บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 ผลการทดสอบค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากการทดสอบค่า SE ด้วยวิธีการเบื้องต้นและทดสอบตามมาตรฐาน EN 50147-1 สามารถสรุปปัจจัยหรือตัวแปรที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

1. ปัจจัยที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่า SE ประกอบด้วยการเพิ่มขึ้นของปริมาณผงโลหะ ปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และความหนาของชิ้นทดสอบ

2. เมื่อเพิ่มปริมาณของผงโลหะในยาง (ผงอลูมิเนียมขนาด 13 μm และขนาด 30 μm และผงดีบุกขนาด 30 μm) จะทำให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่า SE ของยางที่เติมผงโลหะที่แตกต่างกันทั้งสามชนิด โดยที่น้ำหนักเท่ากัน พบว่า ยางที่เติมด้วยผงอลูมิเนียมจะให้ค่า SE สูงกว่ายางที่เติมด้วยผงดีบุก และเมื่อเปรียบเทียบยางที่เติมด้วยผงอลูมิเนียมที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน คือ ขนาด 13 μm และ 30 μm พบว่า มีค่า SE ที่ใกล้เคียงกัน จึงเลือกใช้ผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm ในการทดสอบตามมาตรฐาน EN 50147 – 1 เนื่องจากผสมง่ายและฟุ้งกระจายน้อยกว่าผงอลูมิเนียมขนาด 13 μm

3. ค่า SE ของชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร และ 3 มิลลิเมตร ในตารางที่ 5.1 และ 5.2 ตามลำดับ เมื่อปริมาณของเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า (Ketjenblack EC-300J) เพิ่มขึ้นในยางทั้งสามชนิด พบว่า จะทำให้ค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้น

4. ยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะให้ค่า SE สูงกว่ายางที่เติมผงโลหะ แสดงว่าเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะให้ผลต่อค่า SE มากกว่าผงโลหะทั้งสามชนิด แต่เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงโลหะในยาง พบว่า ให้ค่า SE สูงกว่าเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า หรือผงโลหะเพียงอย่างเดียว

5. ชนิดของยางที่ใช้ พบว่ายางที่มีขั้วจะให้ค่า SE สูงกว่ายางที่ไม่มีขั้ว นั่นคือ ยาง ENR50 (มีขั้ว) และยาง CSM (มีขั้ว) จะให้ค่าสูงกว่ายางธรรมชาติ (ไม่มีขั้ว) แสดงว่า ยางธรรมชาติเมื่อมีการปรับปรุงโครงสร้างให้เป็นยางที่มีขั้ว ทำให้ค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าดีขึ้น

6. จากการทดสอบค่า SE ตามมาตรฐาน EN 50147-1 สูตรยางที่มีค่า SE สูงสุด คือ ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมขนาด 30 μm (ENR50 50/50/Al30) มีค่า SE ในช่วง 33.22 ถึง 41.74 เดซิเบล และช่วง 35.03 ถึง 42.76 เดซิเบล สำหรับยางที่มีความหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ จากค่า SE ของยางสูตรนี้ทั้งสองความหนาจะมีค่า SE ที่ใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากความหนาที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันน้อย

ตารางที่ 5.1 ค่า SE ในช่วงความถี่ 8.5 – 12 จิกะเฮิรตซ์ ของยางสูตรต่างๆ โดยชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร

ปริมาณ	ค่า SE (เดซิเบล)		
CCB / Al30	NR	ENR50	CSM
0/0	0.06 – 0.44	0.09 – 0.56	0.10 – 0.86
0/30	2.53 – 4.72	5.63 – 7.88	3.57 – 6.40
0/50	6.97 – 8.83	8.40 – 10.44	7.59 – 10.44
30/0	14.10 – 15.15	13.97 – 16.72	10.10 – 12.41
50/0	16.44 – 19.85	25.29 – 30.31	23.64 – 31.17
30/30	18.73 – 21.77	21.34 – 24.54	16.64 – 21.11
30/50	20.30 – 24.46	24.10 – 27.11	19.04 – 21.34
50/30	24.30 – 28.23	32.04 – 38.72	30.30 – 38.45
50/50	29.05 – 36.66	33.22 – 41.74	30.06 – 40.73

ตารางที่ 5.2 ค่า SE ในช่วงความถี่ 8.5 – 12 จิกะเฮิรตซ์ ของยางสูตรต่างๆ โดยชิ้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร

ปริมาณ CCB / Al30	ค่า SE (เดซิเบล)		
	NR	ENR50	CSM
0/0	0.11 – 1.26	0.25 – 1.26	0.19 – 1.69
0/30	1.01 – 5.57	0.95 – 6.01	3.08 – 6.48
0/50	0.90 – 7.37	2.88 – 8.07	1.47 – 7.54
30/0	21.64 – 27.46	20.47 – 22.06	19.64 – 23.59
50/0	27.82 – 36.64	32.94 – 43.37	36.16 – 41.34
30/30	26.45 – 32.77	33.57 – 39.56	24.22 – 26.74
30/50	36.06 – 40.17	32.54 – 40.97	28.25 – 35.52
50/30	34.89 – 40.54	35.02 – 43.11	-
50/50	35.46 – 41.54	35.03 – 42.76	-

5.1.2 สมบัติทางไฟฟ้า

จากการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของยางสูตรต่างๆ ประกอบด้วย ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ (ค่าความต้านทานไฟฟ้าเชิงซ้อน) พบว่า ยางทั้งสามชนิดเมื่อมีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียม จะทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าอิมพิแดนซ์มีค่าลดลง

ถ้าเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียม จะให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าอิมพิแดนซ์มีค่าลดลง มากกว่าเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว

ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และยาง CSM ในสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.3 - 5.5 ตามลำดับ

สูตรยางที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงที่สุด คือ ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr เพียงอย่างเดียว (ENR50 50/0) มีค่าสภาพนำไฟฟ้า เท่ากับ 1.03×10^{-5} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

สูตรยางที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูงสุด และค่าอิมพิแดนซ์ต่ำสุด คือ ยาง ENR50 ที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr (ENR50 50/50/Al30) มีค่าเท่ากับ 1.67×10^{4} และ173.56 โอห์ม ตามลำดับ

แต่เมื่อเปรียบเทียบในยางสูตร 50/50/Al30 ของยางทั้งสามชนิด ซึ่งเป็นสูตรที่ให้ค่า SE สูงสุด พบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กและค่าอิมพิแดนซ์ของยางทั้งสามชนิดมีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้าจะเห็นได้ว่า ยาง ENR50 และยาง CSM มีค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติ

ตารางที่ 5.3 ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ ของสูตรยางธรรมชาติ

สูตรยางธรรมชาติ CCB/Al30	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	ค่าอิมพิแดนซ์ (โอห์ม)
0/0	1.00×10^{-17}	2.71	3.61×10^{6}
0/50	8.37×10^{-16}	4.66	2.15×10^{6}
50/0	1.16×10^{-8}	1.08×10^{4}	8.45×10^{2}
50/30	9.66×10^{-9}	1.09×10^{4}	8.09×10^{2}
50/50	4.85×10^{-7}	1.47×10^{4}	7.26×10^{2}

ตารางที่ 5.4 ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ ของสูตรยาง ENR50

สูตรยาง ENR50 CCB/Al30	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	ค่าอิมพิแดนซ์ (โอห์ม)
0/0	-	5.43	2.02×10^{6}
0/50	8.54×10^{-13}	11.02	8.43×10^{5}
50/0	1.03×10^{-5}	1.29×10^{4}	3.98×10^{2}
50/30	5.37×10^{-6}	1.39×10^{4}	2.95×10^{2}
50/50	3.73×10^{-6}	1.67×10^{4}	1.74×10^{2}

ตารางที่ 5.5 ค่าสภาพนำไฟฟ้า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และค่าอิมพิแดนซ์ ของสูตรยาง CSM

สูตรยาง CSM CCB/Al30	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	ค่าอิมพิแดนซ์ (โอห์ม)
0/0	-	7.89	1.29×10^{6}
0/50	4.50×10^{-13}	16.69	5.76×10^{5}
50/0	9.17×10^{-6}	1.30×10^{4}	6.86×10^{2}
50/30	9.36×10^{-6}	1.33×10^{4}	5.15×10^{2}
50/50	9.32×10^{-6}	1.60×10^{4}	4.15×10^{2}

จากการทดสอบสมบัตินำไฟฟ้าทั้งสามข้างต้น พบว่า มีความสัมพันธ์กับค่า SE คือ เมื่อค่า SE มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสภาพนำไฟฟ้าและค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าอิมพิแดนซ์มีค่าลดลง ซึ่งค่า SE จะสัมพันธ์กับค่าสภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากสูตรของค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับค่าสภาพนำไฟฟ้าอยู่ด้วย ตามสมการที่ 2.3 ถึง 2.7

5.1.3 ผลการทดสอบสมบัติเชิงกล

5.1.3.1 ผลการทดสอบความทนต่อแรงดึง

ยางทั้งสามชนิดเมื่อมีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียม ทำให้ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด มีค่าลดลง และเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียมจะทำให้ค่าลดต่ำลงอีก

5.1.3.2 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการฉีกขาด

ยางทั้งสามชนิดเมื่อมีการเติมเขม่าดำนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียม จะทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่ายางที่เติมผงอลูมิเนียม เนื่องจากเขม่าดำที่มีอนุภาคเล็กจะทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดดีขึ้น แต่เมื่อยางที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียม ทำให้ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาดลดลง

5.1.3.3 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการบ่มเร่งด้วยความร้อน

ค่าความทนต่อแรงดึงและค่าระยะยืด ณ จุดขาด หลังจากการบ่มเร่งของยางธรรมชาติและยาง ENR50 มีค่าลดลง เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการขาดของสายโซ่โมเลกุล ส่วนยาง CSM มีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากการบ่มเร่ง เนื่องจากความร้อนทำให้เกิดการเชื่อมโยงมากขึ้น

5.1.3.4 ผลการทดสอบค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด

ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดของยางทั้งสามชนิดที่ทดสอบด้วยอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส มีค่าสูงกว่าที่อุณหภูมิห้อง นั้นคือ อุณหภูมิสูงจะทำให้ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัดสูงขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิสูงจะทำลายพันธะเชื่อมโยงมาก จึงทำให้มีการคืนรูปได้น้อยเมื่อนำแรงที่มากระทำออกไป

พิจารณาสมบัติเชิงกลของยาง ประกอบด้วย ค่าความทนต่อแรงดึง ค่าระยะยืด ณ จุดขาด ก่อนและหลังบ่มเร่ง ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด และค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด ของยางธรรมชาติ ยาง ENR50 และ ยาง CSM แสดงค่าในตารางที่ 5.6 – 5.8 ตามลำดับ

สูตรยางที่ให้ค่า SE และสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี นั่นคือ ยาง ENR50 และยาง CSM ที่เติมที่เติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr (ENR50 50/50/Al30 และ CSM 50/50/Al30) เมื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของยางทั้งสองสูตร ยาง CSM จะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่ายาง ENR50 ดังนั้นยางที่ให้ค่า SE และมีสมบัติเชิงกลที่ดีที่สุดในการศึกษานี้ คือ ยาง CSM

ตารางที่ 5.6 สมบัติเชิงกลของยางธรรมชาติ

ยาง ธรรมชาติ CCB/Al30	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (%)		ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (N/mm)	ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (%)	
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง		อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิ 70 °C
0/0	25.70	29.73	952	699	57.61	2.19	25.08
0/30	14.29	18.64	653	588	61.13	8.23	24.04
0/50	16.01	15.81	683	552	64.74	10.50	32.92
30/0	17.46	15.07	606	405	118.47	17.12	47.51
50/0	15.19	12.63	437	298	101.56	25.49	58.88
30/30	11.93	7.84	393	214	100.44	10.97	25.70
30/50	10.44	6.68	345	169	88.75	14.48	35.22
50/30	11.28	6.73	352	157	88.36	22.36	58.72
50/50	9.05	6.31	300	135	57.61	24.74	68.59

ตารางที่ 5.7 สมบัติเชิงกลของยาง ENR50

ยาง ENR50 CCB/Al30	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (%)		ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (N/mm)	ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (%)	
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง		อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิ 70 °C
0/0	31.89	24.47	871	818	60.89	44.12	76.04
0/30	21.91	15.05	633	646	74.06	17.38	59.14
0/50	15.16	9.59	542	492	63.52	24.61	57.05
30/0	28.64	24.10	563	448	130.18	27.35	53.27
50/0	21.17	20.88	367	272	123.91	31.95	73.04
30/30	18.74	13.63	441	312	87.78	39.03	53.00
30/50	15.97	10.07	419	245	78.76	48.71	62.80
50/30	17.38	15.80	324	192	96.69	44.13	53.84
50/50	12.33	10.57	236	130	77.86	52.84	70.02

ตารางที่ 5.8 สมบัติเชิงกลของยาง CSM

ยาง CSM CCB/Al30	ค่าความทนต่อแรงดึง (MPa)		ค่าระยะยืด ณ จุดขาด (%)		ค่าความต้านทานต่อการฉีกขาด (N/mm)	ค่าการยุบตัวเนื่องจากแรงอัด (%)	
	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง	ก่อนบ่มเร่ง	หลังบ่มเร่ง		อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิ 70 °C
0/0	25.49	31.86	798	615	33.82	37.14	71.70
0/30	19.83	25.91	689	617	40.99	28.62	73.06
0/50	16.46	16.58	628	511	42.40	25.62	49.42
30/0	29.74	34.50	748	742	149.38	18.64	36.23
50/0	19.79	27.30	276	352	120.33	23.55	40.42
30/30	25.71	25.05	648	545	109.73	26.11	58.37
30/50	21.55	23.72	485	455	110.09	33.51	70.12
50/30	25.07	22.58	339	294	115.12	24.57	71.46
50/50	19.73	27.52	258	288	114.38	22.74	71.92

5.1.3.5 ผลการทดสอบความแข็ง

ความแข็งของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อยางเติมด้วยผงอลูมิเนียมหรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า โดยที่เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าจะส่งผลต่อค่าความแข็งมากกว่าผงอลูมิเนียมและเมื่อมีการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียม จะให้ค่าความแข็งมากกว่าเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว โดยสูตรยางที่มีความแข็งมากที่สุด คือ สูตรยางที่มีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr จะให้ค่าความแข็งเท่ากับ 97, 89 และ 81 shore A สำหรับยาง CSM ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

5.1.3.6 ผลการทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของยางมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อยางเติมด้วยผงอลูมิเนียมหรือเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า โดยที่ผงอลูมิเนียมจะส่งผลต่อค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า และเมื่อมีการใช้เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าร่วมกับผงอลูมิเนียม จะให้ค่าความถ่วงจำเพาะมากกว่าเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าหรือผงอลูมิเนียมเพียงอย่างเดียว โดยสูตรยางที่มีค่าความถ่วงจำเพาะมากที่สุด คือ สูตรยางที่มีการเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr และผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr จะให้ค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.4407, 1.3270 และ 1.2555 สำหรับยาง CSM ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ

5.1.4 ผลการตรวจสอบการกระจายของผงโลหะในยางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

จากภาพถ่าย SEM พบว่าผงโลหะสามารถกระจายตัวได้ดีในยาง และจากภาพ x-ray mapping image สามารถสังเกตเห็นรูปร่างของผงโลหะได้ว่ามีลักษณะรูปร่างเป็นแท่ง ซึ่งลักษณะของผงโลหะแบบนี้เหมาะสำหรับการใช้งานด้านการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดสอบค่า SE ควรเป็นห้องปิด และไม่มีการสะท้อนของคลื่นกับผนังห้อง เพื่อป้องกันการสะท้อนของคลื่นที่ไม่ต้องการ
2. ทดลองทำยางผสมระหว่างยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิต
3. ทดลองนำสารตัวเติมที่นำไฟฟ้าได้ชนิดอื่นๆ ที่สามารถหาได้และเหมาะสมกับการผสมในยาง ศึกษาเปรียบเทียบค่า SE กับสารตัวเติมนำไฟฟ้าที่ได้ทำการทดลองแล้ว