บทที่ ๖

สรุปและวิจารณ์

ในการทดลองศึกษาเวลาผ่อนคลาย และ ไดโพลโมเมนต์ของ MBBA และ EBBA นั้น เราต้องทำการทดลองวัดค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องดังได้กล่าวแล้วเราสามารถสรุปและวิจารณ์ผลการทดลองได้ดังนี้

๖.๑ ความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

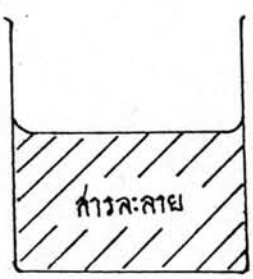
ความคลาดเคลื่อนในการ ดลองอาจมาจากสาเหตุดังต่อไปนี้

๑. เนื่องจากแรงตึงผิวของสารละลาย ทำให้ผิวบนของสารละลายไม่เรียบ มีความโค้งเล็กน้อย (ดูรูป ๖.๑) อาจทำให้การสะท้อนของคลื่นเปลี่ยนแปลงได้บ้าง

๒. การใช้เวอร์เนียวัดความลึกของสารละลายนั้นปลายของเวอร์เนียอาจทะลุเลยเข้าไปในเนื้อของสารละลายได้ในบางครั้งทำให้วัดค่า d ผิดพลาดได้

๓. สารละลายมีเบนซินเป็นตัวทำละลายซึ่งระเหยได้เร็ว อาจทำให้ความสูงเปลี่ยนแปลงได้บ้างในระหว่างการทดลอง และอาจทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนแปลงได้บ้างแต่น้อยมาก

วิธีแก้ไขเราต้องทำการวัดหลาย ๆ ครั้งแล้วนำค่าที่ได้มาเฉลี่ยและในการทดลองแต่ละครั้งต้องใช้เวลาสั้น ๆ



รูปที่ ๖.๑.๑แสดงผิวบนของสารละลายในท่อนำคลื่น

เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดี เราควรมีข้อพึงระวังดังนี้คือ แอทเทนูเอเตอร์จะต้องเป็นแบบที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนเฟสน้อยที่สุด ตลอดจนออสซิลโลสโคปต้องมีกำลังขยายสูงเพื่อให้เห็นสัญญาณได้ชัดเจนทำให้ผลการทดลองแม่นยำยิ่งขึ้น กำลังขยายที่ใช้ ๐.๐๒๕ โวลต์ต่อเซนติเมตร ซึ่งคิดว่าเพียงพอ ในการใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณที่ความถี่ไมโครเวฟ เมื่อเริ่มเปิดเครื่องนั้นความถี่ที่ได้จะยังไม่คงที่อาจคลาดเคลื่อนได้ ๒ – ๓ MHz แต่เราถือว่าน้อยมาก แต่เพื่อให้ผลการทดลองแม่นยำขึ้นเราต้องรอประมาณ ๑๐ – ๑๕ นาที เพื่อให้ความถี่ที่ได้ถูกต้อง และเนื่องจากสารที่ใช้ในการทดลองเป็นของเหลวดังนั้นการจัดวางเครื่องมือจึงต้องให้ท่อนำคลื่นสั้นอยู่ในแนวดิ่งโดยอาศัยลูกดิ่งและระดับน้ำซึ่งเป็นเครื่องวัดระดับช่วย เพราะการทดลองทุกครั้งจะต้องให้ผิวหน้าของสารละลายตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นไมโครเวฟ ส่วนความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการปรับพลันเจอร์ ถ้าเราพิจารณาให้ตำแหน่งของของพลันเจอร์ที่ถูกต้องเป็น p_1 จะทำให้เราทราบเฟสได้จากสมการ

$$\theta_1 = 2\beta_1(DT - p_1 - d) \qquad (๖.๑.๑)$$

แต่เนื่องจากความคลาดเคลื่อนในการวัด เราวัดตำแหน่งของพลันเจอร์ได้ p_2 จะทำให้ทราบเฟสได้ดังนี้

$$\theta_2 = 2\beta_1(DT - p_2 - d) \qquad (๖.๑.๒)$$

จากสมการ (๖.๑.๑) และ (๖.๑.๒) ทำให้เราทราบความคลาดเคลื่อนในการวัดได้ดังนี้

$$\Delta\theta = 2\beta_1 \Delta p$$

หรือ

$$\Delta p = \frac{\Delta\theta}{2\beta_1} \qquad (๖.๑.๓)$$

สมการ (๖.๑.๓) จะบอกถึงความคลาดเคลื่อนของการวัดตำแหนงของพลันเจอร์มีหน่วยเป็นเซนติเมตร ซึ่งในการทดลองจะผิดพลาดเพียง ๐.๐๐๕ เซนติเมตร ซึ่งไม่มากนัก

จากการวิเคราะห์ข้อมูล โดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับผลการทดลอง พบว่ามีความคลาดเคลื่อนดังกล่าวประมาณ ๑ – ๒ % เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ทำให้จุดตัดของกราฟที่เขียนระหว่าง

β_1' และ β_2'' ที่คำนวณจาก ρ และ Θ มีการกระจายแต่อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของตำแหน่งจุดตัดเหล่านี้จะให้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ ดังนั้นถ้าเราทดลองโดยเพิ่มความหนาของสารละลายขึ้นหลาย ๆ ค่าจะทำให้ได้ค่า β_1' และ β_2'' แม่นยำยิ่งขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่ค่าคงที่ฉนวนที่ถูกต้องยิ่งขึ้น

๖.๒ <u>การแปลผลทางฟิสิกส์</u>

ผลการทดลองวัดค่า μ และ τ ของผลึกเหลว MBBA และ EBBA ดังแสดงในตารางที่ (๕.๓๑) พอจะสรุปได้ในหัวข้อข้างล่างนี้

๑. เวลาผ่อนคลาย τ มีค่าประมาณ $๑๐^{-๑๑}$ วินาที เราพบว่าอยู่ใน order of magnitude เดียวกันและให้ผลใกล้เคียงกับการทดลองของ V.P.Arora and V.K.Agorwal[1] ที่ทดลองไว้ที่อุณหภูมิ ๒๗°C วัดค่า τ ของ MBBA และ EBBA ได้ ๒.๗×๑๐^{-๑๑} วินาที และ ๓.๕×๑๐^{-๑๑} วินาทีตามลำดับ แต่ค่า τ ที่เราทดลองได้ที่อุณหภูมิ ๒๗° C ได้ค่า τ ของ MBBA และ EBBA เท่ากับ ๐.๘๘๓×๑๐^{-๑๑} วินาที และ ๐.๔๖๘×๑๐^{-๑๑} วินาทีตามลำดับ

๒. จากตารางที่ (๕.๓๑) พบว่า τ(EBBA) $>\tau$(MBBA) ทั้งนี้เราพบว่าให้ผลสอดคล้องกับความเป็นจริง เนื่องจากการศึกษาด้านโครงสร้างของโมเลกุลของผลึกเหลวทั้งสองเราพบว่า EBBA มีโครงสร้างของโมเลกุลยาวกว่า MBBA

๓. จากการศึกษา τ ที่ทำการทดลองได้ควรมีค่าใกล้เคียงกันสำหรับที่ ๓ ความถี่ที่แตกต่างกันอาจแสดงถึงความคลาดเคลื่อนที่น่าจะศึกษา

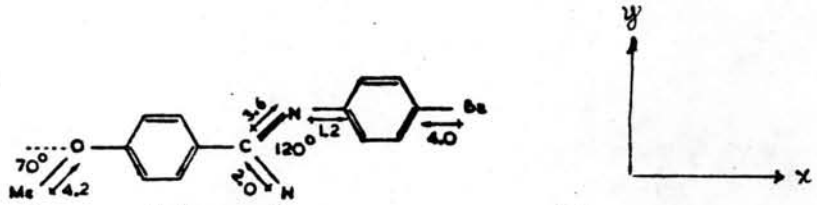
๔. ผลการวัดค่า μ ของ MBBA และ EBBA นี้เราพบว่า μ นี้จะแปรตามความถี่ ความจริง μ ควรจะมีค่าคงที่แต่ผลเฉลี่ยที่ได้ใกล้เคียงกับการทดลองของ V.P.Arora and V.K. Agorwal ซึ่งทดลองวัด μของ MBBA และ EBBA ได้ ๗.๐×๑๐^{-๓๐} Cm และ ๗.๕×๑๐^{-๓๐} Cm ตามลำดับ ที่เราทดลองวัด μของ MBBA และ EBBA ได้ ๕.๗๗×๑๐^{-๓๐} Cm และ ๕.๘๐×๑๐^{-๓๐} Cm ตามลำดับ ได้มีการศึกษาค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าของ MBBA โดยอาศัยกลุ่มโมเมนต์ (group moment)[2] ศึกษาผลรวมของไดโพลโมเมนต์ของกลุ่มต่าง ๆ ของโมเลกุลอิสระของ MBBA ดังแสดงในรูป (๖.๒.๑) ดังนั้นจะพิจารณาได้ดังนี้

$$\mu_x = (4.2\cos 70^\circ + 3.6\cos 60 - 2\cos 60 + 1.2 - 4.6) \times 10^{-31} \quad Cm$$

$$\simeq 1.1 \times 10^{-31} \quad Cm$$

$$\mu_y = (4.2 \sin 70^\circ + 3.6 \sin 60^\circ + 2.0 \sin 60^\circ) \times 10^{-31}$$

$$\simeq 6.5 \times 10^{-31} \quad Cm$$



รูปที่ (๖.๒.๑) แสดงกลุ่มโมเมนต์ของ MBBA ($\times 10^{-30}$ Cm)

ดังนั้นเราสามารถหาค่าไดโพลโมเมนต์ของโมเลกุลอิสระของ MBBA ได้ดังนี้

$$\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} \simeq 6.6 \times 10^{-31} \ Cm$$

๕. ที่น่าสังเกตุ $\mu(EBBA) \simeq \mu(MBBA)$ ซึ่งไม่ถูกต้องนักเพราะโมเลกุลของ EBBA ใหญ่กว่า MBBA ซึ่งทำให้ $\mu(EBBA) > \mu(MBBA)$ อาจเป็นไปได้ว่าผลการทดลองที่ความถี่ ๘.๐๐๐ GHz ของ MBBA คลาดเคลื่อนได้

ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองมีไม่ควรเกิน ๕ % ตัวอย่างดูได้ในตารางที่ ๕.๑๗ แต่ความแตกต่างของผลการทดลองนี้กับผลการทดลองของ V.P.Arora and V.K.Agorwal[1] เกินกว่าที่จะอธิบายได้โดยขอบเขตความคลาดเคลื่อนนี้ ความแตกต่างนี้อาจมาจาก

ก. การทดลองของ V.P.Arora and V.K.AGorwal[1] ที่ความถี่ ๔ , ๔ , ๓๐ GHz และ ∞ (ความถี่แสง) จะเห็นว่ามีพิสัยกว้างมาก อาจทำให้ผลถูกต้องดีกว่าที่วัดในพิสัยแคบ ๆ ในช่วง ๔ , ๑๐ และ ๑๒ GHz เนื่องจากพิสัยของความถี่กว้าง ๆ เราสามารถเขียนกราฟแบบ โคล์ – โคล์[9] (Cole-Cole plot)ได้ทำให้เราสามารถคำนวณค่า τ และ μ ได้ถูกต้องกว่า

ข. ถ้าเราพิจารณาสมการ

$$\epsilon' = \epsilon_\infty + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)\epsilon'' \qquad (๖.๒.๑)$$

สมการข้างบนเราใช้เป็นสมการสำหรับหาค่า τ โดยวัด ϵ', ϵ'' และ ϵ_∞ ที่ความถี่ ๔ , ๑๐ และ ๑๒ GHz เป็นไปได้ว่าสมการนี้ไม่ถูกต้องนักอาจมีความคลาดเคลื่อนของสูตรนี้ได้

๖.๓ ข้อเสนอแนะ

เพื่อการศึกษาสมบัติของผลึกเหลวที่ให้ผลดีกว่านี้ อาจทำการศึกษาโดยวิธีอื่น ๆ ปรับปรุงการทดลองให้มีประสิทธิภาพดีกว่าที่เป็นอยู่ ทำการทดลองโดยให้มีความเข้มข้นของสารละลายเจือจางมากกว่านี้อาจเป็น ๐.๐๑ mole fracetion จะทำให้สูตรข้างบนถูกต้องดียิ่งขึ้น ควรขยายช่วงความถี่ให้สูงกว่านี้ เพราะปัจจุบันเรามีพิสัย ๔ – ๑๒ GHz เท่านั้น

ภาคผนวกที่ ๑

<u>การเขียนโปรแกรมเครื่องคำนวณ</u>

๑. การเขียนโปรแกรม เพื่อหาค่า β_2' และ β_2'' ที่ทำให้ $\rho_e = \rho_e$ และ $\theta_e = \theta_e$ ในสารที่มีการดูดกลืนพลังงาน เราพิจารณาสมการ

$$\rho = \left(\frac{A^2+B^2}{C^2+D^2}\right)^{1/2} \qquad (๑.๑)$$

และ

$$\theta = \tan^{-1}\left\{\frac{BC-AD}{AC+BD}\right\} \qquad (๑.๒)$$

เพื่อความสะดวกในการเขียนโปรแกรมเราจัดเทอม A , B , C และ D ใหม่ดังนี้

$$A = 2e(1-e^{2b}\cos 2a) + \left\{(2a+2ae^{2b}\cos 2a)+2be^{2b}\sin 2a\right\}$$

$$B = 2e(1-e^{2b}\cos 2a) - \left\{(2a+2ae^{2b}\cos 2a)+2be^{2b}\sin 2a\right\}$$

$$C = \left\{(2b+2be^{2b}\cos 2a)-(2ae^{2b}\sin 2a)\right\} + 2ee^{2b}\sin 2a$$

$$D = \left\{(2b+2be^{2b}\cos 2a)-(2ae^{2b}\sin 2a)\right\} - 2ee^{2b}\sin 2a$$

โดยที่ $a = \beta_2' d$, $b = \beta_2'' d$, $e = \beta_1 d$

โปรแกรมนี้เราแยกเป็น ๒ ส่วน

๑.๑ โปรแกรมคำนวณ ρ และ θ (LBL A)

β_2'	STO	1
β_2''	STO	2
β_1	STO	3
d	STO	4
ρ	RCL	6
θ	display	

๑.๒ โปรแกรมคำนวณรากโดยวิธี intrapolate (LBL B)

ถ้า $\rho_1(\beta_2', \beta_{21}'', \beta_1, d)$ มี β_{21}'' เป็นรากโดยที่ $\rho_1 > \rho_E$

และ $\rho_2(\beta_2', \beta_{22}'', \beta_1, d)$ มี β_{22}'' เป็นรากโดยที่ $\rho_2 < \rho_E$

ซึ่ง ρ_E เป็น ρ ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นเราสามารถหา β_2'' ที่ทำให้ $\rho_e = \rho_E$ โดยอาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ว่า

$$\beta_2'' = \frac{(\rho_E - \rho_2)}{(\rho_2 - \rho_1)} \times (\beta_{21}'' - \beta_{22}') + \beta_{22}'' \qquad (๑.๓)$$

จากการศึกษาพบว่า ρ จะเปลี่ยนแปลงเร็วมากเมื่อ β_2'' เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเมื่อ β_2'' เพิ่มขึ้น ρ จะมีค่าลดลง

ในทำนองเดียวกัน ในการคำนวณรากของ Θ กระทำได้ดังนี้

ถ้า $\Theta_1(\beta_2', \beta_{21}'', \beta_1, d)$ มี β_{21}'' เป็นรากโดยที่ $\Theta_1 > \Theta_E$

และ $\Theta_2(\beta_2', \beta_{22}'', \beta_1, d)$ มี β_{22}'' เป็นรากโดยที่ $\Theta_2 < \Theta_E$

ซึ่ง Θ_E เป็น Θ ที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นเราสามารถหา β_2'' ที่ทำให้ $\Theta_e = \Theta_E$ โดยอาศัยเทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ว่า

$$\beta_2'' = \frac{(\Theta_E - \Theta_2)}{(\Theta_2 - \Theta_1)} \times (\beta_{21}'' - \beta_{22}'') + \beta_{22}'' \qquad (๑.๔)$$

จากการศึกษาพบว่า Θ จะเปลี่ยนแปลงเร็วมากเมื่อ β_2'' เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเมื่อ β_2'' เพิ่มขึ้น Θ จะมีค่าลดลง

<u>การเขียนโปรแกรม</u>

β_{21}'	หรือ β_{21}''	STO	A
Θ_1	หรือ ρ_1	STO	B
β_{22}'	หรือ β_{21}''	STO	C
Θ_2	หรือ ρ_2	STO	D
Θ_E	หรือ ρ_E	STO	E
β_2'	หรือ β_2''	display	

๒. การเขียนโปรแกรมเพื่อหาค่า β_2 สำหรับสารที่ไม่มีการดูดกลืนพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (LBL C) พิจารณาจากสมการ

$$\theta = \tan^{-1}\left\{\frac{2\beta_1\beta_2 \sin 2\beta_2 d}{(\beta_1^2-\beta_2^2)-(\beta_1^2+\beta_2^2)\cos 2\beta_2 d}\right\} \qquad (๑.๕)$$

การโปรแกรม

β_1 STO 1

β_2 STO 2

d STO 3

θ display

วิธีการคำนวณหาค่า β_2 คงอาศัยวิธีที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ (๑.๒)

โปรแกรมของเครื่องคำนวณ HP97 เขียนได้ดังนี้

001	*LBLA	21 11
002	RAD	16-22
003	RCL1	36 01
004	RCL4	36 04
005	×	-35
006	2	02
007	×	-35
008	STO5	35 05
009	RCL2	36 02
010	RCL4	36 04
011	×	-35
012	2	02
013	×	-35
014	STO6	35 06
015	RCL3	36 03
016	RCL4	36 04
017	×	-35
018	2	02
019	×	-35
020	STO7	35 07
021	RCL6	36 06
022	e^x	33
023	RCL5	36 05
024	COS	42
025	×	-35
026	STO8	35 08
027	RCL6	36 06
028	e^x	33
029	RCL5	36 05
030	SIN	41
031	×	-35
032	STO9	35 09
033	1	01
034	RCL8	36 08
035	-	-45
036	RCL7	36 07
037	×	-35
038	STOA	35 11
039	RCL5	36 05
040	RCL5	36 05
041	RCL8	36 08
042	×	-35
043	+	-55
044	RCL6	36 06
045	RCL9	36 09
046	×	-35
047	+	-55
048	STOB	35 12
049	RCL6	36 06
050	RCL6	36 06
051	RCL8	36 08
052	×	-35
053	+	-55
054	RCL5	36 05
055	RCL9	36 09
056	×	-35
057	-	-45
058	STOC	35 13
059	RCL7	36 07
060	RCL9	36 09
061	×	-35
062	STOD	35 14
063	RCLA	36 11
064	RCLB	36 12
065	+	-55
066	STOE	35 15
067	RCLA	36 11
068	RCLB	36 12
069	-	-45
070	STO1	35 46
071	RCLC	36 13
072	RCLD	36 14
073	+	-55
074	STO0	35 00
075	RCLC	36 13
076	RCLD	36 14
077	-	-45
078	STO5	35 05
079	RCLE	36 15
080	X^2	53
081	RCL0	36 00
082	X^2	53
083	+	-55
084	RCL1	36 46
085	X^2	53
086	RCL5	36 05
087	X^2	53
088	+	-55
089	÷	-24
090	$\sqrt{X}$	54
091	STO6	35 06
092	RCLE	36 15
093	RCL5	36 05
094	×	-35
095	RCL0	36 00
096	RCL1	36 46
097	×	-35
098	+	-55
099	RCL0	36 00
100	RCL5	36 05
101	×	-35
102	RCLE	36 15
103	RCL1	36 46
104	×	-35
105	-	-45
106	÷	-24
107	TAN⁻¹	16 43
108	RTN	24
109	*LBLB	21 12
110	RCLE	36 15
111	RCLD	36 14
112	-	-45
113	RCLB	36 12
114	RCLE	36 14
115	-	-45
116	÷	-24
117	RCLA	36 11
118	RCLD	36 14
119	-	-45
120	×	-35
121	RCLC	36 13
122	+	-55
123	RTN	24
124	RCL0	36 00
125	*LBLC	21 13
126	2	02
127	RCL2	36 02
128	×	-35
129	RCL3	36 03
130	×	-35
131	STO4	35 04
132	SIN	41
133	2	02
134	×	-35
135	RCL1	36 01
136	×	-35
137	RCL2	36 02
138	×	-35
139	RCL1	36 01
140	X^2	53
141	RCL2	36 02
142	X^2	53
143	-	-45
144	RCL1	36 01
145	X^2	53
146	RCL2	36 02
147	X^2	53
148	+	-55
149	RCL4	36 04
150	COS	42
151	×	-35
152	-	-45
153	÷	-24
154	TAN⁻¹	16 43
155	RTN	24

ภาคผนวกที่ ๒
ค่าคงที่ฉนวนที่ความถี่แสง

อาศัยสมการของแมกซ์เวลล์ โดยพิจารณาสมการ (๓.๒.๑) เราจะได้

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{B})$$

หรือ

$$\nabla^2 E = -\frac{\partial}{\partial t}(\vec{\nabla} \times \vec{B}) \qquad (๒.๑)$$

จากสมการ (๓.๑.๔) , (๓.๑.๖) และ (๒.๑) เราจะได้

$$\nabla^2 E = -\mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} E \qquad (๒.๒)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการ (๓.๑.๒) , (๓.๑.๔) , (๓.๑.๕) และ (๓.๑.๖) เราจะได้

$$\nabla^2 H = \mu\epsilon \frac{\partial^2}{\partial t^2} H \qquad (๒.๓)$$

สมการ (๒.๒) และ (๒.๓) เป็นสมการการเคลื่อนที่ของคลื่นดังนั้นเราได้ว่า

$$\mu\epsilon = \frac{1}{v^2}$$

หรือ

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \qquad (๒.๔)$$

เมื่อ v เป็นความเร็วของคลื่นในตัวกลางที่มีความถี่เป็นความถี่แสง ดังนั้นถ้าเราพิจารณาในตัวกลางที่เป็นสูญญากาศนั้นคือ $v \rightarrow c$ ดังนั้น

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \epsilon_o}} \qquad (๒.๕)$$

จากสมการ (๒.๔) และ (๒.๕) เราได้

$$\frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{\mu_o \epsilon_o}} \qquad (๒.๖)$$

ซึ่ง c/v เป็น ดรรชนีหักเหของแสงของตัวกลาง (η) อาศัยคุณสมบัติของสารไดอิเลคตริก ที่ว่า $\mu = \mu_0$ ทำให้สมการ (๒.๖) กลายเป็น

$$\eta = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{K_\alpha}$$

หรือ

$$K_\alpha = \eta^2 \qquad (\text{๒.๗})$$

โดยที่ K_α เป็นค่าคงที่ฉนวนที่ความถี่แสง