ภาคผนวก ก

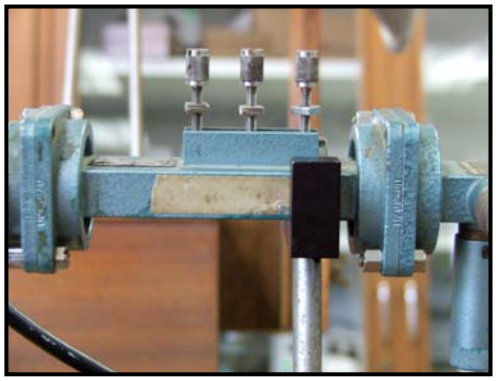
การทำ impedance matching ของเครื่องมือสำหรับวัดค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเบื้องต้น

เครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมแสดงในรูปที่ ก.1 ถึง ก.4 และมีขั้นตอนการทำ impedance matching ดังนี้

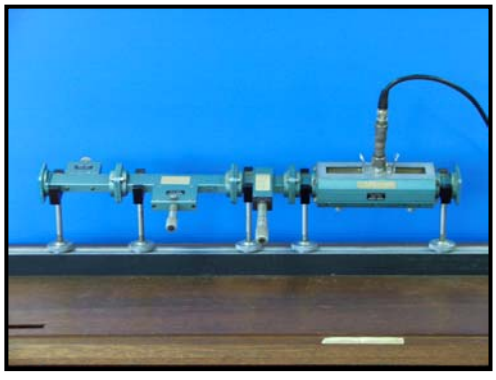
1. ถอดสายที่ต่อเข้ากับสายอากาศตัวส่ง และสายที่ต่อเข้ากับสายอากาศตัวรับออก แล้วนำสายทั้งสองต่อเข้ากับปลายท่อนำคลื่น (wave guide) ทั้งสองข้าง
2. ตั้งค่าความถี่ที่ใช้ซึ่งอยู่ในช่วง 8.5 ถึง 12 GHz และตั้งค่าระดับกำลัง (power level) ควรตั้งให้มีค่าต่ำ เช่น –5.00, -10.00 หรือ –15.00 เดซิเบลมิลลิวัตต์ เป็นต้น ผ่านเครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา (Hewlett Packard 83620B) แสดงในรูปที่ ก.1
3. ทำการปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้เข้าสู่ท่อนำคลื่น และปรับเข็มของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณให้อยู่ระหว่าง 60 – 70 โดยการหมุนปรับปุ่มตัวลด (attenuator) ทั้งสามปุ่มที่อยู่แถวบนของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณแสดงในรูปที่ ก.2
4. ปรับปุ่มบนตัวตรวจหาสัญญาณทั้งสามปุ่ม แสดงในรูปที่ ก.3 โดยหมุนออกจนสุดก่อนแล้วค่อยๆ หมุนปรับทีละตัวจนเข็มของเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณให้ค่าสูงสุดทั้งสามปุ่ม แล้วลองปรับทดสอบกลับไปกลับมาอีกครั้งเพื่อเป็นการตรวจสอบว่าให้ค่าที่สูงสุดหรือไม่
5. ตรวจสอบการทำ impedance matching ด้วยการใช้ตัวตรวจหาสัญญาณที่อยู่ระหว่างท่อนำคลื่น แสดงในรูปที่ ก.4 ซึ่งสามารถเลื่อนไปซ้าย ขวาได้ เพื่อหาจุดที่มีค่าต่ำสุด แล้วเลื่อนมาที่จุดสูงสุด อ่านค่าจากเครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณซึ่งค่าที่อ่านได้ควรมีค่าอยู่ในช่วง 1 – 3 ถ้าค่าที่ได้เกิน 3 ต้องทำ impedance matching ใหม่

รูปที่ ก.1 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ช่วงความถี่ 8.5 ถึง 12 จิกะเฮิรตซ์

รูปที่ ก.2 เครื่องบ่งชี้ระดับสัญญาณ V.S.W.R. Amplifier MK III



รูปที่ ก.3 ปุ่มปรับบนตัวตรวจหาสัญญาณ



รูปที่ ก.4 ท่อนำคลื่น และตัวตรวจหาสัญญาณที่สามารถเลื่อนซ้าย ขวาได้

ภาคผนวก ข

ค่า SE ของชิ้นทดสอบอ้างอิง

จากการทดสอบวัดค่า SE แบบเบื้องต้นในแต่ละครั้งได้ทำการวัดค่า SE ของชิ้นทดสอบของยางธรรมชาติสูตร NR 20/0 ทุกครั้งก่อนทำการทดสอบวัดค่า SE ของชิ้นทดสอบอื่นๆ เพื่อเป็นการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของผลการวัด และเป็นการตรวจสอบเครื่องมือที่ใช้วัดค่า SE และใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อบอกค่าความเบี่ยงเบนในการทดสอบแต่ละครั้ง พบว่า ในการทดสอบแต่ละครั้งของยางธรรมชาติสูตร NR 20/0 จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันที่ความถี่เดียวกัน แสดงในตารางที่ ข.1 และ ข.2 สำหรับชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เมื่อทำการทดสอบวัดค่า SE ของชิ้นทดสอบตามมาตรฐาน EN 50147 – 1 ได้เลือกชิ้นทดสอบยางธรรมชาติสูตร NR 30/0 เป็นตัวอ้างอิง พบว่า ในการทดสอบแต่ละครั้งของยางธรรมชาติสูตร NR 30/0 จะให้ค่าที่ใกล้เคียงกันที่ความถี่เดียวกัน แสดงในตารางที่ ข.3 และ ข.4 สำหรับชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตรและ 3 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ ข.1 ค่า SE ของยางสูตร NR 20/0 ชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง เมื่อทดสอบด้วยวิธีเบื้องต้น

ความถี่ (จิกะเฮิรตซ์)	ค่า SE ที่วัดได้ (เดซิเบล)					ค่าเฉลี่ย (เดซิเบล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เดซิเบล)
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
8.5	7.10	8.56	7.96	6.48	8.20	7.66	0.85
9.0	6.41	6.19	7.53	7.76	6.02	6.78	0.80
9.5	9.03	6.41	9.08	6.90	7.28	7.74	1.24
10.0	5.80	6.06	5.01	5.72	6.11	5.74	0.44
10.5	7.21	9.01	10.51	8.49	8.46	8.74	1.19
11.0	7.86	9.08	9.32	8.95	8.47	8.74	0.58
11.5	5.61	6.17	6.85	5.69	5.11	5.89	0.66
12.0	0.95	0.37	0.28	0.28	0.12	0.40	0.32

ตารางที่ ข.2 ค่า SE ของยางสูตร NR 20/0 ชิ้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง เมื่อทดสอบด้วยวิธีเบื้องต้น

ความถี่ (จิกะเฮิรตซ์)	ค่า SE ที่วัดได้ (เดซิเบล)					ค่าเฉลี่ย (เดซิเบล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เดซิเบล)
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5		
8.5	8.59	10.34	9.42	7.61	9.90	9.17	1.09
9.0	8.12	7.72	8.72	8.98	7.13	8.13	0.75
9.5	10.40	8.03	10.83	8.36	9.36	9.40	1.23
10.0	7.75	7.91	7.04	7.86	7.41	7.59	0.37
10.5	9.88	9.77	10.72	9.55	9.21	9.83	0.56
11.0	9.45	9.33	9.54	9.24	9.01	9.31	0.20
11.5	8.12	8.03	8.38	7.84	7.80	8.03	0.23
12.0	6.39	4.40	5.83	4.10	3.85	4.91	1.12

ตารางที่ ข.3 ค่า SE ของยางสูตร NR 30/0 ชิ้นทดสอบหนา 1 มิลลิเมตร ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน EN 50147-1

ความถี่ (จิกะเฮิรตซ์)	ค่า SE ที่วัดได้ (เดซิเบล)				ค่าเฉลี่ย (เดซิเบล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เดซิเบล)
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
8.5	14.84	14.87	14.24	14.57	14.63	0.29
9.0	14.32	14.34	14.09	13.42	14.04	0.43
9.5	14.42	14.67	14.10	14.84	14.51	0.32
10.0	14.10	14.86	14.77	14.76	14.62	0.35
10.5	14.19	14.37	14.87	14.52	14.49	0.29
11.0	14.18	14.27	14.16	12.94	13.89	0.63
11.5	14.21	14.23	14.71	15.70	14.71	0.70
12.0	15.15	14.97	15.10	15.18	15.10	0.09

ตารางที่ ข.4 ค่า SE ของยางสูตร NR 30/0 ชิ้นทดสอบหนา 3 มิลลิเมตร ที่ใช้เป็นตัวอ้างอิง เมื่อทดสอบตามมาตรฐาน EN 50147-1

ความถี่ (จิกะเฮิรตซ์)	ค่า SE ที่วัดได้ (เดซิเบล)				ค่าเฉลี่ย (เดซิเบล)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เดซิเบล)
	ครั้งที่1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4		
8.5	25.19	24.66	26.32	26.18	25.59	0.80
9.0	24.17	23.83	25.29	25.34	24.66	0.77
9.5	24.51	24.78	25.89	26.26	25.36	0.85
10.0	21.64	24.27	24.49	25.38	23.95	1.61
10.5	23.51	23.68	23.47	24.09	23.69	0.28
11.0	25.17	24.68	24.41	24.10	24.59	0.45
11.5	25.46	25.36	24.74	24.93	25.12	0.34
12.0	27.46	27.59	27.09	25.82	26.99	0.81

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบค่าสภาพนำไฟฟ้า (Specific conductivity)

การทดสอบค่าสภาพนำไฟฟ้านี้ไม่ได้ทำการทดสอบเองเนื่องจากที่มหาวิทยาลัยไม่มีเครื่องมือสำหรับวัดหาค่าได้ แต่ได้รับความอนุเคราะห์จากรองศาสตราจารย์ ดร.อนุวัต ศิริวัฒน์ วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทำการทดสอบให้และผลของค่าสภาพนำไฟฟ้าของยางสูตรต่างๆ แสดงดังตารางที่ ค.1 ซึ่งมีหน่วยเป็นซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (คำว่าซีเมนต์มีค่าเท่ากับส่วนกลับของโอห์ม (ohms) ซึ่งเรียกว่า โมห์ (mhos) (David, Ann and Jin, 1994))

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของยางเมื่อไม่เติมสารตัวเติมชนิดนำไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 10^{-15} ซีเมนต์ต่อเมตร (John and Daniel, 1999) หรือ 10^{-17} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร เมื่อยางธรรมชาติเติมด้วยผงอลูมิเนียมทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น แต่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าเมื่อเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณที่เท่ากันกับผงอลูมิเนียม และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกัน คือ เขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr ร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 phr ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกับยางธรรมชาติที่เติมเพียงเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้า 50 phr แต่เมื่อปริมาณของผงอลูมิเนียมเป็น 50 phr ที่เติมร่วมกับเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเป็น 50 phr ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของยาง ENR50 ที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกันค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าเมื่อเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อพิจารณาเมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr เท่ากันร่วมกับผงอลูมิเนียม 30 และ 50 phr พบว่า ค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ค่าสภาพนำไฟฟ้าของยาง CSM ที่เติมผงอลูมิเนียมมีค่าสภาพนำไฟฟ้าน้อยกว่าเมื่อเติมด้วยเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าในปริมาณที่เท่ากัน และเมื่อมีการเติมสารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกันค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

เปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้าของยางทั้งสามชนิด เมื่อเติมผงอลูมิเนียมปริมาณ 50 phr ยาง CSM มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่า ยาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ เมื่อเติมเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr ยาง ENR50 มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่ายาง CSM และยางธรรมชาติตามลำดับ และเมื่อใช้สารตัวเติมนำไฟฟ้าทั้งสองชนิดร่วมกันค่าสภาพนำไฟฟ้าของยาง CSM มีค่ามากกว่ายาง ENR50 และยางธรรมชาติตามลำดับ ทั้งยาง ENR50 และยาง CSM จะมีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่ายางธรรมชาติ เพราะยางทั้งสองชนิดเป็นยางที่มีขั้วจึงสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่ายางธรรม

ชาติซึ่งไม่มีขั้ว สูตรยางที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าดีที่สุดคือ ยาง ENR50 ที่เติมเพียงเขม่าดำชนิดนำไฟฟ้าปริมาณ 50 phr มีค่าสภาพนำไฟฟ้าเท่ากับ 1.03×10^{-5} ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

เปรียบเทียบยางในสูตรที่ให้ค่า SE สูงสุดของยางแต่ละชนิด คือ ยางสูตร 50/50/Al30 ยาง ENR50 และยาง CSM มีค่าสภาพนำไฟฟ้าใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ายางธรรมชาติ ซึ่งสอดคล้องกับค่า SE ที่ได้

จากการทดสอบค่า SE และค่าสภาพนำไฟฟ้าของยางสูตรต่างๆ มีความสัมพันธ์กัน คือ เมื่อค่า SE มีค่ามาก ค่าสภาพนำไฟฟ้าจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสอดคล้องกับสมการของประสิทธิภาพการกำบังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (สมการที่ 2.3 – 2.7) ดังนั้นค่าสภาพนำไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการกำบังคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ ค.1 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของยางสูตรต่างๆ

ปริมาณ	ค่าสภาพนำไฟฟ้า (ซีเมนต์ต่อเซนติเมตร)		
CCB / Al30	NR	ENR50	CSM
0/0	1.00×10^{-17}	-	-
0/50	8.37×10^{-16}	8.54×10^{-13}	4.50×10^{-13}
50/0	1.16×10^{-8}	1.03×10^{-5}	9.17×10^{-6}
50/30	9.66×10^{-9}	5.37×10^{-6}	9.36×10^{-6}
50/50	4.85×10^{-7}	3.73×10^{-6}	9.32×10^{-6}

ภาคผนวก ง

เวลาการวัลคาไนซ์ของยางสูตรต่างๆ

ค่าเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางสูตรต่างๆ สามารถหาได้จากเครื่องทดสอบหาเวลาการวัลคาไนซ์ของยาง (moving die rheometer, MDR 2000) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ค่าที่ได้จากเครื่อง คือ ค่า t_{90} และเมื่อทำการขึ้นรูปจะทำการปัดเศษของเวลาที่ได้จากเครื่องทดสอบหาเวลาวัลคาไนซ์เป็นจำนวนเต็ม ผลดังแสดงในตารางที่ ง.1 ส่วนเวลาในการวัลคาไนซ์ของยาง CSM บางสูตรมีค่ามาก เนื่องจากลักษณะการวัลคาไนซ์ของยาง CSM เป็นแบบมาร์ชชิ่งจึงทำให้ค่า t_{90} ที่ได้มีค่ามาก แต่จะเลือกเวลาในการวัลคาไนซ์ของยางสูตรที่มีเวลามากเกินไปให้มีเวลาวัลคาไนซ์เท่ากับสูตรที่มากที่สุดของยาง ENR50 คือ 18 นาที

ตารางที่ ง.1 เวลาในการวัลคาไนซ์ของยางสูตรต่างๆ

ปริมาณ CCB / Al30	เวลาในการวัลคาไนซ์ของยาง (นาที)					
	NR		ENR50		CSM	
	t_{90}	เวลาที่ใช้ขึ้นรูป	t_{90}	เวลาที่ใช้ขึ้นรูป	t_{90}	เวลาที่ใช้ขึ้นรูป
0/0	11.49	12.00	5.21	6.00	42.59	18.00
0/30	13.02	14.00	4.11	5.00	10.50	11.00
0/50	8.15	9.00	6.07	7.00	9.32	10.00
30/0	12.38	13.00	10.00	10.00	29.24	18.00
50/0	12.46	13.00	14.13	15.00	12.53	18.00
30/30	10.52	11.00	15.53	16.00	7.51	8.00
30/50	10.06	11.00	16.26	17.00	5.44	6.00
50/30	12.55	13.00	10.39	11.00	17.08	18.00
50/50	13.15	14.00	17.29	18.00	5.09	6.00