

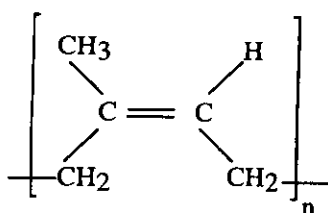
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ

2.1.1. โครงสร้างทางเคมีและสมบัติ

ยางธรรมชาติ (natural rubber, NR) มีชื่อเรียกทางเคมีว่า ซิส-1,4-พอลิไอโซพรีน (cis-1,4-polyisoprene) และมีโครงสร้างแบบเส้นตรงซึ่งจะประกอบด้วยหน่วยที่ซ้ำกันของหน่วยไอโซพรีน (isoprene units, C_5H_8) (Fred, 1988) แสดงในรูปที่ 2.1 ยางธรรมชาติเป็นสารพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเฉลี่ยประมาณ 200,000 ถึง 500,000 กรัมต่อโมล มีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลกว้าง ยางธรรมชาติมีความถ่วงจำเพาะ 0.934 ที่ 20 องศาเซลเซียส และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อยางถูกยืดหรือยืดตัวลง มีดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ 1.5215 ถึง 1.5238 ที่ 20 องศาเซลเซียส (Hoffmann, 1989)



cis-1,4-polyisoprene

รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติโดยที่ n มีค่าตั้งแต่ 5,000 ถึง 15,000

ตัวเลขที่แสดงในชื่อทางเคมี หมายถึง ตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมของแต่ละหน่วยที่ต่อเนื่องกับหน่วยอื่นๆ ฉะนั้นโครงสร้าง 1,4 หมายถึง คาร์บอนอะตอมที่ 1 และ 4 เป็นตำแหน่งที่ต่อหรือเชื่อมกับหน่วยอื่นเพื่อเกิดเป็นสายโมเลกุล ส่วนคำว่า ซิส (cis) และ ทรานซ์ (trans) นั้น หมายถึง ตำแหน่งของคาร์บอนอะตอมที่ต่อเนื่องกับหน่วยอื่นโดยยึดแขนคู่คาร์บอน - คาร์บอน เป็นหลัก กล่าวคือ โครงสร้าง cis 1,4 หมายถึง คาร์บอนอะตอมตัวที่ 1 และ 4 ต่างก็อยู่ข้างเดียวกันของแขนทั้งคู่ ในขณะที่โครงสร้าง trans 1,4 นั้นมีคาร์บอนอะตอมตัวที่ 1 และ 4 อยู่คนละข้างของแขนคู่ คาร์บอน - คาร์บอน

สำหรับโครงสร้างของยางธรรมชาติ ประกอบด้วยสายโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่เป็นแบบ cis 1,4 เกือบจะสมบูรณ์ ดังนั้นชื่อทางเคมีจึงเป็น cis-1,4-polyisoprene สายโมเลกุลขนาดใหญ่ของยางธรรมชาติประกอบด้วยไอโซเมอร์ที่เหมือนกัน เรียกว่า ความสม่ำเสมอของการจัดเรียงตัว (stereo regular) และลักษณะดังกล่าวนี้ที่เป็นผลให้ยางธรรมชาติมีคุณสมบัติการจัดเรียงโมเลกุลได้สม่ำเสมอขณะถูกยืดออก นั่นคือการเกิดผลึกขณะการยืด (crystallize on stretching) อัตราการเกิดผลึกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและชนิดของยาง (Fred, 1988)

โครงสร้างหลักที่มีผลกระทบต่อสมบัติของยาง คือ

1) ยางธรรมชาติมีโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งประกอบด้วยหน่วย 1,4-isoprene อย่างน้อย 97 เปอร์เซ็นต์ (Roff and Scott, 1971) ทำให้ยางธรรมชาติมีสมบัติไม่ทนต่อน้ำมันปิโตรเลียม แต่จะเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี

2) พันธะคู่ที่วงไวต่อปฏิกิริยา ทำให้สามารถวัลคาไนซ์ได้ด้วยกำมะถัน และทำให้ยางทำปฏิกิริยาได้ง่ายด้วยออกซิเจนและโอโซน ซึ่งเป็นสาเหตุของการเสื่อมของยาง ทำให้การออกสุตรยางธรรมชาติจำเป็นต้องมีตัวต้านออกซิเดชัน (antioxidant) และสารต้านโอโซน (antiozonant) ร่วมด้วย

3) โซโมเลกุลที่เคลื่อนไหวหยุกงไปมาได้ง่ายทำให้ยางธรรมชาติคงสภาพยืดหยุ่นได้ดี สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำมาก ยางธรรมชาติมีค่าอุณหภูมิกลาสทรานซิชัน (T_g) เท่ากับ -72 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่ายางสังเคราะห์อื่นๆ ยกเว้นเฉพาะยางบิวทาไดอินและยางซิลิโคนเท่านั้น

4) ความสม่ำเสมอในโครงสร้างโมเลกุล ทำให้ยางธรรมชาติเกิดผลึกได้เมื่อยืดมากๆ ทำให้มีความต้านทานแรงดึงสูงมากและทำให้มีค่าความแข็งแรงขณะไม่วัลคาไนซ์ (green strength) สูง

5) เนื่องจากยางธรรมชาติมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ทำให้ยางแข็งเกินไปที่จะนำไปแปรรูปโดยตรง ดังนั้นต้องนำยางไปบด เพื่อให้ได้โมเลกุลเล็กลงก่อนนำไปใช้งาน

2.1.1.1 สมบัติทางเคมี (วรารณ, 2523)

น้ำยางธรรมชาติประกอบด้วยอนุภาคของยางที่เป็นไฮโดรคาร์บอน และส่วนที่ไม่ใช่ยางแขวนลอยอยู่ในส่วนของเซรัม (Morton, 1987) ปริมาณของยางแห้งในน้ำยางอยู่ระหว่าง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประกอบของน้ำยางสดแสดงในตารางที่ 2.1

ยางธรรมชาติที่ผลิตขึ้นโดยทั่วไป มีส่วนประกอบของไฮโดรคาร์บอนยางเป็นส่วนใหญ่และมีสารพวกที่ไม่ใช่ยาง (non - rubber substances) เป็นส่วนน้อย สารที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้ ถึงแม้จะมีในปริมาณน้อย แต่ก็ยังมีผลกับปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ยางและยังมีผลต่อคุณสมบัติของ

ผลผลิตขั้นสุดท้ายด้วย ถึงแม้ว่าสารพวกที่ไม่ใช่ยางเหล่านี้จะมีอยู่ในน้ำยางตั้งแต่ต้นก็ตาม แต่ปริมาณและสภาพของสารนั้นๆ จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น กรรมวิธีการผลิต ฤดูกาล สภาพดินฟ้าอากาศ และดินที่ปลูกยาง เป็นต้น (วราภรณ์, 2523)

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางสด และยางแห้ง

ส่วนประกอบ	น้ำยาง (%)	ยางแห้ง (%)
ยางไฮโดรคาร์บอน	36.0	93.7
โปรตีน	1.4	2.2
คาร์โบไฮเดรต	1.6	0.4
ไขมัน	1.0	2.4
ไกลโคไลพิด และฟอสโฟไลพิด	0.6	1.0
ส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์	0.5	0.2
อื่นๆ	0.4	0.1
น้ำ	58.5	-

ที่มา : Morton, 1987

สารที่ได้จากการสกัดยางด้วยอะซิโตนประกอบด้วย กรดไขมัน สเตอรอล เอสเทอร์ (fatty acid, sterols and esters) และยังมีสารอื่นๆ อีกแต่ไม่สำคัญมากนัก (Morton, 1987) กรดไขมันนี้มีความสำคัญต่อปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ของยาง ส่วนสเตอรอลเป็นสารต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน นอกจากสเตอรอลแล้วยังมีสารที่ละลายน้ำได้ในส่วนที่ได้จากการสกัดด้วยอะซิโตน ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวต่อต้านปฏิกิริยาออกซิเดชัน

สารที่ไม่ใช่ยางจะมีอิทธิพลต่อสมบัติของยางธรรมชาติทั้งยางดิบ และยางที่วัลคาไนซ์แล้ว สำหรับปริมาณและสภาพของสารโปรตีนนั้น มีผลต่ออัตราของการวัลคาไนซ์ (rate of vulcanization) เนื่องจากเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาของยางธรรมชาติ และกรดไขมันจะเป็นสารกระตุ้น (Morton, 1987)

ในด้านของผงเถ้าของยางธรรมชาตินั้น โดยทั่วไปไม่มีความสำคัญ ยกเว้นเมื่อผงเถ้าเหล่านั้น มีพวกทองแดง แมงกานีส และเหล็กเจือปนด้วย ทั้งนี้เพราะทั้งทองแดง แมงกานีสและเหล็กต่างก็เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) การเกิดออกซิเดชันของยาง ชีตจำกัดของปริมาณธาตุแต่ละชนิดดังกล่าว คือ 8 - 10 ส่วนต่อล้านส่วน (part per million, ppm) ซึ่งโดยธรรมชาติจะมีธาตุเหล่านี้ปริมาณน้อยมากในยาง คือ มีธาตุละประมาณ 2 - 3 ppm และพบว่าส่วนของเปลือกของต้นยางมี

สารแมงกานีสในปริมาณมากกว่าส่วนอื่นๆ ของลำต้น ธาตุต่างๆ ที่อาจพบนอกเหนือไปจากที่กล่าวแล้ว คือ พวกลิวเทเนียม แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส แต่พวกนี้ไม่มีความสำคัญต่อคุณภาพของยางน้ก (วารสารณ์, 2523)

2.1.1.2 สมบัติทางกายภาพ (Morton, 1987)

สมบัติทางกายภาพของยางธรรมชาติอาจเปลี่ยนแปลงได้ ขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายอย่าง เช่น ความหนืดของยางคอมปาวด์ ชนิดและปริมาณของสารตัวเติม ปริมาณการกระจายตัวของสารตัวเติม ปริมาณและชนิดของพันธะเชื่อม โยง

เป็นที่รู้กันดีว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติความแข็งแรงของยางที่วัลคาไนซ์แล้ว คือ ยางที่วัลคาไนซ์แล้วจะมีค่าความทนต่อแรงดึงในช่วง 17 ถึง 24 เมกะพาสกาล แต่เมื่อเติมเขม่าดำจะให้ค่าความทนต่อแรงดึงในช่วง 24 ถึง 32 เมกะพาสกาล ความแข็งแรงนี้สามารถบอกถึงลักษณะเฉพาะอื่น เช่น ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด หรือค่าความต้านทานต่อการเกิดรอยแตก ซึ่งสมบัติทั้งสองนี้เป็นสมบัติที่เชื่อมโยงของยางธรรมชาติ แต่ความแข็งแรงของยางธรรมชาติจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นแต่ยังคงดีกว่ายางชนิดอื่น สมบัติทางกายภาพบางประการของยางธรรมชาติแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพบางประการของยางธรรมชาติ

ความถ่วงจำเพาะ	0.916
ดัชนีการหักเห (ที่ 20 องศาเซลเซียส)	1.519
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ที่ 1 กิโลเฮิรตซ์)	2.4-2.6
ค่าความต้านทานไฟฟ้า (โอห์มเซนติเมตร)	10^{15}

ที่มา : Roff and Scott, 1971

ยางธรรมชาติแสดงสมบัติการละลาย 2 ลักษณะ คือ ลักษณะที่ละลายได้ เรียกว่า “โซล” (sol) กับลักษณะที่ไม่ละลาย เรียกว่า “เจล” (gel) เป็นลักษณะที่ยางคิบมีการเกิดการเชื่อม โยงโมเลกุลขึ้นเอง ซึ่งปริมาณของโซลและเจลนี้จะเห็นได้โดยปริมาณการละลายในตัวทำละลาย กล่าวคือ หากยางมีการละลายได้อย่างสมบูรณ์หรือเกือบสมบูรณ์ แสดงว่ายางนั้นมีส่วนของโซลทั้งหมดหรือเกือบหมด แต่ถ้าพบว่ายางมีการละลายไม่ดีหรือละลายได้ไม่หมด หมายความว่ายางนั้นมีส่วนของเจลสูง การที่จะให้ยางมีเจลสูงนี้ละลายในตัวทำละลายได้จะต้องทำให้โครงสร้างของเจลแตกออก ซึ่งทำได้โดยวิธีการของการใช้แรงเฉือนจากเครื่องกล (mechanical shear) เช่น เครื่องบดยาง หรืออาศัยการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันอันเนื่องมาจากความร้อนและออกซิเจน ตัวทำละลาย

ที่เหมาะสมสำหรับยางที่ได้ผ่านการบดทำให้นิ่มแล้ว (masticated NR) ได้แก่ พวกลิพิดิกและอโรมาติกไฮโดรคาร์บอน พวกลอริเนตเตด ไฮโดรคาร์บอน อีเทอร์ และคาร์บอนไดซัลไฟด์ สำหรับพวกคีโตนเกรดต่ำ แอลกอฮอล์และเอสเทอร์ เกรดต่ำไม่สามารถละลายยางได้

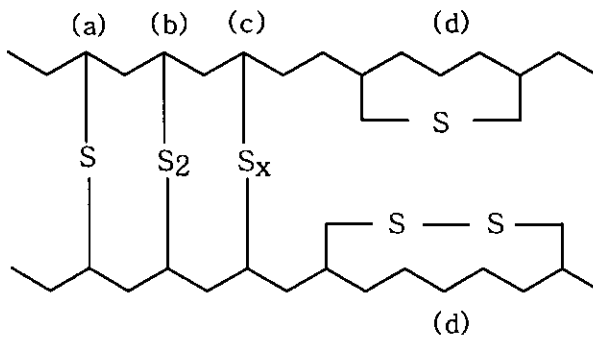
ในการใช้ประโยชน์จากยางธรรมชาติ เพื่อที่จะได้ยางผสมสารเคมีต่างๆ ที่มีความสม่ำเสมอในสมบัติ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทดสอบสมบัติพื้นฐานที่เกี่ยวกับอัตราเวลาการวัลคาไนซ์อย่างต่อเนื่องตามสมบัติทางกายภาพของยาง หากไม่มีการทดสอบดังกล่าวความยุ่งยากเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตในโรงงาน ตลอดจนปัญหาความไม่สม่ำเสมอของผลผลิตจะเกิดขึ้นได้

2.1.2 สารเคมีสำหรับยาง

ยางที่ผสมสารเคมีแล้ว เรียกว่า ยางคอมปาวด์ (compound rubber) ในยางคอมปาวด์หนึ่งๆ จะมีสารเคมีอยู่หลายตัวด้วยกัน ซึ่งอาจจำแนกได้ดังนี้

2.1.2.1 สารวัลคาไนซ์

การวัลคาไนซ์ เป็นการก่อให้เกิดพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง สารที่นิยมใช้วัลคาไนซ์จะเป็นกำมะถัน ซึ่งเริ่มใช้โดย Goodyear ในปี ค.ศ. 1839 (Colin, 1986) เมื่อนำกำมะถันใส่เข้าไปในยางแล้วนำยางนั้นมาให้ความร้อน จะเกิดการวัลคาไนซ์ขึ้น ซึ่งจะทำให้ยางมีสมบัติดีขึ้นคือ เมื่อร้อนไม่เหลว เมื่อเย็นไม่แข็ง ไม่มีกลิ่น ไม่เหนียว ไม่ละลายในตัวทำละลาย เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะกำมะถันทำให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของยาง (crosslink) กำมะถันที่เป็นพันธะเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลอาจจะเป็น โมโนซัลไฟด์ ไดซัลไฟด์ หรือ พอลิซัลไฟด์ แสดงในรูปที่ 2.2 (a) ถึง (c) ตามลำดับ หรืออาจจะเป็น ไซคลิกโมโนซัลไฟด์และไดซัลไฟด์ แสดงในรูปที่ 2.2 (d) (Blow, 1975)



รูปที่ 2.2 ลักษณะพันธะเชื่อมโยงในโครงสร้างยางที่วัลคาไนซ์แล้ว (a) โมโนซัลไฟด์ (b) ไดซัลไฟด์ (c) พอลิซัลไฟด์ และ (d) ไซคลิกโมโนซัลไฟด์และไดซัลไฟด์ (Blow, 1975)

การเกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในยาง จะทำให้โมเลกุลของยางใหญ่ขึ้น ดังนั้นการหลอมเหลวเมื่อถูกความร้อน หรือแข็งตัวเมื่อเย็นจึงเป็นไปได้ยาก รวมทั้งการละลายในตัวทำละลายก็เป็นไปได้ยาก เนื่องจากยางจะคูดซึมตัวทำละลายเข้าไปภายในตัวยางจึงมีลักษณะบวมพองเท่านั้น

2.1.2.2 สารตัวเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์ (accelerator) (กฤษณา, 2526)

สารเร่งปฏิกิริยารีดอกซ์มีประโยชน์ในการใช้กว้างมาก จำเป็นต้องเลือกใช้แต่ละชนิดและปริมาณที่เหมาะสม วิธีการเลือกขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการดังต่อไปนี้

1. กระบวนการแปรรูปที่นำมาใช้ในการผลิต
2. อุณหภูมิของกระบวนการผลิต
3. รูปร่างของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการผลิต
4. สมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ
5. สมบัติของยางที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบ

การจัดชนิดของสารตัวเร่งปฏิกิริยา จัดตามความเร็วของปฏิกิริยาและโครงสร้างทางเคมี แบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาช้า (slow accelerator) ได้แก่ กลุ่มกัวนิติน (guanidine) มีสมบัติทำให้มอดุลัสสูง แต่สมบัติหลังจากการบ่มเร่ง (aging) ไม่ดี แบ่งออกเป็น
 - ไดฟีนิว กัวนิติน (diphenyl guanidine, DPG)
 - ได-ออกตะ-โทลิว กัวนิติน (di - O - tolyl guanidine, DOTG)
2. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็วปานกลาง (medium fast accelerator) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

2.1 กลุ่มไธอาโซล (thiazole) มีสมบัติทำให้สมบัติหลังจากการบ่มเร่งดี มีความต้านทานแรงดึงสูง มีมอดุลัสสูง ค่อนข้างมีรสขม ดังนั้นจึงไม่อาจใช้เป็นตัวเร่งในยางที่ต้องสัมผัสกับอาหาร (พรพรรณ, 2528) เช่น เมอแคปโทเบนโซไทอะโซล (mercaptobenzthiazole, MBT), เมอแคปโทเบนโซไทอะโซล ซัลไฟด์ (mercaptobenzthiazole Sulphite, MBTS) เป็นต้น

2.2 กลุ่มซัลฟีนามาอิด (sulphenamides) สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดนี้ไม่เพียงแต่จะทำให้อัตราการเกิดวัลคาไนซ์เร็ว แต่ยังปลอดภัยจากการเกิดสกอช (scorch) ด้วย เป็นสารตัวเร่งปฏิกิริยาที่นิยมใช้มาก ได้แก่ นอร์มอล-ไซโคลเฮกซิล เบนโซไทอะซิด ซัลฟีนามาอิด (N - cyclohexyl benzthiazyl sulphenamide, CBS)

3. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็ว (fast accelerator) แบ่งออกได้ 2 กลุ่ม

3.1 กลุ่มไธยูรามซัลไฟด์ (thiuram sulphide) มีสมบัติคือ เกิดการวัลคาไนซ์เร็ว มีความทนต่อความร้อนดีมาก ได้แก่ เตตระเมทิว ไธยูรามไดซัลไฟด์ (tetramethyl thiuram disulphide, TMTD) สารตัวเร่งปฏิกิริยาดังนี้มีสมบัติพิเศษคือ ทำหน้าที่เป็นสารให้กำมะถัน (sulfur donor)

3.2 กลุ่มไดไซโอคาร์บาเมต (dithiocarbamate) มีสมบัติคือ ทำให้อัตราการเกิดวัลคาไนซ์เร็วขึ้น นิยมใช้วัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิต่ำหรือที่อุณหภูมิห้อง ละลายน้ำได้จึงนิยมใช้กับน้ำยาง ได้แก่ ซิงค์ ไดเอทิล ไดไซโอคาร์บาเมต (zinc diethyl dithiocarbamate, ZDC)

4. ชนิดที่เกิดปฏิกิริยาเร็วมาก (ultra fast accelerator) ทำให้เกิดปฏิกิริยาวัลคาไนซ์เร็วมาก ได้แก่ ซิงค์ ไอโซโพรพิล แซนเทส (zinc isopropyl xanthate, ZIX) มีสมบัติพิเศษคือ เกิดการวัลคาไนซ์ที่อุณหภูมิห้อง แต่ราคาค่อนข้างแพง

2.1.2.3 สารตัวกระตุ้น (activator) (พรพรรณ, 2528)

สารตัวกระตุ้น คือ สารที่ช่วยเสริมให้ตัวเร่งปฏิกิริยาทำงานมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่

1. สารอินทรีย์ สารตัวกระตุ้นที่เป็นสารอินทรีย์สำคัญ คือ พวงกรดไขมัน (fatty acid) เช่น กรดสเตียริก (stearic acid) กรดปาล์มิติก (palmitic acid) กรดลอริก (lauric acid) เกลือเอมีนกับกรดไขมันข้างต้น พอลิแอลกอฮอล์ และอะมิโนแอลกอฮอล์

2. สารอนินทรีย์ สารอนินทรีย์ที่เป็นสารตัวกระตุ้นที่สำคัญและนิยมใช้ คือ ซิงค์ออกไซด์ (zinc oxide)

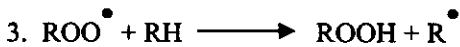
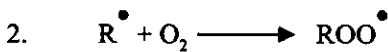
สารตัวกระตุ้นมีสมบัติที่สำคัญ คือ เมื่อใส่เข้าไปในยางปริมาณเล็กน้อยจะทำให้ยางมี modulus สูงขึ้น และบางครั้งถ้าไม่มีสารตัวกระตุ้นก็จะไม่มีการวัลคาไนซ์เกิดขึ้น เพราะซิงค์ออกไซด์จำเป็นในการทำให้ยางวัลคาไนซ์ได้สมบูรณ์

2.1.2.4 สารป้องกันยางเสื่อม

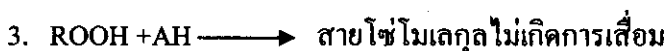
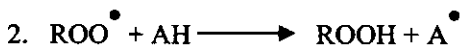
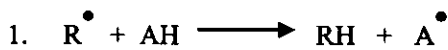
ออกซิเจนและโอโซนเป็นตัวการสำคัญที่ทำให้ยางเกิดการเสื่อมได้ และยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกที่สามารถทำให้ยางเสื่อม เช่น ความร้อน โลหะหนัก (แมงกานีส เหล็ก ทองแดง เป็นต้น) แสง (ช่วงคลื่นอัลตราไวโอเล็ต) เป็นต้น สารเคมีที่ช่วยป้องกันไม่ให้ยางเสื่อม ได้แก่ แอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) หรือ ตัวต้านออกซิเดชัน เป็นสารป้องกันการเกิดออกซิเดชันจากออกซิเจน เช่น ฟีนิว-แอลฟา-แนฟทิลามีน (phenyl- α -naphthylamine, PAN) ฟีนิว-เบต้า-แนฟทิลามีน (phenyl- β -naphthylamine, PBN) เป็นต้น และแอนติโอโซนแนนท์ (antiozonant) หรือสารต้าน

ปฏิกิริยาไอโซน เป็นสารป้องกันไอโซนเข้าทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของยาง เช่น สารกลุ่มพารา-ฟีนีลีน ไดอะมีน (p- phenylene diamine) และ ขี้ผึ้งพาราฟิน (paraffin wax) (พรพรรณ, 2528)

กลไกการเสื่อมของยางเนื่องจากออกซิเจน เกิดจากสายโซ่โมเลกุลที่มีอนุมูลอิสระเข้าทำปฏิกิริยากับออกซิเจน เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน และเกิดอย่างต่อเนื่อง แสดงดังขั้นตอนด้านล่างนี้ตามลำดับ (Blow, 1975)



การหยุดปฏิกิริยาสามารถทำได้โดยจับอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น เพื่อไม่ให้เกิดอนุมูลอิสระที่สามารถเริ่มต้นปฏิกิริยาได้อีก หรืออีกวิธีหนึ่งคือ ทำลายพวกเปอร์ออกไซด์ที่เกิดขึ้นโดยการเติมสารพวกสลายเปอร์ออกไซด์ (Blow, 1975) เช่น ไดลอลิว-เบต้า-ไทโอดิโพรไพโอเนต (dilauryl- β -thiodipropionate, DLTP) เป็นต้น (พรพรรณ, 2528) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นสามารถแสดงได้ดังนี้



เมื่อ RH แทน สายโซ่โมเลกุลของยาง

AH แทน แอนติออกซิแดนต์

2.1.2.5 สารพลาสติไซเซอร์ (plasticizer)

พลาสติไซเซอร์ คือ สารที่ใส่เข้าไปในยางเพื่อช่วยในการแปรรูปยางได้ง่ายขึ้น พลาสติไซเซอร์จะมีชื่อเรียกต่างกันขึ้นอยู่กับหน้าที่และปริมาณที่ใช้ เช่น

- ถ้าใช้ในปริมาณไม่เกิน 5 phr เรียกว่า สารช่วยในการผลิต (processing aid) คือ ช่วยในการแปรรูป ช่วยในการผสมสารเคมีเข้าไปในยางทำได้ง่ายขึ้น (พรพรรณ, 2528)

- ถ้าใช้ปริมาณ 5 – 15 phr เรียกว่า สารทำให้นิ่ม (softener) คือ ใส่เพื่อทำให้ยางนิ่มลงทั้งในขณะที่ยังไม่วัลคาไนซ์และวัลคาไนซ์แล้ว (พรพรรณ, 2528)

- ถ้าใช้ปริมาณเกิน 15 phr เรียกว่า สารเพิ่มเนื้อ (extender) กรณีนี้ใส่เพื่อลดต้นทุน (พรพรรณ, 2528)

ตัวอย่างของพลาสติไซเซอร์ เช่น น้ำมันพาราฟินิก (paraffinic oil) น้ำมันอโรมาติก (aromatic oil) ยางสน (pine tar) ผลิตภัณฑ์จากน้ำมันปิโตรเลียม น้ำมันเอสเทอร์ เรซิน เป็นต้น (Blow, 1975)

2.1.2.6 สารตัวเติม (filler)

สารตัวเติม คือ สารอื่นๆ ที่ไม่ใช่ยางที่ใส่ลงไปในยาง สารตัวเติมที่ใช้โดยมากมีสภาพเป็นเม็ดผง เช่น เขม่าดำ ซิลิกา และแคลเซียมคาร์บอเนต เป็นต้น (กฤษณา, 2526) สารตัวเติมใส่เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้ (พรพรรณ, 2528)

1. เพื่อลดต้นทุน
2. เพื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของยาง
3. เพื่อช่วยในกระบวนการผลิต
4. เพื่อลดการบวมพองของยางในน้ำมัน
5. เพื่อเพิ่มการนำไฟฟ้า การใส่สารตัวเติมประเภทเขม่าดำลงไปในยางจะทำให้ยางมีสมบัติในการป้องกันไฟฟ้าสถิตหรือนำไฟฟ้าได้

6. เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานของยาง

2.1.2.6.1 เขม่าดำ (carbon black)

การผลิตเขม่าดำ มีวิธีการผลิต 5 วิธี ดังนี้ (Blow, 1975)

1. Furnace process
2. Thermal process
3. Channel process
4. Lampblack process
5. Acetylene black process

1. Furnace process

เขม่าดำในปัจจุบันส่วนใหญ่ทำมาจากกระบวนการนี้ กระบวนการนี้เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ของก๊าซธรรมชาติ หรือกากของน้ำมันหรือโรมาติกจากอุตสาหกรรมน้ำมันปิโตรเลียมหรืออุตสาหกรรมถ่านหิน (Blow, 1975) โดยควบคุมปริมาณของอากาศที่ใส่เข้าไปในเตา เขม่าดำที่เกิดขึ้นในเตาจะถูกคัดออกและกรองตลอดเวลา มีประสิทธิภาพในการผลิตเขม่าดำได้ถึง 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (พรพรรณ, 2540) เขม่าดำที่ผลิตโดยกระบวนการนี้จะได้ขนาดอนุภาคในช่วง 20 นาโนเมตร ถึง 80 นาโนเมตร (Blow, 1975)

2. Thermal process (Blow, 1975)

กระบวนการผลิตแบบนี้ประกอบด้วย การสลายตัวด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,300 องศาเซลเซียสของก๊าซธรรมชาติ เขม่าดำที่ได้โดยการผลิตด้วยกระบวนการนี้จะมีขนาดอนุภาคจาก 120 นาโนเมตร ถึง 500 นาโนเมตร

3. Channel process (Blow, 1975)

กระบวนการนี้ทำโดยการเผาก๊าซธรรมชาติ ให้เปลวไฟสัมผัสกับแผ่นโลหะได้เป็นเขม่าเกาะที่แผ่นโลหะ ทำการแยกเขม่าดำออกมา ประสิทธิภาพในการผลิตเขม่าดำด้วยกระบวนการนี้มีค่าต่ำ คือ 5 เปอร์เซ็นต์ หรือน้อยกว่า แต่สามารถผลิตเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็กได้ในช่วง 9 นาโนเมตร ถึง 30 นาโนเมตร

4. Lampblack process (Blow, 1975)

กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ค้นพบมานาน ทำโดยการเผาของน้ำมันปิโตรเลียมหรือน้ำมันเตา ในภาชนะดิน เขม่าดำจะนอนก้นในภาชนะนั้น

5. Acetylene black process (Blow, 1975)

เป็นกระบวนการหนึ่งของการผลิตแบบ thermal process โดยการสลายตัวของก๊าซอะเซทิลีน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ดังนั้นความร้อนจะเกิดตลอดกระบวนการผลิต

2.1.2.6.2 สมบัติของเขม่าดำ

สมบัติของเขม่าดำที่สำคัญมี 5 ประการ คือ (Blow, 1975)

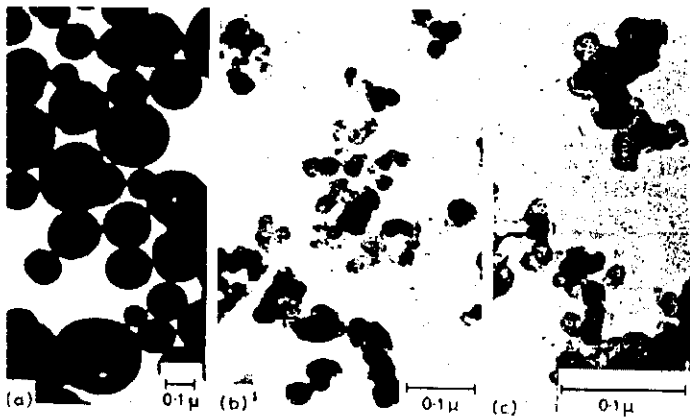
1. ขนาดอนุภาคของเขม่าดำ
2. โครงสร้างของเขม่าดำ
3. ลักษณะทางกายภาพของผิว
4. ลักษณะทางเคมีของผิว
5. ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

1. ขนาดอนุภาคของเขม่าดำ

โดยทั่วไปแล้วเขม่าดำที่มีขนาดเล็ก จะทำให้ยางที่ผสมเขม่าดำมีความแข็งเพิ่มขึ้น ความทนทานต่อการสึกหรอสูงขึ้น และผสมเข้ากับยางได้ยากขึ้นด้วย (พรพรรณ, 2540) การวัดขนาดอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน การวัดพื้นที่ผิวสามารถวัดโดยวิธีการดูดซับ ซึ่งสามารถใช้หาขนาดอนุภาคได้ พื้นที่ผิวที่วัดได้ให้สมมติว่าแต่ละอนุภาคเป็นทรงกลม ทำให้สามารถหาขนาดอนุภาคเฉลี่ยได้ และวิธีการวัดด้วยการดูดซับที่น่าเชื่อถือที่สุด คือ BET area (Brunauer, Emmett and Teller) เป็นการดูดซับก๊าซไนโตรเจน (Blow, 1975) เขม่าดำที่มี BET area สูง แสดงว่ามีขนาดอนุภาคเล็ก (พรพรรณ, 2540)

2. โครงสร้างของเขม่าดำ

คำว่า โครงสร้าง ในที่นี้หมายถึง การเชื่อมต่อกันของอนุภาคของคาร์บอนจนเป็นสายโซ่ยาว (Blow, 1975) ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวไม่ต่อกันหรือต่อกันน้อย แสดงว่าเขม่าดำมีโครงสร้างต่ำ เช่น thermal black มีโครงสร้างต่ำหรือไม่มีเลย แสดงในรูปที่ 2.3 (a) ถ้าเขม่าดำมีการจัดตัวต่อกันเป็นเส้นสายมาก แสดงว่าเขม่าดำมีโครงสร้างสูง เช่น channel black หรือ furnace black แสดงในรูปที่ 2.3 (b) และ (c) ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านของเขม่าดำชนิดต่างๆ (a) thermal black (b) channel black และ (c) furnace black (Blow, 1975)

การที่เขม่าดำมีโครงสร้างสูงจะทำให้การจัดตัวไม่แน่น ดังนั้นการหาโครงสร้างของเขม่าดำนอกจากใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแล้ว ยังมีวิธีวัดช่องว่างของอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคเขม่าดำต่อน้ำหนักของเขม่าดำ ในการทดลอง แทนที่จะวัดช่องว่างของอากาศโดยตรง กลับใช้การใส่น้ำมันลงในช่องว่างนั้น น้ำมันที่ใช้ คือ ไดบิวทิล ฟาธาเลต (dibutyl phthalate, DBP) การ

ทดลองจะเป็นการหาปริมาณของ DBP ที่จะต้องเติมเข้าไปในช่องว่างนั้น เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า absorptometer ซึ่งประกอบด้วยช่องว่างเล็กๆ ที่จะใส่เขม่าดำที่ทราบน้ำหนักแน่นอน มีที่กวนแล้วค่อยๆ เติม DBP เข้าไปในเขม่าดำนั้น ขณะที่เติม DBP เข้าไปจนเต็มช่องว่างของผสมจะแน่นทำให้แรงบิดในการกวนสูงทันที เครื่องมือจะหยุดทำงานในช่วงนี้ อ่านปริมาตรของ DBP ทันที คำนวณหาค่าปริมาตร DBP ที่ใช้เป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อ 100 กรัมของเขม่าดำ (พรพรรณ, 2540)

3. ลักษณะทางกายภาพของผิว (พรพรรณ, 2540)

การจัดตัวของอะตอมคาร์บอนในเขม่าดำจะมีลักษณะเป็นชั้นๆ เขม่าดำที่มีสมบัติในการเสริมประสิทธิภาพต่ำ เช่น thermal black จะมีการจัดของอะตอมคาร์บอนเรียงขนานอย่างมีระเบียบ เขม่าดำที่มีสมบัติเสริมประสิทธิภาพสูง จะมีการจัดตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบ และยิ่งเขม่าดำมีขนาดอนุภาคเล็กยิ่งขึ้นการจัดตัวของอะตอมคาร์บอนไม่เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น บางทีลักษณะของอะตอมคาร์บอนที่ผิวจะมีผลการเสริมประสิทธิภาพได้ เช่น ถ้าอะตอมของคาร์บอนเกิดการสร้างพันธะกันเองจนทำให้ลักษณะผิวจัดตัวเป็นระเบียบ ทำให้เกาะติดกับยางไม่เกิดการเสริมประสิทธิภาพก็จะต่ำ แต่ถ้าอะตอมคาร์บอนมีไฮโดรเจนมาเกาะจะช่วยให้เขม่าดำนั้นเสริมประสิทธิภาพมากขึ้น และเพิ่มมากขึ้นถ้าเกิดอนุมูลอิสระอยู่บนผิวของเขม่าดำ ซึ่งอนุมูลอิสระนี้จะสร้างพันธะกับยางได้ เมื่อโมเลกุลของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระขณะทำการผสม

4. ลักษณะทางเคมีของผิว

เขม่าดำประกอบด้วยคาร์บอนประมาณร้อยละ 90 - 99 ที่เหลือเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ที่เกาะกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ไฮโดรเจนมาจากไฮโดรคาร์บอนเดิม (จากน้ำมันและก๊าซธรรมชาติ) ไฮโดรเจนจะกระจายตลอดทั้งอนุภาคของเขม่าดำ ส่วนออกซิเจนมาจากการเผาไหม้ในขณะการผลิตเขม่าดำ ออกซิเจนส่วนใหญ่จะอยู่ที่ผิวของเขม่าดำ ออกซิเจนที่ผิวจะจับตัวในรูปของหมู่ฟีนอลิก คีโตนิก คาร์บอกซิลิก และแลคโตน นอกจากนี้ยังมีกำมะถันปริมาณเล็กน้อยปนอยู่ในเขม่าดำด้วย (Blow, 1975) ปริมาณของกำมะถันขึ้นอยู่กับปริมาณกำมะถันเดิมที่มีในน้ำมันที่ใช้ผลิตเขม่าดำ ไฮโดรเจน ออกซิเจน และกำมะถันเป็นสาเหตุให้ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของเขม่าดำต่างกัน (พรพรรณ, 2540)

5. ความเป็นรูพรุนของอนุภาค

ผิวของเขม่าดำไม่เรียบเนื่องจากในการผลิตเขม่าดำ ทำโดยการเผาไหม้ที่อุณหภูมิสูง การออกซิเดชันทำให้เกิดเป็นรูพรุนขึ้นในอนุภาคของเขม่าดำได้ (Blow, 1975) การมีรูพรุนมากหรือน้อยจะเป็นเหตุทำให้เวลาการวัลคาไนซ์เร็วหรือช้าได้ เพราะรูพรุนนี้จะดูดสารตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไป ทำให้เวลาในการวัลคาไนซ์ช้าลงได้ ถ้าเขม่าดำที่มีรูพรุนมากจะพบว่าปริมาณอนุภาคมากกว่าเขม่าดำที่มีรูพรุนน้อย ดังนั้นถ้าใช้เขม่าดำจำนวนเท่ากันโดยน้ำหนักใส่ในยาง เขม่า

ค่าที่มีรูปพรุนมากจะทำให้ยางมีความหนืดสูงกว่า การนำไฟฟ้าดีกว่าเขม่าค่าที่มีรูปพรุนน้อย เนื่องจากจำนวนอนุภาคมากกว่านั่นเอง (พรพรรณ, 2540)

เขม่าค่าที่ใช้ในยาง เพื่อวัตถุประสงค์แตกต่างออกไปตามความต้องการสมบัติต่างๆ ตัวอย่างเขม่าค่าชนิดต่างๆ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างเขม่าค่า

ชื่อเต็ม	ชื่อย่อ	การดูดซับ ไอโอดีน (มิลลิกรัมต่อกรัม ของเขม่าค่า)	ขนาด อนุภาค (นาโน เมตร)	โครงสร้าง (ลูกบาศก์เซนติเมตร ของ DBP ต่อ 100 กรัม)
Super abrasion furnace	SAF	140	22	115
Intermediate super abrasion furnace	ISAF	120	28	115
Conductive furnace	CF	140	-	115
Super conductive furnace	SCF	190	-	110
High abrasion furnace	HAF	80	32	105
Extra conductive furnace	XCF	230	-	190
Fine furnace	FF	50	42	60
Lampblack		18	-	120
Fine thermal	FT	-	190	33
Medium thermal	MT	-	300	33

ที่มา : Blow, 1975

2.1.2.6.3 การรวมตัวกันของเขม่าค่า (<http://people.deas.harvard.edu>, 2006)

เขม่าค่าประกอบด้วยอนุภาคเริ่มแรกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตร ระหว่างกระบวนการเตรียมด้วยวิธี furnace และมีการรวมตัวกันเกิดการรวมกันขั้นแรก (primary aggregate) ทำให้เขม่าค่ามีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 150 ถึง 500 นาโนเมตร และจากการรวมกันขั้นแรกก็จะเกิดการรวมตัวกัน (agglomeration) เพื่อให้มีโครงสร้างเป็นร่างแหและมีขนาดใหญ่ขึ้น แสดงในรูปที่ 2.4

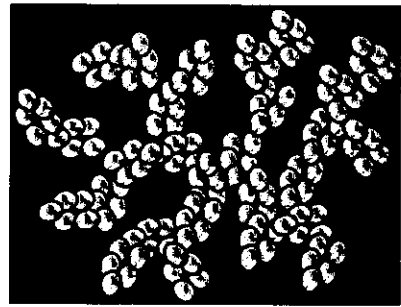
Carbon black particles



primary particle
~ 30nm



primary aggregate ~ 150-500nm



agglomeration of aggregates leads to network
structures (very large)

รูปที่ 2.4 การรวมตัวกันของเขม่าดำ (<http://people.deas.harvard.edu>, 2006)

2.1.2.6.4 เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า

เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเป็นเขม่าดำที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จะสังเกตได้จากค่าการดูดซับไอโอดีนซึ่งถ้ามีค่าสูงแสดงว่ามีขนาดอนุภาคเล็ก (พรพรรณ, 2540) แสดงในตารางที่ 2.3 เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าประกอบด้วย CF, SCF และ XCF มีค่าการดูดซับไอโอดีนที่มีค่ามากกว่าเขม่าดำชนิดอื่นๆ และเขม่าดำชนิดที่นำไฟฟ้าได้ดีจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กมากจึงมีค่าการดูดซับไอโอดีนที่มีค่ามากขึ้น เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเป็นเขม่าดำที่ผลิตด้วยกระบวนการแบบ furnace ทำให้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ามีโครงสร้างสูงเนื่องจากการจัดตัวต่อเป็นยาว (Blow, 1975)

2.1.2.7 สารอื่น

สารอื่นๆ นี้ หมายถึง สารพิเศษนอกเหนือ ไปจากที่กล่าวแล้ว เช่น

- สารฟู (blowing agent) เป็นสารทำให้เกิดฟองสำหรับทำฟองน้ำ
- สารหน่วงไฟ (flame retardants) ได้แก่ สารจำพวกคลอรีน และ ซิลิเนียม

ควรระมัดระวังในการใช้สารเหล่านี้เพราะเป็นสารพิษ (วราภรณ์, 2530)

- สารลดไฟฟ้าสถิตสำหรับทำยางปูพื้น
- สารลดกลิ่น (deodorants) เป็นสารที่จะใช้เพื่อช่วยขจัดกลิ่นที่ไม่พึง

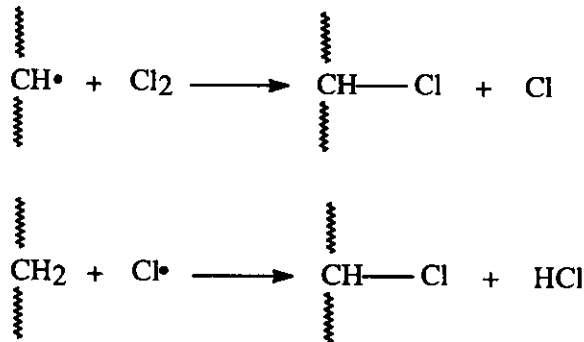
ประสงค์ในผลิตภัณฑ์ยาง ซึ่งอาจจะใช้สารอะโรมาติก (วราภรณ์, 2530)

- สารหน่วง (retarder) ใช้เพื่อป้องกันการเกิดสกอระหว่างกระบวนการแปรรูปและเกิดการวัลคาไนซ์ระหว่างเก็บยาง (กฤษณา, 2528)
- สี ทำให้เกิดสีสันต่างๆ

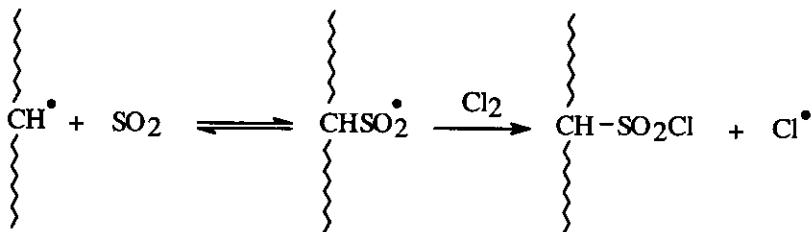
ปริมาณการใช้สารเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งาน และชนิดของสารเคมีที่ใช้
อีกด้วย

2.2 ยางคลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน

คลอโรซัลโฟเนตเตตพอลิเอทิลีน (chlorosulfonated polyethylene, CSM) เป็นพอลิเอทิลีนที่ใส่คลอรีน และซัลเฟอร์ไดออกไซด์เข้าไปในโมเลกุล หรืออาจเรียกว่าเป็นยางคลอรีเนตเตตพอลิเอทิลีนที่ใส่ $-\text{SO}_2\text{Cl}$ เข้าไปในโมเลกุล เป็นพวกอสัณฐาน (amorphous) เป็นยางที่ทำการวัลคาไนเซชันได้ มีชื่อทางการค้าว่า ไฮพาลอน (Hypalon[®]) เตรียมโดยใช้พอลิเอทิลีนในสารละลายคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วผ่านก๊าซคลอรีนลงไป จะได้คลอโรเอทิลีน (chloroethylene) ดังนี้ (กฤษณา และ พรรษา, 2526)



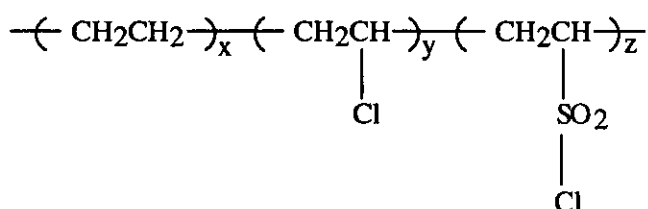
การใส่คลอรีนเข้าไปในพอลิเอทิลีนทำให้สมบัติจุดเดือดลดลง ถ้าคลอรีนเกินกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ พอลิเอทิลีนนั้นไม่เกิดผลึกมีสมบัติเป็นยาง (rubbery) แล้วเติมซัลเฟอร์ไดออกไซด์ลงไปจะได้ดังนี้



ได้พอลิเมอร์ที่มีคลอรีน 29 – 43 เปอร์เซ็นต์ และซัลเฟอร์ 1 – 1.5 เปอร์เซ็นต์ การใส่คลอรีนเข้าไปในโมเลกุลเพื่อให้พอลิเอทิลีนซึ่งเดิมเป็นพลาสติกเปลี่ยนเป็นยาง เพราะคลอรีนทำให้พอลิเมอร์เกิดผลึกไม่ได้ และใส่ซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อให้สามารถวัลคาไนซ์ได้

พอลิเอทิลีนที่ใช้นี้ทั้งแบบโซ่ที่มีกิ่ง (branch) ซึ่งมีความหนาแน่นต่ำและแบบโซ่เป็นเส้นตรง (linear) มีความหนาแน่นสูง

ยางคลอโรซัลไฟเนตเตดพอลิเอทิลีน มีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของยางคลอโรซัลไฟเนตเตดพอลิเอทิลีน (กฤษณา และ พรรษา, 2526)

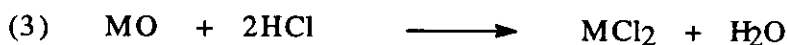
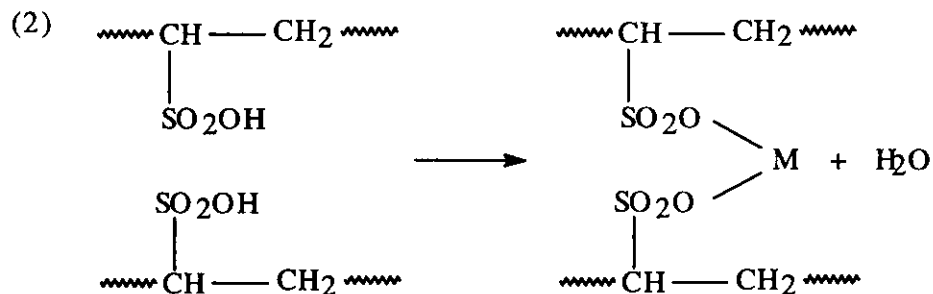
ค่า x , y , z คำนวณจากจำนวนคลอรีนและซัลเฟอร์ น้ำหนักโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับความหนืด (intrinsic viscosity) ข้างนี้เป็นยางไม่มีพันธะคู่จึงสามารถทนต่อความร้อน โอโซน และสภาพดินฟ้าอากาศ คลอรีนทำให้ยางที่วัลคาไนซ์แล้วทนน้ำมันและสารเคมีและยางคลอโรซัลไฟเนตเตดพอลิเอทิลีนเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว จึงเป็นฉนวนได้ปานกลาง การดีคไฟเมื่อเอาไฟออกจะดับเองได้เนื่องจากมีหมู่คลอรีนในโครงสร้าง

สมบัติของยางคลอโรซัลไฟเนตเตดพอลิเอทิลีน เช่น ค่าความถ่วงจำเพาะ 1.11 ถึง 1.28 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วัดที่ความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์ มีค่า 6 – 7 และมีความต้านทานต่อโอโซน ทนต่อสภาพอากาศเมื่อใช้งานกลางแจ้ง และมีความทนต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อนดี (Roff and Scott, 1971)

การวัลคาไนซ์ยางคลอโรซัลไฟเนตเตดพอลิเอทิลีน (กฤษณา และ พรรษา, 2526)

มีวิธีดังนี้

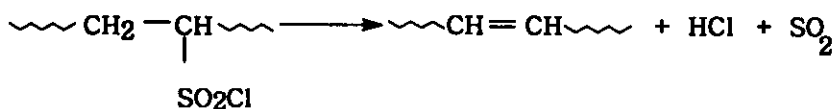
1. ใช้โลหะออกไซด์ร่วมกับสารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ เช่น แมกนีเซีย (magnesia) สารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังนี้



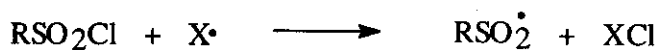
น้ำที่รวมอยู่ในปฏิกิริยาไม่ได้เป็นน้ำที่เดิมลงไป แต่เกิดจากโลหะออกไซด์กับกรดอินทรีย์อ่อน (weak organic acid) ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



สารตัวเร่งปฏิกิริยาลักคาไนซ์ เช่น MBTS เป็นตัวป้องกันการสลายตัวของยาง CSM ซึ่งเมื่อยาง CSM เกิดสลายตัวแล้วทำให้เกิดกรดขึ้นด้วย ดังปฏิกิริยานี้ คือ เกิดกรดไฮโดรคลอริก (HCl)



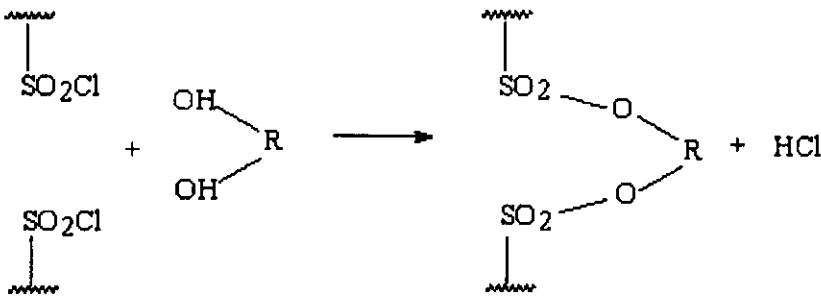
และทำหน้าที่การวัลคาไนซ์โดยการทำให้เกิดอนุมูลอิสระจากการสลายตัวของหมู่ $-\text{SO}_2\text{Cl}$ ดังนี้



X^\bullet คือ อนุมูลอิสระที่แตกตัวจากสารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ (MBTS)

R^\bullet คือ อนุมูลของพอลิเมอร์ซึ่งจะเข้าต่อกันกับ R^\bullet อื่นๆ เกิดการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล

2. วัลคาไนซ์โดยหมู่แอลกอฮอล์หลายหมู่ (polyfunctional alcohol) ปฏิกิริยาเกิดได้รวดเร็ว เมื่อมีสารพวกเบสแก่ นิยมใช้แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพราะสามารถควบคุมปฏิกิริยาการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุลได้ และเติมสารเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ซึ่งคาดว่าจะทำหน้าที่เช่นเดียวกับการใช้โลหะออกไซด์



3. วัลคาไนซ์ด้วยสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน (organic nitrogen compound) เช่น เอมีน เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลซัลฟีนามิด (sulphenamide crosslink) วิธีนี้เกิดสกอกซ์ได้ง่ายและยางที่ได้มีคุณสมบัติทางกายภาพไม่ดี

4. วัลคาไนซ์ด้วยอีพ็อกซีเรซิน (epoxy resin) เช่น ไดโกลซิควิ อีเทอร์ ออฟ บิสฟีนอล เอ (diglycidyl ether of bisphenol A) และสารตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทซัลไฟด์ เช่น MBTS อีพ็อกไซด์เข้าทำปฏิกิริยากับกรดเกลือ สารตัวเร่งปฏิกิริยาวัลคาไนซ์ทำหน้าที่เป็นสารทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างโมเลกุล



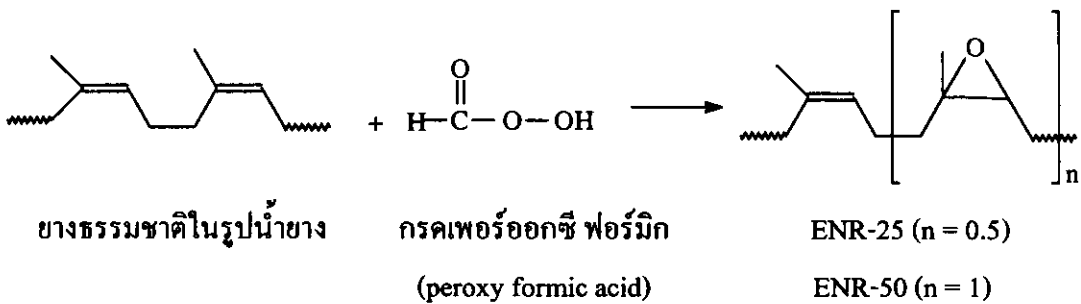
2.3 ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ (epoxidized natural rubber, ENR) เป็นยางที่มีการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญของยางธรรมชาติ คือ การเพิ่มหมู่อีพ็อกไซด์ในยางธรรมชาติ ยางธรรมชาติ

อีพ็อกซิไดซ์ เรียกว่า ENR เตรียมโดยการนำน้ำยางมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์กับ กรดฟอร์มิก แล้วค่อยแยกยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ออก (Morton, 1987)

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์แบ่งเป็นเกรดต่างๆ ตามปริมาณการอีพ็อกซิไดซ์ เช่น ENR10 ENR25 และ ENR50 เป็นยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์ไปร้อยละ 10, 25 และ 50 ตามลำดับ (Morton, 1987)

ปฏิกิริยาการเตรียม ENR แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการเตรียม ENR (พรพรรณ, 2540)

การมีหมู่อีพ็อกไซด์เพิ่มขึ้น ทำให้คุณสมบัติกลาสทรานซิชันของยางธรรมชาติมีค่าเพิ่มขึ้น และสมบัติบางประการของยางธรรมชาติจะมีการเปลี่ยนแปลง เช่น ยาง ENR50 มีการซึมผ่านของอากาศได้น้อยลง (Morton, 1987)

ยางธรรมชาติอีพ็อกซิไดซ์มีความทนทานต่อน้ำมันคล้ายๆ กับยางไนไตรล์ และมีความต้านทานการซึมของอากาศพอๆ กับยางบิวไทล์ (พรพรรณ, 2540)

2.4 คลื่น (<http://www.sn.ac.th>, 2005)

คลื่น (waves) เกิดขึ้นได้จากการที่มีแรงมากระทำตัวกลาง (medium) ทำให้ตัวกลางเกิดการสั่นสะเทือน ในกรณีคลื่นน้ำที่มีน้ำเป็นตัวกลาง เมื่อนำก้อนหินโยนลงไปในน้ำ จะมีแรงกระทำที่ทำให้เกิดคลื่น คือ ก้อนหิน ก่อนที่น้ำจะเกิดคลื่น ผิวหน้าของน้ำเรียบเสมอกัน เมื่อเกิดคลื่นน้ำจะกระเพื่อมขึ้นลงทำให้ผิวหน้าของน้ำสูงต่ำไม่เสมอกันคลื่นจะแผ่กว้างออกไป โดยการทำให้หน้าที่เรียบในตอนแรกเกิดการกระเพื่อมขึ้นต่อเนื่องกัน แต่คลื่นเท่านั้นที่เคลื่อนที่ไป ตัวกลางไม่ได้เคลื่อนที่ไปด้วย

2.4.1 ชนิดของคลื่น

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ ซึ่งสามารถจำแนกตามลักษณะต่างๆ ได้ดังนี้

2.4.1.1 จำแนกตามลักษณะการอาศัยตัวกลาง

1. คลื่นกล (mechanical wave) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยอาศัยตัวกลางซึ่งอาจเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ ตัวอย่างของคลื่นกล ได้แก่ คลื่นเสียง คลื่นที่ผิวน้ำ คลื่นในเส้นเชือก เป็นต้น

2. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่โดยไม่อาศัยตัวกลาง สามารถเคลื่อนที่ในสุญญากาศได้ เช่น คลื่นแสง คลื่นวิทยุและโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น

2.4.1.2 จำแนกตามลักษณะการเคลื่อนที่

1. คลื่นตามขวาง (transverse wave) เป็นคลื่นที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ในทิศตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างของคลื่นตามขวาง ได้แก่ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2. คลื่นตามยาว (longitudinal wave) เป็นคลื่นที่อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่ไปมาในแนวเดียวกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ตัวอย่างของคลื่นตามยาว ได้แก่ คลื่นเสียง คลื่นที่เกิดจากการกดขวดพลาสติก เป็นต้น

2.4.1.3. จำแนกตามลักษณะการเกิดคลื่น

1. คลื่นคล (pulse wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดถูกรบกวนเพียงครั้งเดียว

2. คลื่นต่อเนื่อง (continuous wave) เป็นคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดถูกรบกวนเป็นจังหวะต่อเนื่อง

2.4.2 ส่วนประกอบของคลื่น

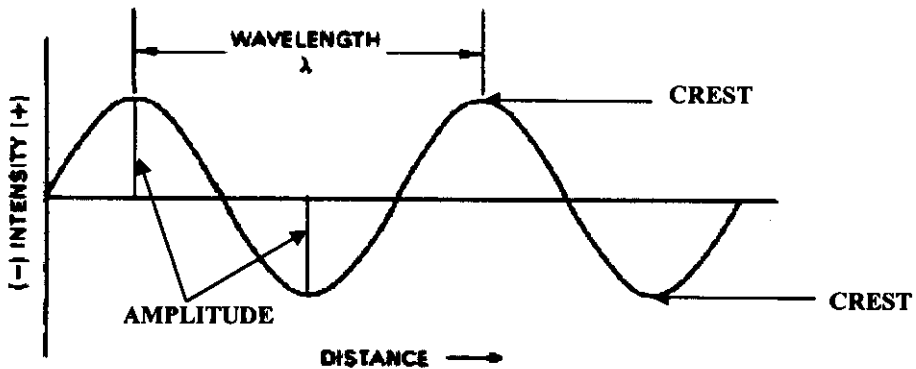
ส่วนประกอบของคลื่น แสดงในรูปที่ 2.7 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้
(<http://web.ku.ac.th/schoolnet>, 2005)

1. สันคลื่น (crest) เป็นตำแหน่งสูงสุดของคลื่น หรือเป็นตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดหรือการกระจัดสูงสุดในทางบวก

2. ท้องคลื่น (trough) เป็นตำแหน่งต่ำสุดของคลื่น หรือเป็นตำแหน่งที่มีแอมพลิจูดสูงสุดในทางลบ

3. แอมพลิจูด (amplitude) เป็นระยะการกระจัดมากที่สุด ทั้งค่าบวกและค่าลบ

4. ความยาวคลื่น (wavelength) เป็นความยาวของคลื่นหนึ่งลูกมีค่าเท่ากับระยะระหว่างสันคลื่นหรือท้องคลื่นที่อยู่ติดกัน ความยาวคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์ λ มีหน่วยเป็นเมตร
5. ความถี่ (frequency) หมายถึง จำนวนลูกคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ในหนึ่งหน่วยเวลา แทนด้วยสัญลักษณ์ f มีหน่วยเป็นรอบต่อวินาที หรือเฮิรตซ์
6. คาบ (period) หมายถึง ช่วงเวลาที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งใดๆ ครบหนึ่งลูกคลื่นแทนด้วยสัญลักษณ์ T มีหน่วยเป็นวินาทีต่อรอบ
7. อัตราเร็วของคลื่น (wave speed) หาได้จากผลคูณระหว่างความยาวคลื่นและความถี่



รูปที่ 2.7 คลื่นและส่วนประกอบของคลื่น (<http://brd3.chosun.com>, 2006)

2.4.3 สมบัติของคลื่น (<http://www.sn.ac.th>, 2005)

สมบัติประการแรกของคลื่นได้แก่ ในตัวกลางชนิดเดียวกัน คลื่นจะแพร่เป็นเส้นตรง (rectilinear propagation) ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นที่มีขนาดเป็นเส้นเล็กมากๆ จะพบว่าเส้นนั้นเป็นเส้นตรง แต่ทันทีที่เคลื่อนที่มาถึงรอยต่อของตัวกลางที่แตกต่างกัน อาจจะเป็นตัวกลางที่ทำให้ความเร็วของคลื่นเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม หรือตัวกลางที่คลื่นไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีกตรงรอยต่อของตัวกลางทั้งสองนั้นถ้าคลื่นไม่ถูกดูดกลืน (absorb) ไปหมดคลื่นจะเคลื่อนที่ต่อไปด้วยสมบัติที่แตกต่างไปจากเดิมอย่างน้อย 3 ลักษณะ ซึ่งบางครั้งลักษณะเหล่านี้จะเกิดขึ้นพร้อมกันมากกว่าลักษณะเดียว ซึ่งแต่ละลักษณะจะมีดังนี้

2.4.3.1 การสะท้อนของคลื่น (reflection)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปยังรอยต่อของอีกตัวกลางหนึ่ง คลื่นจะเคลื่อนที่ย้อนกลับมาในตัวกลางเดิม จึงเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสะท้อนของคลื่น หลังจากการ

สะท้อนแล้วทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปในแนวของคลื่นสะท้อน จะมีรูปร่างเหมือนเดิมถ้าคลื่นสะท้อนจากระยะที่เรียบเป็นเส้นตรง

กฎการเคลื่อนที่ของคลื่น คือ แนวคลื่นตกกระทบ แนวคลื่นสะท้อนและแนวปกติอยู่บนระนาบอันเดียวกัน มุมคลื่นตกกระทบเท่ากับมุมคลื่นสะท้อน

จากกฎการสะท้อนของคลื่นทำให้คลื่นตกกระทบแล้วสะท้อน มีลักษณะแตกต่างกัน 2 อย่าง คือ คลื่นที่สะท้อนจากระยะที่เรียบจะสะท้อนเป็นระเบียบ และคลื่นที่สะท้อนจากระยะที่เรียบจะสะท้อนไม่เป็นระเบียบ

ตัวอย่างการสะท้อน เช่น การสะท้อนแสงของกระจกเงา กระจกเงาที่ผิวเรียบจะสะท้อนแสงออกมาเหมือนวัตถุเดิม แต่กระจกเงาที่ผิวไม่เรียบจะให้ภาพที่บิดเบี้ยวไปจากวัตถุเดิม

2.4.3.2 การหักเห (refraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางเข้าไปในตัวกลางใหม่ คลื่นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างไปจากเดิม และทิศทางเคลื่อนที่ของคลื่นจะเปลี่ยนไป เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการหักเห ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย คลื่นจะเคลื่อนที่ช้ากว่าการเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก การที่คลื่นหักเห่นั้นมีสาเหตุมาจากความเร็วของคลื่นในตัวกลางทั้งสองที่มีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากในตัวกลางต่างกัน ความเร็วของคลื่นจะแตกต่างกัน ดังนั้นถ้าคลื่นตกกระทบเอียงๆ บนรอยต่อของตัวกลาง คลื่นจะเข้าสู่ตัวกลางใหม่จะหักเหเปลี่ยนทิศทางใหม่ที่

สามารถสรุปกฎการหักเหของคลื่นได้ดังนี้

1. แนวคลื่นตกกระทบ แนวคลื่นตกหักเหและแนวปกติอยู่บนระนาบเดียวกัน

2. ถ้าแสงตกกระทบมาจากตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่เคลื่อนที่ได้ช้ากว่า คลื่นจะหักเหเข้าหาแนวปกติ ในทางตรงข้าม ถ้าคลื่นตกกระทบหักเหเข้ากระทบจากตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า คลื่นจะหักเหออกจากแนวปกติ จากปรากฏการณ์การหักเหของคลื่นทำให้เกิดลักษณะพิเศษอีก 2 ประการคือ มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด

2.4.3.3 มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมด

ถ้าคลื่นจากตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ช้า ตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลางแล้วเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่เคลื่อนที่ได้เร็วกว่า คลื่นจะหักเหออกจากแนวปกติ ซึ่งมุมตกกระทบจะเล็กกว่ามุมคลื่นหักเห ถ้าให้มุมตกกระทบโตขึ้นกว่าเดิมมุมหักเหจะยิ่งโตขึ้น ถ้าคลื่นตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤตคลื่นจะหักเหกลับเข้าไปในตัวกลางเดิม ซึ่งคือการสะท้อนนั่นเอง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสะท้อนกลับหมด

2.4.3.4 การเลี้ยวเบน (diffraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเล็กๆ บนฉากกัน ลักษณะของคลื่นจะไม่คมชัดจน บางส่วนของคลื่นจะ โค้งขณะที่ผ่านสันหรือขอบของช่อง ทำให้ขนาดของคลื่นที่ผ่านช่องไปมีขนาด โด ปรากฏการณ์นี้เป็นสมบัติสำคัญที่แสดงให้เห็นว่าพลังงานมีความแตกต่างจากสสารถึงแม้จะเป็น อนุภาคที่เล็ก ก็ไม่สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ได้

2.4.3.5 การแทรกสอดของคลื่น (interference of wave)

เมื่อคลื่นตั้งแต่ 2 คลื่นขึ้นไปเคลื่อนที่มาพบกันในตัวกลาง ขนาดของคลื่นรวมจะ เท่ากับผลรวมทางพีชคณิตของคลื่นเหล่านั้น ซึ่งจะมีความถี่น้อยกว่าหรือเล็กกว่าขนาดของคลื่นเดิม แต่ละคลื่นก็ได้ ขึ้นอยู่กับเครื่องหมายว่าจะแตกต่างกันหรือเหมือนกัน ปรากฏการณ์นี้ทำให้รูปแบบ ของคลื่นแปลกออกไป โดยเฉพาะเมื่อคลื่นที่มีความถี่ขนาดเดียวกันและแอมพลิจูดเท่ากันเคลื่อนที่ มาพบกัน อาจจะทำให้คลื่นรวมมีขนาด โดเป็น 2 เท่า หรืออาจทำให้คลื่นรวมหายไปหมดก็ได้

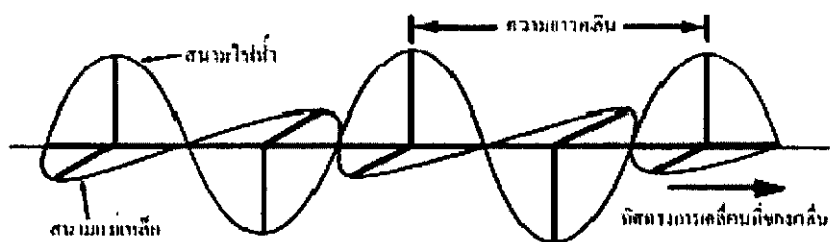
2.4.3.6 รีโซแนนซ์ (resonance)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของคลื่นที่มีความถี่เท่ากัน เมื่อตัวกลางที่ มีความถี่ของการสั่นเฉพาะตัวขนาดหนึ่ง ได้รับพลังงานที่มีความถี่เท่ากันจากแหล่งกำเนิดคลื่น ตัวกลางดังกล่าวจะถูกเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นด้วยขนาดความถี่เท่ากัน

การรีโซแนนซ์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีประโยชน์มากในการสื่อสารกันด้วยคลื่น เช่น ในการรับ-ส่งวิทยุ โทรทัศน์ ไมโครเวฟ โดยการปรับความถี่คลื่นของเครื่องส่งและเครื่องรับให้ ตรงกันก็สามารถติดต่อสื่อสารกันได้

2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ธรรมชาติของแสงแสดงพฤติกรรมเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค เมื่อกล่าวถึงแสงใน สมบัติความเป็นคลื่น เรียกว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves) ซึ่งประกอบด้วย สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำมุมตั้งฉากกัน แสดงในรูปที่ 2.8 และเคลื่อนที่ไปในอากาศด้วย ความเร็ว 3×10^8 เมตรต่อวินาที เมื่อกล่าวถึงแสงในสมบัติของอนุภาค เรียกว่า โฟตอน (photon) เป็นอนุภาคที่ไม่มีมวลแต่เป็นพลังงาน (<http://www.lesa.in.th>, 2005)

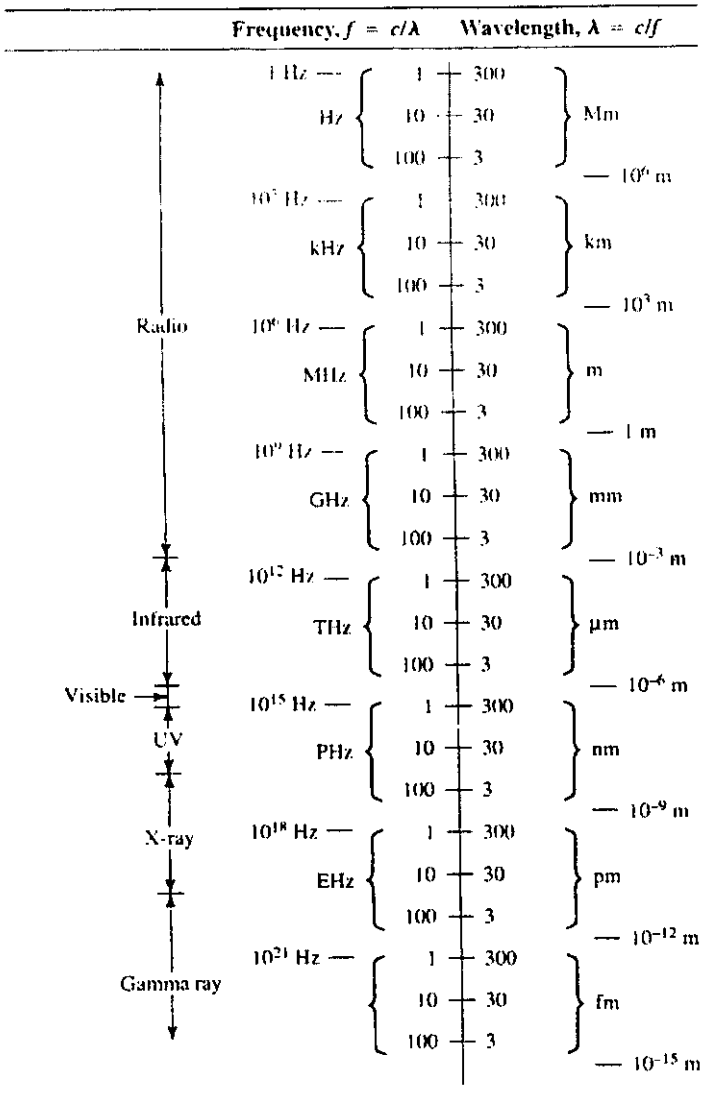


รูปที่ 2.8 สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (<http://www.lesa.in.th>, 2005)

2.5.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีช่วงความถี่คลื่นกว้างมาก ดังนั้นจึงแยกคลื่นที่มีสมบัติเหมือนกันไว้เป็นกลุ่มเดียวกัน เรียกว่า สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic spectrum) แสดงในรูปที่ 2.9 มีชื่อเรียกช่วงต่างๆ ของความถี่ต่างกันตามแหล่งกำเนิดและวิธีการตรวจวัดคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ ในสเปกตรัมมีสมบัติที่สำคัญเหมือนกัน คือ เคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วแสง ซึ่งเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที และมีพลังงานส่งผ่านไปด้วยกับคลื่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นแบ่งออกเป็น 7 ช่วงมีชื่อเรียกดังนี้ (สสวท. กระทรวงศึกษาธิการ, 2533)



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (John and Daniel, 1999)

2.5.1.1 คลื่นวิทยุ

คลื่นวิทยุมีความถี่อยู่ในช่วง $10^4 - 10^9$ เฮิรตซ์ คลื่นช่วงนี้ใช้สำหรับส่งข่าวสารและสาระบันเทิงไปยังผู้รับ คลื่นวิทยุมีการส่งสัญญาณ 2 ระบบ คือ

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

ช่วงความถี่ 530 - 1600 กิโลเฮิรตซ์ สื่อสารโดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นวิทยุ เรียกว่า คลื่นพาหะ โดยสัญญาณเสียงจะไปบังคับให้แอมพลิจูดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงไป

เมื่อคลื่นวิทยุที่ผสมสัญญาณเสียง แล้วกระจายจากสายอากาศไปยังเครื่องรับวิทยุ เครื่องรับวิทยุจะทำหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงออกจากสัญญาณคลื่นวิทยุ แล้วขยายสัญญาณเสียง

ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นเพื่อส่งให้ลำโพงแปลงสัญญาณเสียงออกมาเป็นเสียงที่หูรับฟังได้ การส่งคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มในการกระจายเสียงออกอากาศนอกจากจะใช้คลื่นที่มีความถี่ขนาด 530 - 1600 กิโลเฮิรตซ์ แล้วยังมีช่วงความถี่ต่ำกว่านี้เรียกว่า คลื่นยาว และที่มีความถี่สูงกว่านี้ เรียกว่า คลื่นสั้น ในการส่งระบบเอเอ็มซึ่งเป็นการผสมคลื่นโดยให้แอมพลิจูดของคลื่นพาหะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียงนั้น ขณะที่เคลื่อนไปในบรรยากาศ ถ้ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งอื่น เช่น จากฟ้าแลบ หรือฟ้าผ่า แอมพลิจูดของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยทำให้เกิดการรบกวนมายังเครื่องรับวิทยุได้

ในการส่งคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มสามารถส่งคลื่นได้ทั้งคลื่นดิน เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงขนานกับผิวโลก และคลื่นฟ้า คือคลื่นสะท้อนกลับลงมาจากรชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แล้วสะท้อนกลับลงมาจึงไม่ต้องใช้สายอากาศตั้งสูง

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

ช่วงความถี่ 88 - 108 เมกะเฮิรตซ์ สื่อสาร โดยใช้คลื่นเสียงผสมเข้ากับคลื่นพาหะ โดยความถี่ของคลื่นพาหะจะเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณคลื่นเสียง ในการส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟเอ็มส่งคลื่นได้เฉพาะคลื่นดินอย่างเดียว ถ้าต้องการส่งให้พื้นที่ต้องมีสถานีถ่ายทอดและเครื่องรับต้องตั้งสายอากาศสูงๆ รับ

ระบบการส่งคลื่นแบบเอเอ็มและเอฟเอ็มต่างกันที่วิธีการผสมคลื่น ดังนั้นจึงทำให้เครื่องรับวิทยุแบบเอเอ็มไม่สามารถรับคลื่นวิทยุของอีกฝ่ายหนึ่งได้

โลหะมีสมบัติในการสะท้อนและดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นคลื่นวิทยุจะไม่สามารถทะลุผ่านเข้าไปถึงตำแหน่งภายในโครงสร้างที่ประกอบด้วยโลหะได้ อาจสังเกตได้ง่ายเมื่อฟังวิทยุในรถยนต์พอร์ตผ่านเข้าไปในสะพานที่มีโครงสร้างเป็นเหล็ก เสียงวิทยุจะเบาลงหรือเงียบหายไป

ในการส่งกระจายเสียงของสถานีส่งคลื่นวิทยุต่างๆ จะใช้คลื่นวิทยุที่มีความถี่เดียวกันไม่ได้ เพราะคลื่นที่มีความถี่เดียวกันจะเข้าไปในเครื่องรับพร้อมกันและรบกวนกัน ด้วยเหตุนี้สถานีส่งคลื่นวิทยุแต่ละสถานีจึงมีความถี่คลื่นโดยเฉพาะ แต่ถ้าสถานีส่งคลื่นวิทยุระยะห่างกันมากๆ จนคลื่นวิทยุของสถานีทั้งสองส่งไปไม่ถึงกันและกันสถานีทั้งสองอาจใช้ความถี่เดียวกันได้

2.5.1.2 คลื่นโทรทัศน์และไมโครเวฟ

คลื่นเหล่านี้มีความถี่อยู่ในช่วง $10^8 - 10^{12}$ เฮิรตซ์ มีประโยชน์ในกิจการหลายอย่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงขนาดนี้จะไม่สะท้อนที่ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ แต่ทะลุผ่านชั้นบรรยากาศออกนอกโลก ในการส่งคลื่นโทรทัศน์ไปเป็นระยะทางไกลๆ จะต้องใช้สถานีถ่ายทอดเป็นระยะๆ เพื่อรับคลื่นโทรทัศน์ที่เคลื่อนที่จากสถานีส่งมาในแนวเส้นตรงแล้วขยายให้

สัญญาณแรงขึ้นก่อนที่จะส่งต่อไปยังสถานีที่อยู่ถัดไป ทั้งนี้เพราะสัญญาณเดินทางเป็นเส้นตรง และสัญญาณจะไปได้ไกลสุดเพียงประมาณ 80 กิโลเมตรบนผิวโลกเท่านั้น เพราะความโค้งของโลก นอกจากนี้จะไม่โครเวฟนำสัญญาณจากสถานีส่งไปยังดาวเทียม ซึ่งโคจรอยู่ในตำแหน่งที่หยุดนิ่งเมื่อเทียบกับตำแหน่งหนึ่งบนผิวโลก จากนั้นดาวเทียมจึงส่งต่อไปยังสถานีรับที่อยู่ไกลๆ ได้ คลื่นโทรทัศน์มีความยาวคลื่นสั้นจึงไม่สามารถเลี้ยวเบนอ้อมผ่านสิ่งกีดขวางใหญ่ๆ ได้

เนื่องจากไมโครเวฟสะท้อนจากผิวโลหะได้ดี จึงมีการนำสมบัตินี้ไปใช้เป็นประโยชน์ในการตรวจหาคำแหน่งของอากาศยาน อุปกรณ์ดังกล่าวเรียกว่า เรดาร์ หลักการตรวจหาคำแหน่งของวัตถุด้วยเรดาร์ อาศัยการส่งไมโครเวฟออกจากแหล่งกำเนิดเป็นห้วงๆ และรับคลื่นที่สะท้อนกลับจากวัตถุนั้นเข้ามา เพื่อหาว่าวัตถุนั้นอยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดคลื่นเป็นระยะเท่าไรในทิศไหน ตามปกติไมโครเวฟที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดจะส่งออกเป็นลำคลื่นขนาน โดยจัดให้แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ที่โฟกัสของจานพาราโบลา เพื่อให้คลื่นออกไปเป็นลำขนานคล้ายกับแสงจากหลอดไฟฉายที่สะท้อนจากภายในจานพาราโบลา เมื่อไมโครเวฟเคลื่อนที่ไปกระทบวัตถุ หรือโลหะจะสะท้อนกลับมากกระทบจานพาราโบลา แล้วสะท้อนไปรวมกันที่โฟกัสของจานซึ่งมีเครื่องรับไมโครเวฟติดตั้งอยู่ เมื่อทราบช่วงเวลาที่ส่งคลื่นออกไป และรับกลับจะสามารถหาระยะห่างของวัตถุนั้นจากแหล่งกำเนิดคลื่นได้ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่ของไมโครเวฟสามารถแบ่งเป็นช่วงความถี่เฉพาะได้อีกและมีชื่อเรียกช่วงความถี่ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงความถี่ไมโครเวฟ

ชื่อ	ความถี่ (จิกะเฮิรตซ์)	ความยาวคลื่น (เซนติเมตร)
P band	0.3 – 1	30 – 100
L band	1 – 2	15 – 30
S band	2 – 4	7.5 – 15
C band	4 – 8	3.8 – 7.5
X band	8 – 12.5	2.4 – 3.8
Ku band	12.5 – 18	1.7 – 2.4
K band	18 – 26.5	1.1 – 1.7
Ka band	26.5 – 40	0.75 – 1.1

2.5.1.3 รังสีอินฟราเรด

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ในช่วงประมาณ $10^{11} - 10^{14}$ เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ $10^{-3} - 10^{-6}$ เมตร เรียกว่า รังสีอินฟราเรด รังสีอินฟราเรดมีย่านความถี่คาบเกี่ยวกับไมโครเวฟ วัตถุร้อนจะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 10^{-4} เมตร ออกมา ประสาทสัมผัสทางผิวหนังของมนุษย์สามารถรับรังสีอินฟราเรดได้ ตามปกติสิ่งมีชีวิตจะแผ่รังสีอินฟราเรดออกมา ตลอดเวลา และรังสีอินฟราเรดสามารถทะลุผ่านเมฆหมอกที่หนาเกินกว่าที่แสงธรรมดาจะผ่านได้ จึงอาศัยสมบัตินี้ในการถ่ายภาพพื้นโลกจากดาวเทียม

2.5.1.4 แสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ประมาณ 10^{14} เฮิรตซ์ หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4×10^{-7} ถึง 7×10^{-7} เมตร ประสาทตาของมนุษย์ไวต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าช่วงนี้มาก วัตถุที่มีอุณหภูมิสูงมากๆ จะเปล่งแสงได้ เช่น ไส้หลอดไฟฟ้า ดวงอาทิตย์ เป็นต้น แสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 7×10^{-7} เมตร ประสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีแดง แสงที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่านี้ ประสาทตาจะรับรู้เป็นแสงสีส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ตามลำดับ จนถึงแสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นประมาณ 4×10^{-7} เมตร แสงในตารางที่ 2.5 แสงสีทั้งหมดเมื่อมารวมกันด้วยปริมาณที่เหมาะสมแล้วจะเป็นแสงสีขาว

ตารางที่ 2.5 ช่วงคลื่นต่างๆ ของแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

สี	ม่วง	คราม	น้ำเงิน	เขียว	เหลือง	ส้ม	แดง
ช่วงคลื่น (นาโนเมตร)	400-600	460-475	475-490	490-565	565-575	575-600	600-800
ช่วงคลื่นเฉลี่ย (นาโนเมตร)	430	467.5	482.5	527.5	570	587.5	700
พลังงาน (10^{-19} จูล)	4.65	4.25	4.15	3.80	3.475	3.375	2.90

ที่มา : (<http://funscience.gistda.or.th/electromagnetic/electromagnetic.html>, 2005)

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับคลื่นวิทยุ ดังนั้นอาจใช้แสงเป็นคลื่นพาหะของข่าวสารในการสื่อสารได้เช่นเดียวกับการใช้คลื่นวิทยุและคลื่นโทรทัศน์เป็นพาหะของเสียงและภาพแล้ว เหตุที่ไม่สามารถใช้แสงที่เกิดจากจากวัตถุร้อนเป็นคลื่นพาหะเพราะว่าแสงเหล่านี้มีหลายความถี่และเฟสของคลื่นไม่แน่นอน แต่ปัจจุบันมีเครื่องกำเนิดเลเซอร์ ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสง

อาพันธ์ที่ให้แสงได้โดยไม่อาศัยความร้อน ได้มีผู้ทดลองผสมสัญญาณเสียงและภาพไปกับเลเซอร์ได้สำเร็จ นอกจากการสื่อสารแล้ว เลเซอร์ยังใช้ได้อย่างกว้างขวางในวงการต่างๆ เช่น วงการแพทย์ใช้ในการผ่าตัดคนัยน์ตา เป็นต้น

2.5.1.5 รังสีอัลตราไวโอเล็ต

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่าแสงโดยมีความถี่อยู่ในช่วง $10^{15} - 10^{18}$ เฮิร์ตซ์ เรียกว่า รังสีอัลตราไวโอเล็ต หรือที่เรียกว่า รังสีเหนือม่วง รังสีอัลตราไวโอเล็ตตามธรรมชาติ ส่วนใหญ่มาจากการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ และรังสีนี้เป็นตัวการที่ทำให้เกิดประจุอิสระและไอออนในบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ เพราะรังสีอัลตราไวโอเล็ตมีพลังงานพอเหมาะที่จะไปชนให้อิเล็กตรอนหลุดจากโมเลกุลของอากาศ รังสีอัลตราไวโอเล็ตไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านสิ่งกีดขวางหนาๆ ได้ แต่สามารถทำให้เชื้อโรคบางชนิดตายได้ ในวงการแพทย์จึงใช้รังสีอัลตราไวโอเล็ตรักษาโรคเกี่ยวกับผิวหนัง รังสีอัลตราไวโอเล็ตจำนวนมากอาจทำให้เกิดอันตรายต่อผิวหนังและตาคนได้ แต่เนื่องจากบรรยากาศรอบๆ โลกดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเล็ตไว้บางส่วน ทำให้แสงจากดวงอาทิตย์ที่พื้นผิวโลกมีรังสีอัลตราไวโอเล็ตในปริมาณที่ปลอดภัยต่อสิ่งมีชีวิต

2.5.1.6 รังสีเอกซ์

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง $10^{16} - 10^{22}$ เฮิร์ตซ์ หรือความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง $10^8 - 10^{13}$ เมตร มักเรียกรวมกันว่า รังสีเอกซ์ รังสีเอกซ์สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านสิ่งกีดขวางหนาๆ ได้ ดังนั้นในทางอุตสาหกรรมจึงใช้รังสีเอกซ์ตรวจหารอยร้าวภายในชิ้นส่วนโลหะขนาดใหญ่ เจ้าหน้าที่ด้านตรวจใช้รังสีเอกซ์ตรวจหาอาวุธปืนหรือระเบิดในกระเป๋าเดินทางโดยไม่ต้องเปิดกระเป๋า ทั้งนี้โดยอาศัยหลักที่ว่ารังสีเอกซ์จะถูกกั้นโดยอะตอมของธาตุหนักได้ดีกว่าธาตุเบา แพทย์ใช้รังสีเอกซ์ฉายผ่านร่างกายมนุษย์ไปตกบนฟิล์ม เพื่อตรวจดูลักษณะผิดปกติของอวัยวะภายในและกระดูก

2.5.1.7 รังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงกว่ารังสีเอกซ์ รังสีแกมมามีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์และสามารถกระตุ่นปฏิกิริยานิวเคลียร์ได้ มีอำนาจทะลุทะลวงสูง

2.5.2 สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ และสามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้ และเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากับ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเท่ากับอัตราเร็วแสง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง เนื่องจากคลื่น

ที่ส่งผ่านไปในตัวกลางแล้วทำให้อุณหภูมิของตัวกลางสั้นในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (วิไลวรรณ, 2542) คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถถ่ายเทพลังงานจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้ และเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกปล่อยออกมาจะถูกดูดกลืนได้โดยสสาร คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแทรกสอด สะท้อน หักเห และเลี้ยวเบนได้เช่นเดียวกับคลื่นทั่วไป (<http://web.ku.ac.th/schoolnet>, 2005)

2.6 ทฤษฎีการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในปัจจุบันนี้มีการใช้เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์กันอย่างแพร่หลาย เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ การติดต่อสื่อสารผ่านคลื่นความถี่วิทยุ โทรศัพท์มือถือ การออกอากาศของสถานีวิทยุ และโทรทัศน์ อุปกรณ์การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เช่น สายไฟฟ้าแรงสูง หม้อแปลง เป็นต้น และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เมื่อมีการใช้เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ทำให้เกิดการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ถ้ามีการใช้เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์พร้อมกัน ทำให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแต่ละเครื่องส่งสัญญาณมารบกวนซึ่งกันและกัน ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องป้องกันการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแต่ละเครื่องซึ่งกัน คั้งนั้นจึงต้องทำวัสดุเพื่อป้องกันการการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้น และมีทฤษฎีเกี่ยวกับการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

การวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (shielding effectiveness, SE) มีหน่วยเป็นเดซิเบล (decibels, dB) เป็นฟังก์ชันของลอการิทึม (logarithm, log) ของอัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกำลัง (power density, P) ของคลื่นตกกระทบและความหนาแน่นกำลังที่สะท้อนออกจากวัสดุเมื่อมีการกำบัง ดังแสดงในสมการที่ 2.1 หรือเป็นฟังก์ชันลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างความเข้มของคลื่นตกกระทบ ซึ่งเป็นความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (magnetic intensity) หรือความเข้มของคลื่นระนาบ (plane wave) ที่สะท้อนออกจากวัสดุที่มีการกำบัง ดังแสดงในสมการที่ 2.2 (Das *et al.*, 2000)

$$SE = 10 \log (P_i / P_r) \quad (2.1)$$

$$SE = 20 \log (F_i / F_r) \quad (2.2)$$

โดยที่ P_i คือ ค่าความหนาแน่นกำลังของคลื่นตกกระทบ

P_r คือ ค่าความหนาแน่นกำลังของคลื่นตกกระทบที่สะท้อนออกจากวัสดุ

F_i คือ ค่าความเข้มของคลื่นที่ตกกระทบ

F_c คือ ค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ ความเข้มของคลื่นระนาบที่

สะท้อนออกจากวัสดุเมื่อมีการกำบัง

คุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่ง

พิจารณาจากสูตรการหาค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

$$SE = A_{dB} + R_{dB} \quad (2.3)$$

โดยที่ค่า A_{dB} เป็นค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ค่า R_{dB} เป็นค่าการสะท้อน (ค่าการสะท้อนทางแม่เหล็ก ค่าการสะท้อนทางไฟฟ้า ค่าการสะท้อนคลื่นระนาบ)

จากสมการที่ 2.3 ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีค่าดังสมการที่ 2.4

$$A_{dB} = Ka t (\mu\sigma F)^{0.5} \quad (2.4)$$

โดยที่ A คือ ค่าการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Ka คือ ค่าคงที่ (3.338 หรือ 131.4 สำหรับความหนาในหน่วย mils หรือ มิลลิเมตรตามลำดับ)

t คือ ความหนา (mils หรือ เมตร)

μ คือ ค่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ (magnetic permeability)

σ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าสัมพัทธ์ (relative conductivity)

F คือ ความถี่ (เมกะเฮิรตซ์)

จากสมการที่ 2.3 ค่าการสะท้อน ซึ่งประกอบด้วยค่าการสะท้อนทางแม่เหล็ก ค่าการสะท้อนทางไฟฟ้า ค่าการสะท้อนคลื่นระนาบ มีค่าแสดงในสมการที่ 2.5 ถึง 2.7 (<http://www.lairdtech.com>, 2004)

1. Electric (High Impedance) Fields ($d < \lambda / 2\pi$)

$$RE_{dB} = Ke - 10 \log_{10} (\mu_r F^3 d^2 / \sigma_r) \quad (2.5)$$

2. Magnetic (Low Impedance) Fields ($d < \lambda / 2\pi$)

$$RH_{dB} = Kh - 10 \log_{10} (\mu_\gamma / Fd^2 \sigma_\gamma) \quad (2.6)$$

3. Far Field (Plane Wave) Conditions ($d \geq \lambda / 2\pi$)

$$RP_{dB} = 108.1 - 10 \log_{10} (\mu_\gamma F / \sigma_\gamma) \quad (2.7)$$

โดยที่ Ke และ Kh คือ ค่าคงที่

μ_γ คือ ค่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ (magnetic permeability)

d คือ ระยะห่าง (separation distance)

σ_γ คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าสัมพัทธ์

จากสมการข้างต้น สามารถบอกลักษณะเฉพาะของวัสดุที่ใช้ป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

1. วัสดุที่ใช้ต้องมีลักษณะเป็นวัสดุที่ดูดกลืนหรือสะท้อนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาตกกระทบให้มีความเข้มข้นน้อยกว่าคลื่นที่มาตกกระทบได้
2. ปัจจัยที่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการกำบังอีกค่าหนึ่งคือ ความหนาของวัสดุ ถ้าวัสดุมีความหนามากขึ้นก็จะทำให้มีค่า SE ที่สูงขึ้น
3. วัสดุที่ใช้ป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต้องมีค่าสภาพให้ซึมได้สัมพัทธ์ ถ้าค่านี้สูงก็จะทำให้ค่า SE สูงขึ้นด้วย
4. ค่า SE ยังขึ้นอยู่กับค่าความถี่ด้วย ถ้าความถี่สูงค่า SE ที่ได้ก็จะมีค่าสูงขึ้นด้วย
5. วัสดุต้องมีสมบัติการนำไฟฟ้าที่ดี

การเพิ่มการนำไฟฟ้าให้กับฉนวน เช่น ยาง เป็นต้น เพื่อใช้เป็นวัสดุป้องกันการแทรกแซงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถทำให้วัสดุที่ไม่มีสมบัติการนำไฟฟ้าสามารถนำไฟฟ้าได้โดย

1. ใช้พอลิเมอร์ที่มีคุณสมบัติที่นำไฟฟ้า เช่น พอลิแอนนิลีน พอลิไพโรล เป็นต้น
2. ใช้สารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ (conductive filler) เติมลงในวัสดุ เช่น เชม่าดำ เส้นใยคาร์บอน โลหะ (อลูมิเนียม ทองแดง เงิน และนิกเกิล) เคลือบเส้นใย เส้นใยโลหะ (metal fiber) ผงโลหะ เซรามิก เป็นต้น

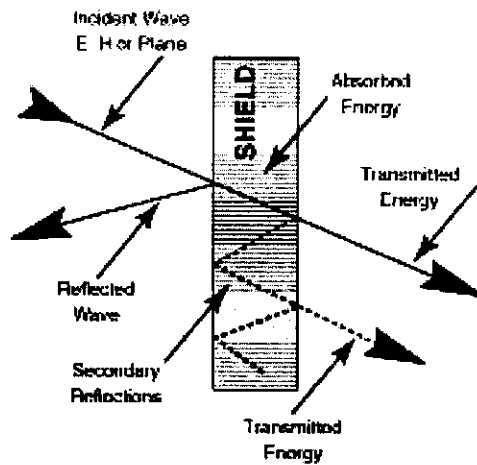
การนำไฟฟ้าของพอลิเมอร์คอมโพสิต สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีที่มีชื่อว่า percolation (Das *et al.*, 2001; Douglas *et al.*, 2004) เรียกบริเวณที่นำไฟฟ้าได้ว่า บริเวณของ percolation ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และเมื่อมีปริมาณ

ของอนุภาคที่นำไฟฟ้าน้อย ทำให้อนุภาคแยกห่างจากกันจึงทำให้การนำไฟฟ้าต่ำ (Michaela *et al.*, 2005) แต่เมื่อปริมาณของสารตัวเติมที่นำไฟฟ้ามากเกินไป ปริมาณ percolation ในยางคอมพอสิตนี้ก็จะมีการนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ในกรณีที่เติมด้วยเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณน้อย อนุภาคของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าอยู่ห่างกันมาก ทำให้การนำไฟฟ้าของยางคอมพอสิตมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับยางที่เติมเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้าในปริมาณที่มาก อนุภาคของเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้ามีระยะที่ชิดกันมากขึ้น (Chiang and Chiang, 1992; Zhang and Chen, 2004) และเขม่าคาร์บอนสามารถรวมตัวกันเป็นสายโซ่ยาวต่อเนื่องกันตลอดภายในยางคอมพอสิต ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้ดี (Pramanik *et al.*, 1991) และเมื่อปริมาณของอนุภาคที่นำไฟฟ้ามีจำนวนมากพอก็จะทำให้ความสามารถในการนำไฟฟ้าของยางคอมพอสิตมีค่าที่เสถียร (Das *et al.*, 2001)

2.7 กลไกการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

กลไกการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของวัสดุป้องกันการแทรกแซงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสดงในรูปที่ 2.10 ซึ่งมีกลไก ดังนี้

1. เมื่อคลื่นมาตกกระทบบนวัสดุที่ใช้กำบังจะมีการสะท้อน (reflection) ออกจากผิววัสดุที่ใช้กำบัง
2. คลื่นบางส่วนถูกวัสดุกำบังดูดกลืน (absorption) เอาไว้ และเปลี่ยนไปเป็นความร้อน
3. คลื่นบางส่วนจะทะลุผ่าน (transmission) วัสดุกำบัง
4. คลื่นบางส่วนจะมีการสะท้อนอยู่ภายในวัสดุกำบังตามความหนาและทะลุผ่านออกมาที่ผิวด้านหลังของวัสดุ (internal reflection)



รูปที่ 2.10 กลไกการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (<http://www.chomerics.com>, 2004)

กลไกของการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับแหล่งที่ปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
คือ

1. ถ้าต้องการป้องกันการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแหล่งปล่อยคลื่น กลไกการป้องกันจะเป็นแบบการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. ถ้าต้องการป้องกันวัสดุที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุที่ใช้ในการกำบังจะมีกลไกในการป้องกันเป็นแบบการสะท้อนและการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.8 สมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ

2.8.1 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ

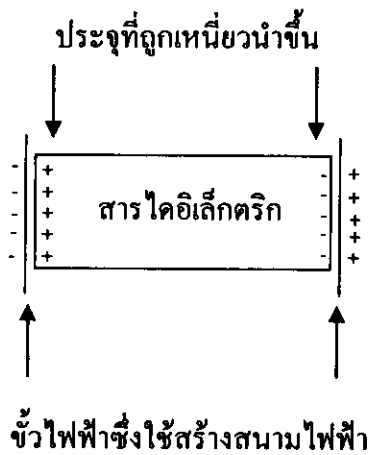
โดยปกติสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ ซึ่งวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง ($\sigma \gg 1$) จะเรียกว่าเป็น ตัวนำไฟฟ้าหรือโลหะ และถ้าวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ ($\sigma \ll 1$) จะเรียกว่าเป็น ฉนวน หรือไดอิเล็กตริก และนอกจากนี้ถ้าวัสดุมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างกึ่งกลางโลหะกับฉนวนจะเรียกว่าเป็น ตัวนำไฟฟ้ากึ่ง หรือสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุทั่วไปที่ใช้ได้กำหนดไว้ในตารางที่ 2.6 ซึ่งจากค่าสภาพนำไฟฟ้าในตารางแสดงให้เห็นสมบัติของวัสดุต่างๆ เช่น ทองแดง อลูมิเนียม เป็นตัวนำ หรือโลหะ เซอร์แมนเนียมและซิลิกอนเป็นสารกึ่งตัวนำ และ แก้วและยาง เป็นฉนวน เป็นต้น (นิรันดร์, 2545) ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีหน่วยเป็นซีเมนส์ต่อเมตร ซึ่งคำว่าซีเมนส์มีค่าเท่ากับส่วนกลับของโอห์ม ซึ่งเรียกว่า โมห์ (David, Ann and Jin, 1994))

ตารางที่ 2.6 ค่าสภาพนำไฟฟ้า (σ) โดยประมาณ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเมตร

วัสดุทั่วไป	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเมตร)
ตัวนำไฟฟ้า	
เงิน	6.1×10^7
ทองแดง	5.8×10^7
ทอง	4.1×10^7
อลูมิเนียม	3.5×10^7
สังกะสี	1.7×10^7
ทองเหลือง	1.1×10^7
เหล็กบริสุทธิ์	10^7
ตะกั่ว	5.0×10^6
ปรอท	10^6
คาร์บอน	3.0×10^4
น้ำทะเล	4
สารกึ่งตัวนำ	
เยอรมันเนียมบริสุทธิ์	2.2
ซิลิกอนบริสุทธิ์	4.4×10^{-4}
ตัวฉนวน	
น้ำกลั่น	10^{-4}
ดินแห้ง	10^{-5}
เบคไลต์ (bakelite)	10^{-10}
กระดาษ	10^{-11}
แก้ว	10^{-12}
กระเบื้องเคลือบ	10^{-12}
ไม้ก้ำ	10^{-15}
พาราฟิน	10^{-15}
ยางแห้ง	10^{-15}
ซีผึ้ง	10^{-17}

2.8.2 ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ หรือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (relative permittivity or dielectric constant)

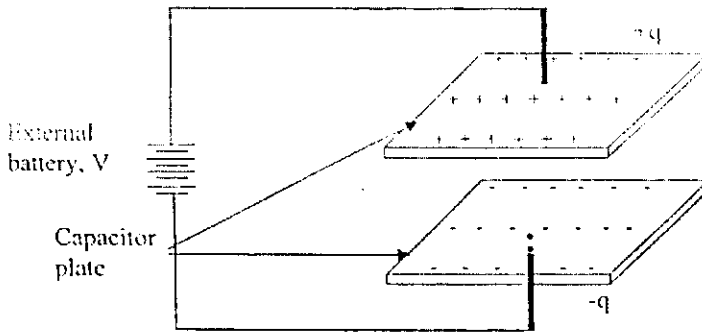
ถ้าวางสารที่ไม่ได้เป็นโลหะลงในสนามไฟฟ้า เช่น วางระหว่างแนวขนานของแผ่นเก็บประจุ จะเกิดประจุขึ้นที่ขอบหรือผิวของสารนั้น แสดงในรูปที่ 2.11 ประจุเหล่านี้เป็นประจุที่ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นโดยสนามไฟฟ้า และจะหายไปทันทีที่สนามไฟฟ้าหมดไป สารที่ประพุดิตัวเช่นนี้ คือ สาร ไดอิเล็กตริก (dielectrics)



รูปที่ 2.11 สาร ไดอิเล็กตริกในสนามไฟฟ้า (ศุภสโรช, 2547)

จากรูปที่ 2.11 แผ่นโลหะที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า จะต่ออยู่กับขั้วบวกและขั้วลบของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ความเข้มสนามไฟฟ้า E แผ่นที่ต่อกับขั้วบวกมีประจุบวก แผ่นที่ต่อกับขั้วลบมีประจุลบ ประจุเหล่านี้จัดเป็นประจุอิสระ สนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุอิสระ (E_0) จะทำให้ศูนย์กลางของประจุบวกและลบของอะตอมของไดอิเล็กตริกแยกออกจากกัน เกิดโมเมนต์คู่ขั้ว (dipole moment) เรียงตัวขนานกันและตรงข้ามกับสนามไฟฟ้า E เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า โพลาริเซชัน (polarization) การถูกโพลาริเซชันได้ของไดอิเล็กตริกทำให้ไดอิเล็กตริกนำไฟฟ้าได้บ้าง (ศุภสโรช, 2547)

พิจารณาตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนาน ประกอบด้วยแผ่นโลหะที่มีพื้นที่ A แยกห่างกันเป็นระยะ d แสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ตัวเก็บประจุชนิดแผ่นขนานอย่างง่าย (ศุภสโรช, 2547)

ในกรณีที่ช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองไม่มีตัวอย่าง เมื่อใส่ความต่างศักย์ไฟฟ้า V ให้กับแผ่นโลหะ โดยที่แผ่นโลหะแผ่นหนึ่งมีประจุสุทธิเป็น $+Q$ และแผ่นโลหะอีกแผ่นหนึ่งมีประจุสุทธิเป็น $-Q$ ค่าประจุ Q จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความต่างศักย์ไฟฟ้า V ดังนี้

$$Q = CV \quad (2.8)$$

$$\text{หรือ } C = \frac{Q}{V} \quad \frac{\text{coulombs}}{\text{volts}} \text{ หรือ farads, F} \quad (2.9)$$

ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุมีหน่วยเป็น คูลอมบ์ต่อโวลต์ หรือ ฟาแรด เนื่องจากประจุ Q กระจายอย่างสม่ำเสมอและสนามไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองมีความสม่ำเสมอ ค่าประจุ Q จึงมีค่าดังนี้ (John and Daniel, 1999)

$$Q = \rho_s A = DA = \epsilon EA \quad (2.10)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่ของแผ่นโลหะ (ตารางเมตร)

ρ_s คือ ความหนาแน่นประจุบนพื้นผิวโลหะ (คูลอมบ์ต่อตารางเมตร)

D คือ ความหนาแน่นของแรงดึงดูดไฟฟ้า (คูลอมบ์ต่อตารางเมตร)

E คือ สนามไฟฟ้า (โวลต์ต่อตารางเมตร)

ϵ คือ สภาพยอมของตัวกลาง (ฟาแรดต่อเมตร)

เนื่องจาก $V = Eh = Ed$ จะได้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ ดังนี้ (John and Daniel, 1999)

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{DA}{Ed} = \frac{\epsilon EA}{Ed} = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.11)$$

หรืออาจจะเขียนอยู่ในรูปทั่วไปได้ดังนี้ (John and Daniel, 1999)

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (2.12)$$

และถ้าช่องว่างระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองถูกแทนที่ด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก ค่าความจุไฟฟ้าของวัสดุไดอิเล็กตริก จะมีค่าแสดงในสมการ 2.13 เนื่องจาก $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d} \quad (2.13)$$

โดยที่ ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริก (relative permittivity or dielectric constant of dielectrics) (Rao, 2004)

ϵ_0 คือ ค่าคงที่สภาพยอมของอากาศ (permittivity of free space) มีค่าเท่ากับ 8.8542×10^{-12} ฟารัดต่อเมตร (David, Ann and Jin, 1994)

ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุบางชนิด แสดงในตารางที่ 2.7 โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะไม่มีหน่วย

ตารางที่ 2.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

วัสดุ	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก
อากาศ	1.0006
กระดาษ	2.0 – 3.0
ยาง*	2.0 – 4.0*
เทฟลอน	2.1
พอลิสไตรีน	2.56
ไนลอน	3.5
ไมกา	6
นีโอพรีน	6.7
เอทิลว แอลกอฮอล์	24.3
น้ำกลั่น	81
ไททานเนียม ออกไซด์	100

ที่มา : Rao, 2004

*<http://www.tpub.com>, 2005

2.9 การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในงานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.9.1 งานวิจัยที่ใช้วัสดุจำพวกยาง

Pramanik, Khastgir และ Saha (1991) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางไนไตรท์คอมโพสิต ที่ใช้สารตัวเติม 3 ชนิด คือ เส้นใยคาร์บอนแบบสั้น เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า (Conductex[®] 900) และสารตัวเติมผสมระหว่างเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นกับเขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า โดยทำการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง แล้วทำการขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้าโดยใช้อุณหภูมิการขึ้นรูปที่ 150 องศาเซลเซียส เวลา 10 นาที ทำการวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (SE) โดยใช้ความถี่สองช่วง คือ 200 – 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 8 – 12 จิกะเฮิร์ตซ์ (x-band) พบว่า ค่า SE ของยางคอมโพสิตจะขึ้นอยู่กับความถี่ที่ใช้ คือ ค่า SE จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความถี่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารตัวเติมเพิ่มขึ้น ค่า SE ก็เพิ่มขึ้น และการเพิ่มความหนาของชิ้นงานก็จะทำให้ค่า SE เพิ่มขึ้น การใช้เส้นใยคาร์บอนแบบสั้นทำให้ค่า SE สูงกว่าการใช้เขม่าคาร์บอนนำไฟฟ้า และสารตัวเติมผสมของทั้งสอง จากการทดลองยังพบว่าการใช้เส้นใยคาร์บอนแบบสั้นในปริมาณมากกว่า 30 phr สามารถที่จะใช้ประโยชน์เพื่องานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและงานด้าน

ไมโครเวฟ ซึ่งยางไนไตรท์คอมโพสิตที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นมีค่า SE ประมาณ 22 ถึง 27 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 8 ถึง 12 จิกะเฮิร์ตซ์

Das และคณะ (2000) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของยางธรรมชาติและยางเอทิลีนไวนิลอะซิเตด (ethylene vinyl acetate rubber, EVA) ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (Vulcan[®] XC-72) และเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ทำการผสมด้วยเครื่องผสมแบบปิด โดยเตรียมขึ้นตัวอย่างที่มีความหนา 1.8 และ 3.5 มิลลิเมตร แล้วนำไปวัดค่า SE ที่ความถี่สองช่วง คือ 100 – 2,000 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 8 – 12 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ค่า SE ของพอลิเมอร์คอมโพสิตขึ้นอยู่กับความถี่ คือ ถ้าความถี่เพิ่มขึ้นค่า SE ก็เพิ่มขึ้น ค่า SE ของยาง EVA มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ เนื่องค่าสภาพนำไฟฟ้าของยาง EVA มีค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ และค่า SE ยังเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณของเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นและจะให้ค่า SE สูงกว่าการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และพบว่าเมื่อใช้เส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ปริมาณ ≥ 20 phr สามารถใช้สำหรับจุดประสงค์ของงานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการใช้งานด้านไมโครเวฟ ซึ่งตัวอย่างค่า SE ของยาง EVA ที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น 30 phr มีค่า 34.1 เดซิเบล ที่ความถี่ 12 จิกะเฮิร์ตซ์

Das และคณะ (2001a) ได้ผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ทำมาจาก EVA ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (Vulcan[®] XC-72) เส้นใยคาร์บอนแบบสั้น และของผสมระหว่างเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ากับเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ซึ่งงานวิจัยนี้แตกต่างจากงานวิจัยในปี ค.ศ. 2000 คือใช้ยาง EVA เพียงชนิดเดียว เพื่อใช้ทำวัสดุกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้า และการใช้งานด้านไมโครเวฟ ในการเตรียมวัสดุเตรียมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ได้มีการศึกษาค่า SE ที่ความถี่สองช่วง คือ 100 - 2,000 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 8 - 12 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ค่า SE จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความถี่เพิ่มขึ้น และการเติมสารตัวเติมเข้าไปใน EVA ก็จะทำให้มีค่า SE เพิ่มขึ้น โดยการที่เติมเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น จะทำให้ค่า SE มีค่าสูงกว่าการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าและของผสมระหว่างเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้ากับเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น เช่น ยาง EVA ที่เติมด้วยเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ปริมาณ 30 phr มีค่า SE ประมาณ 30 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 8 - 12 จิกะเฮิร์ตซ์

Das และคณะ (2001b) ได้ผลิตพอลิเมอร์คอมโพสิตนำไฟฟ้าที่ทำมาจาก EVA, ยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (ethylene-propylene-diene rubber, EPDM) และยางผสมระหว่าง EVA/EPDM ในอัตราส่วน 50 ต่อ 50 และเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (Vulcan[®] XC-72 black) และเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ทำการเตรียมโดยการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความเร็วของโรเตอร์ 60 รอบต่อนาที โดยทำการวัดค่า SE ของพอลิเมอร์คอมโพสิตทั้งสามระบบ ที่ความถี่สองช่วง คือ 100 - 2,000 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 8 - 12 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ค่า SE ขึ้นอยู่กับความถี่ คือ จะมีค่า SE เพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มความถี่ และในการเติมสารตัวเติมเข้าไปก็ทำให้

ค่า SE เพิ่มขึ้นด้วย ในการเติมเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นลงในคอมโพสิตทั้งสามระบบจะทำให้มีการก้ำกึ่งมากกว่าการใช้เขม่าดำ ค่า SE ของยาง EVA มีค่ามากกว่ายาง EPDM ในสูตรเดียวกัน เนื่องจากยาง EVA เป็นยางที่มีขี้ผึ้ง ส่วนยาง EPDM เป็นยางที่ไม่มีขี้ผึ้ง และจากการทดลองพบว่า ยางผสมระหว่าง EVA/EPDM มีค่า SE สูงกว่า EVA และ EPDM ที่เติมเส้นใยคาร์บอนแบบสั้น ค่า SE ของยางผสมระหว่าง EVA/EPDM ที่เติมเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นปริมาณ 50 phr ในช่วงความถี่ 8 - 12 จิกะเฮิร์ตซ์ มีค่า SE ในช่วง 55 ถึง 60 เดซิเบล ขณะที่ยาง EVA หรือยาง EPDM ที่เติมเส้นใยคาร์บอนแบบสั้นปริมาณ 50 phr มีค่าประมาณ 50-55 เดซิเบล และ 45-50 เดซิเบล ตามลำดับ

Faez และ De Paoli (2001) ได้ทำการผลิตพอลิเมอร์นำไฟฟ้าที่ทำจากยางเอทิลีนโพรพิลีนไดอีน (EPDM) ผสมกับพอลิแอนิลีน (polyaniline, PANI) โดยทำการผสมด้วยเครื่องแบบปิดที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 50 รอบต่อนาที โดยทำการเติม EPDM ก่อน หลังจากนั้น 2 นาที จึงเติม PANI-DBSA (dodecylbenzene sulfonic acid) ผสมจนได้ทอร์คมีค่าคงที่ แล้วนำมารีดเป็นแผ่นด้วยการรีด (calendaring) หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการอัดเบ้า วัสดุนี้มีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมจะใช้เป็นยางเสริมแรง (reinforced rubber) พบว่า สมบัติการนำไฟฟ้าที่ดีจะใช้ Pani-DBSA ปริมาณ 30% (w/w) มีค่าเท่ากับ 0.8×10^{-6} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

Gwaily และคณะ (2002) ได้ทำการผลิตวัสดุคอมโพสิตของยางธรรมชาติที่นำไฟฟ้าที่เติมด้วยโบรอนคาร์ไบด์ (boron Carbide, B_4C) ใช้ในปริมาณ 0-50 phr ผลิตเพื่อใช้เป็นตัวก้ำกึ่งการแผ่ของอนุภาคนิวตรอน ตัวอย่างที่เตรียมมีความหนา 2, 3, 6 และ 9 มิลลิเมตร วัดความต้านทานการทะลุผ่านของนิวตรอน ใช้แหล่งพลังงานคือ Am/Be-neutron พลังงานเฉลี่ย 4.5 MeV ตัวตรวจวัด (detector) เป็น lithium fluoride crystals TLD-600 และ TLD-700 สำหรับ thermal neutrons และ γ -rays ตามลำดับ พบว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์การลดลงของ thermal neutron มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณโบรอน คาร์ไบด์จนถึงระดับ 20 phr มีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.345 ต่อเซนติเมตร

El-Tantawy และ Dishovsky (2004) ได้ทำการผลิตยางคอมโพสิตที่นำไฟฟ้าตัวใหม่ซึ่งสามารถใช้ในการก้ำกึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยใช้ยางบิวไทล์ (butyl rubber; IIR) เติมด้วยโบรอนคาร์ไบด์ ซึ่งเป็นเซรามิกนำไฟฟ้าใช้แทนเขม่าดำ สมบัติของโบรอนคาร์ไบด์ เช่น น้ำหนักเบา ทนต่อสารเคมีสูง มอดูลัสสูง ทนต่อการสึกหรอดี เป็นต้น ทำการผสมด้วยเครื่องบดสองลูกกลิ้ง ทำการขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส ความดัน 500 กิโลนิวตันต่อตารางเมตร ในการวัดค่า SE ของยางคอมโพสิตระหว่าง IIR/ B_4C โดยใช้ความถี่ช่วง 1-4 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่าค่า SE จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ปริมาณโบรอน คาร์ไบด์เพิ่มขึ้น และความถี่เพิ่มขึ้นค่า SE ก็เพิ่มขึ้นด้วย ค่า SE ของยางบิวไทล์ที่เติมด้วยโบรอนคาร์ไบด์ปริมาณ 40 phr มีค่า SE ประมาณ 35 - 40 เดซิเบล ในช่วงความถี่ 1 - 4 จิกะเฮิร์ตซ์

2.9.2 งานวิจัยวัสดุที่ทำการเคลือบเส้นใยคาร์บอนด้วยโลหะ หรือวัสดุที่เป็นพอลิเมอร์ที่นำไฟฟ้าแล้วนำไปผสมกับกับพอลิเมอร์

Chiang และ Chiang (1992) ได้ทำการผสมเส้นใยคาร์บอนที่เคลือบด้วยนิกเกิล ทำกับสารช่วยยึด (coupling agent ; Lica 38) แล้วนำไปผสมในพอลิคาร์บอนเนต (polycarbonate, PC) และอะครีโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (acrylonitrile-butadiene-styrene, ABS) ผสมด้วยวิธีผสมแบบหลอม (melt blending) ทำการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 20 รอบต่อนาที และขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้าที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส ความดัน 1.4 เมกะพาสกาล แล้วนำตัวอย่างที่เตรียมได้วัดค่า SE ซึ่งทำตามมาตรฐาน ASTM ES7-83 ความถี่ที่ใช้ทดสอบอยู่ในช่วง 20 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า การใส่ ตัวกระทำการก่อกวนเข้าไปทำให้การกระจายตัวและเพิ่มการเกาะติดของเส้นใยเข้ากับวัสดุ ค่า SE ที่ดีที่สุดมีค่าประมาณ 50 เดซิเบล

Huang และ Pai (1997) ได้ทำการผสมเส้นใยคาร์บอนที่เคลือบนิกเกิลโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (Electroless nickel coated carbon fibers, ENCF) กับอะครีโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) เตรียมเป็นคอมโพสิต เพื่อการใช้งานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมแบบปิด ทำการวัดค่า SE โดยใช้ช่วงความถี่ 30 - 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ และพบว่า ค่า SE ที่ดีที่สุดของคอมโพสิตระหว่าง ENCF/ABS มีค่าเท่ากับ 44 เดซิเบล เมื่อเติม ENCF ปริมาณ 20 phr และได้ศึกษาผลของสารตัวเติม อุณหภูมิ และปริมาณของเส้นใยที่ใช้ที่มีผลต่อค่า SE พบว่า ค่า SE เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเติมแอนติออกซิแดนท์ (antioxidant) และค่า SE จะดีที่สุดเมื่อเติมทั้งสารหล่อลื่น (lubricant) และแอนติออกซิแดนท์ การใช้อุณหภูมิสูงจะใช้ทอร์คต่ำในการผสม ซึ่งจะเป็นการลดความเค้นเฉือน (shear stress) และเป็นการป้องกันเส้นใยแตกหัก ซึ่งก็จะทำให้ค่า SE เพิ่มขึ้น และการใช้ ENCF ปริมาณ 30 phr จะทำให้ค่า SE ต่ำกว่าใช้ ENCF ปริมาณ 20 phr เพียงเล็กน้อย

Huang และ Chiou (1998) ได้ใช้อะครีโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) เติมด้วยสารตัวเติมที่นำไฟฟ้า คือ เส้นใยคาร์บอนที่นำไฟฟ้าเคลือบด้วยนิกเกิล (Nickel-coated conductive carbon fiber, NCF) และเส้นใยคาร์บอนที่นำไฟฟ้า (conductive carbon fiber, CF) ทำการผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 30 รอบต่อนาที แล้วทำการขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้า หลังจากนั้นนำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปวัดค่า SE ซึ่งทำตามมาตรฐาน ASTM ES7-83 ให้ค่า SE ที่ความถี่ 1000 เมกะเฮิร์ตซ์ เท่ากับ 47 เดซิเบล เมื่อใช้ NCF ปริมาณ 30 phr แต่เมื่อใช้ CF จะให้ค่า SE ลดลงเป็น 31 เดซิเบล แต่ถ้ามีการเพิ่มจำนวนรอบในการผลิตจะทำให้ค่า SE ลดลงเนื่องจากเส้นใยเกิดการแตกหัก

Huang และ Pai (1998) ได้ใช้เส้นใยคาร์บอนที่เคลือบด้วยนิกเกิล (Nickel coated carbon fibers) (ซึ่งเป็นสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้าที่ดีที่สุดสำหรับงานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า) นำไปเติมลงในอะคริโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) ผสมในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 200 หรือ 220 องศาเซลเซียส ความเร็วโรเตอร์ 20 รอบต่อนาที แล้วขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้า นำชิ้นทดสอบที่เตรียมได้ไปวัดค่า SE ตามมาตรฐาน ASTM ES7-83 โดยใช้ช่วงความถี่ 30-1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ จะให้ค่า SE ที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 44 เดซิเบล

Koul, Chandra และ Dhawan (2000) ได้ใช้พอลิแอนนิลิน (Polyaniline) เป็นพอลิเมอร์นำไฟฟ้า ผสมเข้ากับอะคริโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) ผสมในเครื่องอัดรีดแบบสองสกรู ที่ช่วงอุณหภูมิ 180-190 องศาเซลเซียส แล้วขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้า นำชิ้นทดสอบไปวัดค่า SE ที่ความถี่ 101 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่าค่า SE จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใส่พอลิเมอร์นำไฟฟ้าเข้าไป เมื่อใส่พอลิแอนนิลิน 2 phr จะให้ค่า SE เท่ากับ 5.91 เดซิเบล แต่เมื่อเพิ่มขึ้นเป็น 50 phr จะให้ค่า SE ที่มีค่ามากกว่า 60 เดซิเบล

Huang และ Mo (2002) ได้ทำการผสมเส้นใยคาร์บอนที่เคลือบนิกเกิลโดยไม่ใช้ไฟฟ้า (high-coated-thickness electroless nickel carbon fibre, HENCF) ผสมกับอะคริโลไนไตร-บิวทาไดอิน-สไตรีน (ABS) ในเครื่องผสมแบบปิด ที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์ 20 รอบต่อนาที หลังจากนั้นทำการอัดเบ้า แล้วนำชิ้นทดสอบไปวัดค่า SE ตามมาตรฐาน ASTM D4935-99 ในช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1.5 จิกะเฮิร์ตซ์ ได้ค่า SE ในช่วง 50 - 55 เดซิเบล

Dhawan Singh และ Rodrigues (2003) ได้นำพอลิแอนนิลิน นำไปผสมในพอลิสไตรีน (polystyrene, PS) และพอลิเมทิลเมทาไครเลต (poly(methylmethacrylate), PMMA) ผสมด้วยวิธีผสมแบบหลอม (melt blending) ในเครื่องผสมแบบปิด เป็นเวลา 5 นาที ด้วยความเร็วโรเตอร์ 100 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 180 ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยทำการเติมพอลิแอนนิลินในระดับตั้งแต่ 2 - 50 % ใน PS และ PMMA หลังจากนั้นทำการขึ้นรูปด้วยการอัดเบ้า แล้วนำชิ้นทดสอบไปวัดค่า SE ที่ความถี่ 101 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า เมื่อเติมพอลิแอนนิลิน 2 และ 5 % ลงใน PS จะให้ค่า SE เท่ากับ 4.23 และ 8.24 เดซิเบลตามลำดับ เมื่อเติมพอลิแอนนิลิน 10, 30, 40 และ 50% ให้ค่า SE เท่ากับ 11.32, 32.45, 42.79 และ 58.59 เดซิเบล จะสังเกตได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพอลิแอนนิลิน จะทำให้ค่า SE เพิ่มขึ้นด้วย

2.9.3 งานวิจัยวัสดุพอลิเมอร์ที่มีสมบัตินำไฟฟ้าไปเคลือบบนผ้า

Lee และคณะ (2002) ได้ทำวัสดุในการป้องกันการแทรกแซงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยพอลิไพโรล (polypyrrole, PPy) กับ โลหะผสม (AgPd) นำไปเคลือบบนเส้นใยพอลิเอทิลีนเทอเรพทาเลต (polyethylene terephthalate, PET) ที่ทอและเส้นใยพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) ที่ไม่ทอ แล้วนำไปวัดค่า SE ตามมาตรฐาน ASTM 4935-99 โดยใช้ความถี่ในช่วง 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1.5 จิกะเฮิร์ตซ์ ประสิทธิภาพของการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของ PPy/fabric และ AgPd/fabric complexes จะมีค่าอยู่ในช่วง 8 – 80 เดซิเบล ขึ้นอยู่กับค่าสภาพนำไฟฟ้า

Kim และคณะ (2002) ได้นำพอลิไพโรล ทำให้เกิดพอลิเมอร์เชซัน (polymerization) บนผ้าพอลิเอสเตอร์ (polyester) ทำการวัดค่า SE ตามมาตรฐาน ASTM D4935-89 ใช้ช่วงความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1.5 จิกะเฮิร์ตซ์ พบว่า ความถี่จากช่วง 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 1.5 จิกะเฮิร์ตซ์ ค่า SE เพิ่มขึ้นจาก 13 เดซิเบล ไปเป็น 26 เดซิเบล ด้วยการลดลงของค่าความต้านทานไฟฟ้าจาก 2.85 ถึง 0.75 โอห์มเซนติเมตร ตามลำดับ และค่า SE จะเพิ่มขึ้นถึง 36 เดซิเบล เมื่อมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำกว่า 0.75 โอห์มเซนติเมตร

Dhawan, Singh และ Venkatachalam (2002a) ได้นำพอลิแอนนิลีนเคลือบบนผ้า ใช้ทำวัสดุกำบังโดยการทำให้กระจายประจุไฟฟ้า ทำการวัดค่า SE ที่ความถี่ ที่ 101 จิกะเฮิร์ตซ์ ได้ทำการนำพอลิแอนนิลีนเคลือบบนผ้าซิลิกา ให้ค่า SE เท่ากับ 35.61 เดซิเบล ส่วน พอลิแอนนิลีนเคลือบบนผ้าพอลิเอสเตอร์ จะให้ค่า SE เท่ากับ 21.48 เดซิเบล การนำแอนนิลีนเคลือบบนผ้าทั้งสองชนิดเพื่อใช้กระจายประจุไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้น

Dhawan, Singh และ Venkatachalam (2002b) ได้นำพอลิแอนนิลีนและพอลิไพโรลเคลือบบนผ้า วัดค่า SE ในช่วงความถี่ 30 – 1,000 เมกะเฮิร์ตซ์ จะให้ค่า SE ในช่วง 30-40 เดซิเบล และที่ความถี่ 101 จิกะเฮิร์ตซ์ จะให้ค่า SE เท่ากับ 35.61 เดซิเบล และการศึกษาการสะท้อนคลื่นไมโครเวฟของผ้าที่เคลือบด้วยพอลิแอนนิลีนและพอลิไพโรลในช่วงความถี่ 8-12 จิกะเฮิร์ตซ์ จะให้ค่า SE ช่วง 3 ถึง 11 เดซิเบล พฤติกรรมของพอลิแอนนิลีนเคลือบบนผ้า จะดูดกลืนพลังงานได้ 98 % และสะท้อนเพียง 2 % เท่านั้น ส่วนกรณีของพอลิไพโรลเคลือบบนผ้าจะดูดกลืนพลังงานได้ 96 % และสะท้อน 4 %

Kim และคณะ (2003) ได้ทำการสังเคราะห์พอลิไพโรล ด้วยวิธีทางเคมีและไฟฟ้าเคมีบนผ้าไนลอน 6 (Nylon 6) ได้ทำการวัดค่า SE โดยใช้ช่วงความถี่ 50 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 13.5 จิกะเฮิร์ตซ์ ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 5 ถึง 40 เดซิเบล ขึ้นอยู่กับการนำไฟฟ้า วัสดุที่มีการนำไฟฟ้าสูง จะแสดงลักษณะเด่นของการสะท้อน ซึ่งเป็นตัวอย่างของพวกโลหะ อย่างไรก็ตามพวกวัสดุคอมโพสิตที่นำไฟฟ้าต่ำ จะเป็นวัสดุที่ดูดกลืนเป็นหลัก