.4.3.6 การนำไฟฟ้าและความร้อน คาร์บอนแบล็คสามารถนำไฟฟ้า และความร้อนได้เป็นอย่างดี ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มสูงขึ้นตามโครงสร้าง และพื้นที่ผิวของคาร์บอนแบล็คที่เพิ่มขึ้น หมู่ฟังก์ชันเคมีที่อยู่บนพื้นผิวโดยเฉพาะหมู่ที่ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบก็มีผลกับคุณสมบัติทางไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็คเช่นกัน เพราะได้มีการศึกษา พบว่าการกำจัดหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อยก็จะส่งผลให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็คลดลง

อย่างมาก

ผงเขม่าดำหรือผงคาร์บอนแบล็ค มีการนำไปใช้ผสมในพอลิเมอร์หลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ เอบีเอส พอลิเอทิลีน พอลิพรอพิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น

2.5 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatic)

ไฟฟ้าสถิตเป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นในบริเวณที่ความชื้นในอากาศต่ำมาก ซึ่งจะทำให้เกิดไฟฟ้าสถิตบนผิวหนังง่ายมาก ดังนั้นเมื่อเกิดการสัมผัสกับวัสดุประเภทตัวนำจะทำให้เกิดการถ่ายเทประจุไปยังตัวนำอย่างรวดเร็วทำให้เกิดอาการสะดุ้งได้ และนอกจากนั้นยังสามารถทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกด้วย

จากคุณลักษณะที่สำคัญของประจุไฟฟ้า การที่ปริมาณประจุไฟฟ้าขั้วบวกและขั้วลบบนผิววัสดุมีไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงดึงดูดเมื่อวัสดุทั้ง 2 ชั้นมีประจุต่างชนิดกัน หรือเกิดแรงผลักรันเมื่อวัสดุทั้ง 2 ชั้นมีประจุชนิดเดียวกัน คุณลักษณะดังกล่าวทำให้เกิดปรากฏการณ์การประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ซึ่งถ้าวัสดุ 2 ชั้นที่มีค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้าต่างกัน หรือ มีจำนวนประจุของไฟฟ้าสถิตบนพื้นผิวต่างกัน เคลื่อนที่มาสัมผัสกัน ประจุลบจะวิ่งเข้าหาประจุบวก เกิดการถ่ายเทประจุ แต่ถ้าจำนวนประจุบนพื้นผิววัสดุมีมากพอจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าที่เข้มข้น ก็สามารถเกิดการถ่ายเทประจุผ่านอากาศได้โดยที่วัสดุทั้ง 2 ชั้นไม่จำเป็นต้องสัมผัสกัน

2.5.1 ประจุไฟฟ้า

วัสดุทุกประเภทจะประกอบขึ้นมาจากอนุภาคที่เล็กที่สุด เรียกว่า อะตอม (Atom) อนุภาคหลักที่พบได้ในอะตอมทั่วไปมี 3 ชนิด คือ

โปรตอน (Proton) มีประจุไฟฟ้าเป็นขั้วบวก อยู่ในส่วนนิวเคลียสเป็นแกนกลางของอะตอม

นิวตรอน (Neutron) มีความเป็นกลางทางประจุไฟฟ้า

อิเล็กตรอน (Electron) มีประจุไฟฟ้าเป็นขั้วลบ โคจรรอบอะตอม และจะมีระดับพลังงานที่เสถียรอยู่จำนวนหนึ่งในลักษณะของวงโคจรอะตอม ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงระดับไปมาระหว่างกันได้โดยการดูดซับหรือปลดปล่อยโฟตอน หรืออนุภาคของแสง ที่สอดคล้องกับระดับพลังงานที่ต่างกัน ดังนั้นอิเล็กตรอนเหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางเคมีของธาตุ และมีอิทธิพลอย่างมากต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของอะตอม

2.5.2 อันตรายของไฟฟ้าสถิตที่มีต่ออุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ไฟฟ้าสถิตได้สร้างปัญหาให้กับภาคอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มาเป็นระยะเวลาเวลานาน จึงได้มีการพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการ เครื่องมือ และวัสดุที่ใช้ในอุตสาหกรรม เพื่อแก้ไข หรือลดความรุนแรงของความเสียหายจากการประทุของไฟฟ้าสถิตจากสิ่งแวดล้อม (เครื่องมือ, เครื่องจักร, วัสดุ หรือตัวบุคลากร) สู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ หรือหัวเขียน, หัวอ่านของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์) หรือการประทุจากชิ้นงานไปสู่สิ่งแวดล้อมที่อยู่รอบด้าน การประทุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นจะมีแรงดันไฟฟ้าสูงเพียงพอที่จะทำลายชิ้นงาน หรืออุปกรณ์ที่มีความเปราะบางต่อการประทุของไฟฟ้าสถิต (ESD sensibility) หรือทำให้ชิ้นงานและอุปกรณ์ดังกล่าวเกิดความเสียหายเป็นผลให้เสถียรภาพในการทำงานลดลง

2.5.2.1 ลักษณะความเสียหาย

1. การเสียหายทันที (Catastrophic failure)

เมื่อผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ได้รับความเสียหายจากการประทุของไฟฟ้าสถิต ผลิตภัณฑ์เหล่านั้น จะไม่สามารถทำงานได้เลย ตัวอย่างเช่น การประทุของไฟฟ้าสถิตจะทำให้วงจรภายในของอุปกรณ์ของสารกึ่งตัวนำ เกิดการละลายจนขาด หรือละลายมาเชื่อมกัน (วงจรเปิด - วงจรปิด) ทำให้ไม่สามารถทำงานได้

2. การเสียหายแบบแอบแฝง (Latent defect)

ความเสียหายในลักษณะนี้ยากที่จะตรวจสอบพบ อุปกรณ์ที่ได้รับความเสียหายจากการประทุของไฟฟ้าสถิตในลักษณะนี้จะทำงานได้ต่ำกว่ามาตรฐาน แต่ก็ยังสามารถทำงานได้ตามที่ออกแบบไว้ อย่างไรก็ตามอายุงานของ อุปกรณ์จะลดลงอย่างมาก และจะเกิดความเสียหายในไม่ช้าเมื่ออุปกรณ์นั้นถูกประกอบเข้าเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จ

2.5.2.2 ปราบกฏการณ์ ESD แบบพื้นฐานและสาเหตุที่ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เสียหาย

ความเสียหายจาก ESD เกิดจาก

1. การประทุของประจุไฟฟ้าสถิตสู่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เมื่อวัตถุที่เป็นตัวนำ เช่น เครื่องมือที่เป็นโลหะ เกิดประจุ แล้วประทุใส่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไวต่อการเสียหายจากไฟฟ้าสถิต ซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า ESDS (Electrostatic discharge sensitive)

2. การประทุไฟฟ้าสถิตจากอุปกรณ์

อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีโอกาสที่จะเสียหายมากขึ้น เมื่อมีการประกอบแบบระบบอัตโนมัติ ซึ่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จะมีประจุเพิ่มขึ้น โดยอุปกรณ์นั้นวิ่งหรือไถลบนรางของการผลิตที่เป็นแบบอัตโนมัติ และเมื่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ถูกส่งไปพบพื้นผิววางหรือภาชนะอื่นที่เป็นตัวนำไฟฟ้า การประทุของประจุจะเกิดอย่างรวดเร็วจากอุปกรณ์นั้นสู่วัสดุที่เป็นโลหะ เหตุการณ์ลักษณะนี้เรียกว่า CDM (Charged device model)

3. การประทุอันเกิดจากการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อไรก็ตามที่วัตถุหนึ่งเกิดประจุไฟฟ้าสถิตขึ้นก็จะมีสนามไฟฟ้าสถิตเกิดมาพร้อมกับประจุเหล่านั้น และถ้ามีอุปกรณ์ที่เป็น ESDS อยู่ใกล้สนามไฟฟ้าสถิตนั้น จะทำให้เกิดการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุขึ้นบนอุปกรณ์ดังกล่าว และหากบังเอิญว่ามีกราวด์อุปกรณ์ชิ้นนั้นในขณะที่ยังอยู่ภายใต้อิทธิพลของประจุไฟฟ้าสถิต การเคลื่อนย้ายของประจุจากอุปกรณ์นั้นก็จะเกิดขึ้น

2.5.3 สาเหตุของการเกิดไฟฟ้าสถิต

โดยปกติวัสดุต่างๆ จะมีคุณลักษณะที่เป็นกลางทางไฟฟ้า คือ มีจำนวนโปรตรอน และอิเล็กตรอนเท่ากัน สาเหตุที่วัสดุเหล่านั้นจะมีคุณลักษณะทางไฟฟ้าเปลี่ยนไปสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายๆ สาเหตุ ซึ่งโดยทั่วไปจะแบ่งสาเหตุหลักได้ 4 ประการ คือ

2.5.3.1 ไทโรโบอิเล็กทริกชาร์จ (Triboelectric charge) หรือ ไทโรโบชาร์จ (Tribocharge)

คือ ไฟฟ้าสถิตที่มีสาเหตุมาจากการขัดถู หรือสัมผัสแล้วแยกจากกันระหว่างวัสดุ 2 ชนิด เหตุการณ์เหล่านี้จะเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างวัสดุทั้งสอง วัสดุใดจะสูญเสียอิเล็กตรอนหรือจะได้รับอิเล็กตรอนมาเพิ่มขึ้นขึ้นอยู่กับธรรมชาติของวัสดุทั้งสอง วัสดุที่สูญเสียอิเล็กตรอนก็จะมีประจุบวก (เพราะมีประจุบวกมากกว่าประจุลบ) วัสดุที่ได้รับอิเล็กตรอนมาเพิ่มก็จะถือเป็นวัสดุประเภทประจุลบ

ประจุไฟฟ้าสถิตมีหน่วยเป็นคูลอมป์ (Coulomb) แทนด้วย "q"

ค่าประจุไฟฟ้าสถิตมีความสัมพันธ์กับค่าความจุ (Capacitance) ของวัสดุ แทนด้วย "C"

ค่าแรงดันไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นบนวัสดุ แทนด้วย "V" สามารถเขียนในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้ดังสมการ

$$q = CV \quad (2.7)$$

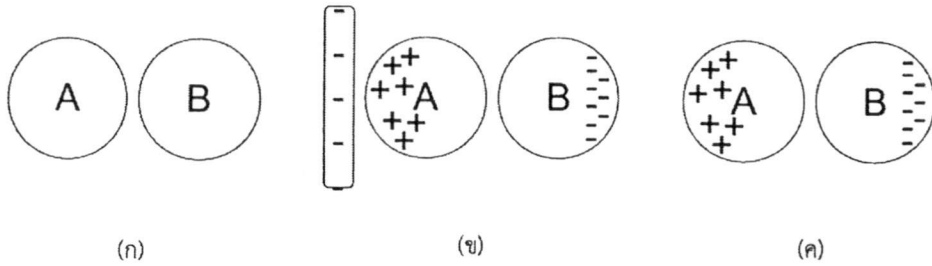
แต่ในทางอุตสาหกรรมจะวัดไฟฟ้าสถิตในรูปของค่าแรงดันไฟฟ้า ที่มีค่า C คงที่ มีหน่วยเป็นโวลต์เดจ (Voltage)

ชนิดของวัสดุทั้งสองที่เกิดการสัมผัสและแยกออก หรือการขีดถู มีผลคือ วัสดุตัวที่อยู่บนกว่า ดังแสดงในตารางที่ 2.4 จะมีประจุบวก ตัวที่อยู่ต่ำกว่าจะเป็นประจุลบ วัสดุในตารางยังอยู่ห่างกันมากในตาราง ก็จะทำให้ประจุมาก ถ้าอยู่ใกล้กันในตารางจะให้ประจุน้อย

2.5.3.2 การสะสมประจุไฟฟ้าที่เกิดโดยการเหนี่ยวนำ (Charging by induction) คือ ไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นมาเนื่องจากการเหนี่ยวนำประจุ เมื่อวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กับวัสดุที่เป็นตัวนำ จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุ โดยไม่มีการสัมผัสกันระหว่างวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 สังเกตที่วัสดุทรงกลม A และ B เป็นวัสดุตัวนำที่เป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ สนามไฟฟ้าจากแหล่งสะสมประจุจะเหนี่ยวนำประจุของวัสดุทำให้เกิดการแยกขั้ว โดยประจุบวกจะยังคงอยู่ที่วัสดุ A ขณะที่ประจุลบจะวิ่งไปยังวัสดุ B ทำให้วัสดุทั้ง 2 แสดงคุณสมบัติเป็นประจุบวก และประจุลบ

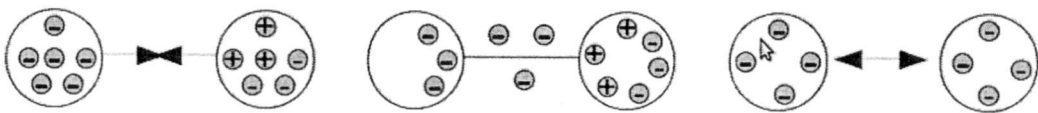
ตารางที่ 2.4 ชนิดของอนุกรมไทรโบอิเล็กทริก[43]

+	Acetate
	Glass
	Nylon
	Wool
	Lead
	Aluminum
-	Paper
	COTTON
	Wood
	Steel
	Nickel
	Copper
	Rubber
	Polyester
	PVC
	Silicon
	Teflon



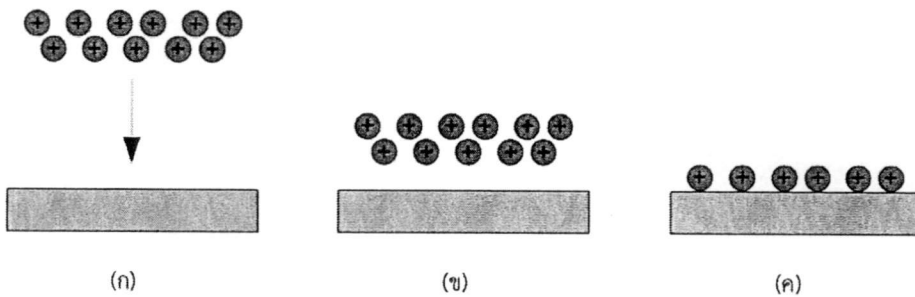
รูปที่ 2.20 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากกาสะสมประจุไฟฟ้าที่เกิดจากการเหนี่ยวนำ[43]

2.5.3.3 การสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุตัวนำโดยการสัมผัส (Charging conductor by contact) คือ การเกิดประจุไฟฟ้าสถิตเนื่องจากการนำประจุ เป็นการถ่ายเทจากวัสดุที่เป็นแหล่งสะสมประจุไปยังวัสดุที่เป็นตัวนำ เมื่อวัสดุทั้ง 2 มาสัมผัสกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 แหล่งสะสมประจุ A มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ขณะที่วัสดุ B เป็นตัวนำ มีค่าความเป็นกลางทางไฟฟ้า เมื่อทั้ง 2 มาสัมผัสกัน ประจุลบจากวัสดุ A จะเกิดการถ่ายเทไปยังประจุ B และไปจับตัวกับประจุบวกจนหมด เมื่อแยกวัสดุทั้ง 2 ออกจากกันอย่างรวดเร็ว จะทำให้วัสดุ B มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ เช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.21 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุตัวนำโดยการสัมผัส[43]

2.5.3.4 การสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวน (Charging insulator) คือ ไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น เมื่อประจุถ่ายเทไปยังวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวน ประจุไฟฟ้าจะไม่สามารถเคลื่อนไหวยบนพื้นผิวฉนวนเนื่องจากมีค่าความต้านทานสูง ประจุไฟฟ้าจึงเกิดการสะสมบนพื้นผิวฉนวนของวัสดุนั้น



รูปที่ 2.22 การเกิดไฟฟ้าสถิตจากการสะสมประจุไฟฟ้าของวัสดุฉนวน[43]

2.5.4 ชนิดและคุณสมบัติของวัสดุในงานควบคุมการประทุของไฟฟ้าสถิต

วัสดุแต่ละชนิดจะมีความนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นคุณสมบัติด้านไฟฟ้าสถิตที่แตกต่างกัน วัสดุที่อยู่ในชีวิตประจำวัน โดยมากจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามความสามารถในการนำไฟฟ้า คือ ตัวนำ (Conductive) และฉนวน (Insulator)

แต่ในงานด้านไฟฟ้าสถิตนั้นไม่ว่าวัสดุประเภทตัวนำ หรือฉนวนก็สามารถสร้างปัญหาได้ไม่แตกต่างกัน ดังนั้นการแบ่งประเภทของวัสดุในงานด้านไฟฟ้าสถิตสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.5.4.1 ฉนวนไฟฟ้า (Insulator) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการกันไม่ให้ประจุไฟฟ้า ไหลไปบนพื้นผิว หรือไหลทะลุผ่าน เพราะคุณสมบัติของวัสดุประเภทนี้จะมีค่าความต้านทานสูง ด้วยคุณสมบัติเช่นนี้ เมื่อเกิดประจุไฟฟ้าบนวัสดุที่เป็นฉนวน ทำให้ประจุไฟฟ้าไม่สามารถไหลไปบนพื้นผิว หรือไหลทะลุผ่านวัสดุไปได้ เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าบนพื้นผิว บางจุดก็มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก บางจุดก็มีประจุไฟฟ้าเป็นลบในเวลาเดียวกัน เมื่อเกิดการสะสมประจุมากขึ้นเรื่อยๆ สามารถทำให้ประจุไฟฟ้าที่เป็นลบไหลเข้าไปรวมกับประจุไฟฟ้าบวก เพื่อเกิดการรวมกันเป็นกลาง แต่เนื่องจากวัสดุประเภทนี้มีความต้านทานสูงจึงเป็นการยากที่จะไหลมารวมกัน ประจุบนวัสดุที่เป็นฉนวนจึงยังคงอยู่เป็นระยะเวลานาน ค่าความต้านทานบนพื้นผิวของวัสดุประเภทนี้จะมีค่ามากกว่า 10^{11} โอห์ม ค่าความต้านทานเชิงปริมาตรของวัสดุประเภทนี้จะมีค่ามากกว่า 10^{11} โอห์ม-เซนติเมตร

2.5.4.2 ตัวนำไฟฟ้า (Conductive) คือ วัสดุที่มีคุณสมบัติในการยินยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านพื้นผิว หรือทะลุผ่านไปได้ง่าย เนื่องจากวัสดุประเภทนี้จะมีค่าความต้านทานต่ำ เมื่อมีประจุไฟฟ้าไหลผ่าน ประจุไฟฟ้าจะกระจายตัวไปทั่วพื้นผิวของวัสดุตัวนำ เมื่อมีวัสดุอื่นมาสัมผัสกับตัวนำประจุไฟฟ้าก็จะถูกถ่ายเทไปยังวัสดุนั้นอย่างง่ายดาย ถ้าวัสดุประเภทตัวนำมีการกรวด ประจุไฟฟ้าก็จะไหลไปสู่กรวดได้โดยง่าย ทำให้ตัวนำนั้นมีคุณสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า (ไม่มีประจุไฟฟ้าทั้งบวก และลบบนตัวนำ) ค่าความต้านทานบนพื้นผิวของวัสดุประเภทนี้จะมีค่าต่ำกว่า 10^4 โอห์ม และค่าความต้านทานเชิงปริมาตรของวัสดุประเภทนี้จะมีค่ามากกว่า 10^4 โอห์ม-เซนติเมตร

2.5.4.3 ตัวกระจายไฟฟ้าสถิต (Static dissipative) คือ วัสดุที่มีค่าความต้านทานระหว่างตัวนำไฟฟ้า และฉนวนไฟฟ้า กล่าวคือ มีสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) สูงกว่า 10^4 ohm/square แต่ต่ำกว่า 10^{11} ohm/square คุณสมบัติของวัสดุประเภทนี้ คือยอมให้ประจุไฟฟ้าไหลผ่านพื้นผิว หรือวิ่งทะลุตัวมันได้ แต่ประจุไฟฟ้าต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ช้ากว่าตัวนำไฟฟ้า จึงมีการนำมาใช้ในงานด้านไฟฟ้าสถิตอย่างมากมาย เพื่อป้องกันการเกิดการประทุของไฟฟ้าสถิตอย่างรวดเร็ว ที่เป็นต้นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อชิ้นงาน หรือผลิตภัณฑ์

2.6 สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical properties)

สมบัติทางไฟฟ้า เป็นสมบัติที่สำคัญในการเลือกวัสดุคอมโพสิตที่จะนำมาใช้งานด้านวัสดุนำไฟฟ้าต่างๆ

2.6.1 สภาพนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ)

เป็นการวัดความสามารถในการลำเลียงประจุภายในวัสดุซึ่งมีหน่วยในระบบเอสไอ (SI unit) เป็นซีเมนต่อตารางเมตร หรือซีเมนต่อตารางเซนติเมตร (S/m^2 หรือ S/cm^2) หรือเป็นสัดส่วนระหว่างความหนาแน่นของกระแส (Current density, j) ต่อค่าความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field strength, E) ดังสมการที่ 2.8

$$\sigma = \frac{j}{E} \quad (2.8)$$

ปริมาณการไหลของไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และความต่างศักย์ (V) มีความสัมพันธ์กันโดยกฎของโอห์ม ดังสมการที่ 2.9

$$V = \frac{I}{R} \quad (2.9)$$

โดยที่ V คือ ความต่างศักย์ มีหน่วยเป็น volts

I คือ ปริมาณการไหลของไฟฟ้า มีหน่วยเป็น amperes ($1A = C/s$)

R คือ ความต้านทาน มีหน่วยเป็น ohm (Ω)

ค่า R ขึ้นอยู่กับรูปทรงของชิ้นตัวอย่าง โดย R จะเพิ่มขึ้นตามความยาว (l) และลดลงเป็นสัดส่วนกับพื้นที่หน้าตัด (A)

สมบัติทางไฟฟ้าที่ขึ้นกับลักษณะของวัสดุ โดยเป็นอิสระจากรูปทรงของชิ้นตัวอย่าง เรียกว่า สภาพความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity, ρ) ซึ่งคำนวณได้จากค่าความต้านทาน (Resistance, R) ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (2.10)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Ω/cm)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าเชิงปริมาตร (Volum resistance) หน่วย โอห์ม

l คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (cm)

A คือ ขนาดพื้นที่ของอิเล็กโทรด (cm^2) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11

$$A = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad (2.11)$$

และเมื่อพิจารณาที่พื้นผิว จะได้สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity, σ) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.12

$$\sigma = \frac{RP}{g} \quad (2.12)$$

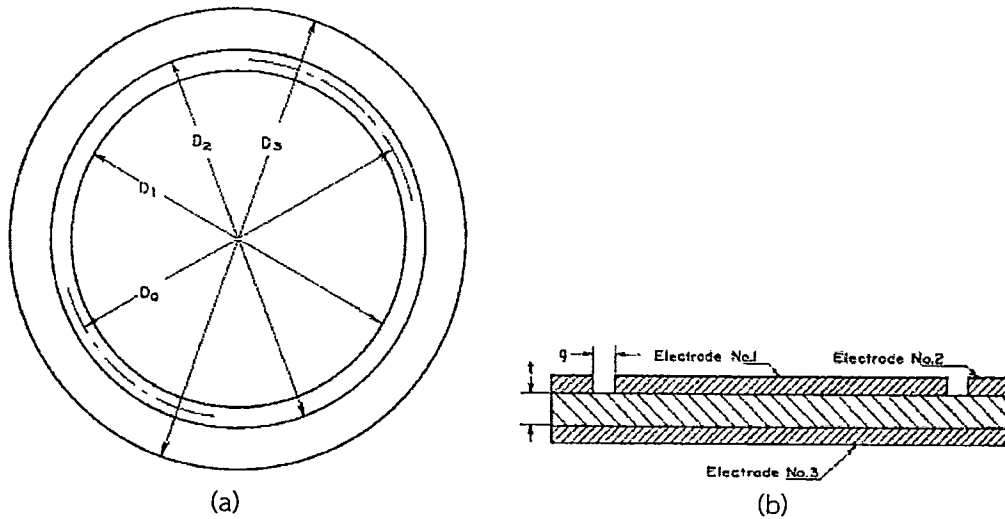
เมื่อ σ คือ สภาพความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ($\Omega/square$)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistance) หน่วย โอห์ม

g คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm) ดังรูปที่ 2.23(b)

P คือ ขนาดเส้นรอบวงของอิเล็กโทรด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.13

$$P = \pi D_0 \quad (2.13)$$



รูปที่ 2.23 (a) ลักษณะของอิเล็กโทรดที่เป็นวงกลม โดยที่ $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}$ และ (b) ลักษณะการวาง
ชั้นงานทดสอบกับอิเล็กโทรด[44]

สมบัติของวัสดุที่มีประโยชน์อีกอย่างคือ ส่วนกลับของ resistivity เรียกว่า conductivity, σ สามารถ
คำนวณได้จากสมการที่ 2.14

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.14)$$

ซึ่งมีหน่วยเป็น $(\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ หรือ S/cm โดย conductivity จะเป็นตัวบอกค่าที่ดีที่สุดในการ
การแบ่งประเภททางไฟฟ้าของวัสดุ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 ซึ่งให้ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)
ของวัสดุวิศวกรรมประเภทต่างๆ

ตารางที่ 2.5 ค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของวัสดุประเภทต่างๆ

Conducting Range	Material	Conductivity, σ (S/cm)
Conductors	Aluminium (annealed)	35.36×10^6
	Copper (annealed standard)	58.00×10^6
	Iron	10.30×10^6
	Steel (wire)	$5.71-9.35 \times 10^6$
Semiconductors	Germanium (high purity)	2.00
	Silicon (high purity)	0.40×10^{-3}
	Lead Sulfide (high purity)	38.40
Insulators	Aluminium oxide	$10^{-10}-10^{-12}$
	Borosilicate glass	10^{-13}
	Polyethylene	$10^{-13}-10^{-15}$

2.6.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ_r)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลต จากรูปที่ 2.23 จะเกิดประจุที่บริเวณขอบหรือผิวของสารประจุจะถูกเหนี่ยวนำทำให้เกิดสนามไฟฟ้า และจะหายไปเมื่อสนามไฟฟ้าหมด สารที่แสดงพฤติกรรมเช่นนี้เรียกว่า สารไดอิเล็กตริก เมื่อพิจารณาจากรูป 2.24 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นประกอบด้วยแผ่นโลหะพื้นที่ A ระยะห่าง d เมื่อให้ความต่างศักย์ (V) กับแผ่นโลหะ โดยที่แผ่นโลหะหนึ่งมีประจุ +Q และอีกประจุหนึ่งมีประจุ -Q ค่าประจุ Q มีสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า V ดังนี้

$$Q = CV \quad (2.15)$$

$$\text{หรือ} \quad C = Q/V \quad \text{ฟารัด} \quad (2.16)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อโวลต์ หรือ ฟารัด เนื่องจากประจุ Q กระจายได้อย่างสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีความสม่ำเสมอ ประจุ Q จึงมีค่าดังนี้

$$Q = \rho_s A = DA = \epsilon EA \quad (2.17)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ (ตารางเมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นของประจุบนพื้นผิวโลหะ (คูลอมบ์ต่อตารางเมตร)

D คือ ความหนาแน่นของแรงดึงดูดไฟฟ้า (คูลอมบ์ต่อตารางเมตร)

E คือ สนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อตารางเมตร)

ϵ คือ สภาพยอมของตัวกลาง (ฟารัดต่อเมตร)

เนื่องจาก $V = Eh = Ed$ จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจูดังนี้

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{DA}{Ed} = \frac{\epsilon EA}{Ed} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.18)$$

หรือเขียนในรูปทั่วไปได้

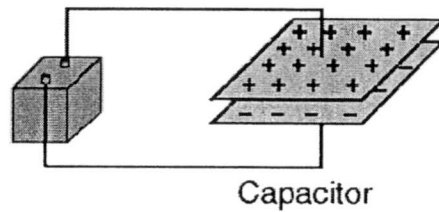
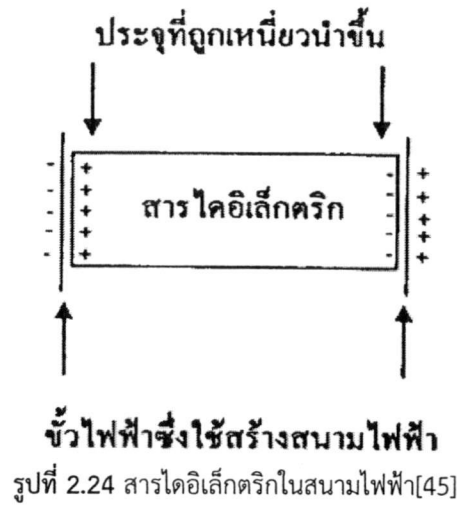
$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.19)$$

และเมื่อช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองถูกแทนที่ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ค่าความจุทางไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก จะมีค่าดังสมการที่ 2.20 เนื่องจาก $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.20)$$

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ (Dielectric permittivity)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่สภาพยอมของอากาศ (Permittivity of free space) เท่ากับ 8.8542×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร



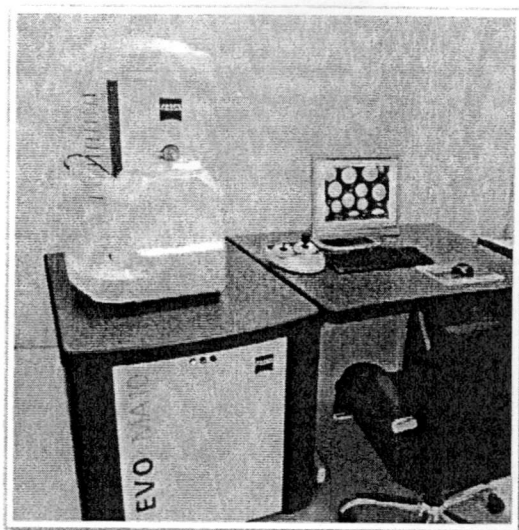
A battery will transport charge from one plate to the other until the voltage produced by the charge buildup is equal to the battery voltage.

รูปที่ 2.25 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน[45]

2.7 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเป็นการประยุกต์ใช้งานอิเล็กตรอนในช่วงคลื่นแสง และใช้เลนส์สนามแม่เหล็กไฟฟ้ามาแทนเลนส์กระจก และมีตัวตรวจวัดที่มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้เป็นภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลคือได้ภาพของวัตถุ ดังแสดงในรูปที่ 2.25

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ช่วยสายตาประเภทกล้องจุลทรรศน์ ที่ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบให้ได้ข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็น ได้ด้วยตาเปล่าหรือบันทึกภาพบนแผ่นฟิล์มได้



รูปที่ 2.26 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด[46]

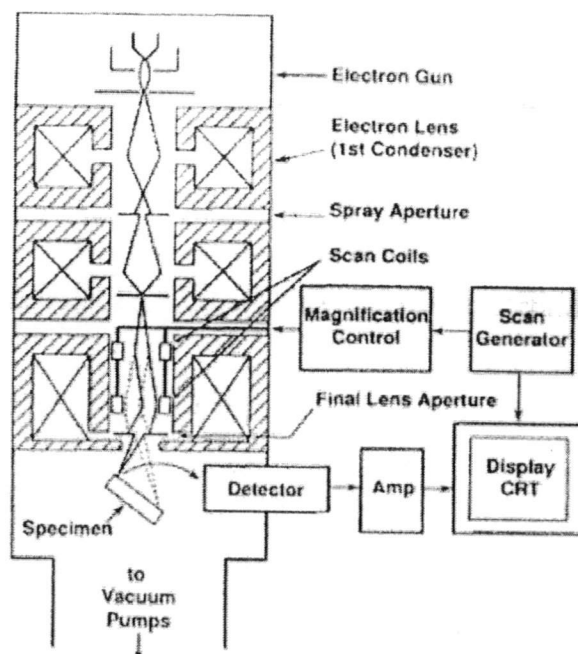
การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)

ส่วนประกอบหลัก และหลักการทำงานของ SEM แสดงดังรูปที่ 2.26 ซึ่งส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating voltage) ในช่วง 0-30 kV (ซึ่งบางเครื่องทดสอบอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) 2 ชุดหรือมากกว่า และปริมาณอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่างๆกัน ตามลักษณะการใช้งาน

โดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เรียกว่า เลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) มีผลต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่รวมกลุ่มอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้กลายเป็นลำอิเล็กตรอน ที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่ในการโฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ โดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน โดย SEM จะมีอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่างๆ แล้วจะส่งไปประมวลผล เพื่อให้เป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ซึ่งตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่

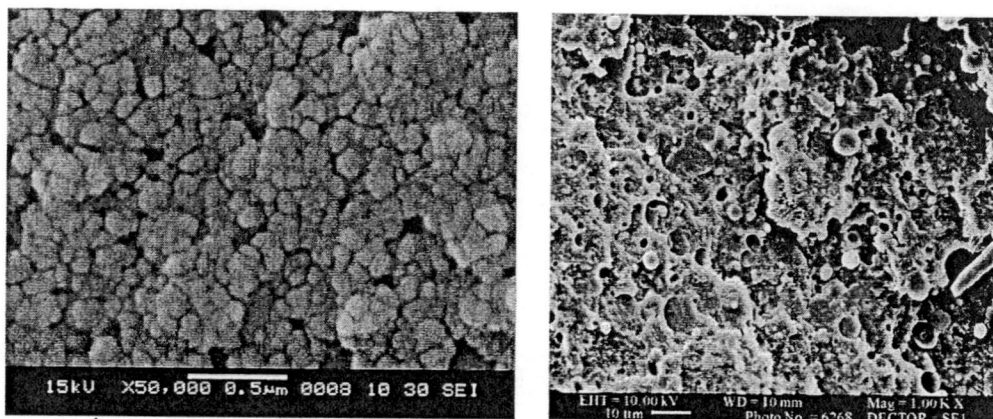
อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons, SE) สัญญาณชนิดนี้จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ซึ่งภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่า ภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron image, SEI)

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back scattered electrons, BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว



รูปที่ 2.27 ส่วนประกอบหลัก และการทำงานของ SEM[47]

นอกจากสัญญาณเหล่านี้ ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave), โอเจอิเล็กทรอนิกส์ (Auger electron) เป็นต้น โดยที่สัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จาก SEM แสดงดังรูปที่ 2.28

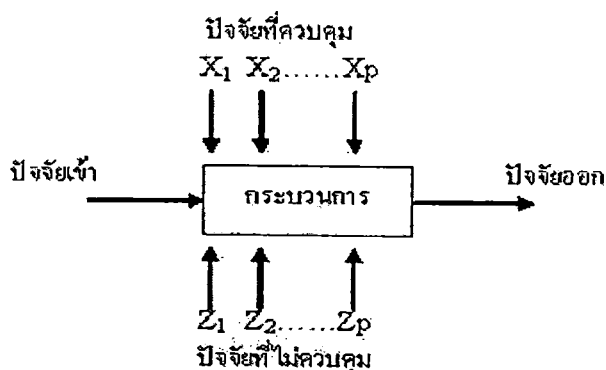


รูปที่ 2.28 ตัวอย่างภาพถ่ายที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM)[1] [48]

2.8 การออกแบบการทดลอง (Design of experiment, DOE)

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical design of experiment) หมายถึง กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสม ที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ ซึ่งจะทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้ ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลอง ก็คือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

โดยส่วนใหญ่การทดลองถูกนำไปใช้ เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งกระบวนการและระบบสามารถแทนด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.29 แบบจำลองของกระบวนการ[49]

กระบวนการ คือ การรวมเอาคนงาน เครื่องจักร วิธีการ และทรัพยากรอื่นๆเข้าด้วยกัน เพื่อเปลี่ยน อินพุต (เช่น วัตถุดิบ) ไปสู่เอาต์พุตที่มีผลตอบออกมาในรูปแบบหนึ่งหรือมากกว่า ซึ่งสามารถเห็นได้ ตัวแปรของ กระบวนการบางชนิดเป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ แทนด้วย $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$ ในขณะที่ตัวแปรบางตัวเป็นตัวแปร ที่ไม่สามารถควบคุมได้ แทนด้วย $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของการทดลองอาจจะเกี่ยวข้องกับ

1. หาตัวแปรที่มีผลมากที่สุดต่อผลตอบ y
2. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ y อยู่ที่ค่าที่ต้องการ
3. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ y มีค่าน้อยสุด
4. หาวิธีการตั้งค่าของ x ที่มีผลต่อค่าผลตอบ y เพื่อให้ผลของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ $z_1, z_2, z_3, \dots, z_p$ มีค่าน้อยที่สุด

2.8.1 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

2.8.1.1 เรพลิคชัน (Replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ไม่สามารถ ควบคุมได้ออกไป มีคุณสมบัติที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. ทำให้สามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ เพื่อเป็นการวัดว่าความแตกต่าง สำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่
2. เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้มาจากผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองให้มีความมั่นใจมาก ขึ้น

2.8.1.2 แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับ ในการทดลองแต่ละครั้งเป็นตัวแปรแบบสุ่ม (Random) ที่มีการกระจายแบบอิสระ ถือเป็นพื้นฐานหลักสำหรับการ ใช้วิธีการเชิงสถิติในการออกแบบการทดลอง การทำแรนดอมไมเซชันจะเป็นตัวช่วยในการลดผลของปัจจัยภายนอก ที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้ แบ่งออกเป็น 3 วิธี ดังนี้

1. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete randomization)
2. การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple randomization)
3. การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete randomization within block)

2.8.1.3 บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลองการ บล็อก คือ การจัดกลุ่มเพื่อทำการเก็บข้อมูลในหน่วยทดลองที่มีลักษณะเหมือนกันหรือมีคุณสมบัติเหมือนกันให้อยู่ใน กลุ่มเดียวกัน โดยในหน่วยทดลองหรือบล็อกเดียวกันจะมีลักษณะใกล้เคียงกันมากที่สุด ในขณะที่หน่วยทดลองที่ ต่างบล็อกกันก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกันมากที่สุด การทำบล็อกกิงเป็นการขยายขอบเขตการทดลองกรณีที่มีสถานที่ใน

การทดลองแต่ละหน่วยห่างไกลกัน และเป็นการลดระยะเวลาในการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองในกรณีที่มี การตั้งค่าที่ใช้ระยะเวลานาน แบ่งเป็น 2 วิธี ดังนี้

1. บล็อกสมบูรณ์ (Complete block) คือ แต่ละบล็อกมีจำนวนสิ่งทดลองเท่ากัน
2. บล็อกไม่สมบูรณ์ (Incomplete block) คือ แต่ละบล็อกมีจำนวนสิ่งทดลองไม่เท่ากัน

2.8.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

2.8.2.1 ทำความเข้าใจถึงปัญหา เป็นขั้นตอนที่ศึกษาวัตถุประสงค์ของการทดลอง หาข้อมูลของค่าอินพุตที่เกี่ยวข้องกับผลตอบที่ต้องการศึกษาจากบุคคลหรือหน่วยงานต่างๆ เช่น แผนกประกันคุณภาพ แผนกการตลาด แผนกการผลิต เป็นต้น

2.8.2.2 เลือกปัจจัยระดับและขอบเขต ในการทดลองผู้ทำการทดลองจะต้องเลือกปัจจัยที่จะนำมาเปลี่ยนแปลงค่าในระหว่างทำการทดลอง ซึ่งปัจจัยดังกล่าวจะมีผลต่อค่าเอาท์พุตที่ได้ นอกจากนั้นยังต้องมีการกำหนดระดับของปัจจัยที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง และเมื่อวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกรองปัจจัย (Screening) ดังนั้นการกำหนดขอบเขตของค่าปัจจัยจึงควรให้มีความกว้างมากๆ

2.8.2.3 เลือกตัวแปรตอบสนอง (Response variables) เป็นการเลือกตัวแปรผลตอบของกระบวนการที่ศึกษา เนื่องจากในกระบวนการหนึ่งๆเป็นไปได้ว่า จะมีค่าผลตอบหลายตัว ดังนั้นจึงควรที่จะเลือกให้ได้ว่าจะศึกษาผลตอบไหน และจะวัดค่าผลตอบที่ได้จากการทดลองอย่างไร

2.8.2.4 เลือกการออกแบบการทดลอง ในขั้นตอนนี้จะเกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรพลีเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล และการเลือกใช้วิธีบล็อกหรือใช้การแรนดอมไมเซชัน โดยในการเลือกการออกแบบ ควรคำนึงถึงวัตถุประสงค์ในการทดลองด้วย

2.8.2.5 ทำการทดลอง

2.8.2.6 วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เป็นการนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อดูว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นนั้นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

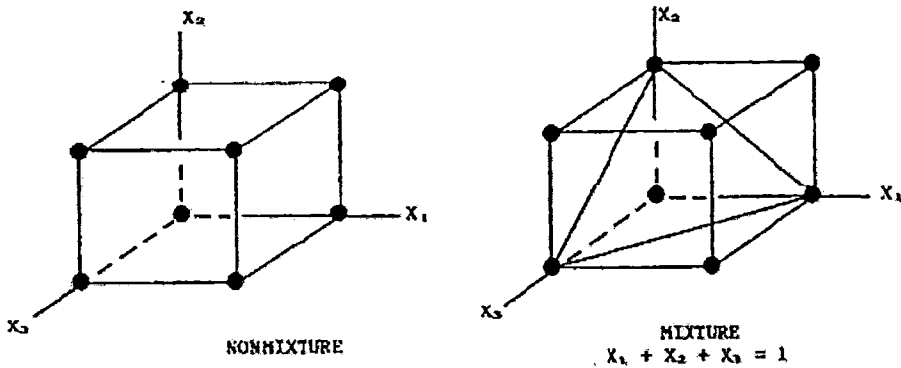
2.8.2.7 สรุปและข้อเสนอแนะ

2.8.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม (Mixture design)

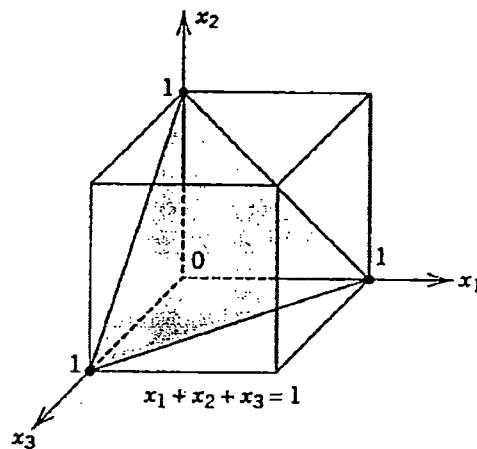
การออกแบบการทดลองแบบผสม คือ การทดลองวิเคราะห์ค่าผลตอบที่เป็นฟังก์ชันของเปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบ (Components) โดยมีวัตถุประสงค์ คือ เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณ ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปที่ทำให้ผลตอบมีค่าที่ดีที่สุด หรือเป็นไปตามที่ผู้ทดลองต้องการ

การออกแบบการทดลองแบบผสมเป็นการออกแบบพื้นผิวตอบประเภทหนึ่งที่มีข้อจำกัด กล่าวคือ ระดับของปัจจัยหรือส่วนประกอบจะไม่เป็นอิสระต่อกัน เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่ Mixture ที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระจากกัน ตัวอย่างดังรูปที่ 2.30 โดยยึดหลักว่า ผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 ส่วน หรือ 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ ตัวอย่างของข้อจำกัดแสดงดังรูปที่ 2.31 เป็นการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมสำหรับสามส่วนผสม ซึ่งแต่ละส่วนผสมจะถูกจำกัดด้วยขอบเขต 0 และ 1 สำหรับแต่ละจุดยอดของสามเหลี่ยม จะเรียกว่า เป็นส่วนผสมบริสุทธิ์ (Pure blend) นั่นคือส่วนผสมที่มี 100 เปอร์เซ็นต์ของส่วนประกอบนั้นเพียงอย่างเดียว

สำหรับบริเวณของการทดลองที่ถูกจำกัด สำหรับ 3 ส่วนผสม สามารถเขียนให้อยู่บนกราฟแกนสามเส้น ดังแสดงในรูปที่ 2.32 โดยแต่ละด้านของทั้งสามด้านจะไม่มีส่วนผสมของทั้งสามส่วนประกอบนี้ และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ถึง 100 เปอร์เซ็นต์ (ชื่อของส่วนประกอบจะถูกเขียนอยู่ที่จุดยอดที่อยู่ตรงกันข้าม)



รูปที่ 2.30 ลักษณะสิ่งทดลองที่เป็นแบบ Non-mixture และ Mixture[50]



รูปที่ 2.31 ช่องว่างที่ถูกจำกัดของปัจจัยของส่วนผสมที่มี 3 ส่วนผสม[50]

การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมมีแบบแผนการออกแบบย่อยแบ่งได้เป็น 4 แบบ ดังนี้

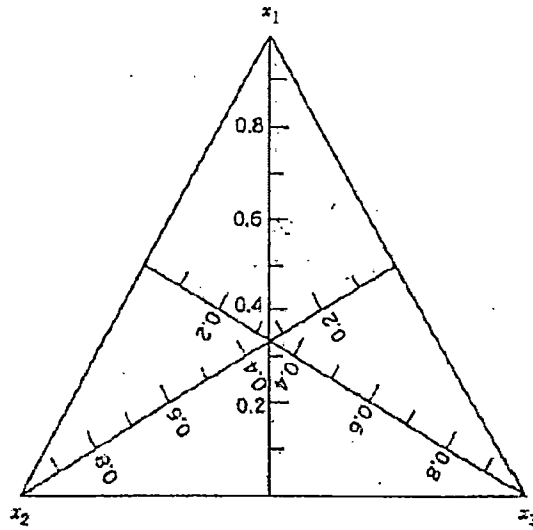
1. การออกแบบแบบเชฟเฟอ์ซิมเพล็กซ์แลตทิซ (Scheffe' simplex-lattice)

พิกัด (Coordinate) ซึ่งเป็นส่วนประกอบต่างๆ ของการทดลอง โดยแต่ละตัวแปรสามารถคำนวณระดับ ได้ดังสมการที่ 2.21

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \quad (2.21)$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, q$

$m =$ สัดส่วนของแต่ละปัจจัยจาก 0-1 (0-100 เปอร์เซ็นต์)



รูปที่ 2.32 ระบบโคออร์ดิเนตแทนสามเส้น[50]

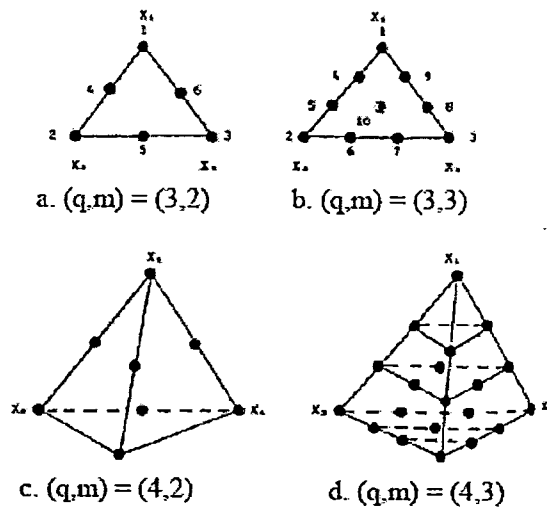
สำหรับในกรณีที่มีจำนวนส่วนผสม (q) เท่ากับ 3 หรือมี 3 ปัจจัย เป็นตัวอย่างที่นิยมใช้แสดงให้เห็นถึงการออกแบบดังกล่าว หาก $m = 3$ พิกัดที่ได้เป็นส่วนประกอบของ x_1, x_2 และ x_3 จะเป็น 0, 1/3, และ 2/3 ตามลำดับ จำนวนของจุดในการทดลองทั้งหมดคำนวณจาก

$$M = \frac{(m+q-1)!}{m!(q-1)!}$$

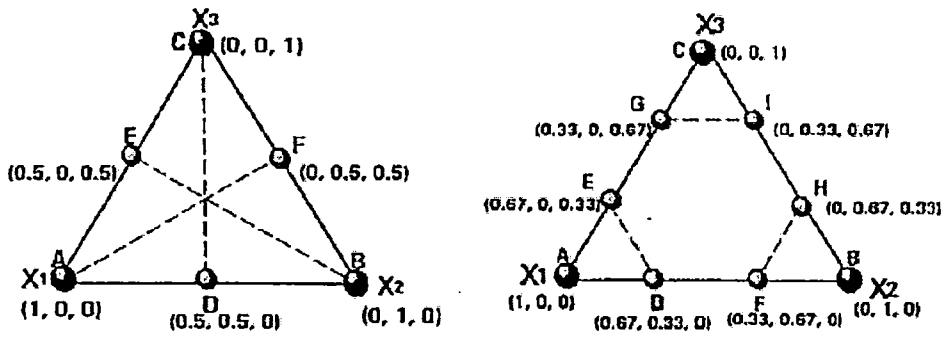
$$= \frac{q(q+1) \dots (q+m-1)}{(1)(2) \dots (m)}$$

ดังนั้น $M = \frac{(3 \times 4 \times 5)}{(1 \times 2 \times 3)} = 10$

ซึ่งตัวอย่างของสิ่งทดลองที่มีจำนวน q และ m ต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.33 และ 2.34



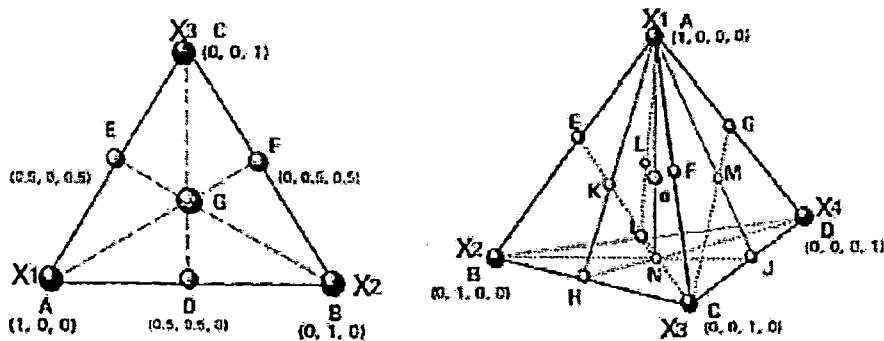
รูปที่ 2.33 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเซฟเฟอิมเพล็กซ์แล็คทิส[51]



รูปที่ 2.34 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเชฟเฟิมเพล็กซ์แล็คทิส ที่มี 3 ตัวแปร แต่ละตัวแปร มี 2 ระดับ และ 3 ระดับ (ไม่รวม 0)[51]

2. การออกแบบแบบเชฟเฟิมเพล็กซ์เซนทรอยด์ (Scheffe' simplex-centroid)

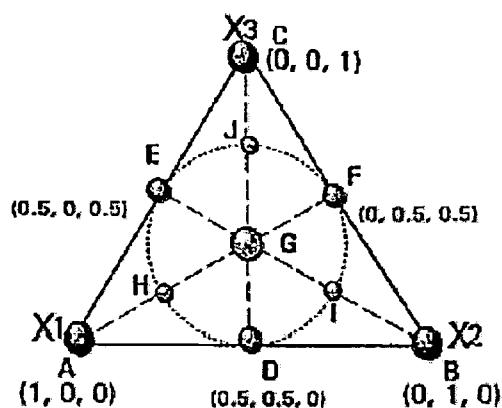
เป็นการออกแบบการทดลองที่มีสิ่งทดลองเท่ากับ $2q - 1$ แต่ละปัจจัยมีสัดส่วนที่เท่ากันทุกปัจจัย สิ่งทดลองประกอบด้วยจุดที่เป็นส่วนผสมเดียว (Pure component) ต่าง ๆ หมายถึง สิ่งทดลองที่มีปัจจัยนั้น 100 เปอร์เซ็นต์ หรือเท่ากับ 1.0 และ 0.5, 0.5, 0, ..., 0 เป็นส่วนผสมคู่ (Binary mixtures) และ 1/3, 1/3, 1/3, 0, ..., 0 สำหรับส่วนผสม 3 ชนิด และ $1/q, 1/q, 0, \dots, 0$ สำหรับ ส่วนผสมแบบควินารี (q-nary mixtures, centroid) และจุดกึ่งกลาง ($1/q, 1/q, \dots, 1/q$) ตัวอย่างของสิ่งทดลองต่าง ๆ สำหรับ 3 และ 4 ปัจจัย แสดงดังรูปที่ 2.35



รูปที่ 2.35 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบเชฟเฟิมเพล็กซ์เซนทรอยด์[51]

3. การออกแบบ แบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex-axial)

เป็นการออกแบบการทดลองโดยเน้นจุดที่เป็นส่วนประกอบต่าง ๆ ของทุกปัจจัย สิ่งเกิดจากจุด H I และ J โดยจุดทั้ง 3 ดังกล่าว มาจากจุดกึ่งกลางของแต่ละส่วนย่อย จากรูปที่ 2.36 หากพิจารณาจุด A D และ E จะมีลักษณะเป็นสามเหลี่ยมย่อย โดยมีจุด H เป็นจุดกึ่งกลางสามเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งเป็นเช่นเดียวกับจุด I และ J



รูปที่ 2.36 สิ่งทดลองสำหรับแผนการทดลองแบบซิมเพล็กซ์แอกเซียล (Simplex-axial)[51]

4. การออกแบบแบบแบบเอ็กซ์ตรีมเวอร์ทิส (Extreme vertices)

เป็นการออกแบบการทดลองแบบที่มีข้อจำกัดสัดส่วน (Design with constraints on proportion) หรือ แบบที่มีข้อจำกัด (Constrained mixture design) กล่าวคือ แผนการทดลองนี้ ระดับในแต่ละปัจจัยไม่จำเป็นต้องเป็น 0-100% โดยอาจเป็น 30-40% (0.30-0.40) หรือ 15-25% (0.15-0.25) เป็นต้น สาเหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากความจำเป็นโดยพื้นฐานในการทดสอบบางอย่าง เช่น ในการผลิตอาหารบางชนิดที่มีส่วนผสมของกลูเตน (Gluten) โปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง (Soy protein isolated) และน้ำ พบว่า ต้องมีส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง รวมกันอย่างน้อย 50% (ใช้ในปริมาณเท่ากันชนิดละ 25%) จึงสามารถจับเป็นก้อนเพื่อทำการรีดเป็นแผ่นได้ ดังนั้นส่วนผสมของกลูเตนและโปรตีนสกัดจากถั่วเหลืองที่ต่ำกว่า 50% จึงไม่เป็นที่สนใจขณะเดียวกัน พบว่าหากมีน้ำต่ำกว่า 30% จะไม่สามารถปั้นให้เป็นก้อนได้ ดังนั้นจึงอาจกำหนดเฉพาะปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมแต่ละชนิดเป็น 25% 25% และ 30% ตามลำดับ โดยให้สังเกตว่า ปริมาณขั้นต่ำของส่วนผสมทั้งสามรวมกันต้องไม่เกินหรือเท่ากับ 100% อย่างเด็ดขาด ไม่เช่นนั้นจะมีเพียงส่วนผสมเดียวที่เป็นไปได้ หรือไม่มีส่วนผสมใดที่เป็นไปได้เลย

นอกจากนี้แม้ว่าการวางแผนจำเป็นต้องให้ปัจจัยที่ทำการศึกษาในแต่ละสิ่งทดลองรวมกันเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่จำเป็นต้องนำทุกปัจจัยมาศึกษาพร้อมกัน ในส่วนผสมของแต่ละสิ่งทดลองอาจมีปัจจัยจำนวนมาก แต่สนใจศึกษาเพียง 3 ปัจจัย สามารถใช้แผนการทดลองแบบผสมได้ เช่น มีส่วนผสมผลิตภัณฑ์จำนวน 10 ปัจจัย คือ A – J แต่สนใจ เฉพาะปัจจัย B C และ D ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าว มีสัดส่วนคิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ของส่วนผสมทั้งหมดสามารถนำปัจจัย B C และ D มากำหนดเป็นสิ่งทดลองต่าง ๆ ซึ่งมีส่วนผสมที่ต่าง ๆ กัน และในส่วนผสมแต่ละสิ่งทดลองที่ได้ให้คิดเป็น 18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 82 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือกำหนดให้ใช้ในปริมาณคงที่หรือเป็นปัจจัยคงที่ (Fixed variables) ในทุกสิ่งทดลอง

ซึ่งได้มีการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองส่วนผสม ไปใช้เป็นเครื่องมือในการวิจัย เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณ ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปที่ทำให้ผลตอบมีค่าที่ดีที่สุด หรือเป็นไปตามที่ผู้ทดลองต้องการ ดังเช่นงานวิจัยของศิรินทิพย์[52] ได้ทำการศึกษเกี่ยวกับการพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผลไม้รวม เป็นภาควิจัยที่ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture design) โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของผลไม้รวมทั้ง 3 ชนิดคือ สับปะรด สตรอเบอร์รี่และมะละกอ เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลิตภัณฑ์ (Optimization) ทั้งในด้านความเข้มข้น ด้านรสชาติ และความเนียนของเนื้อโยเกิร์ต นอกจากนั้นยังใช้แผนการทดลองแบบ Mixture design ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุเรียนกวน ดังงานวิจัยของศุภฎี[53] โดยใช้กลีเซอรอลร่วมกับไซลิทอลเป็นส่วนผสม เพื่อป้องกันหรือลดสาเหตุที่ทำให้เกิดการเน่าเสียของผลิตภัณฑ์ทุเรียนกวน ให้มีอายุการเก็บรักษานานขึ้น มีความหวาน

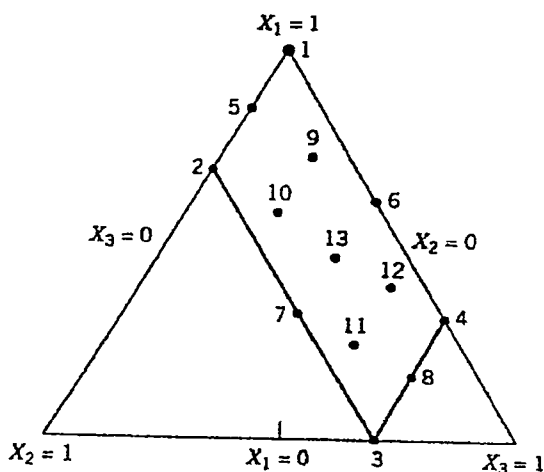
แต่แคลอรีต่ำ และป้องกันหรือลดการเกิดสีคล้ำของผลิตภัณฑ์ โดยเก็บตัวอย่างจากแต่ละสูตรมาทำการตรวจสอบคุณสมบัติได้แก่ สีเนื้อสัมผัสและค่า Water activity เพื่อคัดเลือกสูตรซึ่งที่มีความเหมาะสม โดยเปรียบเทียบกับทุเรียนกวนชุดควบคุม

เห็นได้ว่าการออกแบบการทดลองแบบผสมมักจะใช้กันในด้านของการวิจัย เกี่ยวกับอาหารส่วนในด้านการวิเคราะห์ด้านเคมีก็ได้มีการนำการออกแบบการทดลองแบบผสมมาเป็นเครื่องมือในการวิจัยด้วย ดังเช่นงานวิจัยของชาญณรงค์ และคณะ[54] ใช้หลักการออกแบบการทดลองส่วนผสมเพื่อใช้ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ส่วนผสมของแบบหล่อทราย นอกจากนี้งานวิจัยของอรรชรณ[55] ได้นำการทดลองส่วนผสม เพื่อค้นหาส่วนผสมที่ดีที่สุดของทินเนอร์ เพื่อให้ได้ทินเนอร์สำหรับผสมสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสที่สามารถทำละลายสีได้อย่างดีที่สุด ทำให้สีแห้งเร็ว และมีราคาต้นทุนต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ได้ถูกสร้างขึ้น เนื่องจากการมีขอบเขตของแต่ละส่วนผสม และสามารถทำนายคุณภาพและราคาของทินเนอร์ สำหรับผสมสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วในโตรเซลลูโลสได้จากสมการถดถอย ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงส่วนผสม และยังได้มีการพัฒนาอัตราส่วนที่เหมาะสมของผลิตภัณฑ์ชาขงสมุนไพรมผสมจิร์มถั่วเหลืองด้วยวิธี Mixture design เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการชงชา[56] ให้ได้ปริมาณเจตินมากที่สุด นอกจากนี้ยังต้องได้รับความยอมรับจากผู้บริโภคอีกด้วย ใช้ในการศึกษาผลของสารไฮโดรคอลลอยด์บางชนิดที่มีต่อความฉ่ำน้ำของเบอร์เกอร์กึ่งซุบแป้งทอดแช่เยือกแข็ง[57] เพื่อหาอัตราส่วนของไฮโดรคอลลอยด์ที่เหมาะสมต่อปัจจัยคุณภาพทางด้านความฉ่ำน้ำของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เพื่อปรับปรุงอัตราส่วนผสมของพลาสติกกรีไซเคิล ในงานวิจัยของเจษฎา[58] โดยทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง 3 ตัว คือ พลาสติกบริสุทธิ์ พลาสติกที่ได้จากก้นทางวิ่งชนิด A และพลาสติกที่ได้จากก้นทางวิ่งชนิด B เพื่อประเมินอิทธิพลที่มีต่อค่าความแข็งแรงในการทนต่อแรงกระแทก และอัตราการหดตัวของผลิตภัณฑ์ และจากงานวิจัยของพลาริน[59] ได้ประยุกต์ใช้หลักการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์การทดลอง เพื่อพัฒนาเทียนหอม โดยหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมของเทียนหอมแบบแท่งด้วยวิธี Combined mixture-process design โดยมีปัจจัยในการศึกษา 7 ปัจจัย คือ พาราฟิน พื่อแว็กซ์ สเตียริกแอซิด น้ำมันหอม ไมโครแว็กซ์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเทียน และขนาดไส้เทียน

2.8.4 การออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal

ในกรณีที่ส่วนประกอบบางตัวหรือทุกตัว มีทั้งขอบเขตบนและขอบเขตล่าง เมื่อตีกรอบบริเวณที่เป็นไปได้แล้วมักไม่เป็นรูปสามเหลี่ยมแต่เป็นรูปหลายเหลี่ยม การออกแบบซิมเพลกซ์ไม่สามารถทำได้ ต้องเสียมาใช้ในการออกแบบ D-optimal เพื่อคัดเลือกจุดทดลองที่อยู่ภายใต้เงื่อนไขข้อจำกัด โดยคัดเลือกมาจากจุดทั้งหมดที่เป็นไปได้ และควรจะต้องเลือกจุดที่สามารถระบุพิกัดได้โดยง่ายและถูกต้อง

สำหรับความละเอียดของการเลือกจุดที่จะนำมาทดลองผสมนั้น ขึ้นกับผู้ทดลองว่าต้องการตัวแบบทางคณิตศาสตร์อย่างไร โดยทั่วไปแล้วการทดลองแบบผสมมักต้องการให้มีเทอมอันตรกิริยาอยู่ในตัวแบบด้วย Lawson and Erjavec[50] แนะนำว่าจุดที่จะถูกเลือกมาทดลองควรประกอบด้วย จุดยอดมุมของรูปหลายเหลี่ยมที่กำหนดได้ (Extreme vertices) จุดกึ่งกลางด้าน (Edge center) จุดศูนย์กลางของรูปหลายเหลี่ยมนั้น (Overall centroid) จุดบนแกนสำคัญเช่นเส้นทแยงมุมหรือแกนสมมาตรของรูปหลายเหลี่ยมนั้น (Axial point) ก็พอเพียงที่จะสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ที่มีเทอมอันตรกิริยาได้แล้วซึ่งจุดทั้งหมดที่กล่าวมานั้นแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.37 การกำหนดจุดการทดลองด้วยการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal[50]

การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal เป็นรูปแบบการออกแบบการทดลองโดยใช้อัลกอริทึมคอมพิวเตอร์รูปแบบหนึ่ง ซึ่งการออกแบบที่ใช้คอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบการทดลองมีประโยชน์อย่างยิ่ง เมื่อการออกแบบทั่วไปไม่สามารถนำมาใช้ได้

ซึ่งการออกแบบการทดลองแบบ D-optimal มีความแตกต่างจากการออกแบบการทดลองทั่วไป เช่น การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorials) หรือการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional factorials) เนื่องจากผลกระทบจะถูกประมาณค่าแบบมีความสัมพันธ์กัน

สาเหตุที่เลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบ D-optimal แทนการออกแบบการทดลองพื้นฐานทั่วไป เนื่องจาก

1. การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorials) หรือการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional factorials) ต้องใช้จำนวนในการทดลองมากเกินไปกว่าปริมาณทรัพยากร หรือใช้เวลาในการทดลองมากเกินไปจนระยะเวลาที่สามารถใช้ได้
2. พื้นที่ในการออกแบบถูกจำกัด เช่น ข้อจำกัดในเรื่องของการตั้งค่าปัจจัยในกระบวนการ

2.8.5 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA)

เป็นวิธีการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่ 3 กลุ่มขึ้นไป ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์อัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม (Between-group variance) หรือความแปรผันจากปัจจัย และความแปรปรวนภายในกลุ่ม (Within-group variance) หรือความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

ความแปรปรวนระหว่างกลุ่ม เป็นค่าที่เกิดจากความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ ถ้าค่าเฉลี่ยระหว่างกลุ่มต่างๆ แตกต่างกันมาก ค่าความแปรปรวนระหว่างกลุ่มก็จะมากตามไปด้วย สำหรับความแปรปรวนภายในกลุ่มเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่า คะแนนแต่ละตัวที่รวบรวมมานั้นภายในแต่ละกลุ่มมีการกระจายมากหรือน้อย ค่าที่คำนวณได้เรียกว่า ความคลาดเคลื่อน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถใช้ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ของการถดถอยพหุคูณ หรือความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและเซตของตัวแปรอิสระ โดยมีสมมติฐานในการทดสอบคือ

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

H_1 : มีอย่างน้อยหนึ่ง $\beta_j \neq 0$ โดยที่ $j = 1, 2, \dots, k$

สถิติสำหรับทดสอบ คือ

$$F = MSR/MSE \quad (2.22)$$

และจะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F > F_{\alpha, k, n-k-1}$ ซึ่งถ้าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ และตัวแปรตาม แต่ถ้าสามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ได้ แสดงว่ามีตัวแปรอิสระอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม สมการที่ประมาณได้ จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่า หรือพยากรณ์ตัวแปรตาม

การทดสอบ F หรือ (F-test) จำเป็นต้องสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยคำนวณค่าผลบวกกำลังสองทั้งหมดของ Y (SST) ผลบวกกำลังสองที่อธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (SSR) และ ผลบวกกำลังสองเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน (SSE) ได้จากสมการที่ 2.23 ถึงสมการที่ 2.25

$$SST = \sum Y^2 - (\sum Y)^2 / n \quad \text{หรือ} \quad Y'Y - (\sum Y)^2 / n \quad (2.23)$$

$$SSR = b'X'Y - (\sum Y)^2 / n \quad (2.24)$$

$$SSE = Y'Y - b'X'Y \quad (2.25)$$

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SST มีค่าเท่ากับ $n-1$ เพราะสูญเสียความเป็นอิสระไป 1 เนื่องจาก $\sum (Y_i - \bar{Y}) = 0$ เมื่อนำ df ทหาร SST จะได้กำลังสองเฉลี่ยทั้งหมด (Total mean square) เขียนแทนด้วย MST

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SSR มีค่าเท่ากับ k เมื่อ k คือจำนวนตัวแปรอิสระในสมการถดถอย เมื่อนำ k ทหาร SSR จะได้กำลังสองเฉลี่ยเนื่องจากสมการถดถอย (Mean square due to regression) เขียนแทนด้วย MSR

องศาความเป็นอิสระ (df) ของ SSE มีค่าเท่ากับ $n - k - 1$ เมื่อ n คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด เมื่อนำ $n - k - 1$ ทหาร SSE จะได้ความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Mean square error) เขียนแทนด้วย MSE

2.8.6 การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถดถอย

สำหรับการทดสอบสมมติฐานของสัมประสิทธิ์การถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสม มีวิธีการเช่นเดียวกับการถดถอยแบบทั่วไปแต่มีข้อแตกต่างคือ สัมประสิทธิ์การถดถอยเฉพาะส่วนที่เป็นเชิงเส้นตรงนั้น ถ้ามีบางตัวที่ไม่มีอิทธิพลต่อผลตอบก็ไม่สามารถตัดออกจากสมการได้ Lawson and Erjavec[50] กล่าวว่าเนื่องจากในการดำเนินกระบวนการจริงส่วนผสมที่ไม่มีอิทธิพลนั้นอาจยังคงเป็นส่วนประกอบหนึ่งในส่วนผสมนั้นอยู่ไม่ได้หมายความว่าจะไม่ถูกใช้ เพียงแต่เราสามารถใช้ในปริมาณเท่าใดก็ได้ ที่เหลือจากการหักส่วนผสมอื่นๆ ออกแล้ว

การทดสอบสัมประสิทธิ์การถดถอย, β_j ของตัวแปรอิสระ, X_j เป็นการทดสอบที่จะช่วยตรวจสอบคุณค่าของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่อยู่ในสมการถดถอย โดยการทดสอบว่าตัวแปรอิสระ X_j มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือไม่ เมื่อกำหนดให้ตัวแปรอื่นๆ ที่เหลือมีค่าคงที่ หรือเป็นการยืนยันว่าการเพิ่มตัวแปรอิสระ X_j จะช่วยเพิ่มอำนาจให้กับสมการถดถอยหรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานว่า

$$H_0 : \beta_j = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0$$

สถิติสำหรับการทดสอบคือ

$$t = \frac{b_j}{Sb_j} = \frac{b_j}{\sqrt{MSE \times C_{jj}}} \quad (2.26)$$

เมื่อ C_{jj} คือ สมาชิกที่ j บนเส้นทแยงมุมของเมทริกซ์ $(X'X)^{-1}$ โดยที่การแจกแจง t มีองศาความเป็นอิสระเท่ากับ $n-k-1$

ซึ่งจะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $|t| > t_{\alpha/2, n-k-1}$ แสดงว่า X_j มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามหรือการเปลี่ยนแปลงของ X_j มีอิทธิพลต่อตัวแปรตาม สมควรที่จะบรรจุ X_j ไว้ในแบบจำลองการถดถอย

2.8.6 แบบจำลองการถดถอย (Regression model)

แบบจำลองการถดถอย (Regression model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย เพื่อนำไปสร้างสมการทำนายค่าของผลตอบ ซึ่งจะช่วยให้สามารถหาผลตอบที่จุดใดๆ ในแต่ละช่วงของปัจจัยได้ โดยวิธีการที่ใช้ในการประมาณค่าตัวแปรต่างๆ ในแบบจำลองนี้ส่วนใหญ่คือ วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square method) ซึ่งเป็นการประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่า (β) เพื่อให้ผลรวมของกำลังสองของความผิดพลาด (ε^2) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งบางครั้งเราเรียก β เหล่านี้ว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย โดยมีขั้นตอนในการประมาณค่าดังนี้

1. สร้างผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาด โดยการพิพฒผลตอบ
2. ประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยในเทอมต่างๆ ที่ทำให้ผลรวมของกำลังสองของค่าความผิดพลาดมีค่าน้อยที่สุด
3. นำค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่ได้ไปเขียนสมการทำนายค่าของผลตอบ

2.8.6.1 แบบจำลองการถดถอยสำหรับ Mixture design

Lawson and Erjavec[50] กล่าวว่าแบบจำลองการถดถอยสำหรับการออกแบบการทดลองแบบผสมมีข้อแตกต่างไปจากแบบจำลองการถดถอยแบบทั่วไปอยู่บ้างเนื่องจากเป็นที่เข้าใจแล้วว่า ส่วนประกอบทุกอย่างเมื่อรวมกันแล้วมีสัดส่วนเท่ากับ 1 สมมติว่ามีส่วนประกอบอยู่ 3 อย่างที่จะนำมาผสมกัน ถ้ากำหนดให้ X_i แทนสัดส่วนของส่วนประกอบที่ i แล้ว จะได้ว่า $X_1 + X_2 + X_3 = 1$ เมื่อทราบสัดส่วนของ X_1 และ X_2 ย่อมจะทราบสัดส่วนของ X_3 ได้ทันทีจาก $1 - X_1 - X_2$

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยสำหรับ Mixture design จึงไม่มีค่าคงที่ หรือเทอม β_0 และ $\beta_{ij}X_1^2$ โดยแบบจำลองที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระมีดังนี้[51]

1. แบบหุ่นเส้นตรง (Linear model)

$$\hat{Y} = \sum \beta_i X_i \quad (2.27)$$

$$\hat{Y} = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (2.28)$$

2. แบบหุ่นกำลังสอง (Quadratic model)

$$\hat{Y} = \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (2.29)$$

$$\hat{Y} = \text{Linear} + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 \quad (2.30)$$

3. แบบหุ่นกำลังสามแบบพิเศษ (Special cubic model)

$$\hat{Y} = \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad (2.31)$$

$$\hat{Y} = \text{Quadratic} + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (2.32)$$

4. แบบหุ่นกำลังสามแบบเต็ม (Full cubic model)

$$\hat{Y} = \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \sum \beta_{ijk} X_i X_j (X_i - X_j) + \beta_{ijk} X_i X_j X_k \quad (2.33)$$

$$\hat{Y} = \text{Specialcubic} + \beta_{12} X_1 X_2 (X_1 - X_2) + \beta_{13} X_1 X_3 (X_1 - X_3) + \beta_{23} X_2 X_3 (X_2 - X_3) \quad (2.34)$$

2.8.6.2 การเลือกแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม

เมื่อได้แบบจำลองการถดถอยมาแล้ว ยังไม่สามารถมั่นใจได้ว่าสมการถดถอยนั้นมีรูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ จึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม ที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

1. ทดสอบความมีนัยสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและเขตของตัวแปรถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยพิจารณาสมมติฐานที่เหมาะสมของแต่ละแบบ

วิธีรายงานผลของการทดสอบสมมติฐานวิธีหนึ่ง คือ การแสดงว่าสมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธหรือไม่ที่ค่า α หรือระดับนัยสำคัญที่กำหนด

ในทางสถิติ เมื่อสมมติฐานหลักเป็นจริง ดังนั้น P-Value นี้จะแสดงถึงน้ำหนักของหลักฐานที่จะใช้ในการปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 และผู้ตัดสินใจสามารถสร้างข้อสรุปที่ระดับนัยสำคัญอื่นๆ ได้ นอกจากนี้ยังสามารถนิยาม P-Value ว่าเป็นเหมือนกับค่าที่น้อยที่สุดของระดับนัยสำคัญ ซึ่งนำไปสู่การปฏิเสธสมมติฐานหลัก H_0 ซึ่งปกติแล้ว นิยามที่จะบอกว่าค่าทดสอบทางสถิติมีนัยสำคัญก็ต่อเมื่อ สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ ดังนั้นอาจจะพิจารณา P-Value ว่าเป็นค่า α ที่น้อยที่สุด ซึ่งทำให้ข้อมูลมีนัยสำคัญเมื่อรู้ค่า P-Value ผู้ตัดสินใจก็สามารถทราบว่าคุณมามีนัยสำคัญอย่างไร

2. ทดสอบ Lack of fit

การทดสอบ Lack of fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบจำลองการถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยมีข้อกำหนดว่าจะต้องมีค่าสังเกตซ้ำอย่างน้อยที่ระดับหนึ่งของ X การทดสอบจะแบ่งผลบวกกำลังสองของ residual ออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

$$SSE = SSPE + SSLF \quad (2.35)$$

เมื่อ SSPE คือผลบวกกำลังสองเนื่องมาจาก pure error อันเป็นความคลาดเคลื่อนจริงที่เกิดจากการทดลอง และ SSLF คือผลบวกกำลังสองเนื่องมาจาก lack of fit ซึ่งเป็นความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการสร้างสมการถดถอยที่มีรูปแบบที่ไม่เหมาะสม โดยสมมติฐานการทดสอบคือ

H_0 : แบบจำลองการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล

H_1 : แบบจำลองการถดถอยไม่เหมาะสมกับข้อมูล

สถิติสำหรับการทดสอบ คือ

$$F_0 = \frac{(SSLF/(m-2))}{(SSPE/(n-m))} = \frac{MSLF}{MSPE} \quad (2.36)$$

โดยมีระดับนัยสำคัญ (α) ตามที่ผู้วิจัยกำหนดคือ 0.05 ถ้า $F_0 > F_{\alpha, n-m-k-1, m}$ จะปฏิเสธ H_0 และจะสามารถสรุปว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้ไม่เหมาะสมกับข้อมูล แต่ถ้า F_0 ไม่มากกว่า $F_{\alpha, n-m-k-1, m}$ แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสมกับข้อมูลแล้ว หรือสามารถพิจารณาได้จากค่า P-value ถ้าค่า P-value น้อยกว่า α หรือผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ที่ตั้งไว้ หมายความว่า แบบจำลองการถดถอยไม่มีความเหมาะสมกับข้อมูล แต่ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือค่า P-value มากกว่าหรือเท่ากับ α จะยอมรับสมมติฐานหลัก H_0 ที่ตั้งไว้ หมายความว่า แบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูล

3. วิเคราะห์ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองพิจารณาค่าดังต่อไปนี้

- Standard deviation (Std. Dev.) คือ ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของการประมาณค่าหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย คำนวณได้จากสมการที่ 2.37

$$Std.Dev. = \sqrt{MSE} \quad (MSE, Residual mean square) \quad (2.37)$$

ดังนั้น ควรพิจารณาค่า Std. Dev. ที่มีค่าต่ำ

- R-squared (R^2) คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination)

โดยปกติแล้วค่าที่ได้จากการสังเกตกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอยจะไม่เท่ากัน แต่ก็ควรมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ถ้าหากค่าที่ได้จากการสังเกตเท่ากับค่าที่คำนวณได้จากสมการถดถอยทั้งหมดแล้ว สมการถดถอยจะใช้พยากรณ์ค่าสังเกตได้เกือบ 100% นั่นคือค่าความแปรปรวนที่อธิบายได้ ย่อมมีค่ามากกว่าค่าความแปรปรวนที่ไม่สามารถอธิบายได้ และสัดส่วนค่าความแปรปรวนที่สามารถอธิบายได้กับความแปรปรวนทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับ 1 ด้วยเหตุนี้จึงมีการวัดอัตราส่วนระหว่างความแปรปรวนที่อธิบายได้กับความแปรปรวนทั้งหมด และเรียกอัตราส่วนนี้ว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเขียนแทนด้วย R^2 สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.38

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (2.38)$$

ค่า R^2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ค่า R^2 ที่เท่ากับ 0 หมายความว่าไม่มีความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนอง นั่นคือสมการถดถอยที่ประมาณได้ไม่สามารถนำมาใช้ได้ ในทางกลับกัน ถ้าค่า R^2 มีค่ามากขึ้นแสดงว่าสมการถดถอยที่ประมาณได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลมากตามไปด้วย

- Adjusted R-squared ($Adj-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัวแปร

อิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ซึ่งเป็นค่าวัดว่ารูปแบบเหมาะสมกับข้อมูลอย่างไร โดยการนำ Degree of freedom มาพิจารณาด้วย โดยทั่วไปค่า R^2 จะสูงขึ้น เมื่อตัวแปรอิสระเพิ่มเข้ามาในสมการถดถอย นิยมใช้ในกรณีที่จำนวนข้อมูลในตัวอย่างมีน้อย การพิจารณาค่า R^2 อาจคลาดเคลื่อน เนื่องจากค่า R^2 จะมีค่าสูงเกินความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อขจัดปัญหานี้จึงมีการปรับ ค่า R^2 เรียกว่า R^2 ที่ปรับแล้ว (Adjusted R^2) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.39

$$Adj-R^2 = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{SST/(n-1)}, 0 \leq Adj-R^2 \leq 1 \quad (2.39)$$

เมื่อมีจำนวนข้อมูลในตัวอย่าง (n) มากๆ จะทำให้ค่า R^2 และค่า $Adj-R^2$ มีค่าใกล้เคียงกัน

- Predicted R-squared ($Pred-R^2$) คือ ค่าที่แสดงสัดส่วนหรือเปอร์เซ็นต์ที่ตัว

แปรอิสระ X มีส่วนในการอธิบายความผันแปรทั้งหมดของ Y ที่ได้จากการทำนาย คำนวณได้จากสมการที่ 2.40

$$Pred-R^2 = 1 - \frac{PRESS}{SS_{total}} \quad (2.40)$$

- Predicted Residual Error Sum of Square (PRESS) คือ ค่าผลรวมกำลังสอง

ของความคลาดเคลื่อนตัดออก เป็นการวัดว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับจุดที่ทำการออกแบบไว้หรือไม่ แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมจะเป็นแบบจำลองที่มีค่า PRESS ต่ำ คำนวณได้จากสมการที่ 2.41

$$PRESS = \sum \left(\frac{e_i}{1 - h_i} \right)^2 \quad (2.41)$$

2.8.6.3 การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ (Diagnostics)

สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual analysis)

เป็นวิธีแบบง่ายและได้ผลสำหรับการตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบการถดถอย คือ การตรวจสอบโดยพิจารณาจากส่วนตกค้าง โดยตั้งสมมติฐานว่า $\varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2)$

ส่วนตกค้างหรือค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals, e_i) คือ ค่าความแตกต่างระหว่างค่าสังเกต, Y_i และค่าประมาณ, \hat{Y}_i บนเส้นถดถอย (Fitted or predicted value) ซึ่งเป็นตัวประมาณค่าความคลาดเคลื่อน ดังนั้นถ้าตัวแบบจำลองเหมาะสม ส่วนตกค้างหรือค่าความคลาดเคลื่อนจะต้องสอดคล้องตามสมมติฐานของความคลาดเคลื่อน โดยมีรายละเอียดของสมมติฐานดังนี้

- สมมติฐานข้อแรก ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งสามารถตรวจได้จากการพล็อตกราฟ Normal Probability Plots ของค่าคลาดเคลื่อน (Residuals) คู่กับค่าคาดหวัง (Expected values) ของมัน โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ถ้ากราฟที่พล็อตได้ข้อมูลมีการเรียงตัวในแนวเส้นตรง ก็สามารถสรุปได้ว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ

- สมมติฐานข้อที่สองและสาม คือ ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเท่ากับค่าคงที่ ($V(\varepsilon_i) = \sigma^2$) ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากการพล็อตค่าของส่วนตกค้าง เป็นแผนภาพกระจายคู่กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (Fitted value, \hat{Y}_i) ถ้าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นก็จะมีรูปแบบใด ๆ ทั้งสิ้น

- สมมติฐานข้อสุดท้าย คือ ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวต้องเป็นอิสระต่อกัน สามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล ซึ่งลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้จะต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล

ดังนั้นการตรวจสอบส่วนตกค้างหรือค่าความคลาดเคลื่อนว่าสอดคล้องกับสมมติฐานหรือไม่จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ถ้าสอดคล้องกับสมมติฐานก็อาจกล่าวได้ว่าตัวแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม แต่ถ้าไม่สอดคล้อง ก็จำเป็นจะต้องทำการพิจารณาเป็นกรณีๆ ไป เช่น ถ้าค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอยยังมีความพิงพิงต่อกัน แสดงว่า ตัวแปรอิสระที่อยู่ในสมการถดถอยยังไม่สามารถนำมาอธิบายการเคลื่อนไหวของตัวแปรตามได้หมด ดังนั้นจึงต้องหา ตัวแปรอิสระเพิ่มเติม เพื่อนำมาอธิบายการเคลื่อนไหวของตัวแปรตาม ถ้าค่าความแปรปรวนของ ค่าความคลาดเคลื่อนเปลี่ยนแปลงไปตามค่าของตัวแปรอิสระ อาจจะหมายความว่า รูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระยังไม่เหมาะสม ควรทำการปรับปรุงรูปแบบความสัมพันธ์ใหม่ เป็นต้น จะเห็นว่าการตรวจสอบส่วนตกค้างหรือค่าความคลาดเคลื่อนของแบบจำลองการถดถอย เป็นตัวชี้ถึงความเหมาะสมของแบบจำลองการถดถอยที่ได้กำหนดขึ้นวิธีหนึ่ง

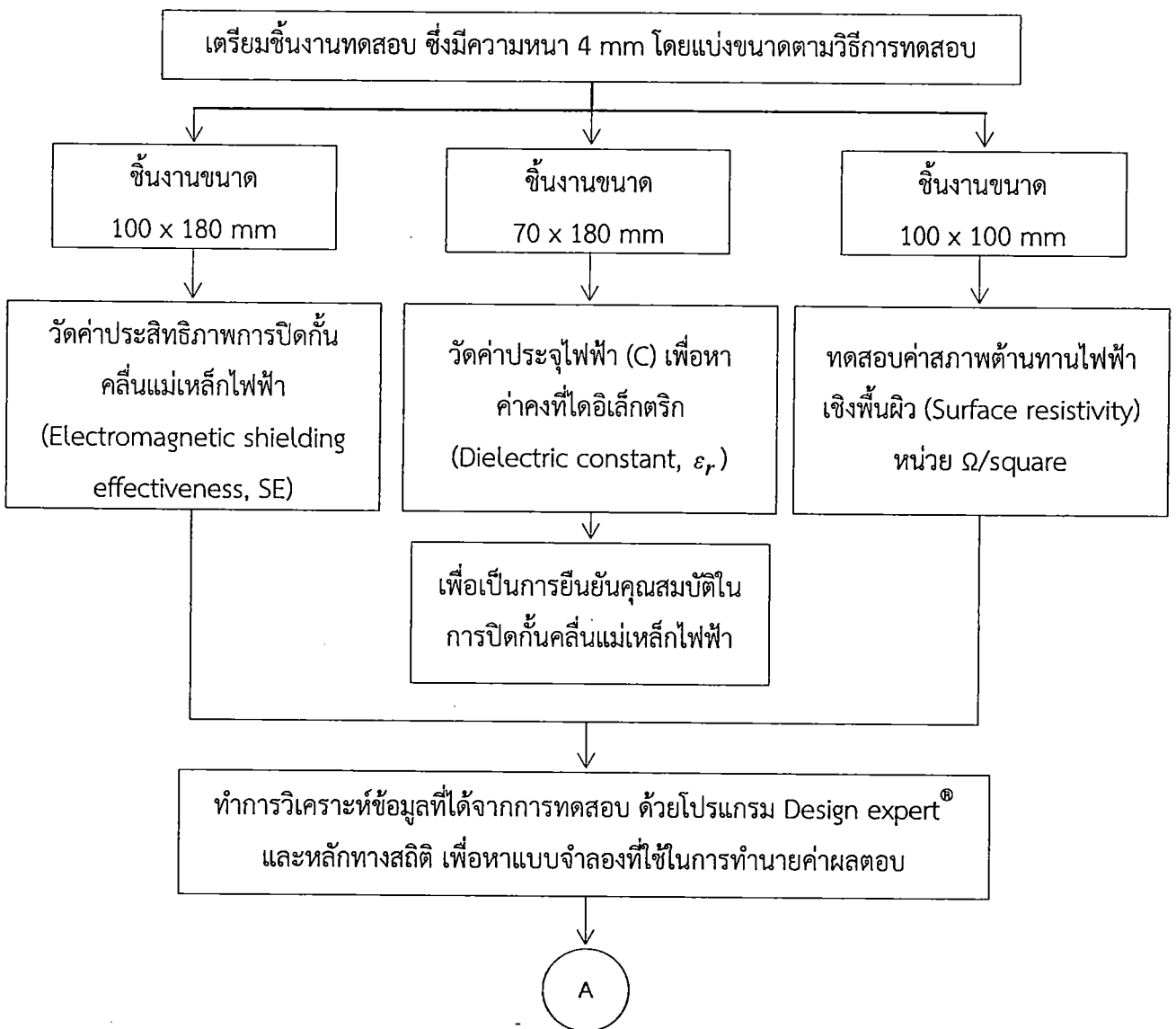
2. การทดสอบในกระบวนการจริง (Verification)

การทดสอบในกระบวนการจริง เป็นการทำการทดลองซ้ำ เพื่อดูว่าค่าที่วิเคราะห์มาเป็นค่าที่ดีที่สุคนั้น ยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีจริงหรือไม่

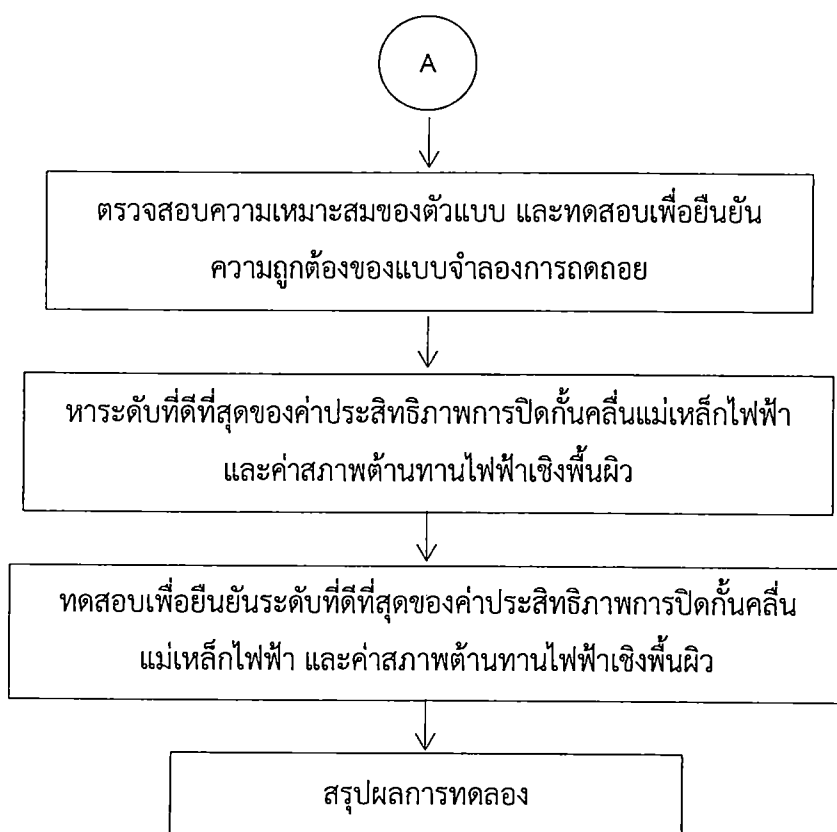
บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding) และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ของพลาสติกเชิงประกอบระหว่างพลาสติกชนิดพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะครีโล-ไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ที่ได้จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบตช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) ที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้า ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญสำหรับการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าว โดยขั้นตอนในการศึกษาแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนในการศึกษา



รูปที่ 3.1(ต่อ) ขั้นตอนในการศึกษา

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

1. เม็ดพลาสติกพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เกรด PC 110 ผลิตโดยบริษัท CHIMEI ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.1
2. เม็ดพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เกรด PA 707 ผลิตโดยบริษัท CHIMEI ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 3.2
3. ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black Powder, CBp) เกรด N220 ผลิตโดยบริษัทไต้โกคาร์บอนโปรดักท์ จำกัด มีสมบัติทางกายภาพ ดังแสดงในตารางที่ 3.3
4. คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black Materbatch, CBm) เกรด PLASBLAK® UN2014 ผลิตโดยบริษัท CABOT ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนแบล็ค 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางกายภาพดังแสดงในตารางที่ 3.5 และพลาสติกพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สมบัติทางกายภาพแสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของพอลิคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) เกรด PC 110[60]

Typical Properties	Test Method	Unit	Condition	PC-110
Melt Flow Index	ASTM D1238	g/10min	300 °C, 1.2 kg	10
Specific Gravity	ASTM D792	-	23 °C	1.20
Heat Distortion Temperature (unannealed)	ASTM D648	°C	4.6 Kg/cm ² , 120 °C/hr	136
			18.6 Kg/cm ² , 120 °C/hr	125
Vicat Softening Temperature	ASTM D1525	°C	1 Kg, 50 °C/hr	150
Volume Resistivity	ASTM D257	X10 ¹⁶ Ω•cm	-	3

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เกรด PA 707[61]

Typical Properties	Test Method	Unit	Condition	PA-707
Melt Flow Index	ASTM D1238	g/10min	200 °C, 5 kg	1.7
			220 °C, 10 kg	23
Specific Gravity	ASTM D792	-	23 °C	1.06
Heat Distortion Temperature	ASTM D648	°C	Annealed	95
			Unannealed	85
Vicat Softening Temperature	ASTM D1525	°C	3 mm, 50 °C/hr	105

ตารางที่ 3.3 สมบัติทางกายภาพของผงคาร์บอนแบล็คที่ใช้ในงานวิจัย[62]

ชนิดของเขม่าดำ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ปริมาณการดูดซับของ DBP (mL/100g)	ความหนาแน่น (kg/m ³)
N220	22	114	345

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (Carbon black Materbatch, CBm) เกรด PLASBLAK® UN2014[63]

Property	Value	Test Method*
Pigment	50% jet carbon black	-
Density @ 23 °C	1220 kg/m ³	CTM E023
MFI 21.6 kg/190 °C	36 g/10min	CTM E005 (ISO 1133)

*วิธีการทดสอบเป็นวิธีทดสอบของ Cabot ซึ่งอ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบนานาชาติ

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของคาร์บอนแบล็ค ในคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของ เขม่าดำ	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (nm)	ปริมาณการดูดซับของ DBP (mL/100g)
JY-380	26	120

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1. เครื่องฉีดพลาสติก TOSHIBA รุ่น IS 80 EPN
2. เครื่องอบแห้งเม็ดพลาสติก Hopper dryers ของ PAECO รุ่น PHD-12
3. เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM)
5. เครื่องชั่งน้ำหนัก Sartorius รุ่น BSA (ทศนิยม 4 หลัก)
6. ปากกาจับชิ้นงาน
7. แผ่นเหล็ก 2 แผ่น
8. เครื่องตัดอัตโนมัติ
9. ตะไบละเอียด
10. เครื่องมือวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Network analyzer รุ่น hp 8449B OPT H02)

3.2 วิธีการเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียม PC/ABS/CB สำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยขึ้นรูปชิ้นงาน ด้วยกระบวนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งมีขนาด 180 x 100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร

1. ชั่งน้ำหนักของส่วนประกอบต่างๆ ตามแต่ละอัตราส่วนทดสอบ ที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ตามตารางที่ 3.6 โดยใช้เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น BSA ดังรูปที่ 3.2
2. ทำการอบแห้งเม็ดพลาสติก ด้วยเครื่องอบแห้งเม็ดพลาสติก Hopper dryers ของ PAECO รุ่น PHD-12 ดังรูปที่ 3.3(ก) โดยแต่ละอัตราส่วนจะใช้อุณหภูมิและเวลาในการอบแห้งที่แตกต่างกัน ดังตารางที่ 3.6 และตั้งอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูป ดังแสดงในตารางที่ 3.7
3. เมื่อทำการอบแห้งเม็ดพลาสติก ครบตามเวลาที่กำหนดแล้ว และอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน เท่ากับค่าที่ต้องการแล้ว จึงเริ่มทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเครื่องฉีดพลาสติก TOSHIBA รุ่น IS 80 EPN ดังรูปที่ 3.3(ข) โดยการฉีดขึ้นรูป แบบไม่ผ่านแม่พิมพ์
4. นำพลาสติกหลอมเหลวที่ถูกฉีดออกมาจากเครื่องฉีด โดยไม่มีการผ่านแม่พิมพ์ ไปทำการขึ้นรูปเป็น แผ่นขนาด 180 x 100 mm และมีความหนา 4 mm ด้วยการใส่พลาสติกที่หลอมเหลวลงในช่องว่างระหว่างแผ่นเหล็ก 2 แผ่น ซึ่งแผ่นเหล็กทั้งสองแผ่น จะวางอยู่บนปากกาจับชิ้นงาน ดังรูปที่ 3.4(ค)
5. เมื่อใส่พลาสติกที่หลอมเหลวในช่องว่างดังกล่าวแล้ว ทำการหมุนปากกาจับชิ้นงาน เพื่อให้แผ่นเหล็ก 2 แผ่น เคลื่อนที่เข้าติดกัน จนกระทั่งพลาสติกที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งเป็นชิ้นงานทดสอบได้ความหนาเท่ากับ 4 mm ตามที่ต้องการ
6. นำชิ้นงานพลาสติกที่ได้ ไปทำการตัดเพื่อให้ได้ขนาด 180 x 100 mm ตามที่ต้องการ ด้วยเครื่องตัดอัตโนมัติ ได้ชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 3.5

7. หลังจากนั้นใช้ตะไบ เพื่อกำจัดเศษของพลาสติกที่ติดอยู่บริเวณขอบชิ้นงาน
8. นำชิ้นงานทดสอบที่ได้ไปทำการทดสอบ เพื่อหาค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า และศึกษาลักษณะทางสัญญาณวิทยาต่อไป

ตารางที่ 3.6 อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งเม็ดพลาสติก สำหรับแต่ละอัตราส่วน

อัตราส่วนที่	อัตราส่วนของแต่ละส่วนประกอบ			อุณหภูมิในการอบแห้ง (°C)	เวลาในการอบแห้ง (ชั่วโมง)
	PC	ABS	CB		
1	0.00	0.83	0.17	85	2
2	0.50	0.50	0.00	100	3
3	0.23	0.65	0.13	100	3
4	0.23	0.73	0.04	100	3
5	0.83	0.00	0.17	120	4
6	0.42	0.42	0.17	100	3
7	0.69	0.23	0.08	100	3
8	1.00	0.00	0.00	120	4
9	0.00	0.92	0.08	85	2
10	0.00	1.00	0.00	85	2
11	0.92	0.00	0.08	120	4

ตารางที่ 3.7 ค่าอุณหภูมิในการฉีดขึ้นรูปชิ้นงาน สำหรับชิ้นงานขนาด 180 x 100 mm ทหนา 4 mm

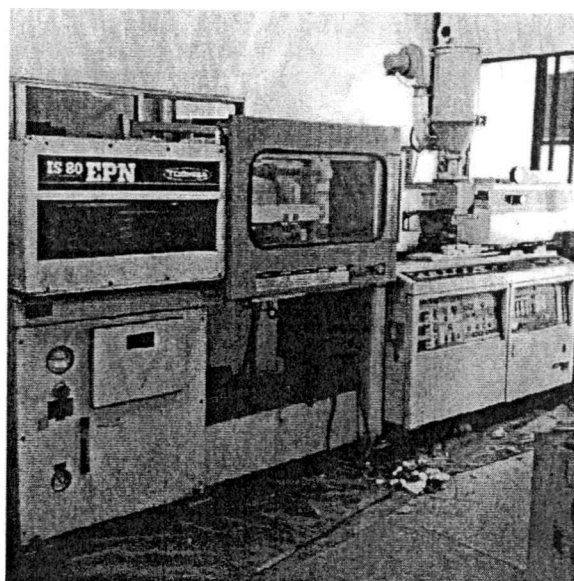
Nozzle (°C)	Compression zone (°C)	Feeding zone (°C)	Hopper (°C)
245	265	265	230



รูปที่ 3.2 เครื่องชั่ง Sartorius รุ่น BSA



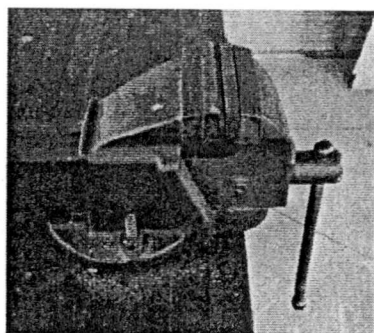
(ก)



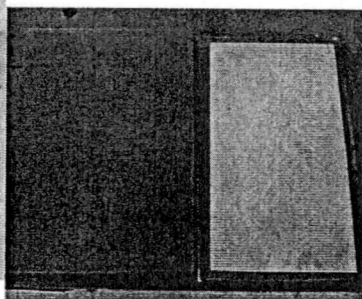
(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) เครื่องอบแห้งเม็ดพลาสติก Hopper dryers ของ PAECO รุ่น PHD-12

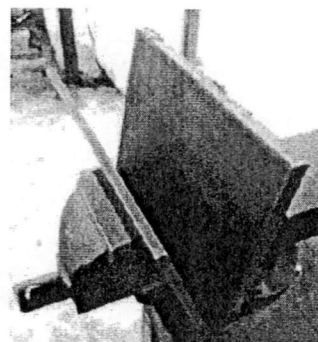
(ข) เครื่องฉีดพลาสติก TOSHIBA รุ่น IS 80 EPN



(ก)

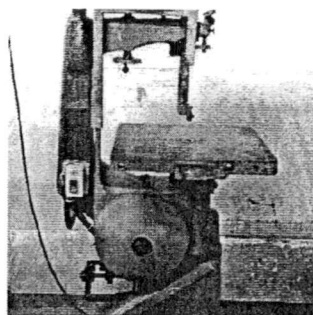


(ข)

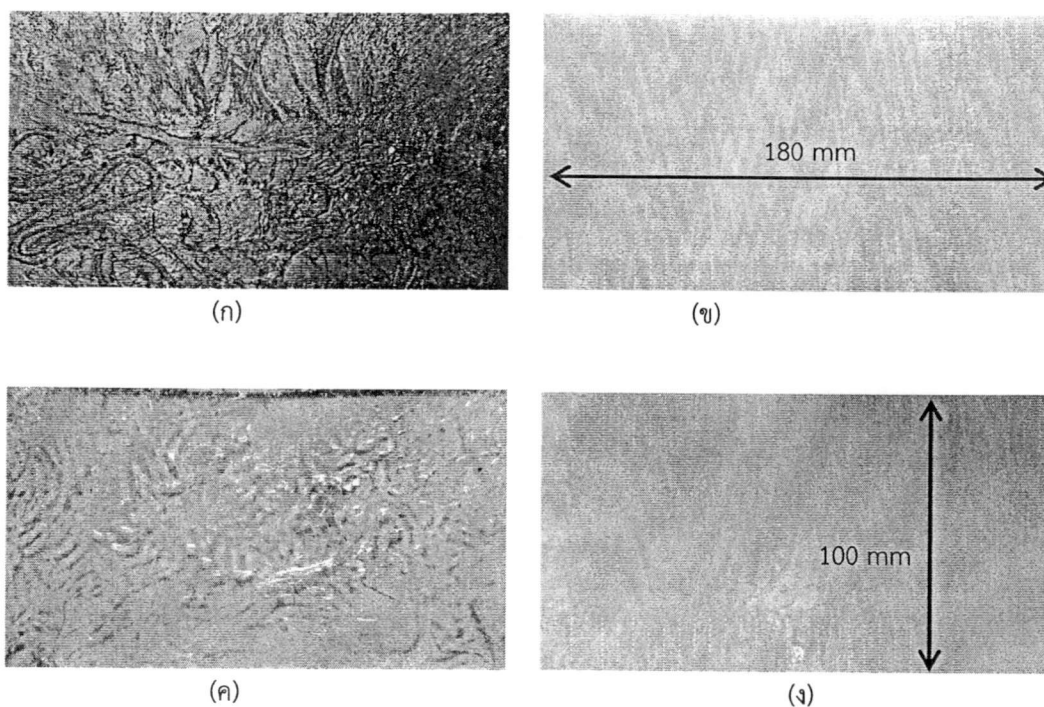


(ค)

รูปที่ 3.4 (ก) ปากกาจับชิ้นงาน (ข) แผ่นเหล็ก 2 แผ่น (ค) วางแผ่นเหล็ก 2 แผ่นบนปากกาจับชิ้นงาน



รูปที่ 3.5 เครื่องตัดอัตโนมัติ



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างชิ้นงานทดสอบ สำหรับทดสอบประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

- (ก) PC/ABS(42/42) ที่เติมคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท 16 %โดยน้ำหนัก
- (ข) PC/ABS(0/100)
- (ค) PC/ABS(100/0)
- (ง) PC/ABS(50/50)

3.3 การออกแบบการทดลองโดยอาศัยวิธีทางสถิติวิศวกรรม

การออกแบบการทดลองได้ใช้หลักการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment, DOE) แบบส่วนผสม (Mixture design) โดยการออกแบบการทดลองประเภทนี้ เป็นการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสัดส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณ ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป โดยยึดหลักว่า ผลรวมปริมาณของปัจจัยทั้งหมดจะต้องเป็น 1.0 (หรือ 100%) เสมอ กล่าวคือ เมื่อปัจจัยหนึ่งมีปริมาณเพิ่มขึ้น ย่อมทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีสัดส่วนลดลง ซึ่งแตกต่างจากการทดลองที่ไม่ใช่ Mixture ที่ตัวแปรแต่ละตัวเป็นอิสระจากกัน

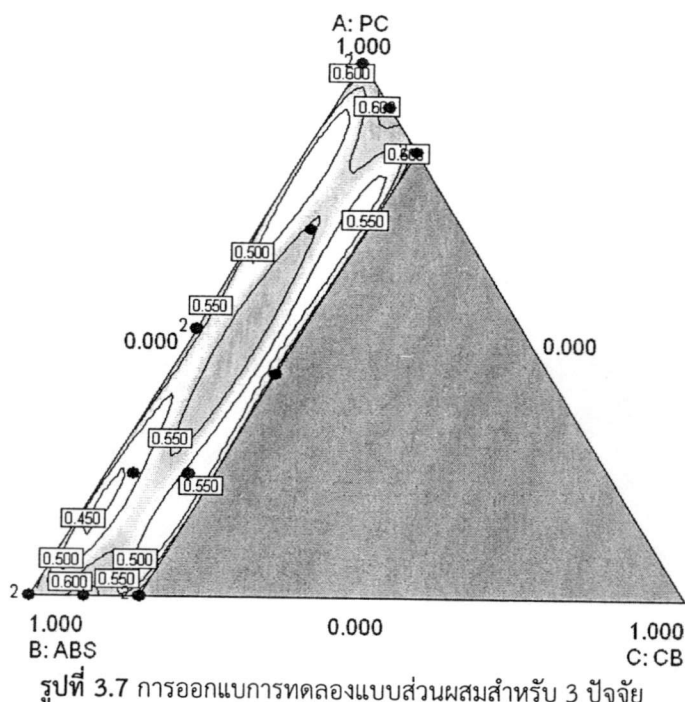
ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสม แบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained mixture designs) และเป็นรูปแบบการเลือกพิจารณาหุนการทดลองที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปัจจัย (Factor) เชิงปริมาณ ทั้ง 3 ปัจจัย คือ พลาสติกชนิด PC, พลาสติกชนิด ABS และสารตัวเติม CB และกำหนดเงื่อนไขอัตราส่วนผสมพลาสติกประกอบ PC/ABS/CB จากการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ได้ดังนี้

$$0 \leq PC \leq 1$$

$$0 \leq \text{ABS} \leq 1$$

$$0 \leq \text{CB}(\text{CBm}, \text{CBp}) \leq 0.166667$$

ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ซึ่งจุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.7



ผลตอบสนอง (Response) ในการทดลองนี้ผลตอบสนองของการทดลองคือ ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) ซึ่งค่าประสิทธิภาพของการปิดกั้นจะเปลี่ยนแปลงตามปริมาณของพลาสติกชนิด PC, ABS และสารตัวเติมในพอลิเมอร์เชิงประกอบที่ถูกเตรียมขึ้น โดยผลของการทดลองจะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert[®] เพื่อให้ทราบถึงความน่าเชื่อถือของข้อมูล การมีผลรบกวนระหว่างปัจจัยและยังทราบถึงแนวโน้มของระดับปัจจัยที่ส่งผลต่อการทดลอง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละปัจจัยกับผลตอบจะออกมาในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ และสามารถทดสอบสมการเมื่อเปลี่ยนแปลงระดับปัจจัยได้ นอกจากค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้ว ยังมีค่าผลตอบอีกหนึ่งตัว คือ ความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต โดยสามารถพิจารณาได้จากค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ของวัสดุ ซึ่งค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจะต้องมีค่าอยู่ในช่วง 10^4 ถึง 10^{11} Ω/square [2] จึงจะมีความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD)

ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลอง โดยทำการวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบตามเงื่อนไข (Condition) ที่ได้ทำการออกแบบการทดลองให้ครบทุกอัตราส่วน ซึ่งอัตราส่วนที่ได้จากการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal แสดงดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การออกแบบการทดลองส่วนผสม แบบ D-optimal

std	run	Block	PC	ABS	CB(CBm,CBp)
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.13
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.17
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00

3.4 การทดสอบค่าอัตราการไหลของพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D1238

เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt flow rate, MFR) มีหลักการทำงานคือ เป็นเครื่องทดสอบหาคูณสมบัติการไหลของพลาสติกโดยการรีดผ่านรูมาตรฐาน (Standard die) แรงที่ใช้ในการรีด (Extrude) ได้จาก ตั้มน้ำหนักกดผ่าน piston ไปยังพลาสติกที่ได้รับความร้อนจนหลอมละลาย โดยความร้อนจะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ พลาสติกที่ได้รับความร้อนจะหลอมละลาย และไหลผ่านรูมาตรฐาน ด้วยแรงกดจาก ตั้มน้ำหนัก

ขั้นตอนการทดสอบ มีดังนี้

1. ควรตรวจสอบการตั้งวางเครื่องให้ได้ระดับ โดยวางระดับน้ำที่ด้านบนของ barrel ปรับขาตั้งวางเครื่องให้ระดับน้ำอยู่ตรงกึ่งกลาง เอาระดับน้ำออก
2. เปิดเครื่องทดสอบ และตั้งระดับอุณหภูมิที่กำหนดค่าตามประเภทของเม็ดพลาสติก ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้อุณหภูมิทดสอบ เท่ากับ 265 °C [64]
3. เมื่ออุณหภูมิถึงจุดที่ตั้งและคงที่ ทำการใส่ลูกสูบ และตั้ค้ำยัน เข้าไปในกระบอบอกหลอม รอจนกระทั่งอุณหภูมินิ่งอีกครั้ง
4. ดึงลูกสูบออก และใส่ตัวอย่างทดสอบเข้าไปในกระบอบอกหลอมที่ล้นน้อยจนหมด ซึ่งในขณะที่ใส่ตัวอย่างทดสอบให้ใช้ไม้กระทุ้ง เพื่อลดช่องว่างของอากาศจากตัวอย่างทดสอบ การใส่ตัวอย่างทดสอบ และใส่อากาศควรใช้เวลาไม่เกิน 1 นาที
5. ใส่ลูกสูบพร้อมกับตั้ค้ำยัน (Piston support sleeve) และรอจนครบเวลา preheat (ประมาณ 4-6 นาที)

6. วางตุ้มน้ำหนักตามค่าจากมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 บนลูกสูบ โดยใช้น้ำหนัก 5 kg [64] ซึ่งจะส่งผลให้พลาสติกที่หลอมละลายในกระบอกหลอม เริ่มมีการไหลออกมาจากรูมาตรฐาน โดยหลังจากครบเวลา preheat แล้ว ห้ามทำการกดตุ้มน้ำหนัก

7. จับเวลา เมื่อพลาสติกที่หลอมละลายไหลผ่านรูมาตรฐาน ออกมาจนครบ 2 นาที ให้นำตุ้มน้ำหนักออก หลังจากนั้นนำพลาสติกที่ไหลออกมาในเวลา 2 นาที ไปทำการชั่งน้ำหนักที่ได้

8. ทำการแปลงหน่วยจาก กรัม/2 นาที ให้เป็น กรัม/10 นาที เพื่อให้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกมีหน่วยตามมาตรฐานสากล



รูปที่ 3.8 เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก

3.5 วัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) ที่ช่วงความถี่ 800 ถึง 3,000 MHz ตามมาตรฐาน MIL-STD-285

ในการศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงการเพิ่มคุณสมบัติการปิดกั้นคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีปริมาณของส่วนประกอบต่างๆ ในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน โดยในการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) ทำการวัดค่าในช่วงความถี่คลื่นในช่วง 800-3,000 MHz ทั้งการส่งและรับสัญญาณในแนวนอนและแนวตั้ง และชิ้นงานทดสอบมีขนาด 180 x 100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร ซึ่งมีขั้นตอนในการทดสอบดังนี้

1. ทำการเตรียมเครื่องมือวัดค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยตั้งค่าสัญญาณที่ระดับความถี่ในช่วง 800 ถึง 3,000 MHz ส่งสัญญาณความถี่ผ่านตามสายอากาศส่งสัญญาณเข้ากับหัวส่งสัญญาณแบบแนวนอน ดังแสดงในรูปที่ 3.10(a) และทำการรับสัญญาณผ่านทางสายอากาศรับสัญญาณ โดยต่อเข้ากับหัวรับสัญญาณแบบแนวนอนที่อยู่ภายในกล่องรับสัญญาณ

2. ทำการปรับอุปกรณ์ส่งสัญญาณความถี่ให้ได้ความถี่ขนาดตามที่กำหนดในช่วงความถี่ที่ทำการทดลองวัด โดยเมื่อทำการเปลี่ยนหัวส่งและรับสัญญาณในแต่ละครั้งต้องทำการสอบเทียบสัญญาณ (Calibrate) ใหม่ทุกครั้งเพื่ออ้างอิงสายอากาศส่งสัญญาณและสายอากาศรับสัญญาณ

3. นำอุปกรณ์ที่ได้ทำการปรับค่าสัญญาณความถี่ตามที่กำหนดและทำการสอบเทียบแล้ว นำสายมาต่อเข้ากับหัวส่งสัญญาณและกล่องรับสัญญาณ ปรับระยะห่างระหว่างสายส่งสัญญาณและกล่องรับสัญญาณ ให้มีระยะห่างเท่ากับ 30 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.11

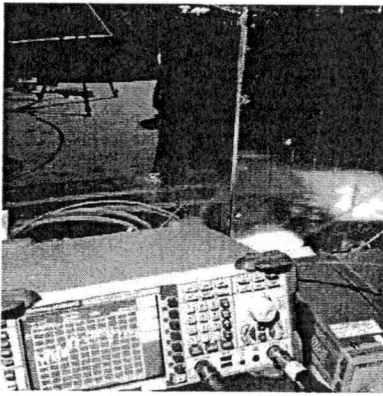
4. บันทึกค่าระดับกำลัง (Power level) เมื่อไม่มีชิ้นงานทดสอบกั้นระหว่างสายอากาศตัวส่งสัญญาณ และสายอากาศตัวรับสัญญาณ ในช่วงความถี่ที่ทำการศึกษา ซึ่งค่าความถี่ที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้คือ 800, 850, 900, 1800, 2100, 2450, 2600 และ 3000 MHz ตามลำดับ กำหนดค่าระดับกำลังที่อ่านค่าได้เป็น P_1 ซึ่งกำหนดให้เป็นค่าระดับกำลังอ้างอิง

5. นำชิ้นงานทดสอบที่มีอัตราส่วนต่างๆ ซึ่งได้จากการฉีดยึดขึ้นรูป โดยมีขนาด 180×100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร มาปิดที่หน้าช่องว่างของกล่องรับสัญญาณให้แนบสนิท ทำการบันทึกค่าที่ได้ในช่วงความถี่ต่างๆ ที่ทำการศึกษา กำหนดให้ค่าระดับกำลังนี้เป็น P_2

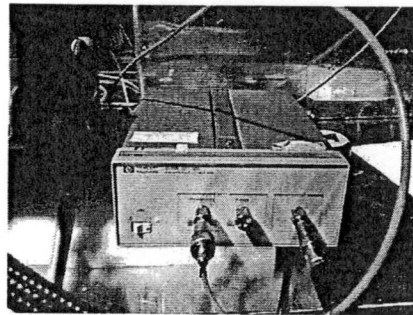
6. คำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 3.1

$$\text{Shielding effectiveness} = P_1 - P_2 \quad (3.1)$$

7. ทำการเปลี่ยนหัวรับและส่งสัญญาณ เป็นแบบแนวตั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.9(b) และทำการทดสอบตามขั้นตอนที่ 1-6 เช่นเดียวกัน

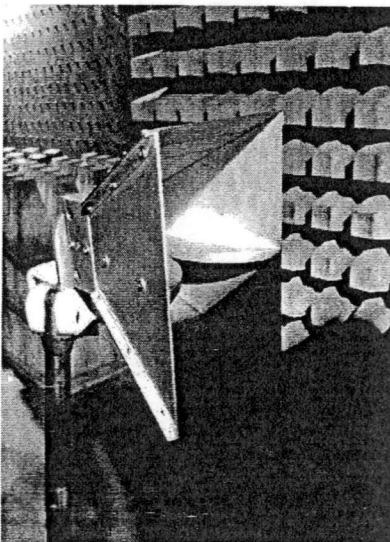


(a)

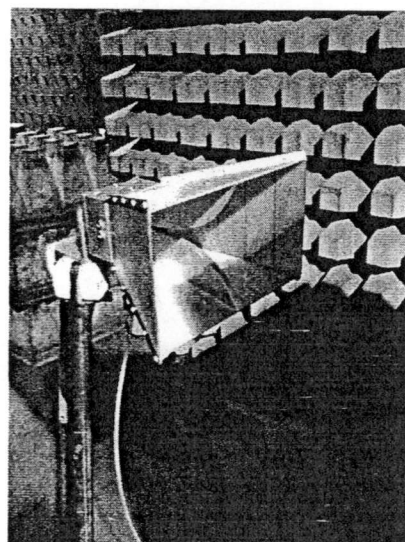


(b)

รูปที่ 3.9 เครื่องกำเนิดและรับสัญญาณ (Network Analyzer รุ่น hp 8449B OPT H02)



(a)



(b)

รูปที่ 3.10 หัวส่งสัญญาณ (a) แบบแนวนอน (Horizontal) (b) แบบแนวตั้ง (Vertical)



รูปที่ 3.11 การติดตั้งหัวส่งสัญญาณกับกล่องรับสัญญาณ

3.6 การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ_r)

การทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด 70×100 มิลลิเมตร หนา 4 มิลลิเมตร
2. ทำการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกด้วยเครื่อง Agilent 4263B โดยใช้ความถี่ 100 kHz และความต่างศักย์ 1000 mV เลือกตัวแปรที่ใช้วัดค่าคือ C_p (Parallel capacitance)
3. นำชิ้นงานทดสอบมาทำการวัด โดยเลื่อนหัววัดมาสัมผัสกับชิ้นงาน บันทึกค่าที่ได้คือ C_p นำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกดังสมการ 3.4

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (3.2)$$

$$\epsilon = \frac{t}{A} C_p \quad (3.3)$$

$$\epsilon_r = \frac{t C_p}{A \epsilon_0} \quad (3.4)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชิ้นงานทดสอบ

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (ฟารัด)

t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลต (ตารางเมตร)

3.7 การทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) โดยอ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D257

ในการทดสอบ ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานทดสอบ ที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ปกติที่อุณหภูมิห้อง ใช้อิเล็กโทรดทองแดงแบบวงกลม ซึ่งจะมีทั้งหมด 3 ชั้น อิเล็กโทรดชั้นที่ 1 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_1) เท่ากับ 50 mm อิเล็กโทรดชั้นที่ 2 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก เท่ากับ 90 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 59 mm และอิเล็กโทรดชั้นที่ 3 มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (D_3) เท่ากับ 100 mm ดังแสดงในรูปที่ 3.12

การทดสอบค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวมีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานทดสอบขนาด 100×100 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร
2. ทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistance, R) ด้วยเครื่อง Megger MIT520/2 โดยใช้ค่าความต่างศักย์ 250 V และเวลาในการทดสอบชิ้นงานครั้งละ 1 นาที เลือกตัวแปรที่ใช้วัดค่าคือ IR
3. นำชิ้นงานทดสอบมาทำการวัด โดยวางชิ้นงานบนอิเล็กโทรด และทำการต่อสายไฟฟ้า เพื่อจ่ายกระแสให้กับชิ้นงานดังรูปที่ 3.13 หลังจากนั้นกดปุ่ม Test Start/Stop ค้างไว้จนกระทั่งไฟ สีแดงที่อยู่ด้านบนของปุ่มติด
4. เครื่องทดสอบจะเริ่มจ่ายกระแสเข้าสู่ชิ้นงานทดสอบ เมื่อครบเวลาที่กำหนดไว้ ทำการบันทึกค่าที่ได้ ซึ่งก็คือ ค่า R
5. นำค่า R ที่วัดได้ มาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวดังสมการ 3.5

$$\sigma = \frac{RP}{g} \quad (3.5)$$

โดยที่ σ คือ สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) หน่วย Ω/square

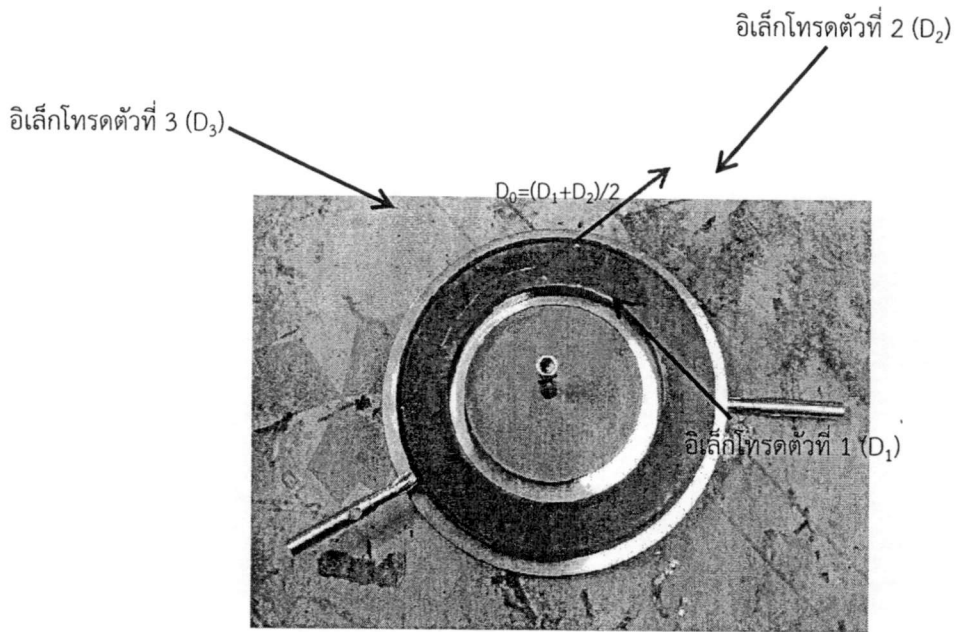
R คือ ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistance) หน่วย โอห์ม

g คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm) มีค่าเท่ากับ 4 cm

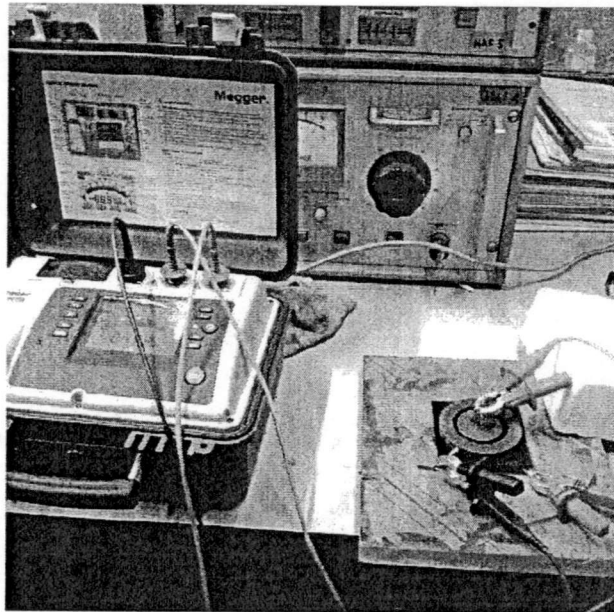
P คือ ขนาดเส้นรอบวงของอิเล็กโทรด (cm) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.6

$$P = \pi D_0 \quad (3.6)$$

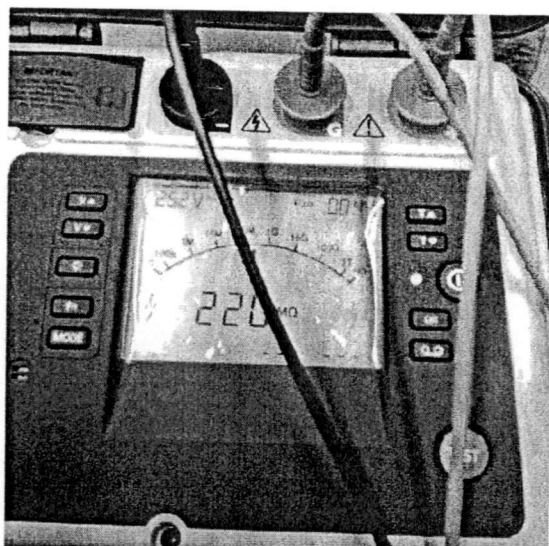
โดยที่ $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{5 + 9}{2} = 7 \text{ cm}$ ดังนั้น P มีค่าเท่ากับ 21.991 cm



รูปที่ 3.12 ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.13 ลักษณะการจัดวางอุปกรณ์และชิ้นงานในการทดสอบ



รูปที่ 3.14 การอ่านค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวที่วัดได้จากเครื่องทดสอบ

3.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CB ด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM)

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ส่งชิ้นงานทดสอบไปทำการทดสอบสัณฐานวิทยาที่หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งทำการตรวจสอบโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ ผงคาร์บอนแบล็ค และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท ในพลาสติกเชิงประกอบระหว่าง PC และ ABS และศึกษาความสามารถในการยึดเกาะกับเนื้อพลาสติกเชิงประกอบของสารตัวเติมทั้ง 2 ชนิด โดยในการเตรียมชิ้นงานทดสอบ จะนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในไนโตรเจนเหลวจนชิ้นงานทดสอบเปราะ และสามารถหักได้ จากนั้นทำการเคลือบทองบนชิ้นงาน นำชิ้นงานที่ได้จากการเตรียมไปส่องกล้องที่กำลังขยายขนาดต่างๆ พร้อมทั้งบันทึกภาพ

โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด เป็นเครื่องมือวิทยาศาสตร์ประเภทกล้องจุลทรรศน์ซึ่งมีหลักการ คือ การใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวของตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบ และจะมีตัวตรวจวัดที่มาจับสัญญาณอิเล็กตรอนที่เกิดจากการที่ลำอิเล็กตรอนไปกระทบผิวตัวอย่าง จากนั้นมีอุปกรณ์ในการแปลงสัญญาณที่ได้ เป็นภาพปรากฏบนจอรับภาพต่อไป ผลที่ได้คือ ภาพของวัตถุที่แสดงข้อมูลของลักษณะพื้นผิวปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

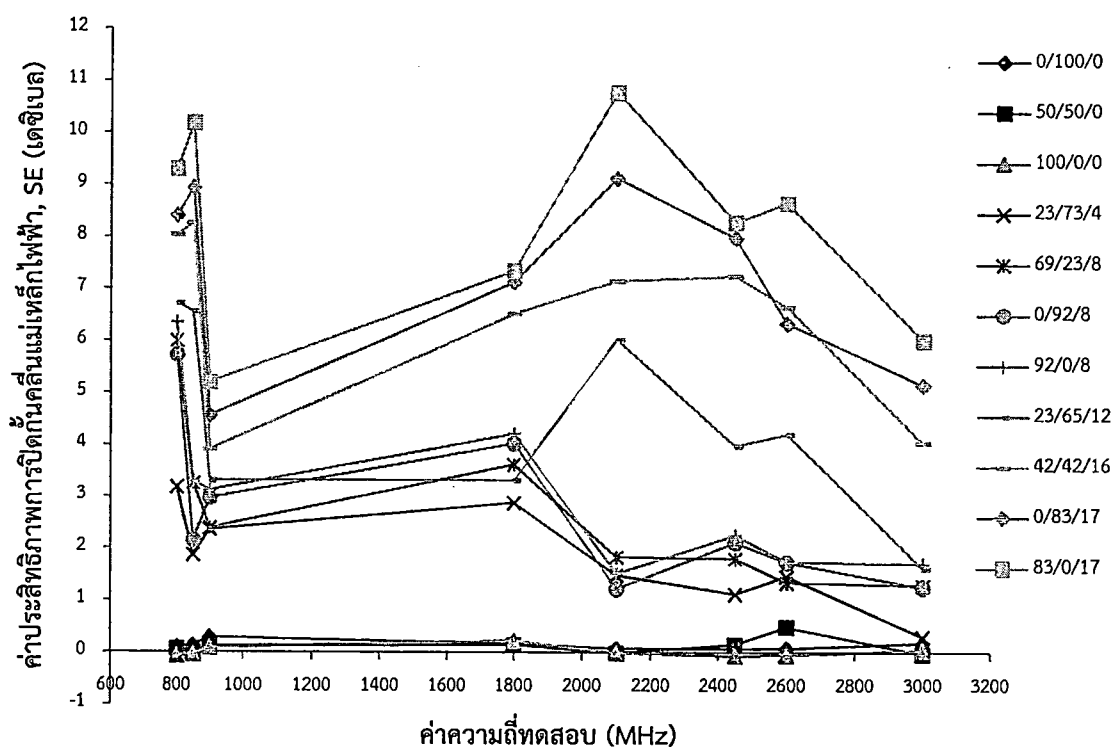
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเพิ่มสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference, EMI) และความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) ของพลาสติกเชิงประกอบ (Composite plastic) ระหว่างพอลิ-คาร์บอนเนต (Polycarbonate, PC) และอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ที่ได้จากการเติมผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารตัวเติม (Filler) ที่ช่วยเพิ่มคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้า (Conductivity) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญสำหรับการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการลดการประทุของไฟฟ้าสถิตของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าว โดยสารตัวเติมเหล่านี้เมื่อถูกผสมกับพอลิเมอร์เบลนด์ (Polymer blend) จะทำให้สมบัติด้านการนำไฟฟ้าของพลาสติกดังกล่าวเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากพลาสติกมีสมบัติเป็นวัสดุที่เป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นสารตัวเติมจึงเป็นสารสำคัญที่จะช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความสามารถในการนำไฟฟ้าของพลาสติกให้ตรงกับความต้องการ และเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้งานในลักษณะเฉพาะ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมชิ้นงานทดสอบโดยทำการผสมสารตัวเติมนำไฟฟ้ากับพอลิเมอร์เบลนด์ระหว่าง PC/ABS และทำการฉีดขึ้นรูปด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป (Injection molding) พร้อมทั้งทดสอบสมบัติของพลาสติกเชิงประกอบ ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ได้แก่ ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สมบัติทางไฟฟ้า และลักษณะทางสัณฐานวิทยา โดยมีผลการทดสอบดังนี้

4.1 ค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

โดยปกติวัสดุที่นำมาใช้ในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่วนมากจะผลิตมาจากวัสดุจำพวกโลหะ เนื่องจากโลหะเป็นวัสดุที่มีค่าการนำไฟฟ้าสูง อย่างไรก็ตามการผสมสารตัวเติมรวมถึงวัสดุจำพวกโลหะลงในพลาสติกยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการกระจายตัว ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของสารตัวเติม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม และกรรมวิธีในการผสม[8] ที่จะส่งผลต่อการเข้ากันของสารตัวเติมกับเนื้อเมทริกซ์พอลิเมอร์[11] [25] ทำให้ส่งผลต่อคุณสมบัติด้านการนำไฟฟ้า และการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอีกด้วย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยศึกษาผลของปัจจัยคือ ปริมาณสารตัวเติม ขนาดอนุภาคของสารตัวเติม (ผงคาร์บอนแบล็ค 22 nm และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ 26 nm) และลักษณะของสารตัวเติม(เป็นผง และเป็นมาสเตอร์แบทช์ในรูปแบบของเม็ดพลาสติก) หลังจากเลือกปัจจัยที่ใช้ในการศึกษา จึงทำการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Design of Experiment, DOE) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ทำการออกแบบการทดลองจากโปรแกรม Design Expert® เพื่อศึกษาและหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปริมาณพลาสติก PC ABS และปริมาณสารตัวเติม ที่ส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามากที่สุด โดยจากการทดลอง เพื่อวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการวัดประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบในช่วงความถี่ 800-3,000 MHz ซึ่งเป็นช่วง

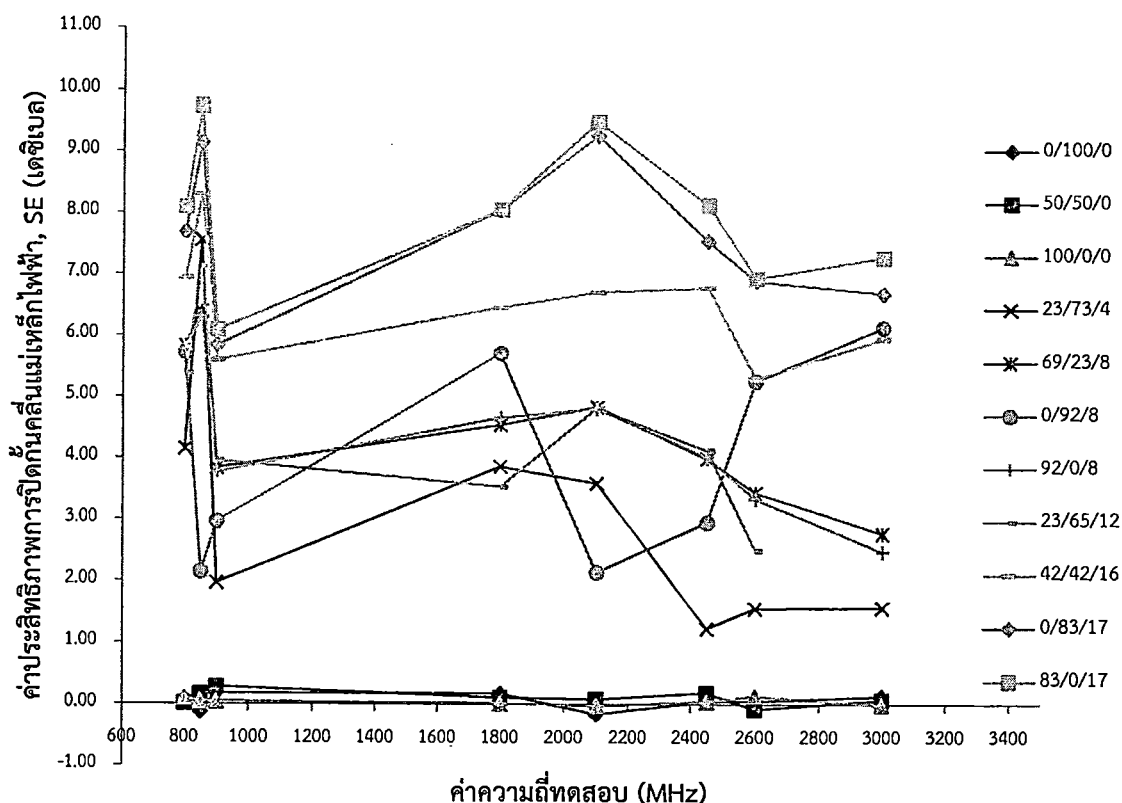
ความถี่ที่สำคัญที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร และเป็นช่วงความถี่ที่มีการใช้งานเป็นจำนวนมาก โดยแบ่งช่วงในการทดสอบออกเป็น 8 ช่วง คือ 800 850 900 1800 2100 2450 2600 และ 3000 MHz ตามลำดับ

พร้อมทั้งนำข้อมูลผลการทดลองที่ได้ มาทำการวิเคราะห์ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปัจจัย (Factor) เชิงปริมาณ ทั้ง 3 ปัจจัย คือ พลาสติกชนิด PC พลาสติกชนิด ABS และสารตัวเติม CB เพื่อให้ได้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีที่สุด ซึ่งผลจากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตามมาตรฐานการทดสอบ MIL-STD-285 แสดงในภาคผนวก ข. ซึ่งจะได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 นอกจากนั้นทำการหาแบบจำลองการถดถอย (Regression model) เพื่อใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่ออัตราส่วนของปัจจัยเชิงปริมาณทั้ง 3 ปัจจัยเปลี่ยนแปลงไป โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูลของผลการทดลองที่ความถี่ทดสอบ 800 900 และ 2450 MHz ด้วยโปรแกรม Design Expert®



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัว

เติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) กับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ที่ความถี่ทดสอบต่างๆ



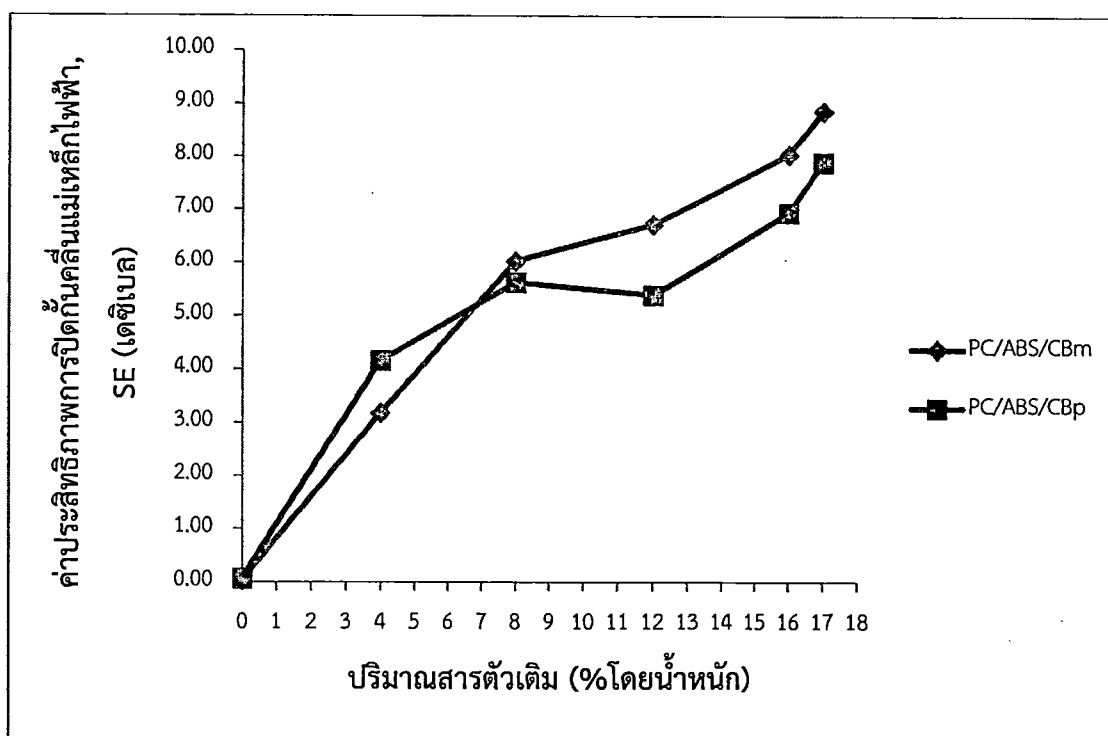
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) กับค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ที่ความถี่ทดสอบต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 และ 4.2 พบว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม ซึ่งก็คือผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) โดยจะเห็นว่า เมื่อปริมาณสารตัวเติมในพลาสติกเชิงประกอบเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้คุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าวดีขึ้นด้วย เนื่องจากสารตัวเติมมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า จึงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวให้กับพลาสติกเชิงประกอบ ที่ปกติมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในบทที่ 2 ที่ระบุว่า วัสดุที่สามารถใช้ในงานปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption loss) และการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อน (Reflection loss) เป็นคุณสมบัติขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ ถ้าค่าของการสูญเสียทั้งสองประเภทมีค่ามากก็จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุมีค่ามากด้วย ดังสมการที่ 2.2

4.1.1 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

จากผลการทดลองพบว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของสารตัวเติมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 เนื่องจากสารตัวเติมมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณที่มาก จะส่งผลให้พลาสติกซึ่งเป็นเมทริกซ์ของพลาสติกเชิงประกอบมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่มากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้า[10] [31] และจากงานวิจัยก่อนหน้าของปรวิทย์ [31] พบว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่าจะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่า แต่ผลการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) ของของพลาสติกเชิง

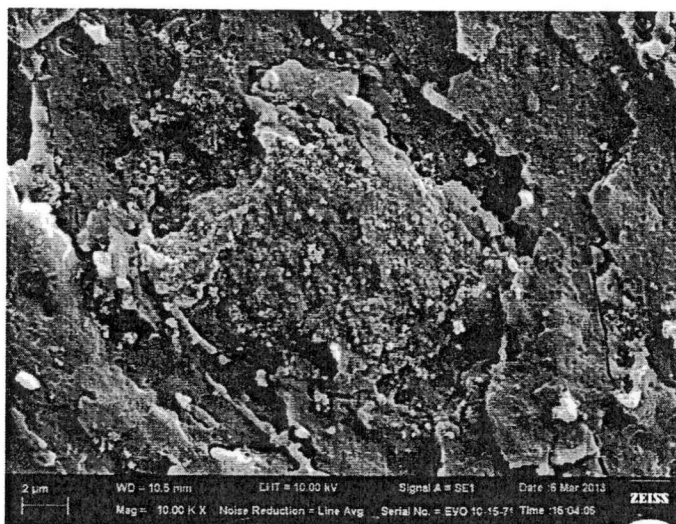
ประกอบที่เติมสารตัวเติมเป็นผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่เล็กกว่า (22 nm) ให้ค่าใกล้เคียงกันกับค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบที่เติมสารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) ที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ (26 nm) ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ดังนั้นปัจจัยในด้านขนาดอนุภาคของสารตัวเติมจึงเป็นปัจจัยมีอิทธิพลน้อยต่อค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เนื่องจากลักษณะการกระจายตัวของสารตัวเติมในเมทริกซ์พอลิเมอร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และ 4.5 ซึ่งเมื่อพิจารณาภาพที่แสดงลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วน 0.42/0.42/0.16 พบว่าเมื่อมีการผสมสารตัวเติมเข้าไป สารตัวเติมดังกล่าวจะกระจายตัวอยู่ในเนื้อเมทริกซ์ ซึ่งเป็นพลาสติกเชิงประกอบระหว่างพลาสติก PC/ABS ดังรูปที่ 4.4(a) ซึ่งการกระจายตัวของผงคาร์บอนแบล็คในเมทริกซ์ไม่ค่อยดี เนื่องจากยังมีการเกาะกลุ่มของผงเป็นแอ็กกริเกต (Aggregates) ไม่แยกออกจากกันเป็นอนุภาค ดังแสดงในรูปที่ 4.4(b) แม้ว่าจะมีปริมาณผงคาร์บอนแบล็คเยอะกว่าอัตราส่วนอื่นๆ แต่จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวไม่ดี จึงเกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแหที่ไม่ดี ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ดีเท่าที่ควร [11] [25] [65] ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าของ พรวิทย์ [31] เมื่อใช้ผงคาร์บอนแบล็คเกรด N220 ผสมในยางธรรมชาติ พบว่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงถึง 21.4 dB และเมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาพบว่า ผงคาร์บอนแบล็คมีการกระจายในยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกันกับอัตราส่วนที่ผสมผงคาร์บอนแบล็คในปริมาณที่น้อย การกระจายตัวของผงคาร์บอนแบล็คก็มีการกระจายตัวที่ไม่ดีเหมือนกัน ดังรูปที่ 4.5(a) และ 4.5(b) ซึ่งส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าน้อย



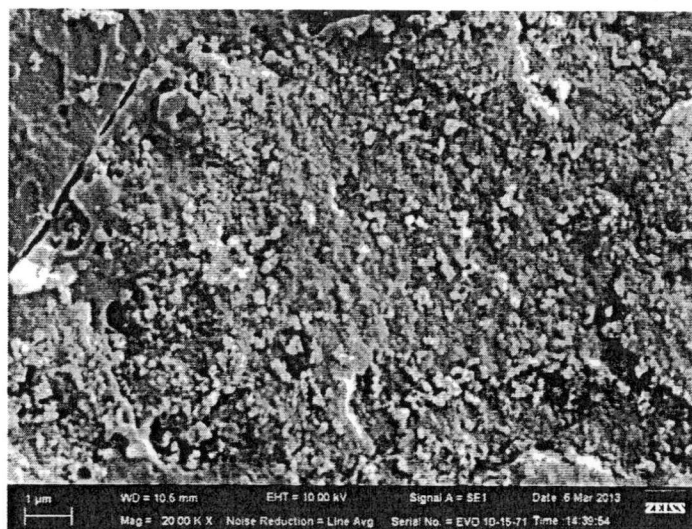
รูปที่ 4.3 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz ของพลาสติกเชิงประกอบนำไฟฟ้า PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) ที่ปริมาณต่างๆ ของสารตัวเติม

และเมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วน 0.42/0.42/0.16 และ 0.69/0.23/0.08 ดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 จะไม่พบลักษณะการกระจายของอนุภาคของคาร์บอนแบล็ค เนื่องจากว่า ในงานวิจัยนี้เป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท ซึ่งเป็นการผสมผงคาร์บอนแบล็คเข้มข้น เข้ากับเมทริกซ์พอลิเมอร์มาแล้วจากทางโรงงาน ดังนั้นลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของคาร์บอนแบล็คจึงกระจายตัวดี และสม่ำเสมอ

ในเมทริกซ์พอลิเมอร์อยู่แล้ว ซึ่งเมื่อนำมาผสมกับพลาสติก PC และ ABS ก็น่าจะผสมกันได้ดีกว่า เมื่อผสมกับผงคาร์บอนแบล็คที่มีโครงสร้างแบบสารอินทรีย์ เพราะมีโครงสร้างเป็นสารอินทรีย์เหมือนกัน[5] จึงส่งผลให้ค่าการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้สารตัวเติมเป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (26 nm) ใหญ่กว่าผงคาร์บอนแบล็ค (22 nm) มีค่าใกล้เคียงกัน แม้ว่าสารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยเล็กกว่า จะส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่า

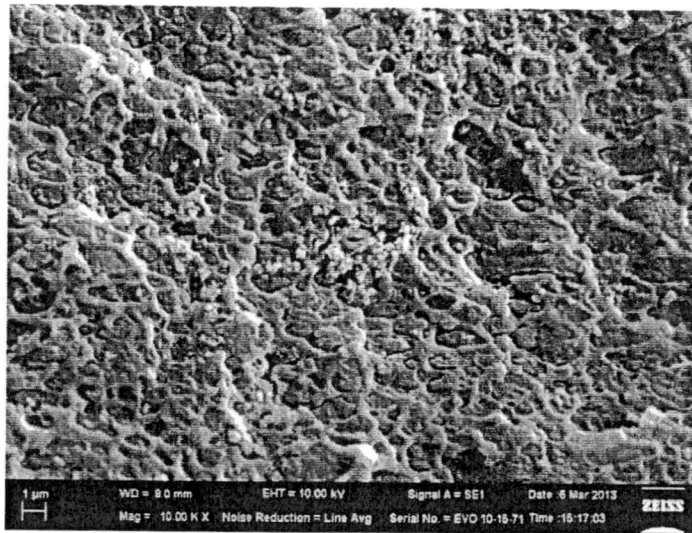


(a)

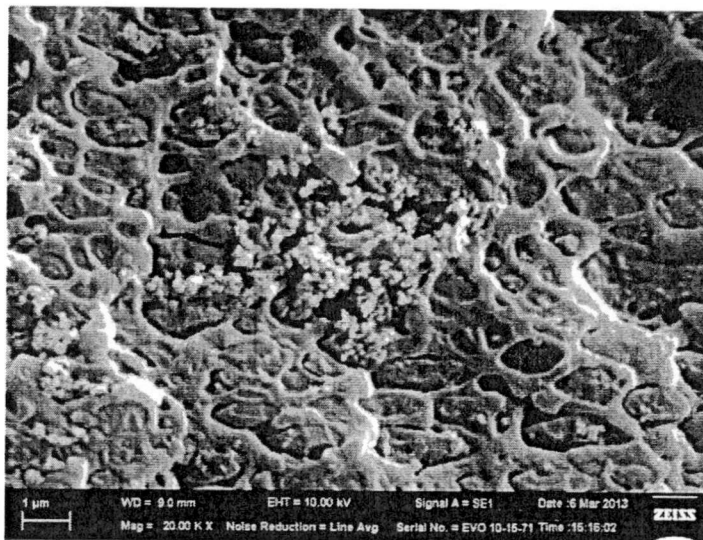


(b)

รูปที่ 4.4 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วน 0.42/0.42/0.16 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



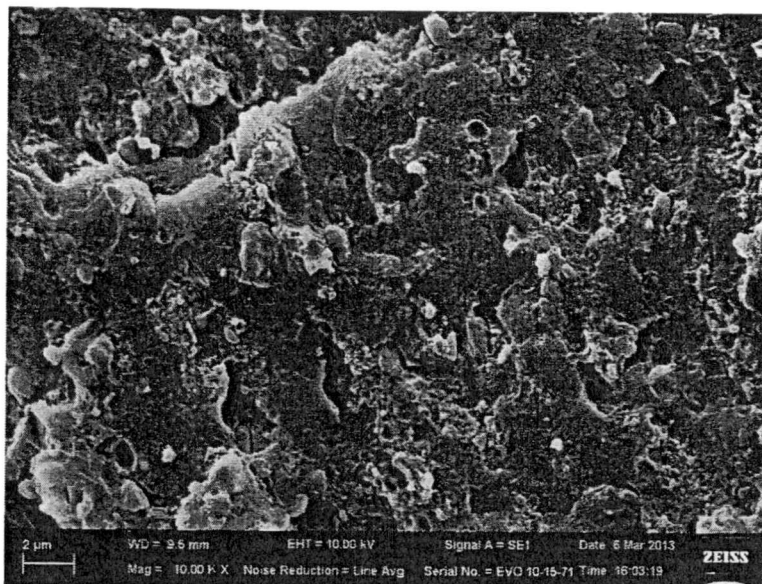
(a)



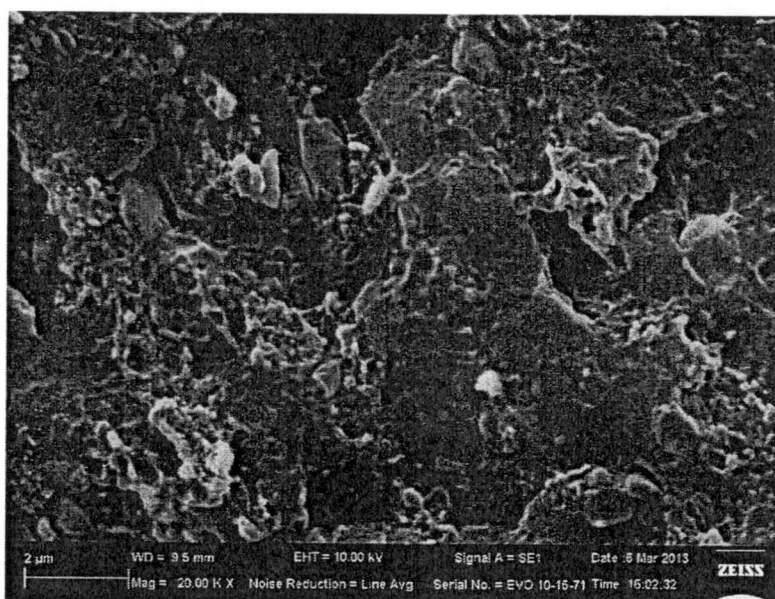
(b)

รูปที่ 4.5 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วน 0.69/0.23/0.08 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

ซึ่งการที่ผงคาร์บอนแบล็คมีการกระจายตัวในเนื้อพลาสติกไม่ดีเนื่องจากวิธีการผสมพลาสติก PC, พลาสติก ABS และสารตัวเติม สำหรับงานวิจัยนี้ จะใช้การเขย่าส่วนผสมต่างๆให้เข้ากัน และจะใช้การหมุนของสกรูที่อยู่ภายในเครื่องฉีดพลาสติก เป็นตัวช่วยในการคอมปาวด์พลาสติก ซึ่งเป็นเนื้อวัสดุหลักกับสารตัวเติม โดยสกรูที่อยู่ภายในเครื่องฉีดพลาสติก เป็นสกรูที่มีลักษณะแบบธรรมดา ขณะที่ทำการหมุน เพื่อให้พลาสติกและสารตัวเติมเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกัน เกิดแรงเฉือนที่ไม่มากพอที่จะทำให้สารตัวเติมมีการกระจายที่ดีในระดับไมโครเมตร ผงคาร์บอนแบล็คจึงมีการกระจายตัวที่ไม่ดีในเนื้อพลาสติก

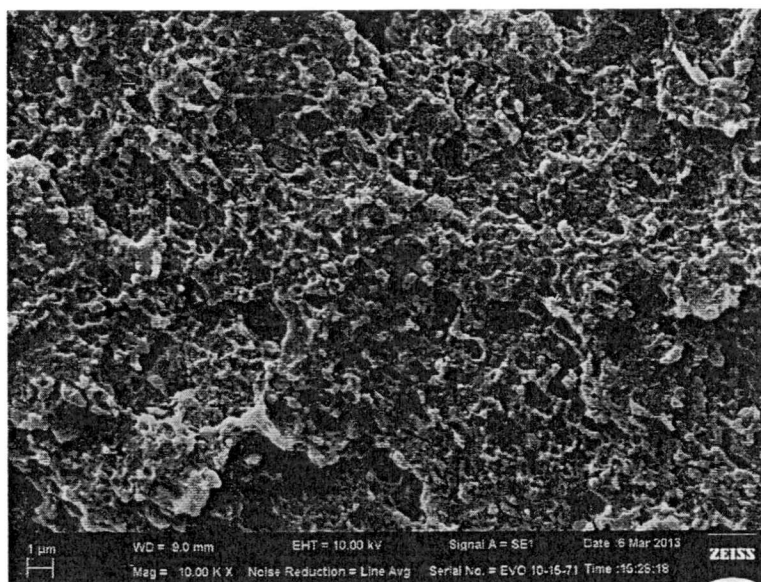


(a)

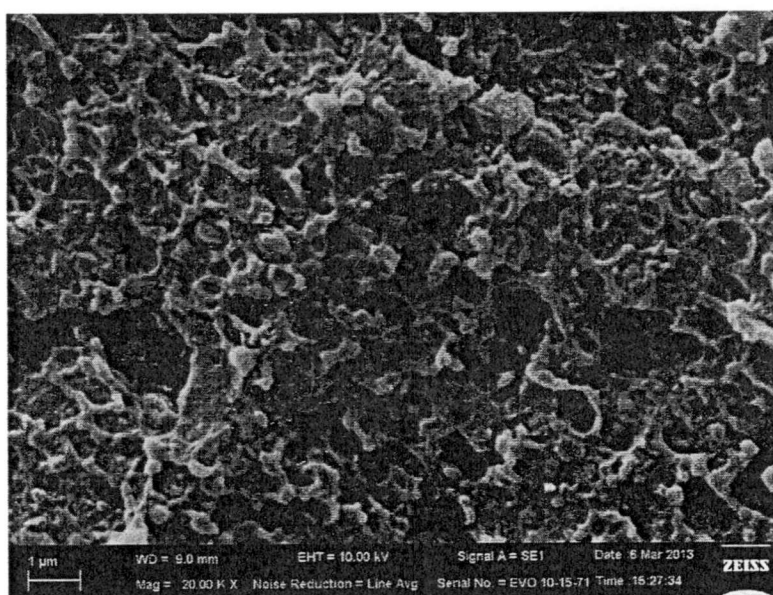


(b)

รูปที่ 4.6 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วน 0.42 /0.42/0.16 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า



(a)



(b)

รูปที่ 4.7 สัณฐานวิทยาของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วน 0.69/0.23/0.08 จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (a) ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า (b) ที่กำลังขยาย 20,000 เท่า

4.1.1.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากตารางที่ 4.1 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Design Expert[®] ซึ่งโปรแกรมดังกล่าว จะทำการแนะนำแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ในที่นี้โปรแกรมได้ทำการแนะนำแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) และเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่า ค่า Adjust R-Square และ ค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสามมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ

นอกจากนั้นค่า Std. Dev. และค่า PRESS ของแบบจำลองกำลังสามมีค่าต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ด้วย ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองกำลังสาม เป็นแบบจำลองที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 4.1 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.76	0.9667	0.9615	0.9518	10.74
Quadratic	0.26	0.9969	0.9953	0.9928	1.61
Special Cubic	0.15	0.9991	0.9984	0.9972	0.63
Cubic	<u>0.11</u>	<u>0.9997</u>	<u>0.9992</u>	<u>0.9978</u>	<u>0.50</u>

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสาม เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.2 ซึ่งจะพบว่าที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.6373 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า < 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำส่วนผสมทุกอย่างไปคำนวณสมการถดถอยที่เหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ส่วนที่เป็นเชิงเส้นตรงนั้นไม่สามารถตัดส่วนผสมออกจากสมการได้ ไม่ว่าจะส่วนผสมนั้นจะมีผลหรือไม่มีผลต่อผลตอบก็ตาม เนื่องจากไม่สามารถไม่ใส่ส่วนผสมดังกล่าว แต่ว่าสามารถใส่ในปริมาณเท่าใดก็ได้ จากปริมาณที่เหลือจากการหักส่วนผสมอื่นๆ ออกแล้ว

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ ดังตารางที่ 4.3 และจะได้สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีผลต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดังสมการที่ 4.1

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz คือ

$$SE = -0.061A + 0.10B + 502.72C + 0.14AB - 819.99AC - 816.79BC + 811.86ABC + 2.16AB(A-B) + 426.13AC(A-C) + 410.22BC(B-C) \quad (4.1)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.2 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	222.81	24.76	2158.80	< 0.0001
Linear Mixture	2	215.45	107.73	9393.60	< 0.0001
AB	1	0.00	0.00	0.14	0.7211
AC	1	0.03	0.03	2.59	0.1590
BC	1	0.03	0.03	2.56	0.1605
ABC	1	0.05	0.05	3.94	0.0943
AB(A-B)	1	0.05	0.05	4.78	0.0715
AC(A-C)	1	0.05	0.05	4.40	0.0808
BC(B-C)	1	0.05	0.05	4.05	0.0907
Residual	6	0.07	0.01		
Lack of Fit	1	3.295E-003	3.295E-003	0.25	0.6373
Pure Error	5	0.07	0.01		
Total	15	222.88			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.3 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

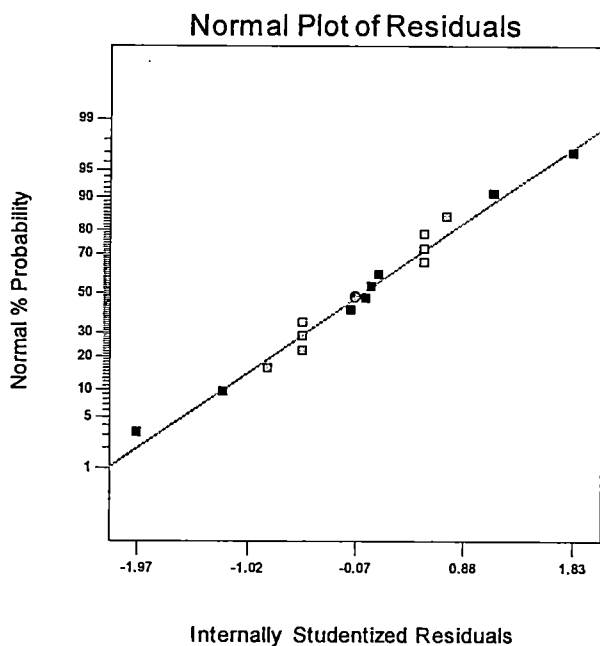
Std. Dev.	0.11	R-Squared	0.9997
Mean	4.48	Adj R-Squared	0.9992
C.V. %	2.39	Pred R-Square	0.9978
PRESS	0.50	Adeq Precisor	110.639

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง (Model adequacy checking)

โดยปกติแล้วก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง ต้องมีการตรวจสอบแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนหรือส่วนตกค้าง (Residual analysis, ϵ_{ij}) โดยความคลาดเคลื่อน คือ ความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงที่เก็บมาได้กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง จึงสามารถประมาณได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ



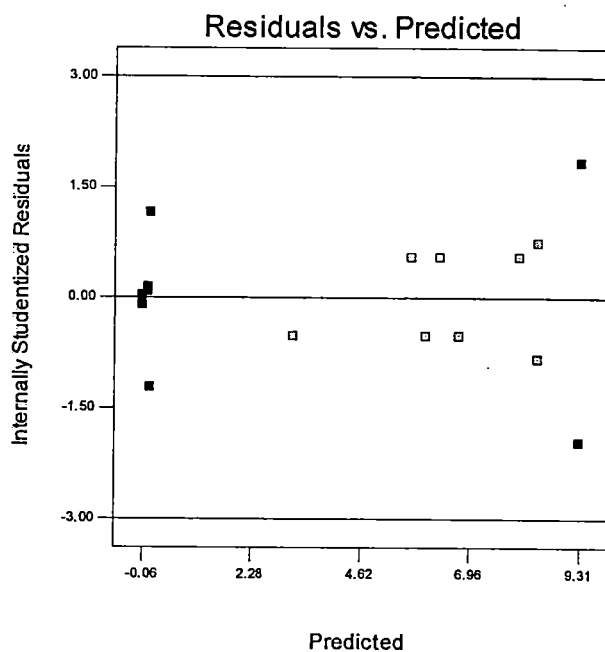
รูปที่ 4.8 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

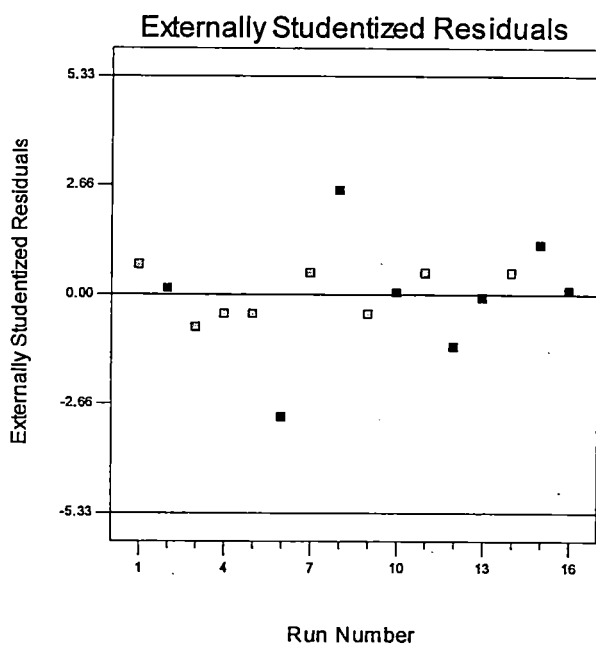
ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็นค่าคงที่ ถ้าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ควรมีรูปแบบ หรือแนวโน้มใดๆ เกิดขึ้น โดยสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย ดังรูปที่ 4.9 เมื่อค่า Internally Studentized Residuals ในที่นี้หมายถึงค่า Studentized Residuals พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เนื่องจากลักษณะของจุดข้อมูลไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น แม้ว่าจะดูไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากว่าข้อมูลมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีความแปรปรวนคงที่

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

ภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนในที่นี้จะใช้ Externally Studentized Residuals ซึ่งหมายถึงค่า Studentized Residuals ที่ใช้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i กับลำดับของการเก็บข้อมูล ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับและเวลาที่เก็บข้อมูล



รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert[®] จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz ดังสมการที่ 4.1 และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคค

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย ที่ได้ โดยการทดสอบในกระบวนการจริง ซึ่งจะนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.83	0	0.17	9.31	9.26	-0.54
2	0.6	0.23	0.17	8.63	8.74	1.27
3	0.55	0.29	0.17	8.47	8.53	0.71
4	0.52	0.32	0.17	8.4	8.38	-0.24
5	0.5	0.33	0.17	8.36	8.4	0.48
6	0.05	0.84	0.11	6.68	6.69	0.15
7	0.25	0.65	0.1	6.1	6.03	-1.15
8	0.39	0.54	0.07	4.9	5.01	2.24

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 2.24% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

4.1.1.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากตารางที่ 4.5 โปรแกรม Design Expert[®] ได้ทำการแนะนำแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยที่ทำการศึกษาเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่า ค่า Adjust R-Square และค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสามมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ นอกจากนั้นยังให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ ด้วย ดังนั้นแบบจำลองกำลังสามเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่จะใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 4.5 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่
ความถี่ 800 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.93	0.9345	0.9244	0.9113	15.26
Quadratic	0.61	0.9784	0.9676	0.9596	6.95
Special Cubic	0.55	0.9843	0.9738	0.9644	6.12
Cubic	<u>0.11</u>	<u>0.9996</u>	<u>0.9990</u>	<u>0.9891</u>	<u>1.87</u>

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสาม เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.6

และเมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz จากตารางที่ 4.6 ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.1528 ซึ่งมากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ ดังตารางที่ 4.7 และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 4.2

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz คือ

$$SE = 0.088A + 0.081B + 4451.18C - 0.20AB - 7296.87AC - 7286.17BC + 6009.48ABC + 2.72AB(A-B) + 3019.66AC(A-C) + 2999.24BC(B-C) \quad (4.2)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	172.07	19.12	1686.74	< 0.0001
Linear Mixture	2	160.86	80.43	7095.95	< 0.0001
AB	1	0.00	0.00	0.32	0.5913
AC	1	2.42	2.42	213.18	< 0.0001
BC	1	2.41	2.41	212.47	< 0.0001
ABC	1	2.55	2.55	225.14	< 0.0001
AB(A-B)	1	0.09	0.09	7.70	0.0323
AC(A-C)	1	2.61	2.61	230.01	< 0.0001
BC(B-C)	1	2.56	2.56	226.14	< 0.0001
Residual	6	0.07	0.01		
Lack of Fit	1	0.02	0.02	2.84	0.1528
Pure Error	5	0.04	8.675E-003		
Total	15	172.14			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.7 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

Std. Dev.	0.11	R-Squared	0.9996
Mean	4.08	Adj R-Squared	0.9990
C.V. %	2.61	Pred R-Square	0.9891
PRESS	1.87	Adeq Precisor	95.602

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

เช่นเดียวกับการตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยของค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

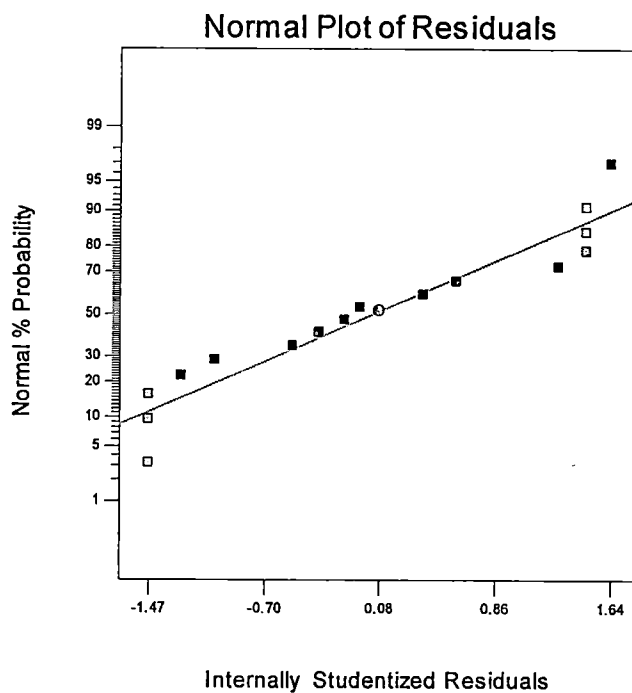
จากรูปที่ 4.11 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน จะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง จึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

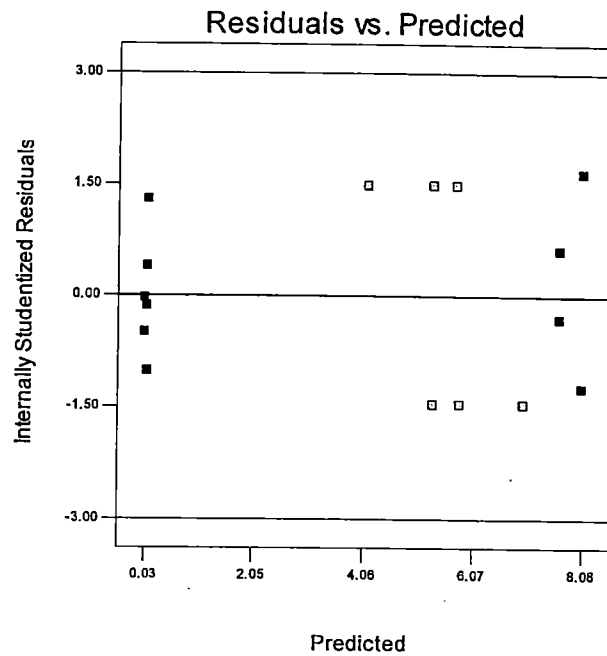
ในทำนองเดียวกันถ้าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ควรมีรูปแบบ หรือแนวโน้มใดๆ เกิดขึ้น ซึ่งจากรูปที่ 4.12 เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย พบว่า ลักษณะของจุดข้อมูลไม่มีแนวโน้ม หรือเป็นเส้นโค้งเกิดขึ้น แม้ว่าจะดูไม่ค่อยสม่่าเสมอนัก เนื่องจากว่าข้อมูลมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

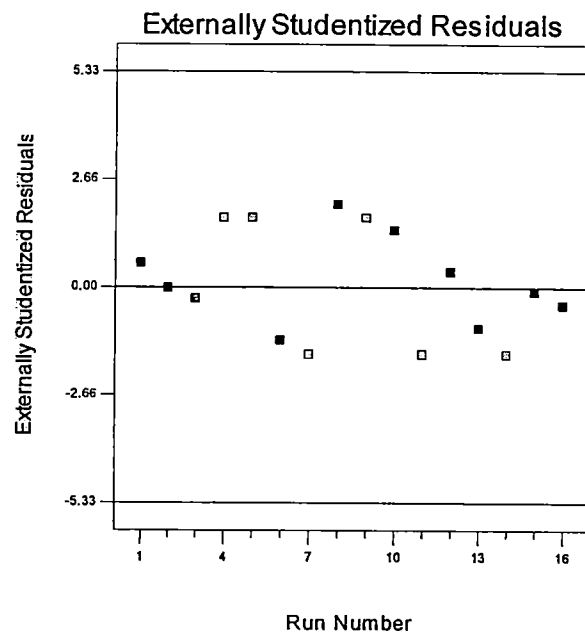
จากรูปที่ 4.13 ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับการเก็บข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.11 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

จากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert[®] จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz ดังสมการที่ 4.2 และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในขนาดเช่นเดียวกัน

และจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ ซึ่งเป็นการทดสอบในกระบวนการจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.8

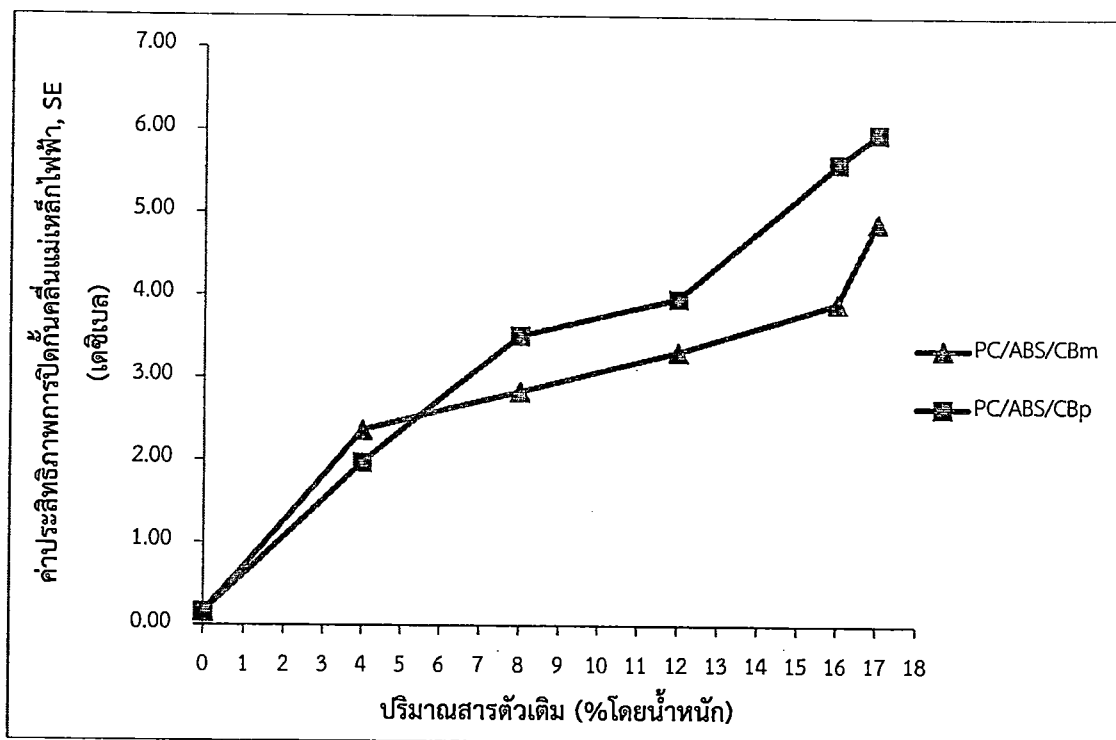
ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 4.8 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ -1.32% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.83	0	0.17	8.08	8.04	-0.50
2	0.6	0.23	0.17	7.86	7.77	-1.15
3	0.55	0.29	0.17	7.77	7.68	-1.16
4	0.52	0.32	0.17	7.73	7.83	1.29
5	0.5	0.33	0.17	7.7	7.75	0.65
6	0.48	0.35	0.17	7.67	7.59	-1.04
7	0.46	0.38	0.17	7.63	7.66	0.39
8	0.42	0.42	0.17	7.57	7.47	-1.32

4.1.2 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

จากผลการทดลองพบว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อมีปริมาณของสารตัวเติมในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.10 เช่นเดียวกันกับแนวโน้มค่า SE ที่ความถี่ 800 MHz นอกจากแนวโน้มของค่า SE ที่ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติมแล้ว อิทธิพลในเรื่องของขนาดอนุภาคของสารตัวเติมก็ให้ผลเช่นเดียวกัน



รูปที่ 4.14 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz ของพลาสติกเชิง

ประกอบนำไฟฟ้า PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และ

คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) วมต่าง ๆ ของสารตัวเติม

4.1.2.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Design Expert[®] พบว่าแบบจำลองที่โปรแกรมทำการแนะนำโดยพิจารณาให้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา คือแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง จากตารางที่ 4.9 พบว่า ค่า Adjust R-Square และค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสามมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ และให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าแบบจำลองอื่น ดังนั้นแบบจำลองกำลังสามจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 4.9 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.45	0.9549	0.9479	0.9358	3.81
Quadratic	0.39	0.9749	0.9623	0.9475	3.11
Special Cubic	0.31	0.9851	0.9752	0.9681	1.89
Cubic	0.15	0.9977	0.9943	0.9910	0.53

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.10 พบว่า ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.9634 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้ จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	59.13	6.57	291.51	< 0.0001
Linear Mixture	2	56.59	28.29	1255.48	< 0.0001
AB	1	0.01	0.01	0.28	0.6188
AC	1	0.25	0.25	11.29	0.0152
BC	1	0.26	0.26	11.39	0.0149
ABC	1	0.26	0.26	11.71	0.0141
AB(A-B)	1	0.25	0.25	11.21	0.0155
AC(A-C)	1	0.27	0.27	12.03	0.0133
BC(B-C)	1	0.27	0.27	12.18	0.0130
Residual	6	0.14	0.02		
Lack of Fit	1	1.898E-004	1.898E-004	7.029E-003	0.9364
Pure Error	5	0.14	0.03		
Total	15	59.26			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ ความถี่ 900 MHz

Std. Dev.	0.15	R-Squared	0.9977
Mean	2.41	Adj R-Squared	0.9943
C.V. %	6.23	Pred R-Square	0.9910
PRESS	0.53	Adeq Precisor	43.166

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz คือ

$$SE = 0.083A + 0.29B + 1483.98C - 0.27AB - 2402.47AC - 2414.15BC + 1961.35ABC - 4.65AB(A-B) + 988.02AC(A-C) + 996.78BC(B-C) \quad (4.3)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

เช่นเดียวกันกับการตรวจสอบแบบจำลองการถดถอยของค่า SE ที่ความถี่ 800 MHz ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

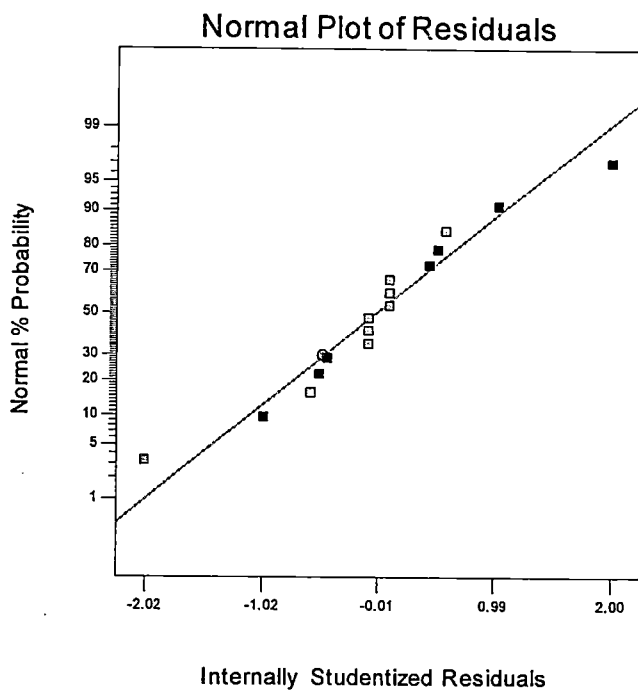
เมื่อพิจารณาจากกราฟ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 จะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง สามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

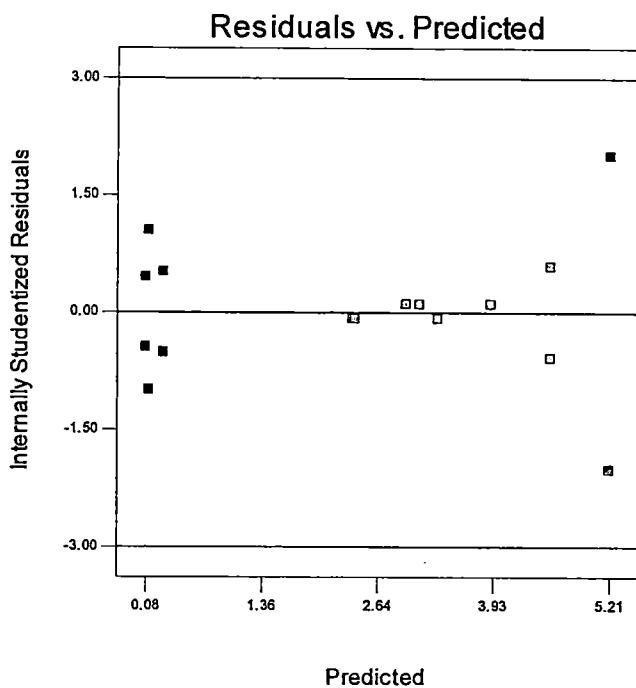
จากรูปที่ 4.16 เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย พบว่า ลักษณะของข้อมูลไม่มีแนวโน้ม หรือเป็นเส้นโค้งเกิดขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

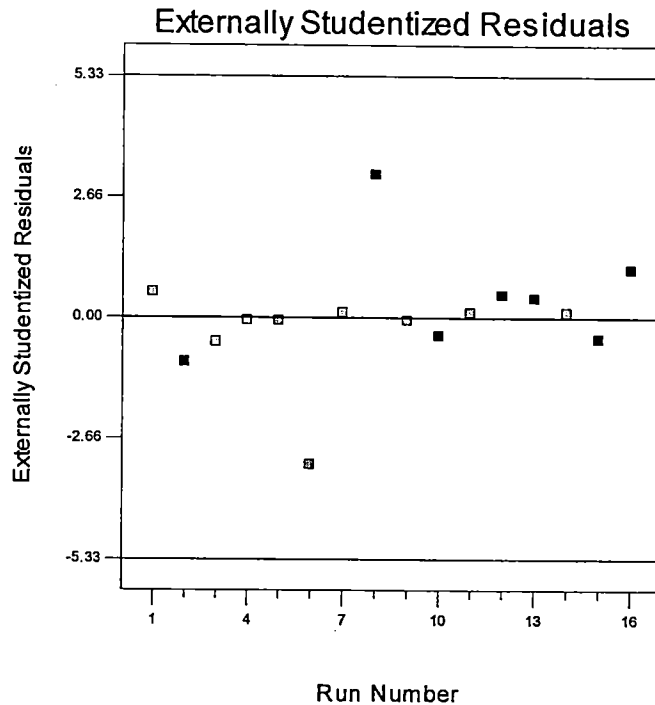
ตรวจสอบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ไม่เกิดการกระจายตัวแบบมีรูปแบบ (Pattern) แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.15 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 4.16 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคด

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

เช่นเดียวกับกับหัวข้อ 4.1.1 จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert® จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz ดังสมการที่ 4.3 และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ
PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.83	0	0.17	5.21	5.18	-0.58
2	0.04	0.8	0.17	4.57	4.49	-1.75
3	0.23	0.6	0.17	4.4	4.52	2.73
4	0.29	0.55	0.17	4.32	4.29	-0.69
5	0.32	0.52	0.17	4.28	4.24	-0.93
6	0.24	0.71	0.06	2.66	2.63	-1.13
7	0.33	0.62	0.04	2.24	2.3	2.68
8	0.19	0.78	0.04	2.24	2.22	-0.89

จากตารางที่ 4.12 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 2.73% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

4.1.2.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 900 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากการวิเคราะห์โดยโปรแกรม Design Expert[®] พบว่าแบบจำลองที่โปรแกรมทำการแนะนำคือ แบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) เช่นเดียวกัน ซึ่งเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่าค่า Std. Dev. และค่า PRESS ของแบบจำลองกำลังสาม มีค่าต่ำกว่าแบบจำลองอื่น และมีค่า Adjust R-Square และค่า R-Square สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 ดังนั้นแบบจำลองกำลังสามจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 4.13 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่
ความถี่ 900 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.32	0.9856	0.9834	0.9797	1.90
Quadratic	0.29	0.9908	0.9862	0.9789	1.97
Special Cubic	0.29	0.9920	0.9866	0.9783	2.03
Cubic	<u>0.13</u>	<u>0.9989</u>	<u>0.9973</u>	<u>0.9913</u>	<u>0.81</u>

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	93.36	10.37	606.86	< 0.0001
Linear Mixture	2	92.11	46.06	2694.46	< 0.0001
AB	1	0.05	0.05	2.85	0.1422
AC	1	0.21	0.21	12.36	0.0126
BC	1	0.20	0.20	11.90	0.0136
ABC	1	0.21	0.21	12.57	0.0121
AB(A-B)	1	0.05	0.05	3.08	0.1299
AC(A-C)	1	0.23	0.23	13.71	0.0101
BC(B-C)	1	0.20	0.20	11.82	0.0138
Residual	6	0.10	0.02		
Lack of Fit	1	5.969E-003	5.969E-003	0.31	0.6023
Pure Error	5	0.10	0.02		
Total	15	93.46			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

จากตารางที่ 4.14 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.6023 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังตารางที่ 4.15

ตารางที่ 4.15 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

Std. Dev.	0.13	R-Squared	0.9989
Mean	2.93	Adj R-Squared	0.9973
C.V. %	4.47	Pred R-Square	0.9913
PRESS	0.81	Adeq Precisor	58.486

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz คือ

$$SE = 0.035A + 0.17B + 1349.77C + 0.75AB - 2188.58AC - 2148.86BC + 1769.32ABC + 2.12AB(A-B) + 918.63AC(A-C) + 855.09BC(B-C) \quad (4.4)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

เช่นเดียวกันก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

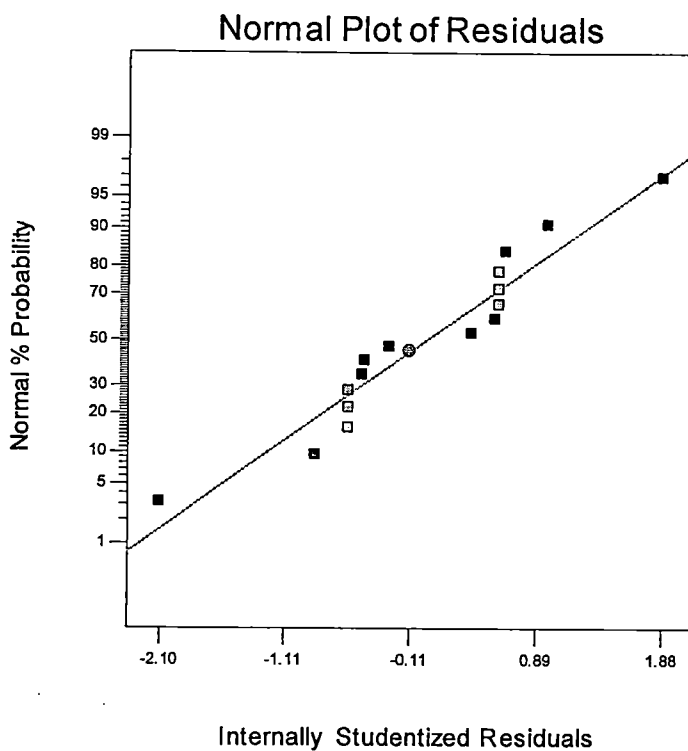
จากรูปที่ 4.18 จากกราฟ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน จะพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

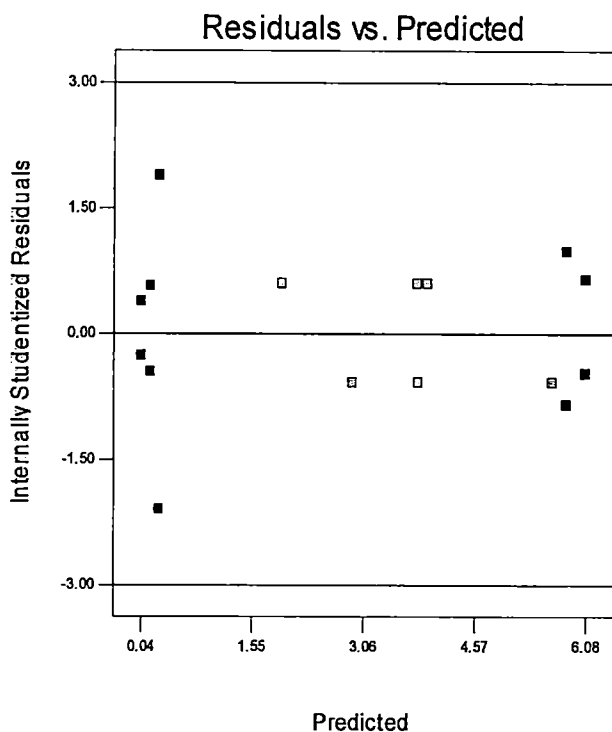
เมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย พบว่า ลักษณะของข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

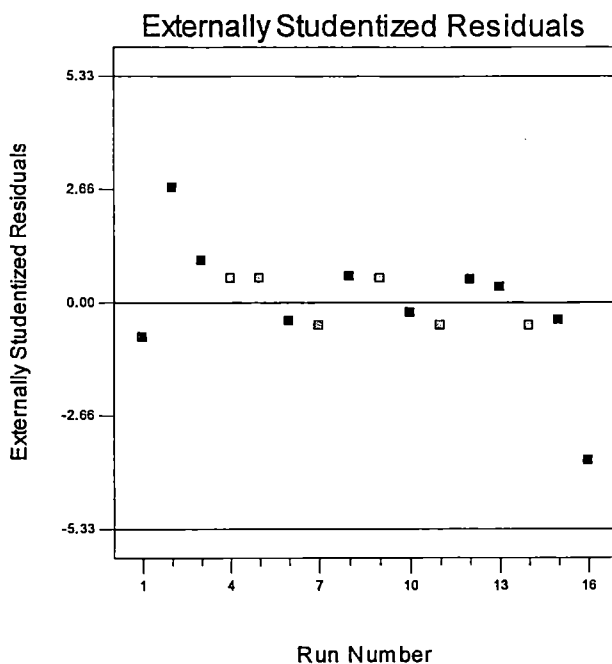
สามารถตรวจสอบสมมติฐานนี้ได้จากการพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.20 จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ไม่เกิดการกระจายตัวแบบมีรูปแบบ (Pattern) แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.18 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 4.19 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

เช่นเดียวกันจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz ดังสมการที่ 4.4 ซึ่งได้จากวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม Design expert[®] โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.16

จากการทดสอบจะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด ซึ่งเป็นค่าที่เปรียบเทียบระหว่างค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง กับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอยมีค่าใกล้เคียง โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ -1.81% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

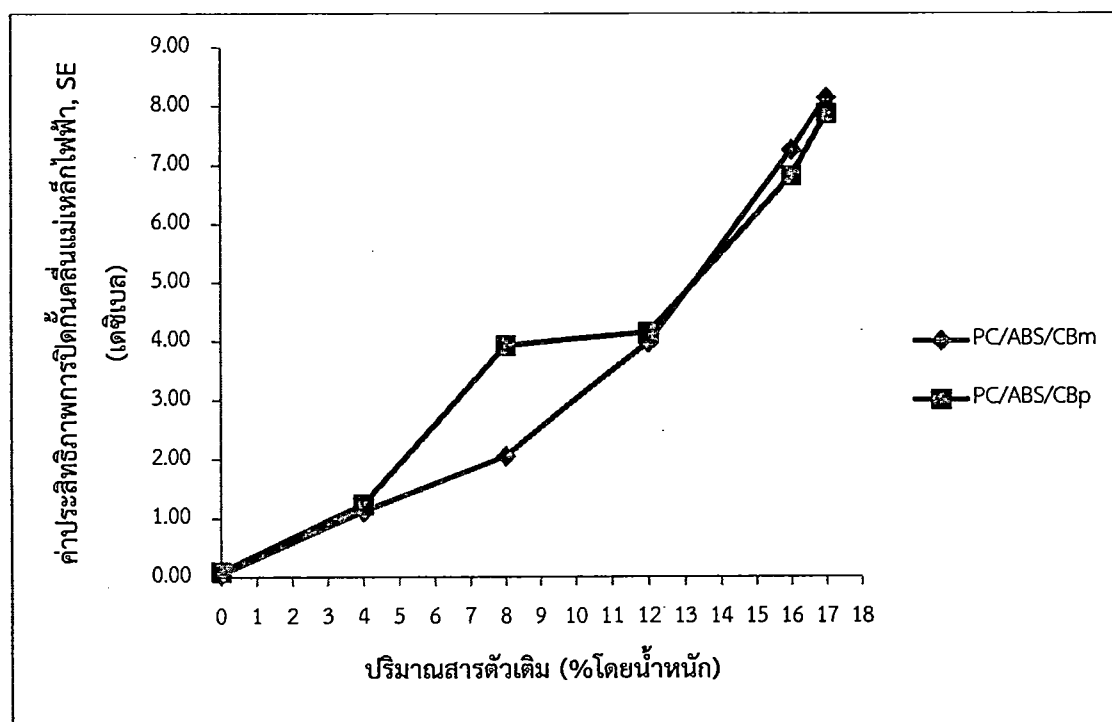
ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ

PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.7	0.13	0.17	6.15	6.2	0.81
2	0.6	0.23	0.17	6.12	6.16	0.65
3	0.55	0.29	0.17	6.08	5.97	-1.81
4	0.52	0.32	0.17	6.06	6.1	0.66
5	0.5	0.33	0.17	6.04	6.02	-0.33
6	0.49	0.34	0.17	6.03	5.97	-1.00
7	0.43	0.4	0.17	5.97	5.88	-1.51
8	0.42	0.42	0.17	5.95	5.93	-0.34

4.1.3 เมื่อพิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

จากผลการทดลองพบว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีแนวโน้มเช่นเดียวกันกับแนวโน้มที่ได้จากการทดลองที่ความถี่ 800 และ 900 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz ของพลาสติกเชิง

ประกอบนำไฟฟ้า PC/ABS ซึ่งมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และ

คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (CBm) - วมต่างๆ ของสารตัวเติม

4.1.3.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท (CBm)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากตารางที่ 4.17 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert[®] เช่นเดียวกัน โดยแบบจำลองที่โปรแกรมแนะนำว่าเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษาก็คือ แบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) ซึ่งเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่า ค่า Adjust R-Square และค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสามมีค่าสูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ นอกจากนั้นยังให้ค่า Std. Dev. ที่ต่ำด้วย ดังนั้นแบบจำลองกำลังสามจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ 4.17 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.95	0.9355	0.9256	0.9086	16.73
Quadratic	0.24	0.9967	0.9951	0.9932	1.24
Special Cubic	0.21	0.9978	0.9963	0.9946	0.99
Cubic	0.12	0.9995	0.9989	0.9894	1.95

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.18

และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.2207 ดังแสดงในตารางที่ 4.18 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ ดังตารางที่ 4.19 และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังสมการที่ 4.5

แบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz คือ

$$SE = -0.066A + 0.076B + 1414.32C + 0.50AB - 2130.75AC - 2132.55BC + 1468.35ABC - 2.94AB(A-B) + 740.70AC(A-C) + 738.74BC(B-C) \quad (4.5)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.18 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	182.89	20.32	1479.29	< 0.0001
Linear Mixture	2	171.18	85.59	6230.49	< 0.0001
AB	1	0.02	0.02	1.57	0.2562
AC	1	0.20	0.20	14.65	0.0087
BC	1	0.20	0.20	14.66	0.0087
ABC	1	0.15	0.15	10.83	0.0166
AB(A-B)	1	0.10	0.10	7.39	0.0347
AC(A-C)	1	0.15	0.15	11.15	0.0156
BC(B-C)	1	0.15	0.15	11.04	0.0160
Residual	6	0.08	0.01		
Lack of Fit	1	0.02	0.02	1.96	0.2207
Pure Error	5	0.06	0.01		
Total	15	182.98			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.19 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

Std. Dev.	0.12	R-Squared	0.9995
Mean	3.21	Adj R-Squared	0.9989
C.V. %	3.65	Pred R-Square	0.9894
PRESS	1.95	Adeq Precisor	90.4098

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

เช่นเดียวกันก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

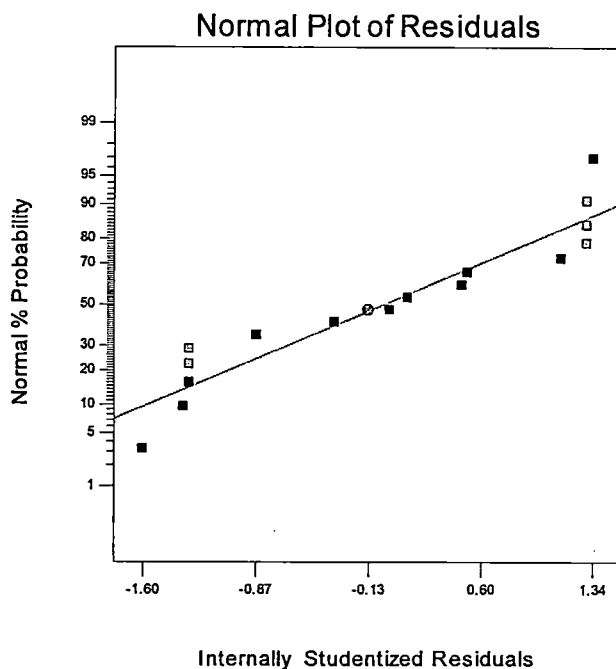
จากกราฟ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน ดังแสดงในรูปที่ 4.22 จะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

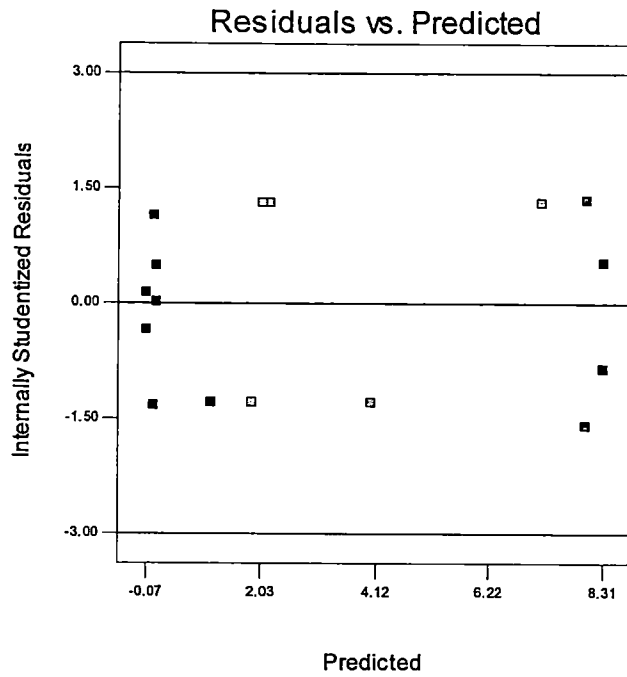
จากกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ลักษณะของข้อมูลไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น มีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

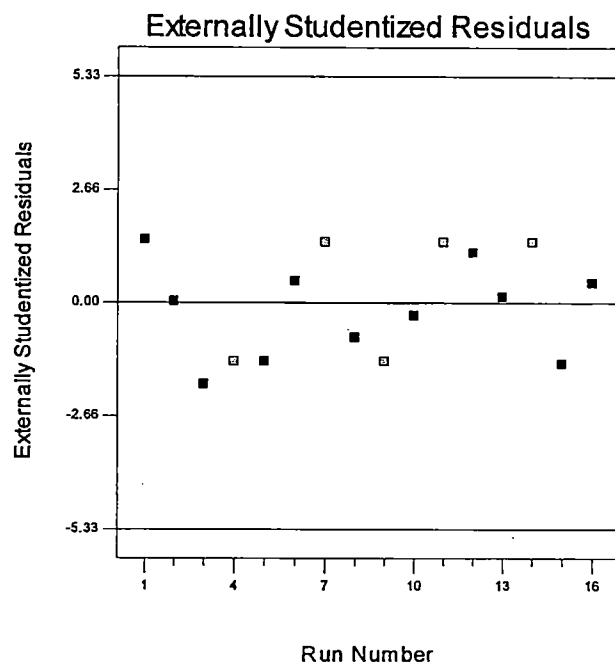
สามารถตรวจสอบได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4.24 จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ไม่เกิดการกระจายตัวแบบมีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กัลำดับของการเก็บข้อมูล



รูปที่ 4.22 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz



รูปที่ 4.23 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz



รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

เช่นเดียวกันกับในหัวข้อ 4.1.1 และ 4.1.2 จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert® จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz ดังสมการที่ 4.5 และจากการตรวจสอบแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย ที่ได้เช่นเดียวกัน โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.13	0.70	0.17	8.08	8.05	-0.37
2	0.23	0.60	0.17	8.05	7.97	-0.99
3	0.02	0.81	0.17	8.02	8.18	2.00
4	0.00	0.83	0.17	8.00	7.94	-0.75
5	0.32	0.52	0.17	7.99	8.03	0.50
6	0.03	0.93	0.04	0.94	0.93	-1.06
7	0.20	0.77	0.03	0.93	0.95	2.15
8	0.01	0.98	0.01	0.30	0.31	3.33

จากตารางที่ 4.20 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 3.33% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

4.1.3.2 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอย เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความถี่ 2450 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp)

1. วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

จากตารางที่ 4.21 แสดงผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม Design Expert[®] โดยแบบจำลองที่โปรแกรมทำการแนะนำว่าเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ก็คือแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) เช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง พบว่าแบบจำลองกำลังสามให้ค่า Std. Dev. ต่ำกว่าแบบจำลองอื่นๆ และมีค่า Adjust R-Square และค่า R-Square สูงกว่าแบบจำลองอื่นๆ ด้วย ดังนั้นแบบจำลองกำลังสามจึงเป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูล ตามที่โปรแกรมทำการแนะนำ

ตารางที่ 4.21 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.46	0.9834	0.9808	0.9769	3.78
Quadratic	0.42	0.9892	0.9837	0.9770	3.77
Special Cubic	0.34	0.9937	0.9895	0.9820	2.95
Cubic	<u>0.13</u>	<u>0.9993</u>	<u>0.9984</u>	<u>0.9720</u>	<u>4.58</u>

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4.22

และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit จากตารางที่ 4.22 พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.0562 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสามมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ ดังตารางที่ 4.23 และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz แสดงดังสมการที่ 4.6

$$SE = 0.060A + 0.054B + 970.74C + 0.39AB - 1498.92AC - 1504.93BC + 1151.58ABC + 8.16AB(A-B) + 588.90AC(A-C) + 591.53BC(B-C) \quad (4.6)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.22 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	9	163.47	18.16	1020.79	< 0.0001
Linear Mixture	2	160.86	80.43	4520.20	< 0.0001
AB	1	0.01	0.01	0.75	0.4185
AC	1	0.10	0.10	5.57	0.0563
BC	1	0.10	0.10	5.61	0.0557
ABC	1	0.09	0.09	5.11	0.0644
AB(A-B)	1	0.78	0.78	43.84	0.0006
AC(A-C)	1	0.10	0.10	5.41	0.0589
BC(B-C)	1	0.10	0.10	5.43	0.0586
Residual	6	0.11	0.02		
Lack of Fit	1	0.06	0.06	6.13	0.0562
Pure Error	5	0.05	9.595E-003		
Total	15	163.58			

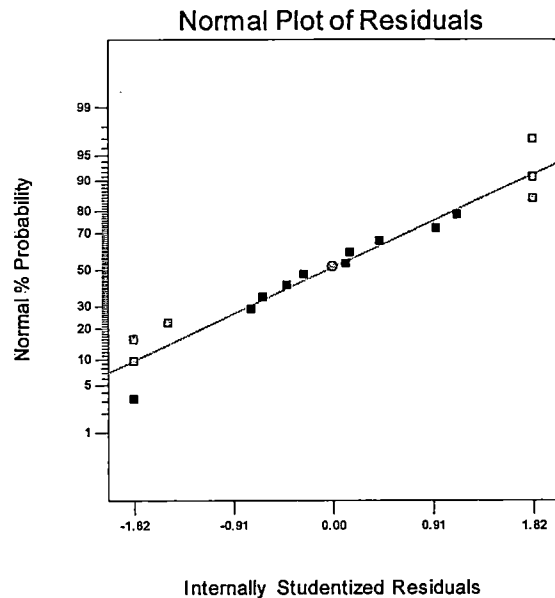
A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

ตารางที่ 4.23 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสาม (Cubic model) สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

Std. Dev.	0.13	R-Squared	0.9993
Mean	3.50	Adj R-Squared	0.9984
C.V. %	3.81	Pred R-Square	0.9720
PRESS	4.58	Adeq Precisor	77.107

2. ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบ

เช่นเดียวกันก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา



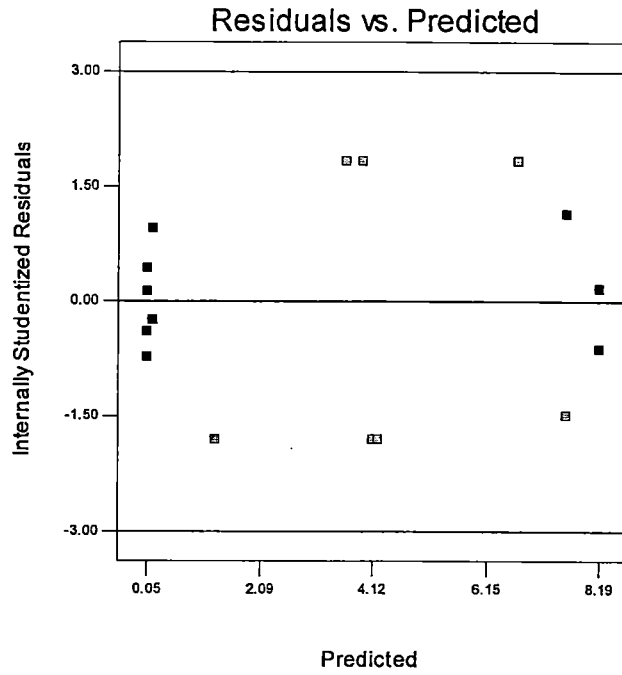
รูปที่ 4.25 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกันคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

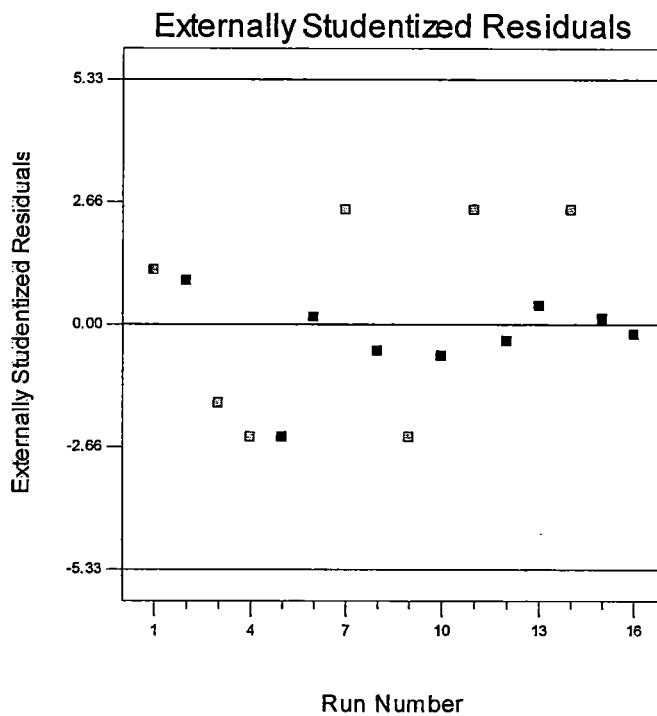
จากรูปที่ 4.25 ได้จากการพล็อตกราฟ Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อนจะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวเกือบจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

สามารถตรวจสอบสมมติฐานนี้ได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย ดังแสดงในรูปที่ 4.26 พบว่า ลักษณะของข้อมูลไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น มีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว



รูปที่ 4.26 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่า SE สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz



รูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล จะเห็นได้ว่า ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ไม่เกิดการกระจายตัวแบบมีรูปแบบ แสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กัลำดับของการเก็บข้อมูล

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz ซึ่งมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

เช่นเดียวกันเมื่อได้แบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่า SE ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz มาแล้ว จะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ ด้วยการทดสอบจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.24

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบยืนยันผลที่ได้จากการหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สำหรับ

PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

No.	PC	ABS	CB	Prediction	SE	%error
1	0.79	0.04	0.17	8.21	8.27	0.73
2	0.83	0.00	0.17	8.19	8.14	-0.61
3	0.60	0.23	0.17	7.83	7.81	-0.26
4	0.55	0.29	0.17	7.62	7.79	2.23
5	0.52	0.32	0.17	7.51	7.56	0.67
6	0.50	0.33	0.17	7.45	7.44	-0.13
7	0.46	0.37	0.17	7.28	7.34	0.82
8	0.42	0.42	0.17	7.12	7.07	-0.70

จากตารางที่ 4.24 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 2.23% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

4.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ_r) ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant, ϵ_r) เป็นค่าที่ใช้แสดงถึงความสามารถในการที่จะทำให้เกิดเส้นแรงแม่เหล็กขึ้นเมื่อนำวัสดุต่างชนิดกันมาทำเป็นฉนวนคั่นระหว่างแผ่นเพลต อีกทั้งยังสามารถบอกได้ถึงความเป็นฉนวน (Insulation) ของวัสดุนั้นๆ ได้ด้วย ถ้าวัสดุนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาก แสดงว่า วัสดุนั้นมีความเป็นฉนวนน้อย[25] [66] โดยปกติสำหรับพลาสติกที่ยังไม่มีการเติมสารตัวเติมใดๆ จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ระหว่าง 2-20[66] ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติก ที่ยังไม่ทำการเติมสารตัวเติมคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ และผงคาร์บอนแบล็ค ได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกอยู่ในช่วง 3.04 – 3.34 ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.7 และวิธีการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแสดงดังภาคผนวก ค. โดยในการทดสอบทำการเติมสารตัวเติมทั้งคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (CBm) และผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) ผสมลงไปเนื้อพลาสติก หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยการฉีดขึ้นรูป โดยขึ้นงานทดสอบมีขนาด 70 x 180 mm และหนา 4 mm หลังจากนั้นทำการวัดค่าประจุไฟฟ้าของชิ้นงานทดสอบ และทำการคำนวณเป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริก แสดงผลดังตารางที่ 4.25 และ 4.26

$$\epsilon_r = \frac{tC_p}{A\epsilon_0} \quad (4.7)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชิ้นงานทดสอบ

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (ฟารัด)

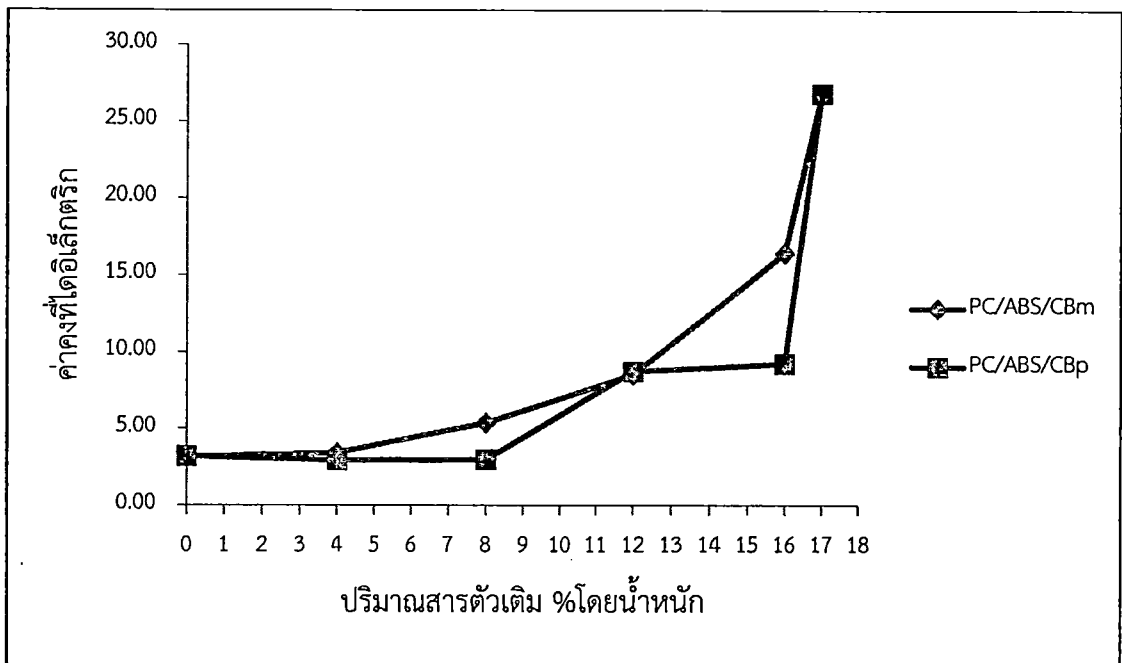
t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลต (ตารางเมตร)

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.28 พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแปรผันตามปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองชนิด โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (CBm) และผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) ที่เติมลงไปเนื้อพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเติมสารตัวเติมในปริมาณเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลทำให้อุณหภูมิของสารตัวเติม มีโอกาสเกิดการสัมผัสกันระหว่างผิวของอนุภาคมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลของงานวิจัยก่อนหน้า[25] นอกจากนี้อิทธิพลของขนาดของอนุภาคของสารตัวเติม ไม่ค่อยมีผลต่อค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ซึ่งไม่เป็นไปตามผลการทดลองของงานวิจัยก่อนหน้า[31] ที่แสดงผลการทดลองไว้ว่า สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะมีผลทำให้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าสูงกว่าขนาดอนุภาคของสารตัวเติมที่ใหญ่กว่า โดยขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะส่งผลให้การเข้ากันเป็นเนื้อเดียวกันระหว่างอนุภาคของสารตัวเติมกับเนื้อพลาสติก และเมื่อทำการพิจารณาผลการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของยางธรรมชาติที่ทำการเติมสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิดพบว่า ยางธรรมชาติที่ทำการเติมเคมีดำจะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงที่สุด เนื่องจากความหนาแน่นของสารตัวเติมทั้ง 3 ชนิด เคมีดำเป็นสารตัวเติมที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุด (1.8 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดีบุก (4 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และทั้งสแตน (7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) ดังนั้นจะพบว่าที่น้ำหนักที่เท่ากันในหน่วย phr ปริมาณของเคมีดำที่ทำการเติมลงไปจะมีปริมาณสูงที่สุด[25] [31] และผลของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนี้ยังแสดงให้เห็นว่ายางธรรมชาติที่เติมสารตัวเติมชนิดเคมีดำจะมีสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ดีที่สุด ซึ่งเมื่อพิจารณาแนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับค่าประสิทธิภาพ

การปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่า วัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีจะมีผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีเช่นกัน ผลในส่วนของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกในการทดลองนี้วัสดุที่เติมสารตัวเติมที่เป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สูงกว่าสารตัวเติมที่เป็นผงคาร์บอนแบล็ค และจากผลในส่วนของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก็พบว่า พลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm ให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) สูงกว่าของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp เป็นไปตามแนวโน้มที่ว่า เมื่อวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาก ความเป็นฉนวนจะน้อย ส่งผลให้มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น ซึ่งคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า ถือเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับวัสดุที่มีความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวัสดุมีความสามารถนำไฟฟ้า ผิวของวัสดุนั้น จะมีอิเล็กตรอน (Electrons) หรือหลุม (holes) ที่จะเป็นตัวเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าส่งผลให้เกิดการสะท้อนของคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า[67]

นอกจากนั้นวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาก จะมีค่าความเป็นขั้วทางไฟฟ้าสูง (Electric dipoles) ซึ่งค่าความเป็นขั้วทางไฟฟ้าเป็นคุณสมบัติที่ทำให้เกิดการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืน (Absorption loss)[67] ดังนั้นเมื่อวัสดุมีทั้งความสามารถในการสะท้อน และดูดกลืนคลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ก็จะส่งผลให้ความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุดังกล่าวมีเพิ่มขึ้นด้วย



รูปที่ 4.28 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ PC/ABS/CBm และ PC/ABS/CBp ที่มีปริมาณสารตัวเติมแตกต่างกัน

4.2.1 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท (Carbon black masterbatch, CBm)

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก หรือค่าสภาพยอมสัมพันธ์ (Permittivity) เป็นสมบัติของวัสดุที่สามารถบอกคุณสมบัติความเป็นฉนวน (Insulators) ของวัสดุได้[25] โดยที่ถ้าวัสดุนั้นมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกน้อย แสดงว่าวัสดุนั้นมีความเป็นฉนวนมาก ซึ่งจากการทดสอบจะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.25

ตารางที่ 4.25 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm

อัตราส่วนที่	PC	ABS	CB	C (pF)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
1	0.00	1.00	0.00	89.44	3.21
2	0.50	0.50	0.00	85.32	3.06
3	1.00	0.00	0.00	90.44	3.24
4	0.23	0.73	0.04	95.09	3.41
5	0.69	0.23	0.08	184.99	6.63
6	0.00	0.92	0.08	131.18	4.70
7	0.92	0.00	0.08	132.80	4.76
8	0.23	0.65	0.12	237.39	8.51
9	0.42	0.42	0.16	458.21	16.43
10	0.00	0.83	0.17	712.45	25.55
11	0.83	0.00	0.17	779.46	27.95

จากตารางที่ 4.25 พบว่า ที่อัตราส่วนที่มีปริมาณสารตัวเติมมาก จะมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาก ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า ที่อัตราส่วนดังกล่าวพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm มีคุณสมบัติความเป็นฉนวนน้อย ก็คือสามารถนำไฟฟ้าได้มาก ดังนั้นจึงส่งผลต่อคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ดีกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณสารตัวเติมน้อย ซึ่งก็เป็นไปตามการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE)

4.2.2 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp)

จากการทดสอบจะได้ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังตารางที่ 4.26 พบว่า แนวโน้มของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีปริมาณสารตัวเติมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ซึ่งจะแสดงให้เห็นว่า พลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp จะมีคุณสมบัติความเป็นฉนวนลดลง (สามารถนำไฟฟ้าได้มากขึ้น) จึงส่งผลต่อคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีคุณสมบัติที่ดีกว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณสารตัวเติมน้อย ซึ่งก็เป็นไปตามการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เช่นเดียวกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.1

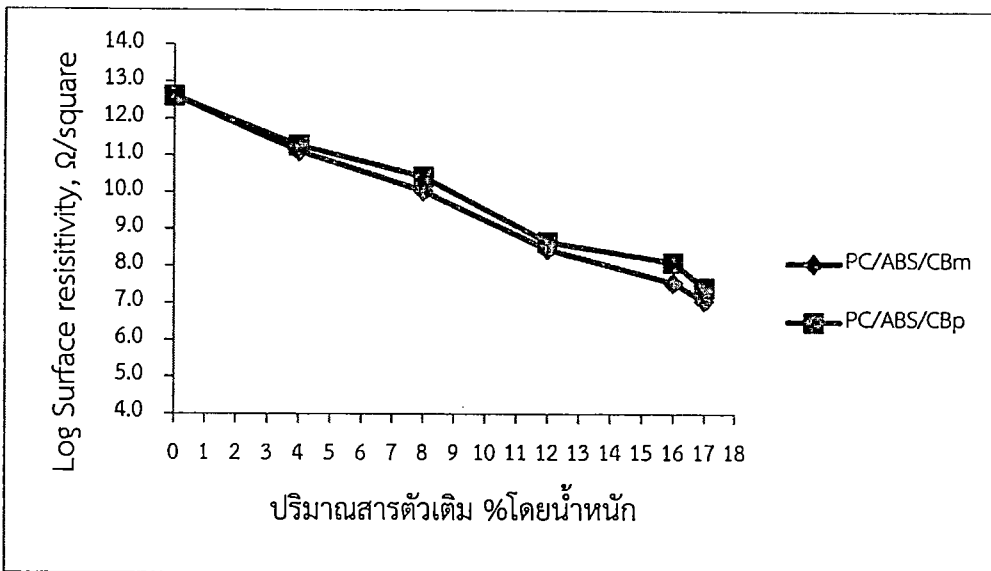
ตารางที่ 4.26 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBp

อัตราส่วนที่	PC	ABS	CB	C (pF)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
1	0.00	1.00	0.00	90.27	3.24
2	0.50	0.50	0.00	84.86	3.04
3	1.00	0.00	0.00	92.54	3.32
4	0.23	0.73	0.04	81.82	2.93
5	0.69	0.23	0.08	90.91	3.26
6	0.00	0.92	0.08	75.10	2.69
7	0.92	0.00	0.08	82.97	2.97

8	0.23	0.65	0.12	243.24	8.72
9	0.42	0.42	0.16	276.93	9.23
10	0.00	0.83	0.17	689.28	24.71
11	0.83	0.00	0.17	806.18	28.91

4.3 สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

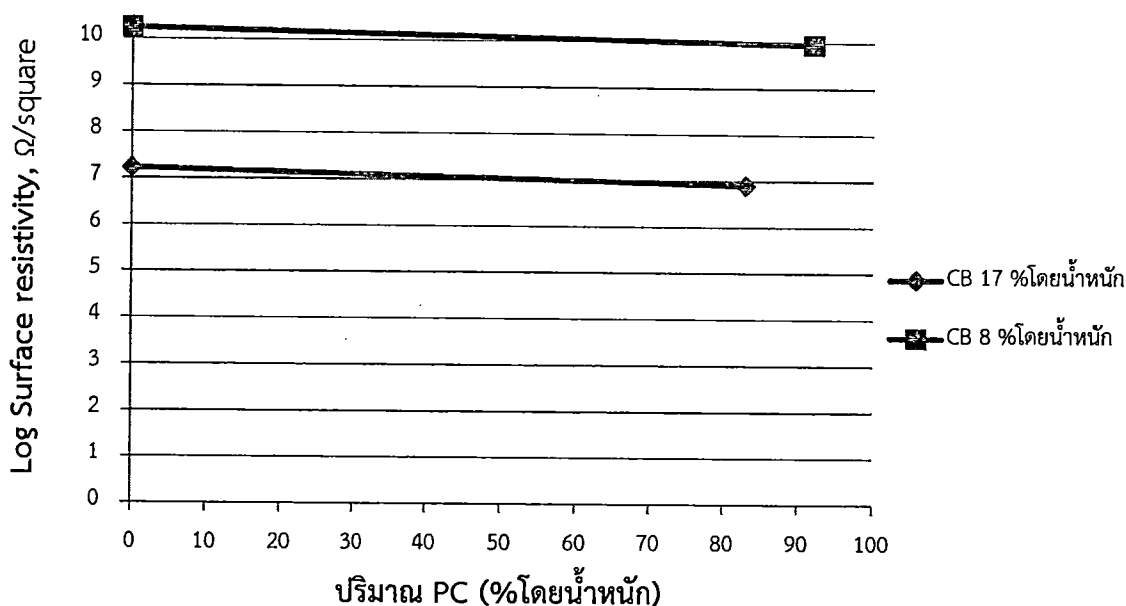
จากการทดสอบ เพื่อวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมสองชนิดคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D257 ซึ่งวิธีการคำนวณ แสดงดังภาคผนวก ง. ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.29



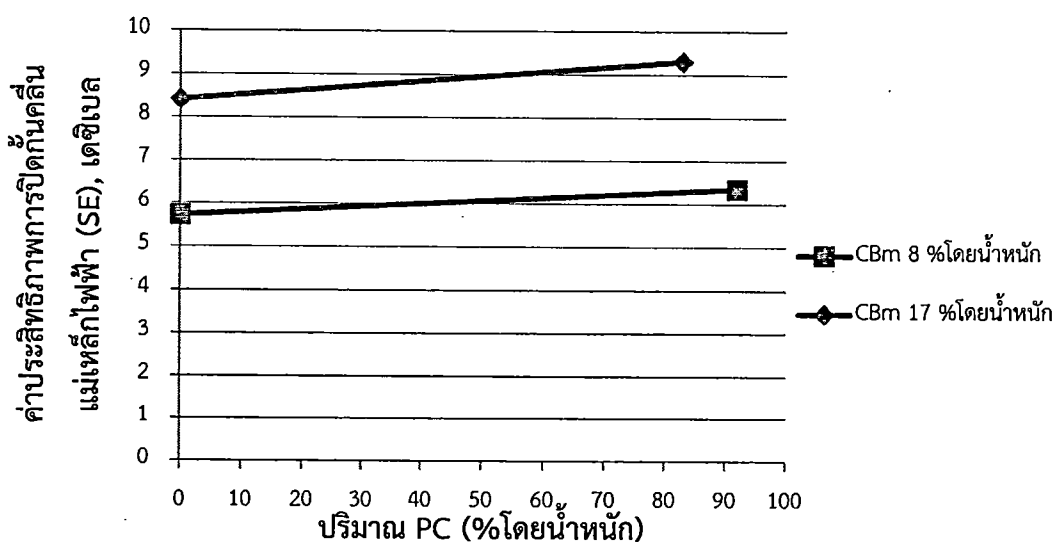
รูปที่ 4.29 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) และ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (CBm) ที่มีปริมาณสารตัวเติมแตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.29 พบว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบระหว่าง PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวสูงกว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (CBm) แสดงว่า PC/ABS/CBm มีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่า PC/ABS/CBp เล็กน้อย จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดีกว่า โดยแนวโน้มของสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบมีแนวโน้มเดียวกันคือ จะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเข้าไป เนื่องจากว่า สารตัวเติมที่ใช้มีโครงสร้างที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าได้ ดังนั้นการใส่สารตัวเติมเข้าไป จึงส่งผลให้คุณสมบัติของพลาสติกเชิงประกอบ ซึ่งเป็นเมทริกซ์ของคอมโพสิตมีคุณสมบัติที่เปลี่ยนไปด้วย [1] [65] และเช่นเดียวกันเมื่อวัสดุมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวลดลง ก็จะส่งผลให้วัสดุนั้นมีค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าสภาพการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของวัสดุเป็นส่วนกลับของสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของวัสดุ เมื่อวัสดุสามารถนำไฟฟ้าได้ ก็จะสามารถปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เช่นเดียวกัน ซึ่งผลดังกล่าวมีความสอดคล้องกับแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้

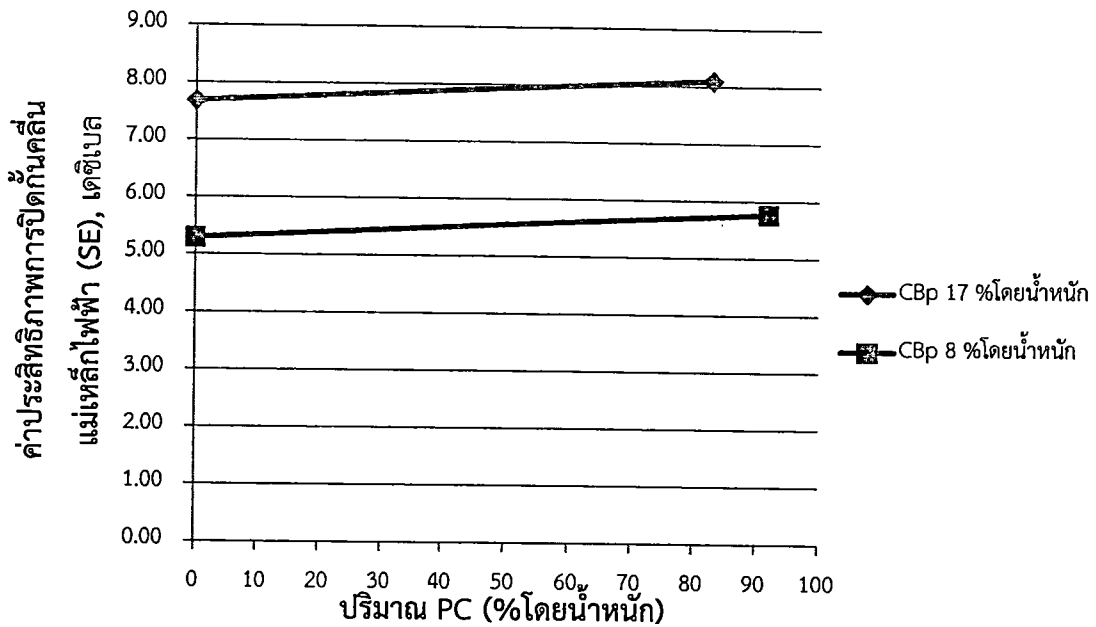
และเมื่อพิจารณาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว กับอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.30 พบว่า อัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC มากกว่าให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวที่ต่ำกว่าเล็กน้อย เนื่องจากพลาสติก PC เป็นพลาสติกที่มีความเป็นขี้มากกว่าพลาสติก ABS ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากค่าคงที่ไดอิเล็กตริก คือ วัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมาก ความเป็นขี้ของวัสดุนั้นจะมีมากด้วย ซึ่งจากแนวโน้มดังกล่าว แสดงว่าอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC มากกว่าจะมีความสามารถในการนำไฟฟ้ามากกว่าด้วยเช่นกัน จึงส่งผลให้อัตราส่วนดังกล่าวมีความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดีกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถพิจารณาได้จาก รูปที่ 4.31 และ 4.32



รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวกับอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC แตกต่างกัน



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SE กับอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC แตกต่างกันที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ CBm



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า SE กับอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC แตกต่างกัน ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz โดยมีสารตัวเติมคือ CBp

จากรูปที่ 4.31 และ 4.32 พบว่าค่าประสิทธิผลการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC มากกว่ามีค่ามากกว่าเล็กน้อย ซึ่งผลดังกล่าวเป็นไปตามแนวโน้มของค่าสภาวะต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

4.3.1 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

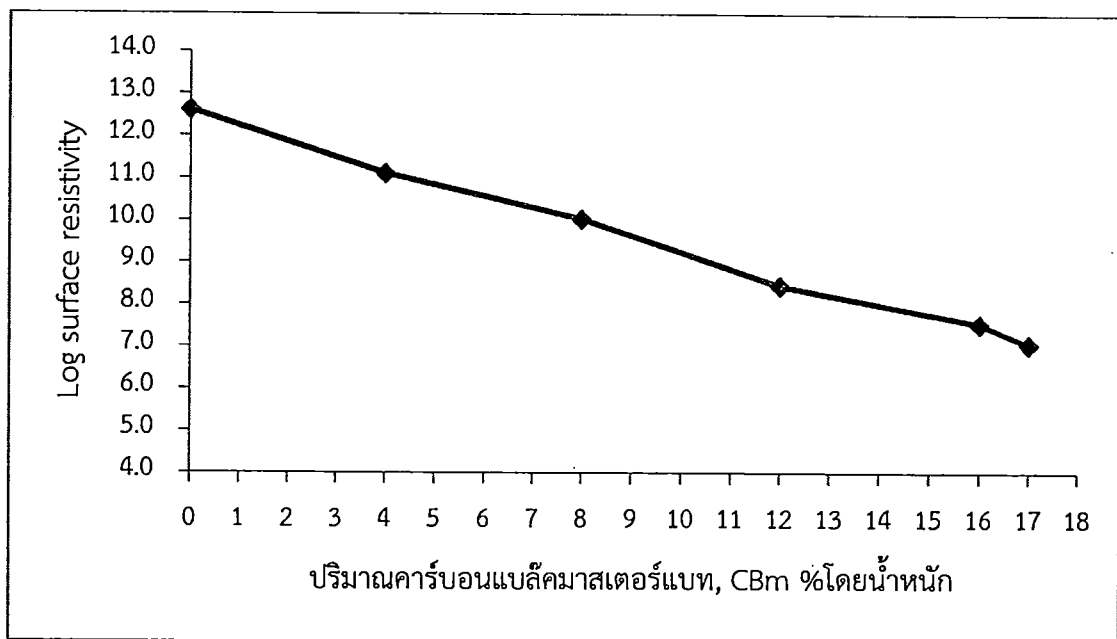
จากการทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ดังตารางที่ 4.27

ตารางที่ 4.27 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วนต่างๆ

std	run	Block	PC	ABS	CB	Surface Resistivity (Ω/square)
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	1.12×10^7
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	2.25×10^7
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	2.84×10^8
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	1.31×10^{11}
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	8.19×10^6

14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	3.57×10^7
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	7.84×10^6
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	8.41×10^9
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	1.75×10^{10}
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	8.89×10^9
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบต (Carbon black masterbatch, CBm) ในหน่วย % โดยน้ำหนัก พบว่า แนวโน้มของค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) จะลดลง เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบตใน PC/ABS มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.33 และพบว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบที่ไม่มีการเติมสารตัวเติมเข้าไปผสม มีค่าประมาณ 10^{12} และเมื่อมีการผสมสารตัวเติมคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์ ซึ่งมีสมบัติในการนำไฟฟ้าเข้า จะส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าวมีค่าลดลง จนกระทั่งเมื่อใส่สารตัวเติมในปริมาณ 17 % โดยน้ำหนัก พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ลดลงเหลือประมาณ 10^7 ซึ่งเป็นค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุที่มีคุณสมบัติในการกระจายไฟฟ้าสถิต[2]



รูปที่ 4.33 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีปริมาณ CBm แตกต่างกัน

4.3.1.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบต (CBm)

โดยทำการวิเคราะห์ข้อมูล ด้วยโปรแกรม Design expert[®] เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ เช่นเดียวกับผลการทดลองในส่วนของคุณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง.

จากการวิเคราะห์ที่ได้แบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface resistivity} = & 12.62A + 12.61B - 35.38C - 0.12AB \\ & + 16.78AC + 18.96BC \end{aligned} \quad (4.8)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

โดยในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์โดยใช้ Log scale เนื่องจากข้อมูลอยู่ในรูปของเลขยกกำลังหลายเท่า ถ้าใช้การวิเคราะห์ด้วยข้อมูลแบบธรรมดา อาจจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ ดังนั้นค่าสภาพต้านทานที่จะได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะแสดงค่าเป็นแบบ Log scale ด้วยเช่นกัน ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจึงไม่สามารถทำนายออกมาเป็นค่าตัวเลขที่แน่นอนได้ แต่จะบอกแนวโน้มของค่าได้

และจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม ดังแสดงในภาคผนวก ง. สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในขนาด

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ เป็นการทดสอบในกระบวนการจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ตามสมการที่ 4.7 เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.28

ซึ่งผลจากตารางที่ 4.28 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ซึ่งเป็นค่าแบบ Log scale ที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 2.09% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBm

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ

PC/ABS/CBm

No.	PC	ABS	CB	Prediction (Log scale)	TRUE (Log scale)	%error
1	0.83	0.11	0.06	10.62	10.50	-1.13
2	0.66	0.25	0.09	9.59	9.67	0.83
3	0.63	0.26	0.11	9.05	8.94	-1.22

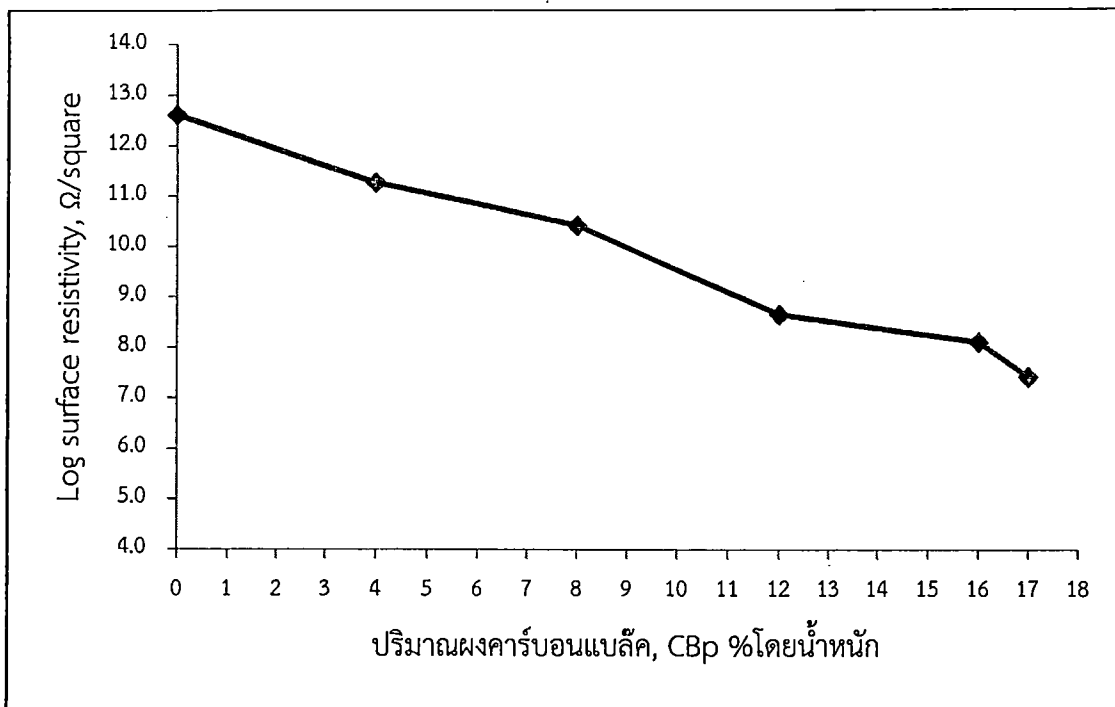
4	0.77	0.16	0.07	10.16	10.23	0.69
5	0.16	0.68	0.15	7.60	7.51	-1.18
6	0.55	0.28	0.16	7.18	7.08	-1.39
7	0.12	0.71	0.17	7.18	7.33	2.09
8	0.53	0.39	0.08	9.91	9.95	0.40

4.3.2 พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp)

จากการทดสอบ เพื่อหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ดังตารางที่ 4.29 ซึ่งพบว่าค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC มากกว่าให้ค่าที่ต่ำกว่าเช่นเดียวกัน ดังนั้นที่อัตราส่วนนี้วัสดุจึงมีความสามารถในการนำไฟฟ้าที่ดีกว่า ส่งผลให้แนวโน้มการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถปิดกั้นได้ดีกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ

ตารางที่ 4.29 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วนต่างๆ

std	run	Block	PC	ABS	CB	Surface Resistivity (Ω /square)
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	2.86×10^7
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	7.84×10^6
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	4.54×10^8
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	1.87×10^{11}
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	2.51×10^7
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	1.30×10^7
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	2.25×10^7
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	1.40×10^{11}
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	4.07×10^{10}
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	3.31×10^{10}
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}



รูปที่ 4.34 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS ที่มีปริมาณ CBp แตกต่างกัน

และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) ในหน่วย % โดยน้ำหนัก ดังแสดงในรูปที่ 4.34 พบว่า แนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ ค่าจะลดลง เมื่อปริมาณผงคาร์บอนแบล็คใน PC/ABS มากขึ้น

4.3.2.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp)

เช่นเดียวกันทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยโปรแกรม Design Expert โดยผลการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ง.

จะได้แบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface resistivity} = & 12.61A + 12.61B - 59.33C - 0.21AB \\ & + 49.29AC + 47.93BC \end{aligned} \quad (4.9)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

และค่าความต้านทานที่จะได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะแสดงว่าเป็นแบบ Log scale ด้วยเช่นกัน

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ด้วยการทดสอบในกระบวนการจริงเช่นกัน โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้ ซึ่งจะนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ตามสมการที่ 4.7 เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ได้ผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4.30 ซึ่งจะเห็นว่า ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ซึ่งเป็นค่าแบบ Log scale ที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ -1.68% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBp

ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ

PC/ABS/CBp

No.	PC	ABS	CB	Prediction (Log scale)	TRUE (Log scale)	%error
1	0.00	0.83	0.17	7.14	7.02	-1.68
2	0.83	0.00	0.17	7.34	7.41	0.95
3	0.59	0.24	0.17	7.25	7.23	-0.28
4	0.34	0.50	0.16	7.58	7.49	-1.19
5	0.42	0.42	0.16	7.60	7.54	-0.79
6	0.00	0.92	0.08	10.38	10.22	-1.54
7	0.23	0.70	0.07	10.68	10.64	-0.37
8	0.36	0.56	0.07	10.53	10.67	1.33

4.4 การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

ในการใช้งานด้านการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญที่ใช้สำหรับแสดงคุณสมบัติของวัสดุปิดกั้น ซึ่งถ้าวัสดุปิดกั้นมีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) มาก จะแสดงให้เห็นว่าวัสดุปิดกั้นมีความสามารถในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้มากด้วย ซึ่งในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะต้องสามารถปิดกั้นสัญญาณรบกวนที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทั้งจากที่เกิดขึ้นภายในของระบบ หรืออุปกรณ์ ไม่ให้ไปรบกวนการทำงานของระบบ หรืออุปกรณ์อื่นๆ ที่อยู่ใกล้เคียง และที่เกิดจากแหล่งกำเนิดภายนอก ไม่ให้รบกวนต่อการทำงานของระบบ หรืออุปกรณ์ได้เช่นกัน

และคุณสมบัติของวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ควรจะมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) อยู่ในช่วง $10^4 - 10^{11} \Omega/\text{square}$ เพื่อให้ประจุไฟฟ้าสามารถไหล

ผ่านพื้นผิว หรือรังสีตัววัสดุได้ แต่ประจุไฟฟ้าจะต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ช้ากว่า เวลาที่เคลื่อนที่ในตัวนำ เพื่อป้องกันการเกิดการประทุของไฟฟ้าสถิตอย่างรวดเร็ว

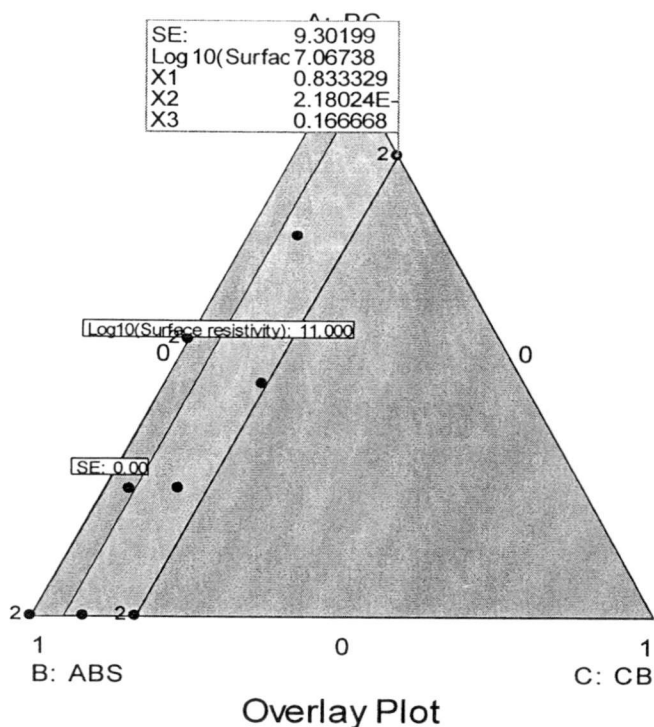
ซึ่งถึงแม้ว่าสมการถดถอยจะมีประโยชน์ในการทำนายค่าผลตอบ แต่การจะได้ระดับผลตอบที่ดีที่สุดตามที่ต้องการนั้น ต้องอาศัยการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน ถ้าสมการถดถอยไม่มีเทอมของอันตรกิริยา (Interaction) การหาระดับของแต่ละส่วนผสมที่จะให้ค่าผลตอบต่ำที่สุดนั้นสามารถทำได้ด้วยการนำสมการถดถอยไปหาอนุพันธ์ แต่ถ้ามีเทอมอันตรกิริยาแล้ว การหาอนุพันธ์ไม่สามารถตอบได้ว่าเทอมที่มีอันตรกิริยานั้นมีปริมาณส่วนผสมแต่ละตัวอยู่อย่างละเท่าไรแน่ ดังนั้นการใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่จะสะดวกรวดเร็ว

ดังนั้นโปรแกรม Design expert[®] ซึ่งเป็นโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จึงทางเลือกที่ใช้ในการทำนายค่าผลตอบที่ดีที่สุดตามที่ต้องการ โดยอาศัยหลักการประมวลพื้นผิวตอบสนอง เพื่อทำนายค่าของผลตอบ ให้ได้ค่าตามที่ต้องการ ซึ่งบริเวณที่สนใจ คือ บริเวณที่ให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) สูง และมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวอยู่ในช่วง $10^4 - 10^{11} \Omega/\text{square}$ โดยในการหาค่าที่ดีที่สุดนี้อัตราส่วนของส่วนผสมยังเป็นไปตามการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ในหัวข้อ 3.3 ซึ่งการจะหาพื้นผิวตอบสนองที่มีผลตอบหลายตัว วิธีที่ง่ายที่สุดในการหาระดับที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการนำกราฟของทุกผลตอบมาวางซ้อนกันเพื่อหาบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทุกผลตอบ

4.4.1 การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท (CBm)

4.4.1.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert[®] จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ ดังรูปที่ 4.35 ซึ่งเมื่อพิจารณากราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour Plot) ของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz บริเวณที่แสดงค่าสอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ บริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท ตั้งแต่ 0.08 ส่วน (8 %โดยน้ำหนัก) ถึง 0.17 ส่วน (17 %โดยน้ำหนัก) ส่วนปริมาณของพลาสติกทั้งสองชนิดใส่ในอัตราส่วนเท่าไรก็ได้ แต่ที่โปรแกรมทำนายค่าได้จุดที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC 0.83 ส่วน ปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน แต่ไม่มีปริมาณพลาสติก ABS ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 9.31 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวเท่ากับ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.31



รูปที่ 4.35 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

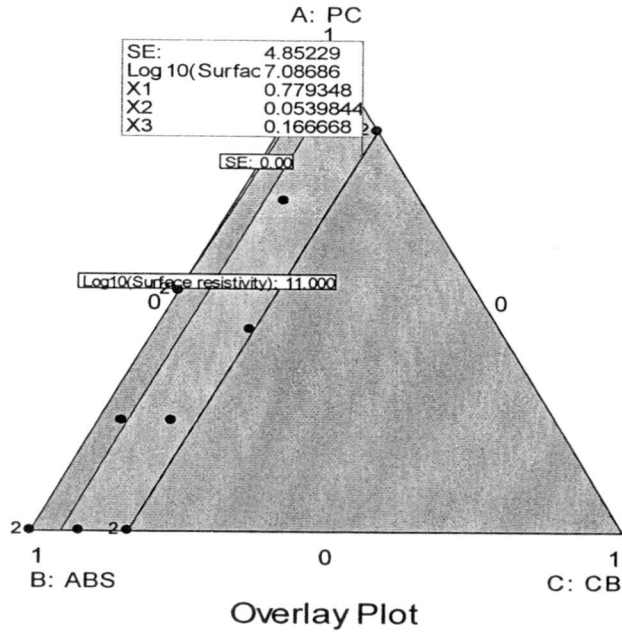
ตารางที่ 4.31 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.83	0.00	0.17	9.31	7.06
2	0.60	0.23	0.17	8.63	7.09
3	0.55	0.29	0.17	8.47	7.10
4	0.52	0.32	0.17	8.40	7.10
5	0.50	0.34	0.17	8.34	7.11

4.4.1.2 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert® จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ

เมื่อพิจารณากราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของค่า SE และค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz ดังรูปที่ 4.36 บริเวณที่แสดงค่าสอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ บริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท ตั้งแต่ 0.07 ส่วน (7 %โดยน้ำหนัก) ถึง 0.17 ส่วน (17 %โดยน้ำหนัก) ส่วนปริมาณของพลาสติกทั้งสองชนิดใสในอัตราส่วนเท่าไรก็ได้เช่นเดียวกัน แต่ที่โปรแกรมทำนายค่าได้จุดที่ดีที่สุดคือ อัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC 0.78 ส่วน ปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน และมีปริมาณพลาสติก ABS 0.05 ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 4.86 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวเท่ากับ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.32



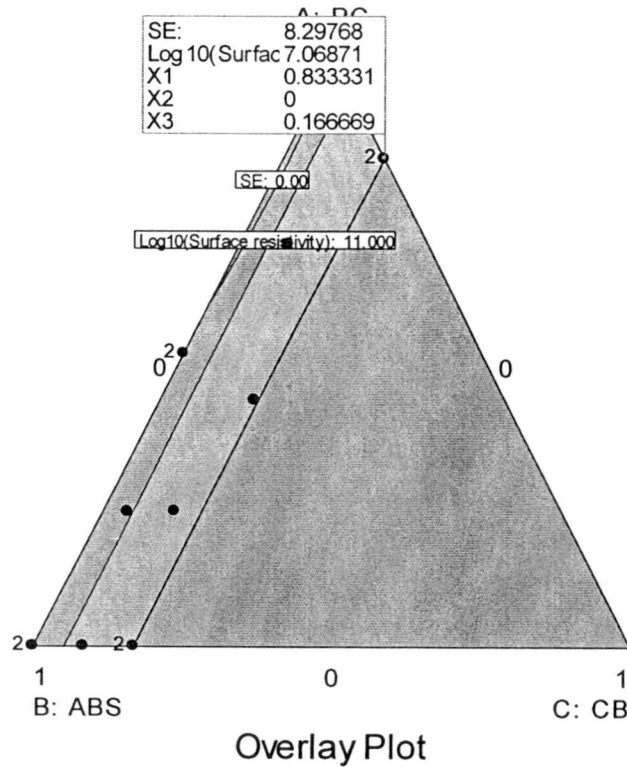
รูปที่ 4.36 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

ตารางที่ 4.32 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.78	0.05	0.17	4.86	7.08
2	0.03	0.81	0.17	4.57	7.19
3	0.23	0.6	0.17	4.39	7.16
4	0.29	0.55	0.17	4.31	7.15
5	0.33	0.5	0.17	4.25	7.15

4.4.1.3 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

จากรูปที่ 4.37 เมื่อพิจารณากราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของค่า SE และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz บริเวณที่แสดงค่าที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ อัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC 0.83 ส่วน ปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน และไม่มีปริมาณพลาสติก ABS ซึ่งจะให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 8.31 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวเท่ากับ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.33

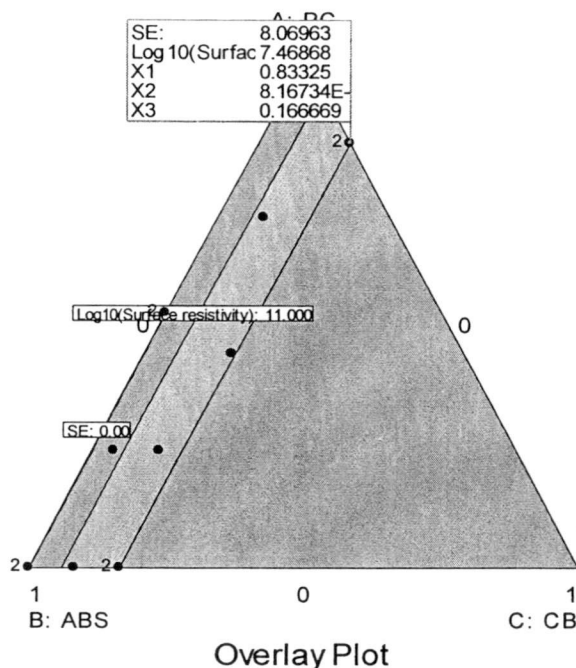
ตารางที่ 4.33 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.83	0	0.17	8.31	7.06
2	0.8	0.04	0.17	8.19	7.07
3	0.15	0.68	0.17	8.08	7.15
4	0.23	0.6	0.17	8.05	7.14
5	0.32	0.52	0.17	7.99	7.13

4.4.2 การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ก (CBp)

4.4.2.1 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert® จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ ดังรูปที่ 4.38



รูปที่ 4.38 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

ตารางที่ 4.34 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.83	0	0.17	8.08	7.46
2	0.7	0.13	0.17	7.99	7.42
3	0.6	0.23	0.17	7.86	7.40
4	0.55	0.29	0.17	7.77	7.38
5	0.52	0.32	0.17	7.73	7.38

เมื่อพิจารณากราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ของค่า SE และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz ดังแสดงในรูปที่ 4.38 พบว่า บริเวณที่แสดงค่าสอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ บริเวณที่มีปริมาณของพลาสติก PC 0.83 ส่วน ปริมาณคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน และไม่มีปริมาณพลาสติก ABS ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 8.08 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวเท่ากับ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.34

4.4.2.2 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

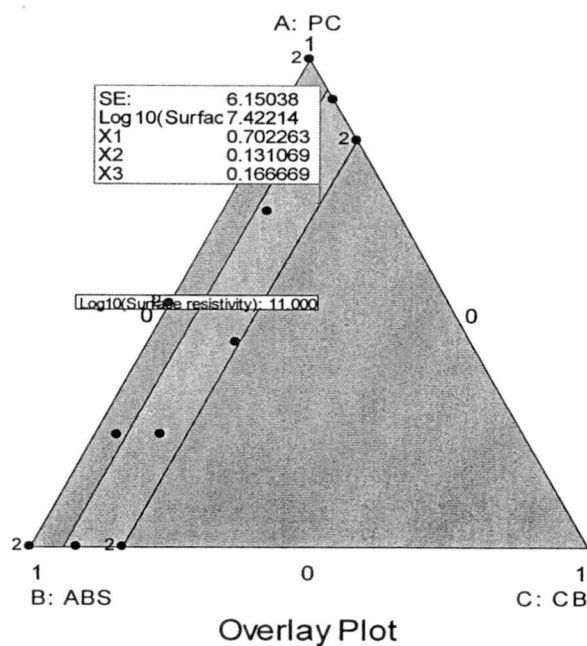
จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert® จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ ดังรูปที่ 4.39 พบว่า บริเวณที่

แสดงค่าที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ บริเวณที่มีปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน มีปริมาณพลาสติก PC 0.13 ส่วน และไม่มีปริมาณพลาสติก ABS ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 6.15 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวประมาณ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.35

ตารางที่ 4.35 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่

ความถี่ทดสอบ 900 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.70	0.13	0.17	6.15	7.42
2	0.60	0.23	0.17	6.12	7.39
3	0.55	0.29	0.17	6.08	7.37
4	0.53	0.30	0.17	6.07	7.36
5	0.50	0.33	0.17	6.04	7.36



รูปที่ 4.39 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่

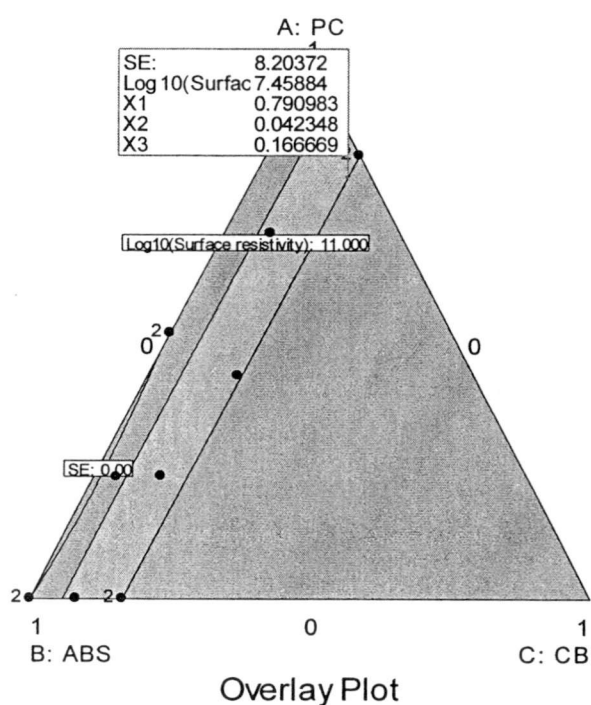
900 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

4.4.2.3 พิจารณาที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design expert[®] จะได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสอง (Contour plot) ที่แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับค่าที่เหมาะสมของทั้งสองผลตอบ ดังรูปที่ 4.40 และเมื่อพิจารณากราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสอง (Contour plot) ของค่า SE และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz บริเวณที่แสดงค่าที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสองมากที่สุด คือ บริเวณอัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก ABS 0.04 ส่วน ปริมาณคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท 0.17 ส่วน และมีปริมาณพลาสติก PC 0.79 ส่วน ซึ่งให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) เท่ากับ 8.21 dB และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวประมาณ 10^7 ดังแสดงในตารางที่ 4.36

ตารางที่ 4.36 ตัวอย่างอัตราส่วนที่อยู่ในบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง ของ PC/ABS/CBp ที่ ความถี่ทดสอบ 2540 MHz

Number	PC	ABS	CB	SE	Log10(Surface resistivity)
1	0.79	0.04	0.17	8.21	7.45
2	0.6	0.23	0.17	7.83	7.39
3	0.74	0.1	0.16	7.83	7.63
4	0.55	0.29	0.17	7.62	7.37
5	0.52	0.31	0.17	7.52	7.36



รูปที่ 4.40 กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสอง (Contour plot) ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz แสดงบริเวณที่สอดคล้องกับผลตอบทั้งสอง

4.5 นำสัดส่วนของปัจจัยที่ดีที่สุดไปทดสอบเพื่อยืนยันผลการวิเคราะห์

เมื่อได้ข้อสรุปเบื้องต้นแล้วว่า อัตราส่วนของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท (CBm) และผงคาร์บอนแบล็ก (CBp) ที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบ ดังตารางที่ 4.37 และ 4.38 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.37 อัตราส่วนของ PC/ABS/CBm ที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบ

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			SE	Log10(Surface resistivity)
	PC	ABS	CBm		
800	0.83	0	0.17	9.31	7.09
900	0.78	0.05	0.17	4.86	7.08
2450	0.83	0	0.17	8.31	7.06

ตารางที่ 4.38 อัตราส่วนของ PC/ABS/CBp ที่ดีที่สุด สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบ

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			SE	Log10(Surface resistivity)
	PC	ABS	CBp		
800	0.83	0	0.17	8.08	7.46
900	0.7	0.13	0.17	6.15	7.42
2450	0.79	0.04	0.17	8.21	7.45

จากตารางที่ 4.37 และ 4.38 พบว่าค่าผลตอบทั้งสอง ได้ค่าที่อยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต้องได้ค่ามากที่สุด และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจะต้องอยู่ในช่วง $10^4 - 10^{11}$ Ω /square เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต

ซึ่งค่าผลตอบที่แสดงในตารางที่ 4.37 และ 4.38 ได้จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert[®] ดังนั้นจึงมีความจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ที่ได้ โดยการทดสอบในกระบวนการจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมต่างๆ มาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้ เพื่อทดสอบความถูกต้อง และเพิ่มความมั่นใจในการเลือกใช้อัตราส่วนดังกล่าว โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ 4.39 ถึงตารางที่ 4.42

ตารางที่ 4.39 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBm ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่า SE

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			SE	SE	%error
	PC	ABS	CBm	prediction		
800	0.83	0	0.17	9.31	9.14	-1.83
900	0.78	0.05	0.17	4.86	4.84	-0.41
2450	0.83	0	0.17	8.31	8.28	-0.36

ตารางที่ 4.40 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBm ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			Surface resistivity	Log10(Surface resistivity)	%error
	PC	ABS	CBm	prediction		
800	0.83	0	0.17	7.09	7.1	0.14
900	0.78	0.05	0.17	7.08	7.2	1.69
2450	0.83	0	0.17	7.06	7.0	-0.85

ตารางที่ 4.41 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBp ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่า SE

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			SE prediction	SE	%error
	PC	ABS	CBp			
800	0.83	0	0.17	8.08	8.05	-0.37
900	0.70	0.13	0.17	6.15	6.04	-1.79
2450	0.79	0.04	0.17	8.21	8.14	-0.85

ตารางที่ 4.42 การนำค่าที่เหมาะสมที่สุดของ PC/ABS/CBp ไปทดสอบเพื่อยืนยันผล สำหรับค่า
สภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

ความถี่ทดสอบ (MHz)	อัตราส่วนที่ดีที่สุด			Surface resistivity prediction	Log10(Surface resistivity)	%error
	PC	ABS	CBm			
800	0.83	0	0.17	7.46	7.5	0.54
900	0.70	0.13	0.17	7.42	7.3	-1.62
2450	0.79	0.04	0.17	7.45	7.3	-2.01

จากตารางที่ 4.39 ถึงตารางที่ 4.42 จะเห็นว่า ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว สำหรับแต่ละความถี่ทดสอบที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Desig expert[®] โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) อยู่ในช่วงที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นอัตราส่วนผสมดังกล่าว สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้จริง ซึ่งอัตราส่วนของพลาสติกประกอบ PC/ABS/CBm เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ซึ่งต้องการวัสดุที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวในช่วง $10^4 - 10^{11} \Omega/\text{square}$ แต่สำหรับในการใช้งานในด้านการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีข้อจำกัดอยู่ เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่สูงนัก เมื่อเทียบกับวัสดุจำพวกโลหะ หรือวัสดุที่ผสมสารตัวเติมชนิดอื่นๆ และเนื่องจากในการใช้งานสำหรับอุตสาหกรรมทั่วไป ต้องการวัสดุที่มีค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่ 20 dB เป็นต้นไป เพื่อให้วัสดุปิดกั้นสามารถปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างน้อย 99 % [11] ดังแสดงในตารางที่ 4.43

ตารางที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับเปอร์เซ็นต์การปิดกั้น[11]

Shielding effectiveness (dB)	% การปิดกั้น
20	99
30	99.9
40	99.99
50	99.999
60	99.9999
70	99.99999

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมพลาสติกเชิงประกอบระหว่าง PC/ABS โดยมีสารตัวเติม คือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) เพื่อทำการศึกษาสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interference shielding) โดยพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Shielding effectiveness, SE) ที่ทำการทดสอบโดยอ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ MIL-STD-285 และศึกษาความสามารถในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต (Electrostatic discharge, ESD) โดยพิจารณาจากสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ซึ่งวัสดุที่เหมาะสมต่อการใช้งานในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ควรจะมีค่าสภาพต้านทานเชิงพื้นผิวอยู่ในช่วง $10^4 - 10^{11} \Omega/\text{square}$ นอกจากนี้ยังทำการศึกษานำไฟฟ้าของวัสดุที่ได้อีกด้วย ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) ของวัสดุที่เตรียมได้ สำหรับแต่ละอัตราส่วน เพื่อยืนยันแนวโน้มของผลที่ได้ในส่วนของการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ ซึ่งจากผลการศึกษานี้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการทดลอง

1. แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) ของพลาสติกเชิงประกอบ ขึ้นอยู่กับปริมาณของสารตัวเติม ที่ทำการผสมเข้าไป ซึ่งก็คือผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp) และคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ซึ่งจากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อัตราส่วนผสมต่างๆ อัตราส่วนที่มีปริมาณสารตัวเติมในพลาสติกเชิงประกอบมาก จะส่งผลให้คุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าวมากด้วย เห็นได้จากค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบที่ยังไม่มีการเติมสารตัวเติม มีค่าต่ำกว่า 1 dB แต่เมื่อมีการเติมสารตัวเติมเข้าไป ส่งผลให้ค่า SE ของพลาสติกเชิงประกอบดังกล่าวมีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ตัวอย่างเช่นที่อัตราส่วน PC/ABS/CBm (0.42/0.2/0.16) ค่า SE มีค่าเท่ากับ 7 dB ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz เนื่องจากสารตัวเติมมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า จึงเป็นการเพิ่มคุณสมบัติดังกล่าวให้กับพลาสติกเชิงประกอบ โดยที่วัสดุที่สามารถใช้ในงานปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ จะต้องเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ดี เนื่องจากการสูญเสียเนื่องจากการดูดกลืนและจากการสะท้อน ขึ้นอยู่กับค่าการนำไฟฟ้าของวัสดุ แต่ผลของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบที่เติมสารตัวเติมมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก จึงทำให้การประยุกต์ใช้งานในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอาจจะยังมีข้อจำกัดอยู่

2. จากการทดสอบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของชิ้นงานที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้ เพื่อดูแนวโน้มของการเป็นฉนวนของวัสดุ พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะแปรผันตามปริมาณของสารตัวเติมทั้งสองชนิด โดยที่ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบทช์ (CBm) และผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) ที่เติมลงไปเนื้อพลาสติกเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวเป็นแนวโน้มเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เมื่อวัสดุมีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ค่าความเป็นฉนวนของวัสดุนั้นก็จะน้อย แสดงว่ามีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้มากขึ้น ซึ่งเมื่อวัสดุนำไฟฟ้าได้ ก็ส่งผลให้มีคุณสมบัติในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เนื่องจากวัสดุที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงจะสามารถดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดี โดยจะเปลี่ยนพลังงานที่ดูดกลืนดังกล่าว ให้เป็นพลังงานความร้อน

3. ในส่วนของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ของพลาสติกเชิงประกอบ ก็มีแนวโน้มขึ้นอยู่กับปริมาณสารตัวเติมด้วยเช่นกัน ไม่ว่าจะสารตัวเติมที่เป็นผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder,

CBp) หรือสารตัวเติมที่เป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต (Carbon black masterbatch, CBm) ซึ่งผลการทดสอบพบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกที่ไม่มีการเติมสารตัวเติม จะมีค่าเท่ากับ 10^{12} Ω /square แต่เมื่อทำการเติมสารตัวเติมในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบมีแนวโน้มลดลงอยู่ในช่วง $10^6 - 10^{11}$ Ω /square ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในการป้องกันจากการประทุของไฟฟ้าสถิต ซึ่งต้องการวัสดุที่มีค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวในช่วง 10^4 ถึง 10^{11} Ω /square ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า แนวโน้มของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบจะมีค่าลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณสารตัวเติมเข้าไป นอกจากนี้ปริมาณพลาสติก PC ก็มีผลต่อค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวด้วยเช่นกัน คือ อัตราส่วนที่มีปริมาณพลาสติก PC มากกว่าจะให้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวต่ำกว่าเล็กน้อย

4. จากการทดสอบค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) และสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) พบว่า ค่าทั้งสองของพลาสติกเชิงประกอบที่มีการเติมสารตัวเติมที่แตกต่างกัน ให้ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก แม้ว่าสารตัวเติมที่เป็นผงคาร์บอนแบล็คจะมีขนาดอนุภาคเล็กกว่า ซึ่งจากงานวิจัยก่อนหน้าพบว่า สารตัวเติมที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าจะส่งผลต่อการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ดีกว่า แต่ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ขนาดอนุภาคของสารตัวเติมกลับไม่ค่อยมีอิทธิพลต่อค่าดังกล่าว เนื่องจากว่าวิธีการผสมสารตัวเติม เข้ากับเมทริกซ์พลาสติก สำหรับผงคาร์บอนแบล็ค (CBp) ทางผู้วิจัยได้ทำผสมสารตัวเติมดังกล่าวเข้ากับพลาสติกเชิงประกอบด้วยตนเอง แต่สำหรับสารตัวเติมที่เป็นคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต (CBm) ตัวผงสีคาร์บอนแบล็คจะถูกผสมเข้ากับพลาสติกที่ใช้เป็นเนื้อเมทริกซ์มาอยู่แล้ว ดังนั้นลักษณะการกระจายตัวของคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต ย่อมสามารถกระจายตัวได้ดีกว่า ผงคาร์บอนแบล็ค ซึ่งเมื่อพิจารณาจากลักษณะทางสัณฐานวิทยา ก็พบว่า ลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคของคาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบตกระจายตัวดี และสม่ำเสมอในเมทริกซ์พอลิเมอร์ แต่สำหรับการกระจายตัวของผงคาร์บอนแบล็คในเมทริกซ์ จะเห็นว่าการกระจายตัวที่ไม่ค่อยดี เนื่องจากยังมีการเกาะกลุ่มของผงเป็นแอ็กกรีเกต ไม่แยกออกกันเป็นอนุภาค จึงทำให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบร่างแหที่ไม่ดี ส่งผลให้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ดีเท่าที่ควร

5. การหาระดับที่ดีที่สุดของค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ด้วยโปรแกรม Design expert[®] และทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล โดยการทดสอบจริงแล้วนำค่าที่ได้จากการทดสอบจริง มาเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายค่าด้วยโปรแกรม จะได้ผลดังนี้

- สำหรับ PC/ABS/CBm

ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 83/0/17 %โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 9.14 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ 10^7 Ω /square

ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 78/0.05/17 %โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 4.84 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ 10^7 Ω /square

ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 83/0/17 %โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 8.28 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ 10^7 Ω /square

- สำหรับ PC/ABS/CBp

ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 83/0/17 %โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 8.05 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ 10^7 Ω /square

ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 70/13/17 %โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 6.04 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ 10^7 Ω /square

ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz อัตราส่วนที่ดีที่สุด คือ 79/0.04/17 % โดยน้ำหนัก ซึ่งให้ค่า SE เท่ากับ 8.14 dB และค่า Surface resistivity ประมาณ $10^7 \Omega/\text{square}$

6. พลาสติกเชิงประกอบที่ได้จากงานวิจัยนี้มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต เนื่องจากมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวที่เหมาะสม แต่การจะนำไปประยุกต์ใช้งานในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังไม่ค่อยเหมาะสมเท่าที่ควร เนื่องจากในภาคอุตสาหกรรมต้องการวัสดุปิดกั้นที่มีค่าประสิทธิภาพในการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตั้งแต่ 20 dB เป็นต้นไป เพื่อให้สามารถปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ 99%

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการศึกษาคุณสมบัติเชิงกล และสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุที่เตรียมได้จากงานวิจัยนี้เพิ่มเติม เพื่อประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆ

2. เนื่องจากในงานวิจัยนี้เลือกใช้เกร็ดพลาสติกที่มีค่าอัตราการไหลที่ค่อนข้างต่ำ จึงส่งผลให้ไม่สามารถเติมสารตัวเติมลงไปปริมาณที่มากได้ เพราะเมื่อมีปริมาณสารตัวเติมที่มาก จะส่งผลให้การขึ้นรูปขึ้นงานด้วยการฉีดทำได้ค่อนข้างยาก จึงควรมีการนำพลาสติกเกรดอื่นๆ มาศึกษาด้วย

3. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบในย่านความถี่เบื้องต้นที่ 800-3,000 MHz ดังนั้นเพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงความถี่ที่หลากหลายจึงควรมีการทดสอบในช่วงความถี่อื่นๆ เพิ่มเติม

4. สารตัวเติมที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารตัวเติมที่มีลักษณะเป็นอนุภาค ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำ จึงควรการนำวัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสูงๆ มาทำการเติมลงไปพลาสติกเชิงประกอบ เพื่อทดสอบเปรียบเทียบ

5. วัสดุที่ใช้งานในด้านการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กับการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ไม่ควรเป็นวัสดุเดียวกัน เนื่องจากวัสดุที่ใช้ในการปิดกั้นต้องการวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้ามาก แต่ในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ต้องการวัสดุที่มีความสามารถในการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำ และฉนวนไฟฟ้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] คุณาลยา สถานสถิต, ศศิโรจน์ ชูสกุล, วลัยพร ปุษณารุณ เอื้อใจ และศิริศาสตร์ เอื้อใจ. 2554. “สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงความร้อนและสมบัติเชิงไฟฟ้าของ LLDPE ที่เติมพอลิพีโรลและคาร์บอนแบล็ก.” หน้า 349-356. ใน *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*. ปีที่ 21, ฉบับที่ 2.
- [2] RTP company. “CONDUCTIVE & ANTI-STATIC PLASTIC COMPOUNDS.” [Online]. Available : <http://www.rtpcompany.com/products/conductive/index.htm>. 2013.
- [3] ที่มา : <http://plastic.oie.go.th/SizingThaiMarket.aspx>
- [4] ที่มา : Stephen Halpein “ Guidelines for Static Control Management” Eumstat,1990
- [5] วลัยพร ปุษณารุณ เอื้อใจ และ ศิริศาสตร์ เอื้อใจ. 2550. *รายงานการวิจัย เรื่อง วัสดุเชิงประกอบนำไฟฟ้าระดับนาโนที่เตรียมจากพอลิพีโรล และการประยุกต์ใช้ในการกำบังการแทรกสอดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.* มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.
- [6] Chi-Yuan Huang and Tey-Wen Chiou. 1998. “The Effect of reprocessing on The EMI Shielding Effectiveness of Conductive Fibre Reinforced ABS Composites.” *European Polymer Journal*, 34(1) : 37-43.
- [7] Shinn-Shyong Tzeng and Fa-Yen Chang. 2001. “EMI Shielding effectiveness of metal-coated carbon fiber-reinforced ABS composites.” *Materials Science and Engineering*, A302 : 258-267.
- [8] Kan-Sen Chou, Kuo-Cheng Huang and Zong-Huai Shih. 2005. “Effect of Mixing Process on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Nickel/Acrylonitrile–Butadiene–Styrene Composites.” *Journal of Applied Polymer Science*. 97 (2005) : 128–135.
- [9] Varij Panwar and R.M. Mehra. 2008. “Analysis of Electrical, Dielectric, and Electromagnetic Interference Shielding Behavior of Graphite Filled High Density Polyethylene Composites.” *Polymer Engineering And Science*, 2178-2187.
- [10] Mohammed H. Al-Saleh, Uttandaraman Sundararaj. 2008. “Electromagnetic Interference (EMI) Shielding Effectiveness of PP/PS Polymer Blends Containing High Structure Carbon Black.” *Macromolecular Mater Engineering*. 293 (2008): 621–630.
- [11] Quinton J. Krueger. 2002. “Electromagnetic Interference and Radio Frequency Interference Shielding of Carbon-Filled Conductive Resins.” Master of Science In Chemical Engineering, Michigan Technological University.
- [12] Zhang, Qing-Hua and Chen, Da-Jun. 2004. “Percolation Threshold and Morphology of Composites of Conducting Carbonblack/Polypropylene/EVA.” *Journal of Materials Science*. 39(2004) : 1751-1757.
- [13] วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ. 2554. “เอกสารประกอบการสอนรายวิชาเคมีประยุกต์.” คณะวิทยาศาสตร์

และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

- [14] Lexan vs Acrylic. 2003. [Online]. Available : <http://www.kazuli.com/UW/4A/ME534/Lexan%20VS%20Acrylic2.htm>.
- [15] สมฤทธิ์ ดันมา. 2550. “การเตรียมเอป็อกไซคอมโพสิตนำไฟฟ้าเพื่อใช้เป็นไบโพลาร์เพลตในเซลล์เชื้อเพลิงแบบฟิวเซลล์.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [16] Alexander Chandra, Adam J. et.al. 2007. “Effect of Injection Molding Parameter on the Electrical Conductive of Polycarbonate/Carbon Nanotube Nanocomposites.” *ANTEC*. 2184-2188.
- [17] *INJECTION MOULDING*. [Online]. Available : <http://www.dogma.org.uk/vtt/process/processes/injectionmoulding.htm>.
- [18] คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. [Online]. Available : http://www.school.net.th/library/snet3/saowalak/electromagnet/e_wave.htm.
- [19] ฟิสิกส์ราชมงคล. “สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ บทความเพิ่มเติม.” [Online]. Available : <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/285/17/2/EMW.htm>.
- [20] Xingcun Colin Tong. 2009. “*Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference Shielding*.” USA. CRC Press Taylor&Francis Group.
- [21] กอบชัย เตชหาญ. 2527. *การลดสัญญาณรบกวนในระบบ*. คณะวิศวกรรมศาสตร์ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [22] ประสิทธิ์ ทิมพุดิ และไกรสร อัญชลีวรพันธุ์. 2549. *EMC 1: มาตรฐานอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ มาตรฐานและการทดสอบ*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [23] RTP company. “*THE “ART” OF WAVES*.” [Online]. Available : <http://www.rtpcompany.com/products/shielding/waves.htm>.
- [24] *EMC Shielding Materials*. [Online]. Available : http://www.emiguru.com/index.php?option=com_easyblog&view=entry&id=18.
- [25] อรรถพล บุญช่วย. 2549. “วัสดุป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำมาจากยางธรรมชาติ.” วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีพอลิเมอร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [26] S.Geetha, K.K.Satheesh Kumar, Chepuri R.K.Rao, M.Vijayan and D.C.Trived. 2009. “EMI Shilding: Method and Materials-A Review.” *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.112 : 2073-2086.
- [27] Yangyong Wang and Xinli Jing. 2005. “Intrinsically Conducting Polymers for Electromagnetic Interference Shielding.” *POLYMERS FOR ADVANCED TECHNOLOGIES*. 16 : 344-351.
- [28] C. Y. Lee, D. E. Lee, C. K. Jeong, Y. K. Hong, J. H. Shim, J. Joo, M. S. Kim, J. Y. Lee, S.

- H. Jeong, S. W. Byun, D. S. Zang, H. G. Yang. 2002. "Electromagnetic Interference Shielding by Using Conductive Polypyrrole and Metal Compound Coated on Fabrics." *Polymer for Advanced Technologies*, 13. (2002):577-583.
- [29] M.S. Kim, H.K. Kim, S.W. Byun, S.H. Jeong, Y.K. Hong, J.S. Joo, K.T. Song, J.K. Kim, C.J. Lee, J.Y. Lee "PET Fabric/Polypyrrole Composite with High Electric Conductivity for EMI Shielding." *Synthetic Metal*. 126 (2002) : 233-239.
- [30] เบญจพร หนูคล้าย "วัสดุผสมสามองค์ประกอบทำจากยางธรรมชาติและตัวเติมนาโนเป็นตัวตรวจรู้ทางอิเล็กทรอนิกส์." วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551.
- [31] ปรวิทย์ ไผ่ไหล. 2555. "ประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางธรรมชาติ ผสมเขม่าดำ ดีบุก และทังสเตน." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [32] P. B. Jana, A. K. Mallick and S. K. De. 1991. "Electromagnetic Shielding Effectiveness of Short Carbon Fibre-filled Polychloroprene Vulcanized by Barium Ferrite." 478 – 481.
- [33] El-Tantawy, Ferid and Dishovesky, Nikolay. 2004. "Novel V-Shaped Negative Temperature Coefficient of Conductivity Thermistors and Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness from Butyl Rubber Load Boron Carbide Composites." *Journal of Applied Polymer Science*, 91 (2004) : 2756-2770.
- [34] P.K. Pramanik, D. Khastgir and T.N. Saha. 1991. "Electromagnetic Interference Shielding by Conductive Nitrile Rubber Composite Containing Carbon Filler" *Journal of Elastomer and Plastics*. 23(October 1991) : 345-361.
- [35] Rajendra Kumar Goyal and Amol Kadam. 2010. "Polyphenylene Sulphide/Graphite Composites for EMI Shielding Applications." *Advance Materials Letters*. 1(2) : 143-147.
- [36] วัชรพันธ์ มณีรัตน์. 2549. "การปรับปรุงสมบัติการนำไฟฟ้าของยางธรรมชาติโดยใช้คาร์บอนแบล็ค." วิศวกรรมมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [37] Wen-Yen Chiang and Kai-Yuan Cheng. 1997. "Processing Conditions for Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Mechanical Properties of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Based Composites." *Polymer Composites*, 18(6): 748-756.
- [38] Douglas H McQueen, Karl-Michael Jager and Michaela Peliskova. 2004. "Multiple Threshold Percolation in Polymer/Filler Composites." *Journal of Physics D: Applied Physics*. 37(2004) : 2160-2169.
- [39] Michaela Peliskova, Jarmila Vilcakova, Maria Omastova, Petr Saha, Chunzhong Li and Otakar Quadrat. 2005. "The Effect of Pressure Deformation on Dielectric and Conduction Properties of Silicon Rubber/Polypyrrole Composites in The Percolation Threshold Region." *Smart Materials and Structure*. 14(2005): 949-952.

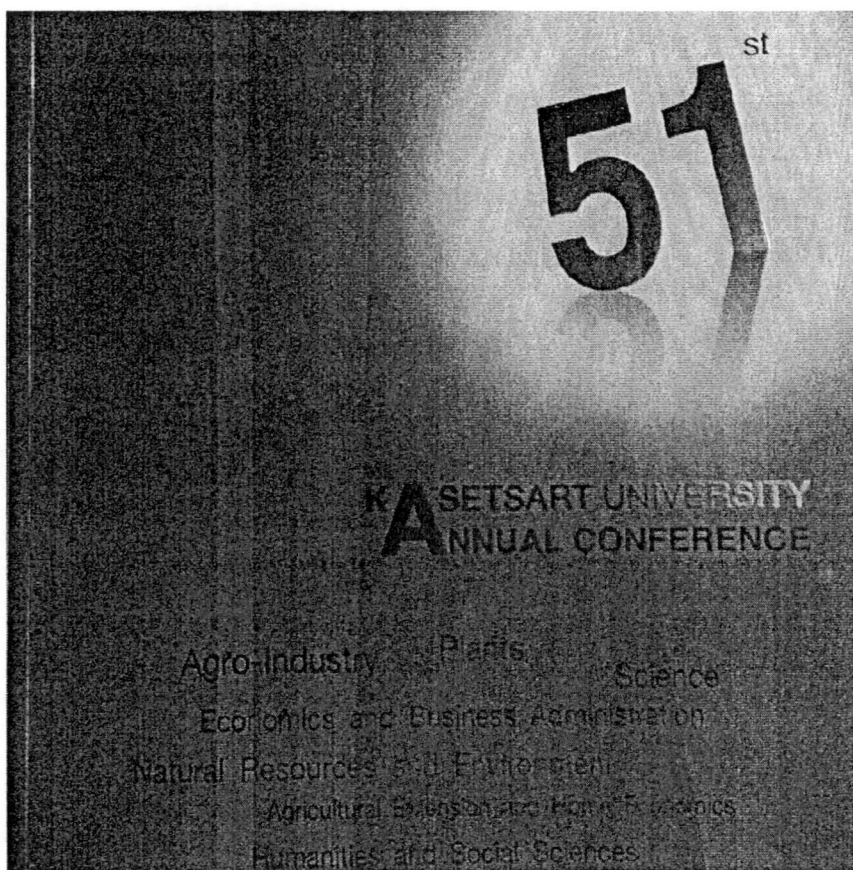
- [40] Chiang, Wen-Yen and Chiang, Yung-Shin. 1992. "Effect of Titanate Coupling Agent on Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness and Mechanical Properties of PC-ABS-NCF Composite." *Journal of Applied Polymer Science.* 46(1992): 673-681.
- [41] อธิพิล แจ้งซัด. *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [42] อธิพิล แจ้งซัด. 2545. *เทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ : ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [43] พิจักษ์ เพิ่มประเสริฐ. "การศึกษาวิธีการประทุของไฟฟ้าสถิตในอุตสาหกรรม." *วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.*
- [44] ASTM Standards : Standard Test Method for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. Detailed drawings are available from ASTM International, 2007.
- [45] ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชวมงคล. "ไฟฟ้าและความต้านทาน." [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/95/index95.htm>.
- [46] หน่วยวิจัยและบริการเครื่องมือกลาง. "Scanning Electron Microscopy (กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด)." [Online]. Available: <http://www.dstar.kmitl.ac.th/?q=node/547>.
- [47] ฟิสิกส์ราชวมงคล. "Scanning Electron Microscope, SEM." [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/192/SEM.pdf>.
- [48] Rachida Krache and Ismahane Debbah. 2011. "Some Mechanical and Thermal Properties of PC/ABS Blends." *Materials Sciences and Applications.* 2 : 404-410.
- [49] ประเมศ ชุตินา. 2545. *การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [50] Lawson, J. and J. Erjavec. 2001. *Modern Statistics for Engineering and Quality Improvement.* Duxbury. Australia.
- [51] อิศรพงษ์ พงษ์ศิริกุล. 2550. *การวิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป สำหรับอุตสาหกรรมเกษตร*. พิมพ์ครั้งที่ 4. ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนากสิกรรม : คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [52] ศรินทิพย์ พงษ์สว่าง. 2550. "การพัฒนาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตผลไม้รวม โดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.*
- [53] ดุษฎี มณีสุวรรณรัตน์ และคณะ. 2547. "การพัฒนาผลิตภัณฑ์ทุเรียนกวน." *วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาจุลชีววิทยา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.*
- [54] ชาญณรงค์ สายแก้ว, เสริมศักดิ์ เวียงวิเศษ และอภัย ศรีบุญเรือง. 2011. "การปรับปรุงสมบัติแบบหล่อทรายในอุตสาหกรรมเหล็กหล่อ โดยใช้การทดลองแบบส่วนผสม." หน้า 196-178. ใน *KKU Research Journal.* 16(2).
- [55] อรวรรณ พรรณบัวหลวง. 2549. "การออกแบบการทดลองแบบผสมเพื่อหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตทินเนอร์สำหรับสีพ่นรถยนต์แห้งเร็วไนโตรเซลลูโลส." *วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.*

- [56] คันธรส ปานแก้ว, เสาวณีย์ เลิศวรสิริกุล, วิชัย ทฤพัยธนาสันต์ และวารุณี ณะแพสย์. 2549. “การพัฒนาผลิตภัณฑ์ชาสมุนไพรผสมเจิร์มถั่วเหลืองเพื่อสุขภาพ.” หน้า 378-385 ใน *การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 44*.
- [57] Pichayana Juemane, et. al. 2006. “Effect of Some Hydrocolloids On Juiciness Of Frozen Battered Shrimp Burger.” Department of Food Technology Faculty of Agro-Industry Prince of Songkla University.
- [58] เจษฎา หาญบาง. 2552. “การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองแบบส่วนผสม เพื่อการปรับปรุงอัตราการผสมพลาสติกกรีซไคเคิล.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [59] พลวริน พลย์ง. 2551. “การพัฒนาเทียนหอมโดยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง.” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [60] Typical of WONDERLITE[®]PC-110, CHI MEI Corporation, 2012.
- [61] General Purpose ABS, POLYLAC[®] Characteristics, CHI MEI Corporation, 2012.
- [62] Product Information, Thai Tokai Carbon Product Company Limited, 2011.
- [63] PLASBLAK[®] UN2014, Cabot Corporation, 2007
- [64] ASTM Standards : Standard Test Method for Melt Flow Rates of Thermoplastics by Extrusion Plastometer. Detailed drawings are available from ASTM International, 2010.
- [65] Moshe Narkis, Gershon Lidor, Anita Vaxman and Limor Zuri. 1999. “Novel Electrically Conductive Injection Moldable Thermoplastic Composites For ESD Applications”. *Conductive Polymers and Plastics*. 209-217.
- [66] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. “บทที่ 6 การทดสอบสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์.” เอกสารประกอบการสอนวิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis. คณะพลังงานสิ่งแวดล้อม และวัสดุ. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.
- [67] D.D.L. Chung. 2001. “Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials.” *Elsevier Science*. 39 : 279-285.
- [68] กุลชลิศ วิสารทกุล, ปฐมพงศ์ สุกใส และอภิชาติ มณีงาม. 2552. “เครื่องทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก.” ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [69] เจริญ นาคะสรรค์, ผศ.ดร. 2546. *เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โพธิ์เพช.
- [70] ดร.ชนัน พัทธวราร. “เทคโนโลยีกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์.” ภาควิชาเคมี
- [71] บุญรักษ์ กาญจนวรวณีย์. “โพลีเมอร์คอมโพสิต.” [Online]. Available : http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=79&Itemid=176. 2008.
- [72] พงษ์ธร แซ่ฮ้อย, *วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอย่าง*. วารสารเพื่อการพัฒนาของอุตสาหกรรมยางไทย. ปีที่ 2, ฉบับ ที่ 2 เมษายน-พฤษภาคม, 2551.
- [73] วิโรจน์ เตชะวิญญูธรรม, ผศ. 2553. *วิศวกรรมการผลิตพลาสติก*. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
- [74] วิชิต หล่อจ๊ะระขุนท์กุล และจิราวัลย์ จิตรถเวช. 2548. *เทคนิคการพยากรณ์*. พิมพ์ครั้งที่ 3 ฉบับปรับปรุง. กรุงเทพฯ : โครงการส่งเสริมเอกสารวิชาการ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์.

- [75] วีระเชษฐ์ ชันเงิน. “ความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าด้านสื่อสาร.” [Online]. Available : <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>
- [76] สุเมธ วงศ์พานิชเลิศ, ดร. 2552. ผลกระทบต่อสุขภาพจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ : สำนักสื่อสารสาธารณะและบริการประชาชน และสถาบันคุ้มครองผู้บริโภคในกิจการโทรคมนาคม (สบท.).
- [77] สมพงษ์ นนทพันธ์. 2550. “วัสดุป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำมาจากยางธรรมชาติผสมกับผงแม่เหล็กเฟอร์ไรต์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมวัสดุ, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- [78] สมศักดิ์ วรมงคลชัย, รศ.ดร. 2547. สารปรับแต่งพอลิเมอร์. กรุงเทพฯ : บริษัท บุ๊คเน็ต จำกัด.
- [79] All4polymers. “Carbon Black.” [Online]. Available : <http://www.all4polymers.com/?cid=276742>. 2013.
- [80] Anulorm Sripin. “poly_electronics.” [Online]. Available : https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_electronics/search/?q=ptanulom&fields=lastModifiedAuthor. 2013.
- [81] Das, N.C., et. al. 2001a. “Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Ethylene Vinyl Acetate Based Conductive Composites Containing Carbon Fillers.” *Journal of Applied Polymer Science*. 80(2001) : 1601-1603.
- [82] Das, N.C., et. al. 2001b. “Electromagnetic Interference Shielding Effectiveness of Conductive Carbon Black and Carbon Black Fiber-Filled Composites Based on Rubber and Rubber Blends.” *Advance in Polymer Technology*. 20(3) : 226-236.
- [83] J. Azadmanjiri, P. et.al. 2011. “Synthesis and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Iron Oxide/Polypyrrole Nanocomposites.” *Polymer Engineering and Science*. 51 : 247-253.
- [84] NIST SEMATECH. “ENGINEERING STATISTIC Handbook.” [Online]. Available : <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>. 2013.
- [85] VTI VACUUM TECHNOLOGIES INC. “ESD & EMI Shielding Form-in-Place Gaskets.” [Online]. Available : <http://www.vactecinc.com/process.htm>. 2013.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์



เรื่องเดิมการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 51 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
The Proceeding of 51st Kasetsart University Annual Conference

เล่มที่ 5

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
(Subject: Architecture and Engineering)

จัดโดย (Organized by)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (Kasetsart University)

ร่วมกับ (in cooperation with)

สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (Commission of Higher Education)

กระทรวงศึกษาธิการ (Ministry of Education)

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ (Ministry of Agriculture and Cooperatives)

กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (Ministry of Science and Technology)

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

(Ministry of Natural Resource and Environment)

กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร

(Ministry of Information and Communication Technology)

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (National Research Council of Thailand)

และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (The Thailand Research Fund)

5 - 7 กุมภาพันธ์ 2556 (February 5 - 7, 2013)

ISBN 978-616-278-068-4

การทดลองศึกษาอัตราการไหลของพลาสติก Polycarbonate(PC)/ Acrylonitrile-Butadiene-Styrene(ABS) ที่ผสมคาร์บอนแบล็ค (Carbon Black)

The Experimental Study on Melt Flow Rate of PC/ABS-Carbon Black Composites

อาสาลิ ทิพยไกรสร¹

Arsarin Tippayakraisorn¹

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาค่าอัตราการไหล (Melt Flow Rate, MFR) ของพลาสติกประกอบระหว่างโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) ซึ่งสารตัวเติม คือ คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black, CB) พร้อมทั้งออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixture Design) แบบ Simplex Centroid Design เพื่อหาอัตราส่วนของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิด โดยทำการวัดค่าอัตราการไหลของพลาสติกประกอบดังกล่าว ที่อุณหภูมิ 265 °C ใช้น้ำหนักกด 5 kg ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 พบว่า ที่อัตราส่วนของ PC/ABS/CB ที่มีอัตราส่วนของคาร์บอนแบล็ค มากกว่า 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ไม่สามารถไหลได้ ดังนั้นจึงทำการออกแบบการทดลองใหม่ โดยทำการจำกัดขอบเขตของปริมาณคาร์บอนแบล็คในอัตราส่วนไม่เกิน 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้การออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Designs) เมื่อทำการทดสอบค่าอัตราการไหลพบว่า ปริมาณของอัตราส่วนของส่วนประกอบ 3 ชนิดมีผลทำให้ค่าอัตราการไหลของพลาสติกเกิดการเปลี่ยนแปลง แม้ว่าจะใช้ อุณหภูมิ และน้ำหนักกดเท่ากัน ซึ่งแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าอัตราการไหลของพลาสติก จะเกิดขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC และสารตัวเติม CB และแนวโน้มของค่าอัตราการไหลของพลาสติกจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS ในพลาสติกประกอบระหว่าง PC/ABS/CB

Abstract

This research was to study the melt flow rate of the compounded polymer between polycarbonate(PC) and acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS) filled with carbon black (CB). The simplex centroid of mixture design was used to prepare the recipes of compounded materials. The melt flow rate was measured at testing temperature of 265 °C with weight 5 kg followed by the ASTM D1238. It found the PC/ABS/CB which had carbon black more than 17 percent by weight couldn't perform the experiment. Therefore, the new experiments with the limitation of 17% by weight of the carbon black were set. The D-optimal mixture design which was the constrained mixture designs was applied with this experiment. The result showed the ratio of composited material effect to the MFR although using the same temperature and weight. The increasing of MFR depended on the ratio of PC and CB. MFR was decreased when increasing the ratio of ABS in PC/ABS/CB composites.

Keywords: Melt Flow Rate(MFR), Carbon black

e-mail address: arsarin_ploy@hotmail.com

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, 10520

คำนำ

ปัจจุบันพลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ชิ้นส่วนประกอบรถยนต์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ รวมทั้งงานบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในการบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งโดยปกติพลาสติกที่ใช้ในการขึ้นรูปสำหรับอุตสาหกรรมดังกล่าว คือ พลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) ซึ่งพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และพอลิคาร์บอเนต (PC) เป็นเทอร์โมพลาสติกที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมดังกล่าว และมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดี โดย ABS มีคุณสมบัติในการต้านทานต่อสารเคมี และต้านทานต่อการถูกร่อน แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติทางกลต่างๆ ไปของ ABS ต่ำกว่าของพลาสติกที่ใช้ในงานวิศวกรรม (Engineering Plastics) ชนิดอื่นๆ ซึ่งวิธีหนึ่งที่ถูกนำเสนอเพื่อใช้ในการพัฒนาคุณสมบัติของ ABS คือ การผสมพลาสติกชนิด ABS และพลาสติกชนิด PC เข้าด้วยกัน นอกจากจะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติทางกลให้กับพลาสติกชนิด ABS แล้ว ยังเป็นการเพิ่มความสามารถในการขึ้นรูปของพลาสติกชนิด PC ด้วยเช่นกัน (Huang and Wu, 2000) นอกจากนั้นการใช้งานในอุตสาหกรรมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ คุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ คุณสมบัติในการป้องกันสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสามารถมีคุณสมบัติทั้งสองอย่างดังกล่าวมาได้นั้น จะต้องมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า (คุณาลยา และคณะ, 2554; William and George, n.d.; Urban et al., 2006) แต่เป็นที่ทราบกันดีว่าพลาสติกมีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการผสมสารตัวเติมเข้าไป เพื่อเพิ่มความสามารถในการนำไฟฟ้าของพลาสติก โดยสารตัวเติมดังกล่าว คือ คาร์บอนแบล็ค (ปรวีย์, 2554; Tzeng and Chang, 2000; Mohammed and Sundararaj, 2008) และถึงแม้ว่าความสามารถในการนำไฟฟ้าของคาร์บอนแบล็คจะต่ำกว่าวัสดุพวกทองแดง อะลูมิเนียม และเงิน เป็นต้น (S. Geetha et al., 2008) แต่ในด้านของราคา คาร์บอนแบล็คเป็นสารตัวเติมที่มีราคาต่ำกว่าวัสดุดังกล่าว ซึ่งความสามารถในการนำไฟฟ้าก็สามารถเพิ่มขึ้นได้ เมื่อจำนวนสารตัวเติมในพลาสติกประกอบมีปริมาณมาก (คุณาลยา และคณะ, 2554) แต่ก็มีข้อจำกัดในเรื่องของการขึ้นรูปพลาสติกประกอบดังกล่าว

เมื่อมีการผสมพลาสติกสองชนิดเข้าด้วยกัน และเติมสารตัวเติมเข้าไป ความสามารถในการขึ้นรูปของพลาสติกประกอบก็จะเปลี่ยนแปลงไปจากคุณสมบัติเดิม ซึ่งสมบัติหลักๆ ที่มีผลต่อการขึ้นรูปชิ้นงานพลาสติกเชิงประกอบก็คือ อัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Rate, MFR) เนื่องจากเป็นค่าที่แสดงคุณสมบัติการไหลของพลาสติกในการขึ้นรูปด้วยวิธีต่างๆ ถ้าค่า MFR ของพลาสติกแต่ละชนิดไม่เหมาะสมกับกรรมวิธีการขึ้นรูป จะส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องต่างๆ ของชิ้นงาน เช่น ในกระบวนการฉีดขึ้นรูป ทำให้เกิดการฉีดไม่เต็มแบบ (Short shot) เกิดร่องรอยการไหลของพลาสติกเหลวในชิ้นงาน และทำให้ชิ้นงานเกิดครีบ (Flash) ซึ่งการเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวส่งผลให้เกิดการสูญเสียในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ทั้งในด้านของการสูญเสียวัสดุ สูญเสียเวลาในการผลิต และเสียค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นถ้าทราบคุณสมบัติในการไหลของพลาสติก และเลือกใช้วิธีการในการขึ้นรูป รวมทั้งเลือกใช้เครื่องมือที่เหมาะสมในการขึ้นรูปพลาสติกประกอบดังกล่าว ก็ถือเป็นแนวทางในการลดโอกาสที่จะเกิดความเสียหายในกระบวนการผลิตขึ้น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาค่าอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Rate, MFR) ตามมาตรฐานการทดสอบ ASTM D1238 ของพลาสติกประกอบ ระหว่างพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และพลาสติกชนิดอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) โดยการเติมสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black, CB) ซึ่งมีหน่วยในการวัด คือ กรัมต่อ 10 นาที โดยที่ปริมาณของสารตัวเติมมีแนวโน้มที่จะมีผลต่อค่าอัตราการไหลของพลาสติกประกอบ และวัสดุประกอบดังกล่าวที่ถูกเตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้

นำไปใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, คุณสมบัติในการลดการประทุของไฟฟ้าสถิต และ ความต้านทานแรงดึงต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

วัสดุ

ในการทดลองเลือกใช้เม็ดพลาสติกชนิดโพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) และอะคริโลไนไตรล์-บิวทาไดอีน-สไตรีน (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene, ABS) เกรด PC 110 และเกรด PA 707 ตามลำดับ ผลิตโดยบริษัท CHIMEI และเลือกใช้ Filler Masterbatch ซึ่งสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็ค (Carbon Black, CB) เกรด PLASBLAK® UN2014 ผลิตโดยบริษัท CABOT และประกอบด้วย คาร์บอนแบล็ค 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การทดสอบอัตราการไหลของพลาสติก (Melt Flow Rate, MFR)

เป็นการทดสอบคุณสมบัติการไหลตัวของพลาสติกเหลวจำพวกเทอร์โมพลาสติก ตามมาตรฐาน ASTM D1238 ค่าอัตราการไหลของพลาสติก (MFR) มีหน่วยเป็น กรัม/10 นาที

การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยใช้วิธีการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบมีข้อจำกัด (Constrained Mixture Designs) และเป็นรูปแบบการเลือกพิจารณาหุนการทดลองที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของปัจจัยเชิงปริมาณ ทั้ง 3 ปัจจัย คือ พลาสติกชนิด PC, ABS และสารตัวเติม CB และกำหนดเงื่อนไขอัตราส่วนผสมพลาสติกประกอบ PC/ABS/CB จากการออกแบบการทดลองส่วนผสมแบบ D-optimal ได้ดังนี้ $0 \leq PC \leq 1$, $0 \leq ABS \leq 1$, $0 \leq CB \leq 0.166667$ ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ซึ่งจุดการทดลองแสดงดัง Figure 1

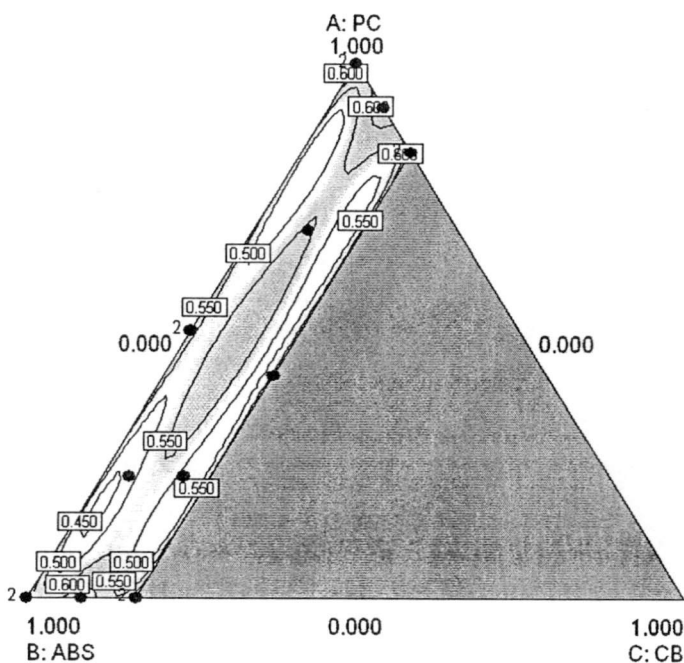


Figure 1 D-optimal mixture design for 3 components

ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

จากการนำข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design-Expert 8.0.7.1 โดยใช้แบบจำลองถดถอยที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ พบว่าแบบจำลอง Special Quartic มีความเหมาะสม โดยพิจารณาจากค่าทางสถิติ คือ ค่า Adjust R-Square และค่า Predicted R-Square ที่มีค่าสูง และพิจารณาจากค่า P-value ของตัวรูปแบบ มีค่าน้อยกว่า 0.05 ประกอบกัน ดังแสดงใน Table 1 และ Table 2

Table 1 Model summary statistics

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	7.08	0.2271	0.1082	-0.2898	1088.58
Quadratic	1.99	0.9533	0.9300	0.9064	78.97
Special Cubic	2.04	0.9557	0.9261	0.8506	126.09
Cubic	0.97	0.9933	0.9831	0.6360	307.20
<u>Special Quartic</u>	<u>0.42</u>	<u>0.9985</u>	<u>0.9969</u>	<u>0.9838</u>	<u>13.70</u>
Quartic	0.19	0.9998	0.9994		

Table 2 Analysis of variance for special quartic mixture model

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	7	842.46	102.35	630.24	<0.0001
Linear Mixture	2	191.68	95.84	501.89	<0.0001
AB	1	52.51	52.51	274.99	<0.0001
AC	1	6.69	6.69	35.05	0.0004
BC	1	23.05	23.05	120.69	<0.0001
AB ² C	1	37.30	37.30	195.31	<0.0001
ABC ²	1	24.96	24.96	130.71	<0.0001
Residual	8	1.53	0.19		
Lack of Fit	3	1.35	0.45	12.71	0.0089
Pure Error	5	0.18	0.035		
Total	15	843.99			

จาก Table 2 เป็นแบบจำลองที่ตัดตัวแปรที่ไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ ออกจากแบบจำลองการถดถอยแล้ว โดยยังคงตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับอิทธิพลหลักไว้ เมื่อวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะได้ผลทางสถิติ ดังแสดงใน Table 3

Table 3 Model summary statistics for special quartic

Std. Dev.	0.44	R-Squared	0.9982
Mean	14.81	Adj R-Squared	0.9966
C.V. %	2.95	Pred R-Square	0.9875
PRESS	10.54	Adeq Precisor	67.963

จาก Table 3 ค่า C.V. % คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความผันแปร (Coefficient of variation)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าผลตอบ และส่วนผสมที่ส่งผลต่อค่าอัตราการไหลของพลาสติก

ตามทฤษฎีสถิติค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า Y รอบเส้นถดถอย (Standard Deviation, Std. Dev.) และผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดจากการทำนาย (Prediction Error Sum of Squares, PRESS) ทั้ง 2 ค่านี้ยิ่งมีค่าน้อยมากเท่าใด แบบจำลองที่ได้จะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเท่านั้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Squared) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ใช้ในการทำนาย (Pred R-Square) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับแล้ว (Adj R-Squared) ยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้นมากเท่าใด จะทำให้แบบจำลองที่ได้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเท่านั้นเช่นกัน ซึ่งจาก Table 1 และ Table 2 พบว่าแบบจำลอง Special Quartic ให้ค่า Std. Dev. และ PRESS มีค่าน้อย และ R-Squared = 0.9982 และค่า Adj R-Squared = 0.9966 ซึ่งมีค่าสูงและใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองการถดถอยที่ใช้เหมาะสมกับข้อมูล

จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert 8.0.7.1 ได้ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของปัจจัยที่มีผลต่อค่าผลตอบ (ค่าอัตราการไหลของพลาสติก) ดังแสดงใน Table 4

Table 4 Coefficient estimate of component

Component	Coefficient	Component	Coefficient
A	11.45	AC	-245.46
B	22.47	BC	-456.49
C	279.17	AB ² C	-1055.57
AB	23.57	ABC ²	2641.44

ดังนั้นจาก Table 4 จะได้สมการการถดถอย (Regression equation) ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณอัตราส่วนผสม กับผลตอบ (ค่าอัตราการไหลของพลาสติก) ซึ่งเป็นแบบจำลองกำลังสี่ (Special Quartic) ดังนี้

$$\text{MFR} = 11.45A + 22.47B + 279.17C + 23.57AB - 245.46AC - 456.49BC - 1055.57AB^2C + 2641.44ABC^2$$

(1)

โดยที่ A = อัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC

B = อัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS

C = อัตราส่วนของสารตัวเติม CB

การตรวจสอบความเหมาะสมของสมการถดถอย (Diagnostic)

การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลต่างๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual Analysis)

การตรวจสอบคุณสมบัติของรูปแบบการถดถอยจะใช้การพิจารณาจากกราฟของส่วนตกค้าง 2 กราฟ คือ Normal Probability Plots และ Residual Plots ดังแสดงใน Figure 2 และ Figure 3 ตามลำดับ

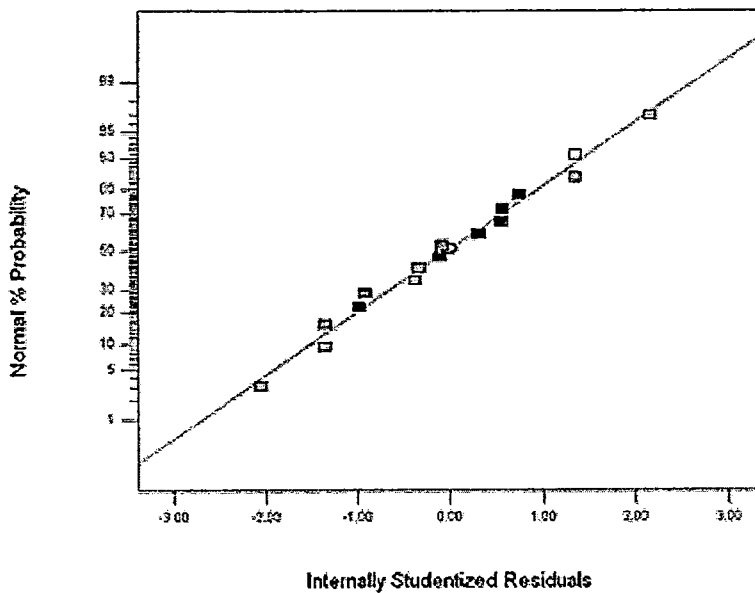


Figure 2 Normal probability plot of the residuals

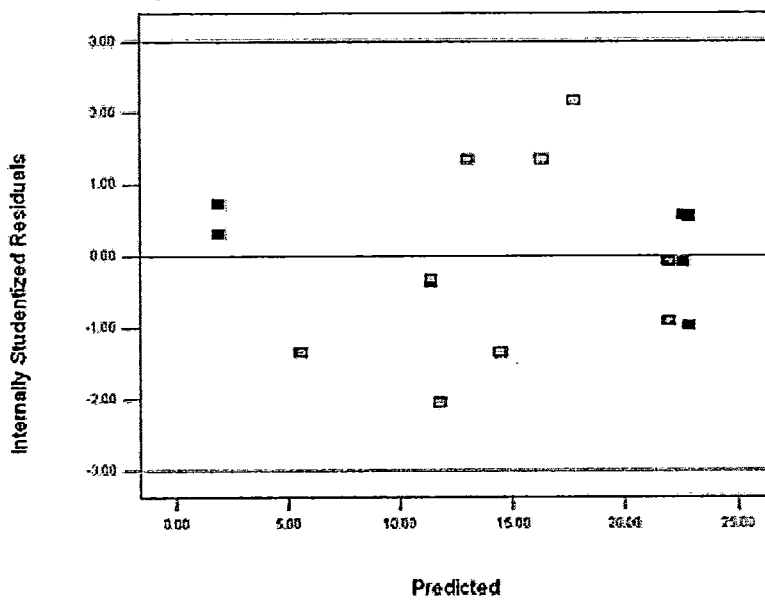


Figure 3 Residuals vs. Predicted

จาก Figure 2 กราฟ Normal probability plot of the residuals การกระจายตัวของข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นค่าความคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบปกติ และ Figure 3 กราฟระหว่าง Residual (e) กับ

ค่าประมาณบนเส้นถดถอย \hat{Y}_i มีลักษณะการกระจายแบบสุ่ม แสดงว่าความแปรปรวนของค่าความคลาดเคลื่อนคงที่ ดังนั้นสมการถดถอยมีรูปแบบที่เหมาะสมกับข้อมูล

2. การตรวจสอบค่าผิดปกติ เนื่องจากค่าของตัวแปรอิสระ

พิจารณาจากค่า h_{ii} หรือค่า leverage ภายใต้เงื่อนไข $h_{ii} \geq 2p/n$, p คือ จำนวนพารามิเตอร์ในสมการถดถอย และ n คือ จำนวนการทดลอง ดังนั้นสมการถดถอยของผลตอบ มีจำนวนพารามิเตอร์ในสมการทั้งหมด 8 ตัว ($p=8$) ตามสมการที่ 1 และจำนวนการทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ($n=16$) กล่าวโดยสรุปคือ การหาค่าผิดปกติเนื่องจากค่าตัวแปรอิสระพิจารณาจาก $h_{ii} \geq 2p/n = 2(8)/16 = 1.00$ ซึ่งจาก Figure 4 การกระจายตัวของข้อมูลอยู่ระหว่าง 0.40 ถึง 1.00 แสดงให้เห็นว่าไม่มีค่าผิดปกติเนื่องจากค่าตัวแปรอิสระไม่เกินค่า h_{ii}

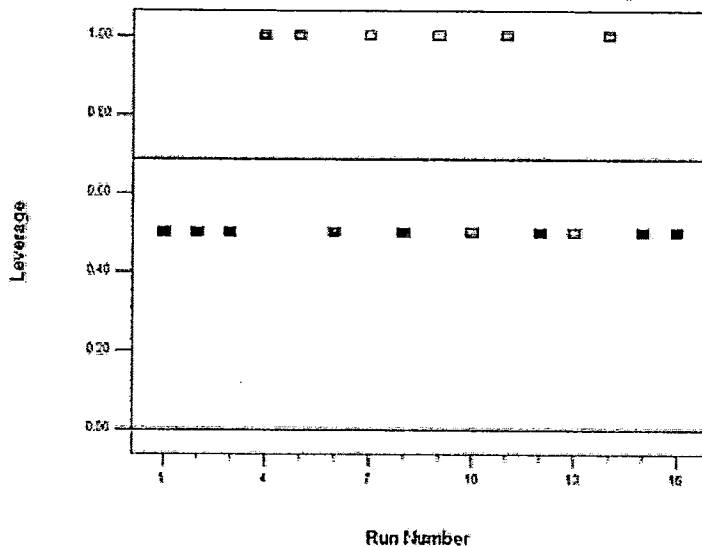


Figure 4 Leverage vs. Run

พิจารณารูปเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (contour plot) ของค่าอัตราการผลิตของพลาสติก

จากการวิเคราะห์ผล จากโปรแกรม Design-Expert 8.0.7.1 ได้กราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวผลตอบสนอง (Contour Plot) ของค่าอัตราการผลิตของพลาสติก ดังแสดงใน Figure 6

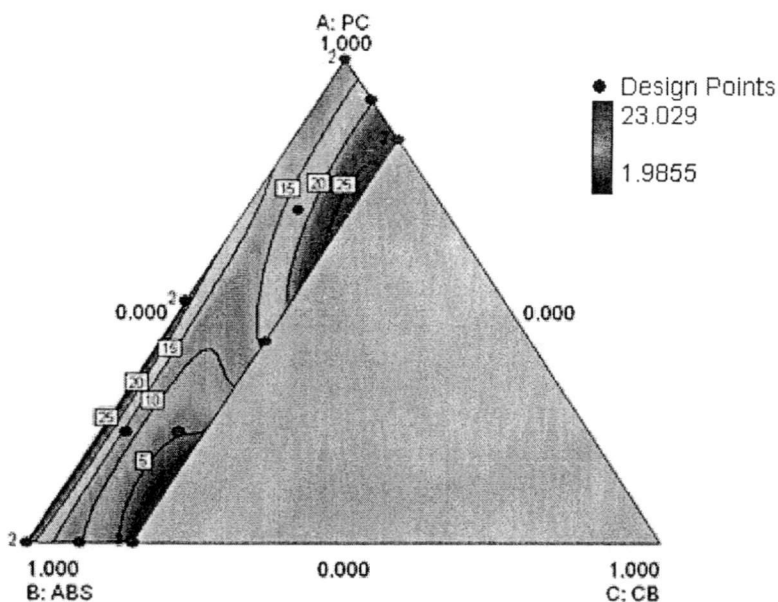


Figure 6 Contour plot of MFR

จาก Figure 6 สามารถบอกแนวโน้มของค่าผลตอบ (ค่าอัตราการไหลของพลาสติก, Melt Flow Rate, MFR) โดยพิจารณาจากสี ซึ่งสีแดงจะแสดงค่า MFR สูง รองลงมาคือ สีเขียว และสีน้ำเงิน จะแสดงค่า MFR ต่ำที่สุด และจากกราฟเส้นโครงร่างพื้นผิวตอบสนอง จะพบว่าบริเวณที่ค่า MFR มีค่าสูงมีอยู่ 2 ส่วน คือส่วนแรกเป็นส่วนที่มีปริมาณอัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC และสารตัวเติม CB ค่อนข้างมาก และอีกส่วนคือ ส่วนที่มีปริมาณอัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS มาก แต่ไม่มีพลาสติกชนิด PC และสารตัวเติม CB รวมอยู่ด้วย ดังนั้นแนวโน้มของค่าอัตราการไหลจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC และสารตัวเติม CB และแนวโน้มของค่าอัตราการไหลของพลาสติกจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS ในพลาสติกประกอบระหว่าง PC/ABS/CB

สรุป

จากการวิเคราะห์ผลจะได้สมการการถดถอย (Regression equation) ที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ของปริมาณอัตราส่วนผสม กับผลตอบ (ค่าอัตราการไหลของพลาสติก) ซึ่งเป็นแบบจำลองกำลังสี่ (Special Quartic) เป็นดังนี้

$$MFR = 11.44A + 22.63B - 50.56C + 23.20AB + 150.25AC - 61.52BC - 814.78A^2BC - 1542.06AB^2C + 5956.71ABC^2$$

โดยที่ A = อัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC, B = อัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS และ C = อัตราส่วนของสารตัวเติม CB

และแนวโน้มของค่าอัตราการไหลจะสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด PC และสารตัวเติม CB และแนวโน้มของค่าอัตราการไหลของพลาสติกจะลดลง เมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของพลาสติกชนิด ABS ในพลาสติกประกอบระหว่าง PC/ABS/CB

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.วิภู ศรีสืบสาย ในการให้คำแนะนำ และชี้แนะแนวทางในการทำงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณ รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ ในการให้คำปรึกษาในการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and Analysis of Experiments). บริษัท สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด, กรุงเทพมหานคร.

ผศ.ดร.เจริญ นาคะสรรค์. 2546. เทคโนโลยีเบื้องต้นทางพลาสติก. สำนักพิมพ์ไทร์เพช, กรุงเทพมหานคร.

วิรัช พานิชวงค์. 2549. การวิเคราะห์การถดถอย. ศูนย์ตำราเรียน สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, กรุงเทพมหานคร.

Douglas C. Montgomery. 2009. Design and Analysis of Experiments. 7th Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York.

JAN-CHAN HUANG. 2002. Carbon-Black Filled Conducting Polymers and Polymer Blends. *Advances in Polymer Technology* 21: 299-313.

ภาคผนวก ข

ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE) โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน MIL-STD 285

การคำนวณค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic shielding effectiveness, SE)

ในการวัดค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$SE = P_1 - P_2 \quad (\text{dB}) \quad (1)$$

เมื่อ P_1 คือ ระดับกำลังที่อ่านค่าได้ เมื่อไม่มีวัสดุปิดกั้น (dB)

P_2 คือ ระดับกำลังที่อ่านค่าได้ เมื่อมีวัสดุปิดกั้น (dB)

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลาสติกเชิงประกอบระหว่าง PC/ABS เมื่อสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบตช์ (Carbon black masterbatch, CBm) ที่ความถี่ 800 MHz

- เมื่อตัวรับ และตัวส่งสัญญาณเป็นแนวนอน

เริ่มต้นจากการวัดค่าระดับกำลัง เมื่อไม่มีวัสดุปิดกั้น คือ P_1 มีค่าเท่ากับ 84.31 dB และเมื่อนำวัสดุมาปิดกั้นระหว่างตัวรับกับตัวส่งสัญญาณสามารถวัดค่าระดับกำลังได้ P_2 มีค่าเท่ากับ 75.17 dB ดังนั้นจะได้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) สำหรับกรณีที่ตัวรับ และตัวส่งสัญญาณเป็นแนวนอน ดังนี้

$$\begin{aligned} SE &= 84.31 - 75.17 && (\text{dB}) \\ &= 9.17 && (\text{dB}) \end{aligned}$$

- เมื่อตัวรับ และตัวส่งสัญญาณเป็นแนวตั้ง

เช่นเดียวกันกับแบบแนวนอน จะได้ P_1 และ P_2 เท่ากับ 80.08 dB และ 70.94 dB ตามลำดับ ดังนั้นจะได้ค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) สำหรับกรณีที่ตัวรับ และตัวส่งสัญญาณเป็นแนวตั้ง ดังนี้

$$\begin{aligned} SE &= 80.08 - 70.94 && (\text{dB}) \\ &= 9.14 && (\text{dB}) \end{aligned}$$

เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นเวกเตอร์ จึงต้องทำการวัดค่าประสิทธิภาพทั้งในแนวนอน และแนวตั้ง ซึ่งถ้าวัสดุปิดกั้นมีคุณสมบัติในการปิดกั้นที่ดี ค่าประสิทธิภาพของทั้งสองแนว จะต้องมามีค่าเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด

1.1 ผลสถิติเชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็คมาสเตอร์แบต (Carbon black masterbatch, CBm)

1.1.1 ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 800 MHz

run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical			SE
					Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE	
1	Block 1	0.00	0.83	0.17	84.31	75.83	8.48	80.08	71.63	8.45	8.47
2	Block 1	0.50	0.50	0.00	84.31	84.05	0.26	80.08	80.21	-0.13	0.07
3	Block 1	0.00	0.83	0.17	84.31	76.53	7.78	80.08	71.17	8.91	8.35
4	Block 1	0.23	0.65	0.12	84.31	76.59	7.72	80.08	74.36	5.72	6.72
5	Block 1	0.23	0.73	0.04	84.31	80.88	3.43	80.08	77.15	2.93	3.18
6	Block 1	0.83	0.00	0.17	84.31	75.14	9.17	80.08	70.94	9.14	9.16
7	Block 1	0.42	0.42	0.16	84.31	76.27	8.04	80.08	72.05	8.03	8.04
8	Block 1	0.83	0.00	0.17	84.31	75.02	9.29	80.08	70.48	9.60	9.45
9	Block 1	0.69	0.23	0.08	84.31	78.28	6.03	80.08	74.11	5.97	6.00
10	Block 1	1.00	0.00	0.00	84.31	84.21	0.10	80.08	80.3	-0.22	-0.06
11	Block 1	0.00	0.92	0.08	84.31	78.84	5.47	80.08	74.09	5.99	5.73
12	Block 1	0.00	1.00	0.00	84.31	84.03	0.28	80.08	80.34	-0.26	0.01
13	Block 1	1.00	0.00	0.00	84.31	84.02	0.29	80.08	80.51	-0.43	-0.07
14	Block 1	0.92	0.00	0.08	84.31	77.95	6.36	80.08	73.75	6.33	6.35
15	Block 1	0.00	1.00	0.00	84.31	83.98	0.33	80.08	80.03	0.05	0.19
16	Block 1	0.50	0.50	0.00	84.31	84.11	0.20	80.08	80.16	-0.08	0.06

1.1.2 ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 900 MHz

run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical		
					Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE
1	Block 1	0.00	0.83	0.17	72.77	68.02	4.75	69.45	64.95	4.50
2	Block 1	0.50	0.50	0.00	72.77	72.88	-0.11	69.45	69.32	0.13
3	Block 1	0.00	0.83	0.17	72.77	67.89	4.88	69.45	65.33	4.12
4	Block 1	0.23	0.65	0.12	72.77	69.64	3.13	69.45	65.96	3.49
5	Block 1	0.23	0.73	0.04	72.77	70.05	2.72	69.45	67.45	2.00
6	Block 1	0.83	0.00	0.17	72.77	67.75	5.02	69.45	64.49	4.96
7	Block 1	0.42	0.42	0.16	72.77	68.72	4.05	69.45	65.68	3.77
8	Block 1	0.83	0.00	0.17	72.77	67.19	5.58	69.45	64.19	5.26
9	Block 1	0.69	0.23	0.08	72.77	70.01	2.76	69.45	67.44	2.01
10	Block 1	1.00	0.00	0.00	72.77	72.52	0.25	69.45	69.63	-0.18
11	Block 1	0.00	0.92	0.08	72.77	69.71	3.06	69.45	66.57	2.88
12	Block 1	0.00	1.00	0.00	72.77	72.44	0.33	69.45	69.10	0.35
13	Block 1	1.00	0.00	0.00	72.77	72.54	0.23	69.45	69.42	0.03
14	Block 1	0.92	0.00	0.08	72.77	69.67	3.10	69.45	66.32	3.13
15	Block 1	0.00	1.00	0.00	72.77	72.13	0.64	69.45	69.63	-0.18
16	Block 1	0.50	0.50	0.00	72.77	72.56	0.21	69.45	69.20	0.25

1.1.3 ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBm ที่ความถี่ 2450 MHz

std	run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical			SE
						Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE	
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	94.50	86.33	8.17	99.18	91.13	8.05	8.11
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	94.50	94.36	0.14	99.18	99.06	0.12	0.13
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	94.50	86.84	7.66	99.18	91.11	8.07	7.87
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	94.50	90.67	3.83	99.18	95.05	4.13	3.98
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	94.50	93.40	1.10	99.18	98.04	1.14	1.12
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	94.50	86.18	8.32	99.18	90.79	8.39	8.36
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	94.50	87.24	7.26	99.18	91.93	7.25	7.26
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	94.50	85.93	8.57	99.18	91.27	7.91	8.24
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	94.50	92.88	1.62	99.18	97.20	1.98	1.80
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	94.50	95.01	-0.51	99.18	98.86	0.32	-0.09
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	94.50	92.40	2.10	99.18	97.06	2.12	2.11
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	94.50	94.32	0.18	99.18	99.02	0.16	0.17
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	94.50	94.85	-0.35	99.18	98.94	0.24	-0.05
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	94.50	92.12	2.38	99.18	97.06	2.12	2.25
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	94.50	94.77	-0.27	99.18	98.98	0.20	-0.03
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	94.50	94.31	0.19	99.18	99.03	0.15	0.17

1.2 พลศาสตร์เชิงประกอบ PC/ABS โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black powder, CBp)

1.2.1 ที่ความถี่ทดสอบ 800 MHz

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 800 MHz

run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical			SE
					Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE	
1	Block 1	0.00	0.83	0.17	84.31	76.23	8.08	80.08	72.73	7.35	7.72
2	Block 1	0.50	0.50	0.00	84.31	84.28	0.03	80.08	80.05	0.03	0.03
3	Block 1	0.00	0.83	0.17	84.31	76.59	7.72	80.08	72.51	7.57	7.65
4	Block 1	0.23	0.65	0.12	84.31	78.97	5.34	80.08	74.64	5.44	5.39
5	Block 1	0.23	0.73	0.04	84.31	79.97	4.34	80.08	76.1	3.98	4.16
6	Block 1	0.83	0.00	0.17	84.31	75.99	8.32	80.08	72.43	7.65	7.99
7	Block 1	0.42	0.42	0.16	84.31	77.54	6.77	80.08	72.97	7.11	6.94
8	Block 1	0.83	0.00	0.17	84.31	76.03	8.28	80.08	71.95	8.13	8.21
9	Block 1	0.69	0.23	0.08	84.31	77.96	6.35	80.08	74.77	5.31	5.83
10	Block 1	1.00	0.00	0.00	84.31	84.10	0.21	80.08	79.92	0.16	0.19
11	Block 1	0.00	0.92	0.08	84.31	78.74	5.57	80.08	75.07	5.01	5.29
12	Block 1	0.00	1.00	0.00	84.31	84.35	-0.04	80.08	79.82	0.26	0.11
13	Block 1	1.00	0.00	0.00	84.31	84.21	0.10	80.08	80.16	-0.08	0.01
14	Block 1	0.92	0.00	0.08	84.31	78.87	5.44	80.08	73.98	6.10	5.77
15	Block 1	0.00	1.00	0.00	84.31	84.22	0.09	80.08	80.03	0.05	0.07
16	Block 1	0.50	0.50	0.00	84.31	84.27	0.04	80.08	80.13	-0.05	0.00

1.2.2 ที่ความถี่ทดสอบ 900 MHz

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 900 MHz

run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical			SE
					Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE	
1	Block 1	0.00	0.83	0.17	72.77	66.71	6.06	69.45	64.02	5.43	5.75
2	Block 1	0.50	0.50	0.00	72.77	72.27	0.50	69.45	69.02	0.43	0.47
3	Block 1	0.00	0.83	0.17	72.77	66.52	6.25	69.45	63.87	5.58	5.92
4	Block 1	0.23	0.65	0.12	72.77	68.94	3.83	69.45	65.36	4.09	3.96
5	Block 1	0.23	0.73	0.04	72.77	70.66	2.11	69.45	67.62	1.83	1.97
6	Block 1	0.83	0.00	0.17	72.77	66.61	6.16	69.45	63.54	5.91	6.04
7	Block 1	0.42	0.42	0.16	72.77	67.42	5.35	69.45	63.61	5.84	5.60
8	Block 1	0.83	0.00	0.17	72.77	66.49	6.28	69.45	63.45	6.00	6.14
9	Block 1	0.69	0.23	0.08	72.77	68.84	3.93	69.45	65.71	3.74	3.84
10	Block 1	1.00	0.00	0.00	72.77	72.89	-0.12	69.45	69.31	0.14	0.01
11	Block 1	0.00	0.92	0.08	72.77	69.84	2.93	69.45	66.60	2.85	2.89
12	Block 1	0.00	1.00	0.00	72.77	72.51	0.26	69.45	69.27	0.18	0.22
13	Block 1	1.00	0.00	0.00	72.77	72.33	0.44	69.45	69.75	-0.30	0.07
14	Block 1	0.92	0.00	0.08	72.77	69.04	3.73	69.45	65.63	3.82	3.78
15	Block 1	0.00	1.00	0.00	72.77	72.64	0.13	69.45	69.33	0.12	0.13
16	Block 1	0.50	0.50	0.00	72.77	72.66	0.11	69.45	69.38	0.07	0.09

1.2.3 ที่ความถี่ทดสอบ 2450 MHz

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของ PC/ABS/CBp ที่ความถี่ 2450 MHz

std	run	Block	PC	ABS	CB	horizontal			vertical			SE
						Ref	TRUE	SE	Ref	TRUE	SE	
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	94.50	86.54	7.96	99.18	91.75	7.43	7.70
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	94.50	94.24	0.26	99.18	98.95	0.23	0.25
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	94.50	87.01	7.49	99.18	91.78	7.40	7.45
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	94.50	90.31	4.19	99.18	95.08	4.10	4.15
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	94.50	93.24	1.26	99.18	97.96	1.22	1.24
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	94.50	86.23	8.27	99.18	91.05	8.13	8.20
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	94.50	87.65	6.85	99.18	92.39	6.79	6.82
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	94.50	86.41	8.09	99.18	91.02	8.16	8.13
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	94.50	90.57	3.93	99.18	95.07	4.11	4.02
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	94.50	94.73	-0.23	99.18	98.97	0.21	-0.01
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	94.50	90.51	3.99	99.18	95.71	3.47	3.73
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	94.50	94.19	0.31	99.18	99.46	-0.28	0.02
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	94.50	94.44	0.06	99.18	99.04	0.14	0.10
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	94.50	90.27	4.23	99.18	95.33	3.85	4.04
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	94.50	94.21	0.29	99.18	99.34	-0.16	0.07
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	94.50	94.35	0.15	99.18	99.07	0.11	0.13

ภาคผนวก ค

ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

การคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

ในการหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสามารถหาได้จากการวัดค่าการเก็บประจุ (C) ของวัสดุและนำมาคำนวณหาค่าคงที่ไดอิเล็กตริกได้จากสมการที่ 2

$$\epsilon_r = \frac{tC_p}{A\epsilon_0} \quad (2)$$

โดยที่ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่สุญญากาศ เท่ากับ 8.854×10^{-12} (ฟารัดต่อเมตร)

ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของชิ้นงานทดสอบ

C_p คือ ค่าความจุไฟฟ้า (ฟารัด)

t คือ ความหนาของชิ้นงานทดสอบ (เมตร)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของแผ่นเพลต (ตารางเมตร)

โดยในการทดสอบชิ้นงานทดสอบมีขนาด 70×180 mm ซึ่งเท่ากับขนาดของแผ่นเพลต และหนา 4 mm ดังนั้น

$$t = 4 \times 10^{-3} \text{ เมตร}$$

$$A = (0.07 \times 0.18) = 0.0126 \text{ ตารางเมตร}$$

ตัวอย่างการคำนวณค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS เมื่อเติมคาร์บอนแบล็ค มาสเตอร์แบท (CBM) ที่อัตราส่วน 0.42/0.42/0.16 โดยใช้ความถี่ในการวัดเท่ากับ 100 KHz และวัดค่าการเก็บประจุ (C) ได้เท่ากับ 779.46×10^{-12} ฟารัด ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= (4 \times 10^{-3})(779.46 \times 10^{-12}) / (8.854 \times 10^{-12})(0.0126) \\ &= 16.43 \end{aligned}$$

ซึ่งจากการทดสอบจะได้ค่าประจุไฟฟ้า (C) และค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ของแต่ละอัตราส่วน ดังตารางที่ ค.1 และ ค.2

ตารางที่ ค.1 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือคาร์บอนแบล็ค
มาตรฐานแบบท (CBm)

อัตราส่วนที่	PC	ABS	CB	C (pF)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
1	0.00	1.00	0.00	89.44	3.21
2	0.50	0.50	0.00	85.32	3.06
3	1.00	0.00	0.00	90.44	3.24
4	0.23	0.73	0.04	95.09	3.41
5	0.69	0.23	0.08	184.99	6.63
6	0.00	0.92	0.08	131.18	4.70
7	0.92	0.00	0.08	132.80	4.76
8	0.23	0.65	0.12	237.39	8.51
9	0.42	0.42	0.16	458.21	16.43
10	0.00	0.83	0.17	712.45	25.55
11	0.83	0.00	0.17	779.46	27.95

ตารางที่ ค.2 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือผงคาร์บอน
แบล็ค (CBp)

อัตราส่วนที่	PC	ABS	CB	C (pF)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
1	0.00	1.00	0.00	90.27	3.24
2	0.50	0.50	0.00	84.86	3.04
3	1.00	0.00	0.00	92.54	3.32
4	0.23	0.73	0.04	81.82	2.93
5	0.69	0.23	0.08	90.91	3.26
6	0.00	0.92	0.08	82.97	2.97
7	0.92	0.00	0.08	75.10	2.69
8	0.23	0.65	0.12	243.24	8.72
9	0.42	0.42	0.16	276.93	9.23
10	0.00	0.83	0.17	806.18	28.91
11	0.83	0.00	0.17	689.28	24.71

ภาคผนวก ง.
ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว

การคำนวณค่าสภาพาคความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface resistivity)

ในการหาค่าสภาพาคความต้านทานเชิงพื้นผิว (Surface resistivity) ซึ่งมีหน่วย Ω/square สามารถหาได้จากการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistance) หน่วย โอห์ม (Ω) ของวัสดุและนำมาคำนวณหาค่าสภาพาคความต้านทานเชิงพื้นผิว ได้จากสมการที่ 3

$$\sigma = \frac{RP}{g} \quad (3)$$

โดยที่ σ คือ สภาพาคความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Ω/square)

R คือ ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Surface resistance) หน่วย โอห์ม

g คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (cm) มีค่าเท่ากับ 4 cm

P คือ ขนาดเส้นรอบวงของอิเล็กโทรด (cm) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$P = \pi D_0 \quad (4)$$

โดยที่ $D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2} = \frac{5 + 9}{2} = 7 \text{ cm}$ ดังนั้น P มีค่าเท่ากับ 21.991 cm

ตัวอย่างการคำนวณสภาพาคความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS เมื่อเติมคาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบท (CBm) ที่อัตราส่วน 0/0.83/0.17 โดยใช้ความต่างศักย์ในการวัดเท่ากับ 250 V และวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (R) ได้เท่ากับ 1.49×10^6 โอห์ม ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} \sigma &= (1.49 \times 10^6)(21.991)/4 \\ &= 8.19 \times 10^6 \text{ } \Omega/\text{square} \end{aligned}$$

ซึ่งจากการทดสอบจะได้ความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Ω) และสภาพาคความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว (Ω/square) ของแต่ละอัตราส่วน ดังตารางที่ ง.1 และ ง.2

ตารางที่ ง.1 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว และสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm
สำหรับแต่ละอัตราส่วน

PC	ABS	CB	R (Ω)	Surface Resistivity (Ω /square)
0.00	0.83	0.17	2.04×10^6	1.12×10^7
0.50	0.50	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.00	0.83	0.17	4.08×10^6	2.25×10^7
0.23	0.65	0.12	51.7×10^6	2.84×10^8
0.23	0.73	0.04	2.38×10^9	1.31×10^{11}
0.83	0.00	0.17	1.49×10^6	8.19×10^6
0.42	0.42	0.16	6.49×10^6	3.57×10^7
0.83	0.00	0.17	1.43×10^6	7.84×10^6
0.69	0.23	0.08	1.53×10^9	8.41×10^9
1.00	0.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.00	0.92	0.08	3.18×10^9	1.75×10^{10}
0.00	1.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
1.00	0.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.92	0.00	0.08	1.62×10^9	8.89×10^9
0.00	1.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.50	0.50	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}

ตารางที่ ง.2 ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว และสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp
สำหรับแต่ละอัตราส่วน

PC	ABS	CB	R (Ω)	Surface Resistivity (Ω /square)
0.00	0.83	0.17	5.20×10^6	2.86×10^7
0.50	0.50	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.00	0.83	0.17	1.43×10^6	7.84×10^6
0.23	0.65	0.12	82.7×10^6	4.54×10^8
0.23	0.73	0.04	34×10^9	1.87×10^{11}
0.83	0.00	0.17	4.56×10^6	2.51×10^7
0.42	0.42	0.16	23.60×10^6	1.30×10^7
0.83	0.00	0.17	4.08×10^6	2.25×10^7
0.69	0.23	0.08	2.54×10^9	1.40×10^{11}
1.00	0.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.00	0.92	0.08	7.40×10^9	4.07×10^{10}
0.00	1.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
1.00	0.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.92	0.00	0.08	6.02×10^9	3.31×10^{10}
0.00	1.00	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}
0.50	0.50	0.00	750×10^9	4.12×10^{12}

1. พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ คาร์บอนแบล็กมาสเตอร์แบตช์ (Carbon black masterbatch, CBm)

จากการทดสอบเพื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะได้ค่าความต้านทานเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ดังตารางที่ ง.3

ตารางที่ ง.3 ค่าความต้านทานเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ที่อัตราส่วนต่างๆ

std	run	Block	PC	ABS	CB	Surface Resistivity (Ω /square)
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	1.12×10^7
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	2.25×10^7
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	2.84×10^8
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	1.31×10^{11}
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	8.19×10^6
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	3.57×10^7
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	7.84×10^6
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	8.41×10^9
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	1.75×10^{10}
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	8.89×10^9
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}

1.1 วิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมกับผลตอบ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยโปรแกรม Design Expert[®] โดยในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์โดยใช้ Log scale เนื่องจากข้อมูลอยู่ในรูปของเลขยกกำลังหลายเท่า ถ้าใช้การวิเคราะห์ด้วยข้อมูลแบบธรรมดา อาจจะทำให้การวิเคราะห์ข้อมูลเกิดการผิดพลาดได้ ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวจะทำการแนะนำแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ในที่นี้โปรแกรมได้ทำการแนะนำแบบจำลองเส้นตรง (Linear model) แต่เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ดังตารางที่ ง.4 พบว่า ค่า Adjust R-Square และค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) มีค่าสูงกว่า นอกจากนั้นยังให้ค่า Std. Dev. และค่า PRESS ต่ำกว่าด้วย ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ ๓.4 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว
ของ PC/ABS/CBm

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.16	0.9963	0.9958	0.9945	0.47
Quadratic	0.15	0.9975	0.9962	0.9943	0.49
Special Cubic	0.15	0.9976	0.9960	0.9904	0.82
Cubic	0.15	0.9983	0.9958	0.9199	6.85

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสอง เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ ๓.5

ตารางที่ ๓.5 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBm

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	5	85.33	17.07	790.33	< 0.0001
Linear Mixture	2	85.23	42.61	1973.57	< 0.0001
AB	1	1.920E-003	1.920E-003	0.088	0.7727
AC	1	0.04	0.04	1.70	0.2216
BC	1	0.05	0.05	2.17	0.1716
Residual	10	0.22	0.02		
Lack of Fit	5	0.17	0.03	3.73	0.0874
Pure Error	5	0.05	9.127E-003		
Total	15	85.54			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

จากตารางที่ ๓.5 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.0846 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบ พบว่ามีค่า < 0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังตารางที่ ง.6

ตารางที่ ง.6 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) สำหรับ PC/ABS/CBm

Std. Dev.	0.15	R-Squared	0.9975
Mean	10.07	Adj R-Squared	0.9962
C.V. %	1.46	Pred R-Square	0.9943
PRESS	0.47	Adeq Precisor	63.009

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface resistivity} = & 12.62A + 12.61B - 35.38C - 0.12AB \\ & + 16.78AC + 18.96BC \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

เนื่องจากในการวิเคราะห์ได้ทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Log scale ดังนั้นค่าความต้านทานที่จะได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะแสดงว่าเป็นแบบ Log scale ด้วยเช่นกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจึงไม่สามารถทำนายออกมาเป็นค่าตัวเลขได้ แต่จะบอกแนวโน้มของค่าได้

1.2 ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง (Model adequacy checking)

เช่นเดียวกันกับในส่วนของผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้อมา ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคือ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนหรือส่วนตกค้าง (Residual analysis, ϵ_{ij}) โดยความคลาดเคลื่อน คือ ความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงที่เก็บมาได้กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย

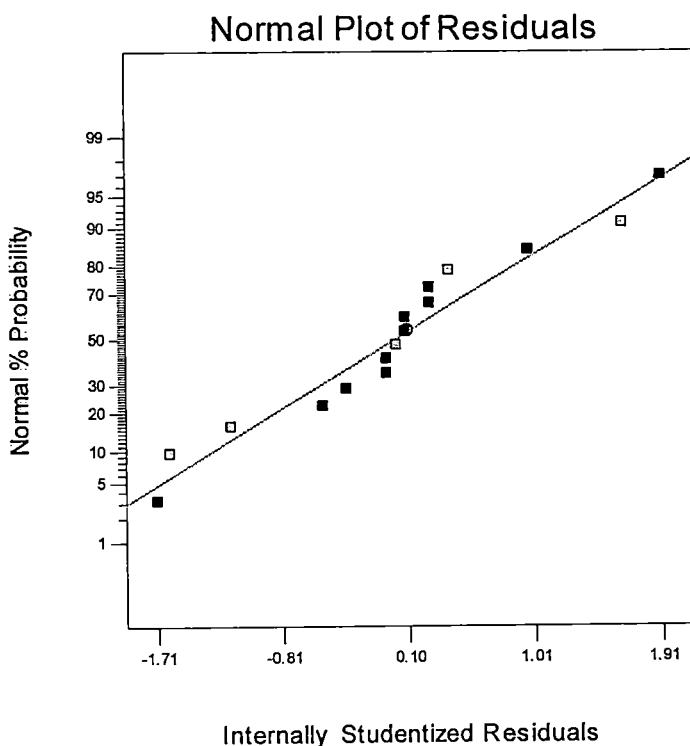
- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังแสดงในรูปที่ ง.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง จึงสามารถประมาณได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็นค่าคงที่ ถ้าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ควรมีรูปแบบ หรือแนวโน้มใดๆ เกิดขึ้น โดยสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน

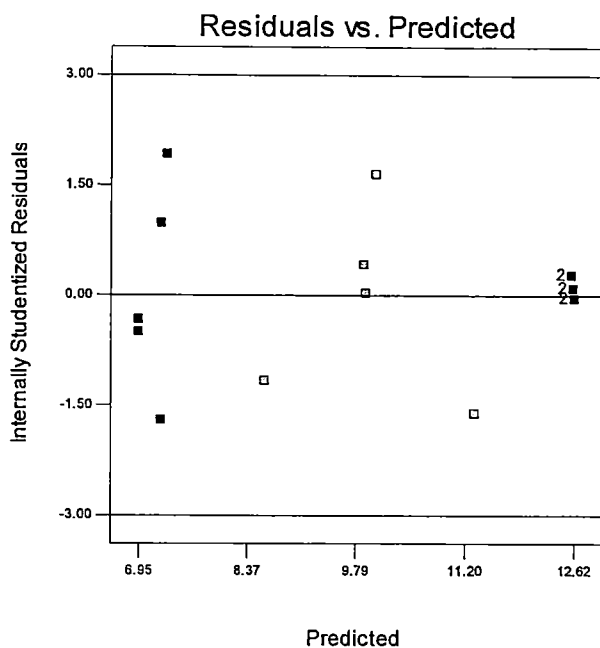
(Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย ดังรูปที่ ง.2 เมื่อค่า Internally Studentized Residuals ในที่นี้หมายถึงค่า Studentized Residuals พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เนื่องจากลักษณะของจุดข้อมูลไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น แม้ว่าจะดูไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากว่าข้อมูลมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่



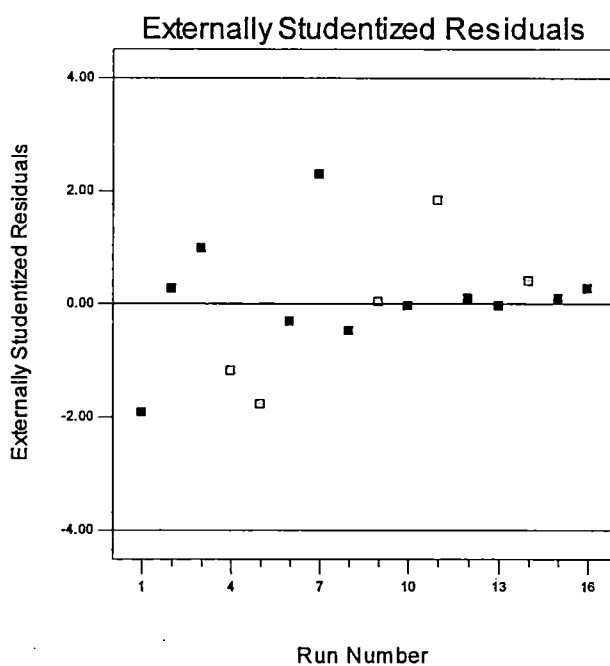
รูปที่ ง.1 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

ภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนในที่นี้จะใช้ Externally Studentized Residuals ซึ่งหมายถึงค่า Studentized Residuals ที่ใช้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i กับลำดับของการเก็บข้อมูล ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ ง.3 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ได้ขึ้นอยู่กับลำดับและเวลาที่เก็บข้อมูล



รูปที่ ง.2 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวสำหรับ PC/ABS/CBm



รูปที่ ง.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBm

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว สำหรับ PC/ABS/CBm

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert[®] จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm ดังสมการที่ 5 และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ เป็นการทดสอบในกระบวนการจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้หลังจากนั้นทำการคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ตามสมการที่ 3 เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ ๗.7

ตารางที่ ๗.7 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ

PC/ABS/CBm

No.	PC	ABS	CB	Prediction (Log scale)	TRUE (Log scale)	%error
1	0.83	0.11	0.06	10.62	10.50	-1.13
2	0.66	0.25	0.09	9.59	9.67	0.83
3	0.63	0.26	0.11	9.05	8.94	-1.22
4	0.77	0.16	0.07	10.16	10.23	0.69
5	0.16	0.68	0.15	7.60	7.51	-1.18
6	0.55	0.28	0.16	7.18	7.08	-1.39
7	0.12	0.71	0.17	7.18	7.33	2.09
8	0.53	0.39	0.08	9.91	9.95	0.40

จากตารางที่ ๗.7 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ซึ่งเป็นค่าแบบ Log scale ที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ 2.09% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBm

2. พิจารณาพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS ที่มีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (Carbon black masterbatch, CBp)

จากการทดสอบ เพื่อวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว จะได้ค่าความต้านทานเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ดังตารางที่ ๗.8

ตารางที่ ง.8 ค่าความต้านทานเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ที่อัตราส่วนต่างๆ

std	run	Block	PC	ABS	CB	Surface Resistivity (Ω /square)
15	1	Block 1	0.00	0.83	0.17	2.86×10^7
3	2	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}
16	3	Block 1	0.00	0.83	0.17	7.84×10^6
11	4	Block 1	0.23	0.65	0.12	4.54×10^8
7	5	Block 1	0.23	0.73	0.04	1.87×10^{11}
13	6	Block 1	0.83	0.00	0.17	2.51×10^7
14	7	Block 1	0.42	0.42	0.16	1.30×10^7
12	8	Block 1	0.83	0.00	0.17	2.25×10^7
9	9	Block 1	0.69	0.23	0.08	1.40×10^{11}
2	10	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
10	11	Block 1	0.00	0.92	0.08	4.07×10^{10}
5	12	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
1	13	Block 1	1.00	0.00	0.00	4.12×10^{12}
8	14	Block 1	0.92	0.00	0.08	3.31×10^{10}
6	15	Block 1	0.00	1.00	0.00	4.12×10^{12}
4	16	Block 1	0.50	0.50	0.00	4.12×10^{12}

2.1 วิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสม เพื่อทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว โดยมีสารตัวเติมคือ ผงคาร์บอนแบล็ค (CBp)

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบโดยโปรแกรม Design Expert[®] โดยในการวิเคราะห์จะวิเคราะห์โดยใช้ Log scale เช่นเดียวกัน ซึ่งโปรแกรมทำการแนะนำแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของปัจจัยที่ทำการศึกษา ในที่นี้โปรแกรมได้ทำการแนะนำแบบจำลองเส้นตรง (Linear model) แต่เมื่อพิจารณาผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลอง ดังตารางที่ ง.9 พบว่า ค่า Adjust R-Square และค่า R-Square ของแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) มีค่าสูงกว่า นอกจากนั้นยังให้ค่า Std. Dev. ต่ำกว่าด้วย ดังนั้นจึงเลือกแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมในการใช้วิเคราะห์ข้อมูล เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ในภาคผนวก ง. หัวข้อ 1.

ตารางที่ ง.9 ผลทางสถิติของแต่ละแบบจำลองที่ใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว
ของ PC/ABS/CBp

Source	Std. Dev.	R-Square	Adjusted R-Square	Predicted R-Square	PRESS
Linear	0.29	0.9863	0.9842	0.9794	1.59
Quadratic	0.27	0.9906	0.9859	0.9781	1.70
Special Cubic	0.27	0.9913	0.9856	0.9611	3.01
Cubic	0.32	0.9921	0.9803	0.5884	31.91

หลังจากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองกำลังสอง เพื่อทดสอบว่าตัวแปรอิสระตัวใดบ้างที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตาม หรือผลตอบ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ซึ่งทำการประมวลผลด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ ง.10

ตารางที่ ง.10 วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของส่วนผสมต่างๆ ที่มีผลต่อค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBp

Source	Degree of Freedom	Sum of Square	Mean Square	F	P-value
Model	5	76.79	15.36	211.03	<0.0001
Linear Mixture	2	76.46	38.23	525.29	<0.0001
AB	1	1.972E-003	1.972E-003	0.027	0.8725
AC	1	0.32	0.32	4.35	0.0636
BC	1	0.30	0.30	4.11	0.0701
Residual	10	0.73	0.073		
Lack of Fit	5	0.57	0.11	4.46	0.0936
Pure Error	5	0.16	0.032		
Total	15	77.52			

A = ปริมาณพลาสติก PC B = ปริมาณพลาสติก ABS C = ปริมาณสารตัวเติม

จากตารางที่ ง.10 เมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit มีค่าเท่ากับ 0.0936 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 (α) จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักของการทดสอบ (H_0 : รูปแบบการถดถอยเหมาะสมกับข้อมูล) แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยแบบกำลังสองมีความเหมาะสมกับข้อมูล และเมื่อพิจารณาค่า P-value ของรูปแบบพบว่ามีค่า <0.0001 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 (α) แสดงว่ามีตัวแปรอย่างน้อยหนึ่งตัว มีความสัมพันธ์กับผลตอบ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ประมาณได้จึงมีประโยชน์ต่อการทำนายค่าผลตอบ

และเมื่อทำการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยดังกล่าวแล้ว จะได้ผลทางสถิติ และสมการความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงปริมาณที่มีต่อผลตอบหรือค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังตารางที่ ง.11

ตารางที่ ง.11 ผลทางสถิติของแบบจำลองกำลังสอง (Quadratic model) สำหรับ PC/ABS/CBm

Std. Dev.	0.27	R-Squared	0.9906
Mean	10.26	Adj R-Squared	0.9859
C.V. %	2.63	Pred R-Square	0.9781
PRESS	1.70	Adeq Precisor	32.285

ดังนั้นแบบจำลองการถดถอย ที่ใช้ในการทำนายค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของพลาสติกเชิงประกอบ PC/ABS/CBm คือ

$$\begin{aligned} \text{Surface resistivity} = & 12.61A + 12.61B - 59.33C - 0.21AB \\ & + 49.29AC + 47.93BC \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ A = ปริมาณพลาสติก PC

B = ปริมาณพลาสติก ABS

C = ปริมาณสารตัวเติม

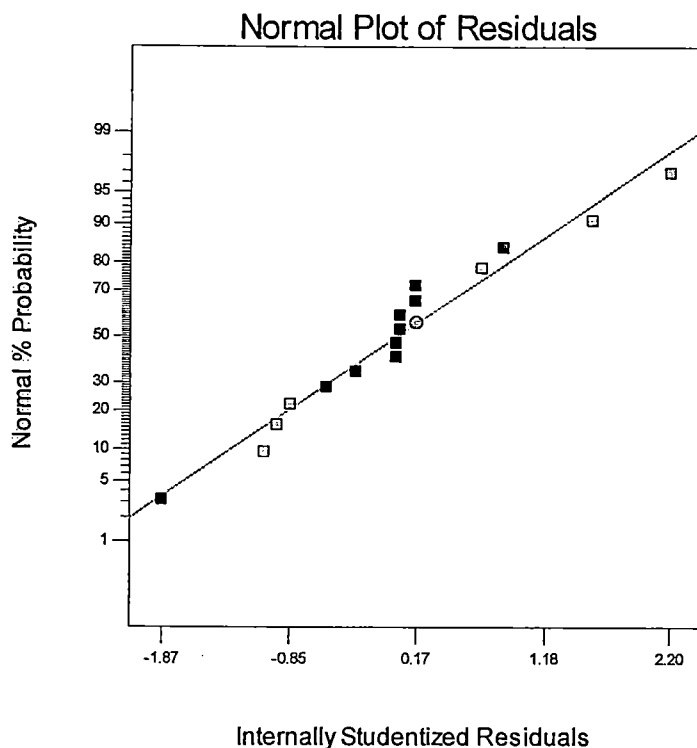
เนื่องจากในการวิเคราะห์ได้ทำการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Log scale ดังนั้นค่าความต้านทานที่จะได้จากการทำนายด้วยแบบจำลองการถดถอยดังกล่าว จะแสดงว่าเป็นแบบ Log scale ด้วยเช่นกัน ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวจึงไม่สามารถทำนายออกมาเป็นค่าตัวเลขได้ แต่จะบอกแนวโน้มของค่าได้

2.2 ตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบจำลอง (Model adequacy checking)

เช่นเดียวกันกับในส่วนของผลการทดลองค่าประสิทธิภาพการปิดกั้นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งานจริง จะต้องมีการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองก่อน เพื่อให้แน่ใจว่าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างได้มีความเหมาะสมกับข้อมูลที่ได้มา ซึ่งเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนหรือส่วนตกค้าง (Residual analysis, ϵ_{ij}) โดยความคลาดเคลื่อนคือ ความแตกต่างระหว่างข้อมูลจริงที่เก็บมาได้กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย

- ค่าความคลาดเคลื่อนต้องมีการแจกแจงแบบปกติ

สามารถตรวจสอบได้ด้วยการนำค่าความคลาดเคลื่อนมาทำ Normal Probability Plot ดังแสดงในรูปที่ ง.4 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากกราฟจะพบว่า ข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง จึงสามารถประมาณได้ว่า ค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ



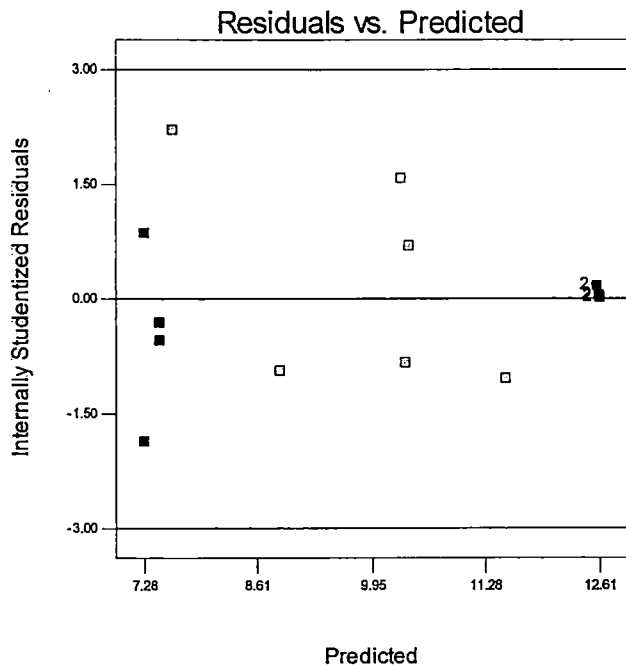
รูปที่ ๔.4 Normal Probability Plot ของค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) ของค่าความต้านทาน ไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBm

- ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนต้องมีค่าเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อนจะต้องมีค่าคงที่

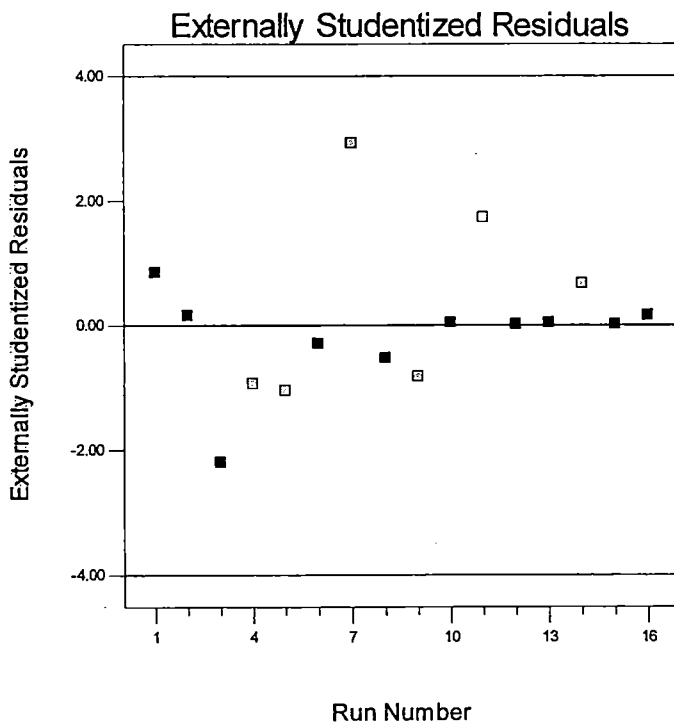
ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าเฉลี่ยของความคลาดเคลื่อนมีค่าเท่ากับศูนย์ และมีความแปรปรวนเป็นค่าคงที่ ถ้าแบบจำลองการถดถอยที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นไม่ควรมีรูปแบบ หรือแนวโน้มใดๆ เกิดขึ้น โดยสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลองการถดถอย ดังรูปที่ ๔.5 เมื่อค่า Internally Studentized Residuals ในที่นี้หมายถึงค่า Studentized Residuals พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีความเหมาะสมกับข้อมูลแล้ว เนื่องจากลักษณะของจุดข้อมูลไม่มีแนวโน้มเกิดขึ้น แม้ว่าจะดูไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากว่าข้อมูลมีจำนวนน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และมีค่าความแปรปรวนคงที่

- ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวจะต้องเป็นอิสระต่อกัน

ภายใต้สมมติฐานว่า ค่าความคลาดเคลื่อนแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันสามารถตรวจสอบได้จากการพล็อตค่าความคลาดเคลื่อนในที่นี้จะใช้ Externally Studentized Residuals ซึ่งหมายถึงค่า Studentized Residuals ที่ใช้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐานที่คำนวณจากข้อมูลทุกตัวยกเว้นค่าสังเกตที่ i กับลำดับของการเก็บข้อมูล ลักษณะการกระจายของแผนภาพที่ได้ต้องไม่เกิดแนวโน้มหรือมีรูปแบบ (Pattern) จึงจะเป็นการแสดงว่าข้อมูลแต่ละค่ามีความเป็นอิสระกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับของการเก็บข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ ๔.6 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกันและไม่ขึ้นอยู่กับลำดับและเวลาที่เก็บข้อมูล



รูปที่ ง.5 กราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อน (Residuals) กับค่าประมาณบนเส้นถดถอย (\hat{Y}_i) ของค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวสำหรับ PC/ABS/CBm



รูปที่ ง.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนกับลำดับของการเก็บข้อมูล สำหรับค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBp

ซึ่งจากการทดสอบสมมติฐานทั้งสาม สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการถดถอยที่ได้ มีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ซึ่งจะมีประโยชน์ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

- ทดสอบแบบจำลองการถดถอยที่ใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว สำหรับ PC/ABS/CBp

จากการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Design Expert[®] จะได้แบบจำลองการถดถอย เพื่อใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของ PC/ABS/CBp ดังสมการที่ 6 และจากการตรวจสอบความเหมาะสมของแบบจำลองข้างต้น ก็สามารถบอกได้ว่า แบบจำลองดังกล่าวมีประโยชน์ในการทำนายค่า SE ในกรณีที่มีการปรับเปลี่ยนสัดส่วนการผสมในอนาคต

แต่อย่างไรก็ตามจำเป็นจะต้องทำการทดสอบเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ เป็นการทดสอบในกระบวนการจริง โดยนำแต่ละอัตราส่วนผสมมาทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงาน และทำการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิวของชิ้นงานที่ได้ หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ตามสมการที่ 3 เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอย โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทำนาย กับค่าที่ได้จากการทดสอบจริง ดังตารางที่ ง.12

ตารางที่ ง.12 ผลการทดสอบยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองการถดถอยที่ได้ สำหรับ

PC/ABS/CBp

No.	PC	ABS	CB	Prediction (Log scale)	TRUE (Log scale)	%error
1	0.00	0.83	0.17	7.14	7.02	-1.68
2	0.83	0.00	0.17	7.34	7.41	0.95
3	0.59	0.24	0.17	7.25	7.23	-0.28
4	0.34	0.50	0.16	7.58	7.49	-1.19
5	0.42	0.42	0.16	7.60	7.54	-0.79
6	0.00	0.92	0.08	10.38	10.22	-1.54
7	0.23	0.70	0.07	10.68	10.64	-0.37
8	0.36	0.56	0.07	10.53	10.67	1.33

จากตารางที่ ง.12 จะเห็นว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ซึ่งเป็นค่าแบบ Log scale ที่ได้จากการทดสอบจริง มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากแบบจำลองการถดถอย โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%error) มากสุด คือ -1.68% ซึ่งค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่ยอมรับให้เกิดขึ้นได้ คือ $\pm 10\%$ ดังนั้นแบบจำลองการถดถอยที่ได้มีประโยชน์ในการนำมาใช้ในการทำนายค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงพื้นผิว ของ PC/ABS/CBp