

บทที่ 4

ผลการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ

ในบทที่ 3 ได้แสดงผลการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ต่ำและความถี่แสง ซึ่งผลที่ได้สามารถจะนำไปคำนวณหาค่าโพลีโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้าของโมเลกุลได้

ในบทนี้ เราจะพิจารณาผลการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ (8.000 GHz และ 9.780 GHz) และการคำนวณหาค่าเวลาผ่อนคลาย τ จากค่าไดอิเล็กตริกดังกล่าวนี้

4.1 การวัดความสูงของสารละลายไดอิเล็กตริกในท่อน้ำคลื่น

ในการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายที่ความถี่ไมโครเวฟ เราจำเป็นต้องทราบค่าความสูงของสารละลายในท่อน้ำคลื่น วิธีที่สะดวกที่สุดก็คือการชั่งน้ำหนักสารละลายและท่อน้ำคลื่น ซึ่งสามารถทำได้รวดเร็วกว่าวิธีวัดอื่น ๆ และจากนั้นวัดความสูงของสารละลายในท่อโดยใช้เวอร์เนียร์คาลิปเปอร์ (Vernier - Callipers) เราทราบว่าน้ำหนักของสารในท่อน้ำคลื่น จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูงในท่อ และเนื่องจากสารมีเนื้อเดียวกัน มีความหนาแน่นคงที่และท่อน้ำคลื่นมีความกว้างยาวคงที่ตลอด จากการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของเบนซิน d ในท่อน้ำคลื่น และน้ำหนักของเบนซินรวมกับท่อน้ำคลื่น w เป็นกราฟเส้นตรง ดังแสดงเป็นตัวอย่างในรูปที่ 4.1 และในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 น้ำหนักและความสูงของเบนซินในท่อน้ำกลั่น

น้ำหนักของเบนซินรวมกับท่อน้ำกลั่น	ความสูงของเบนซินในท่อน้ำกลั่นวัดด้วยเวอร์เนีย
153.649 gm	5.823 cm
155.404 gm	6.699 cm
157.380 gm	7.695 cm
159.860 gm	8.935 cm

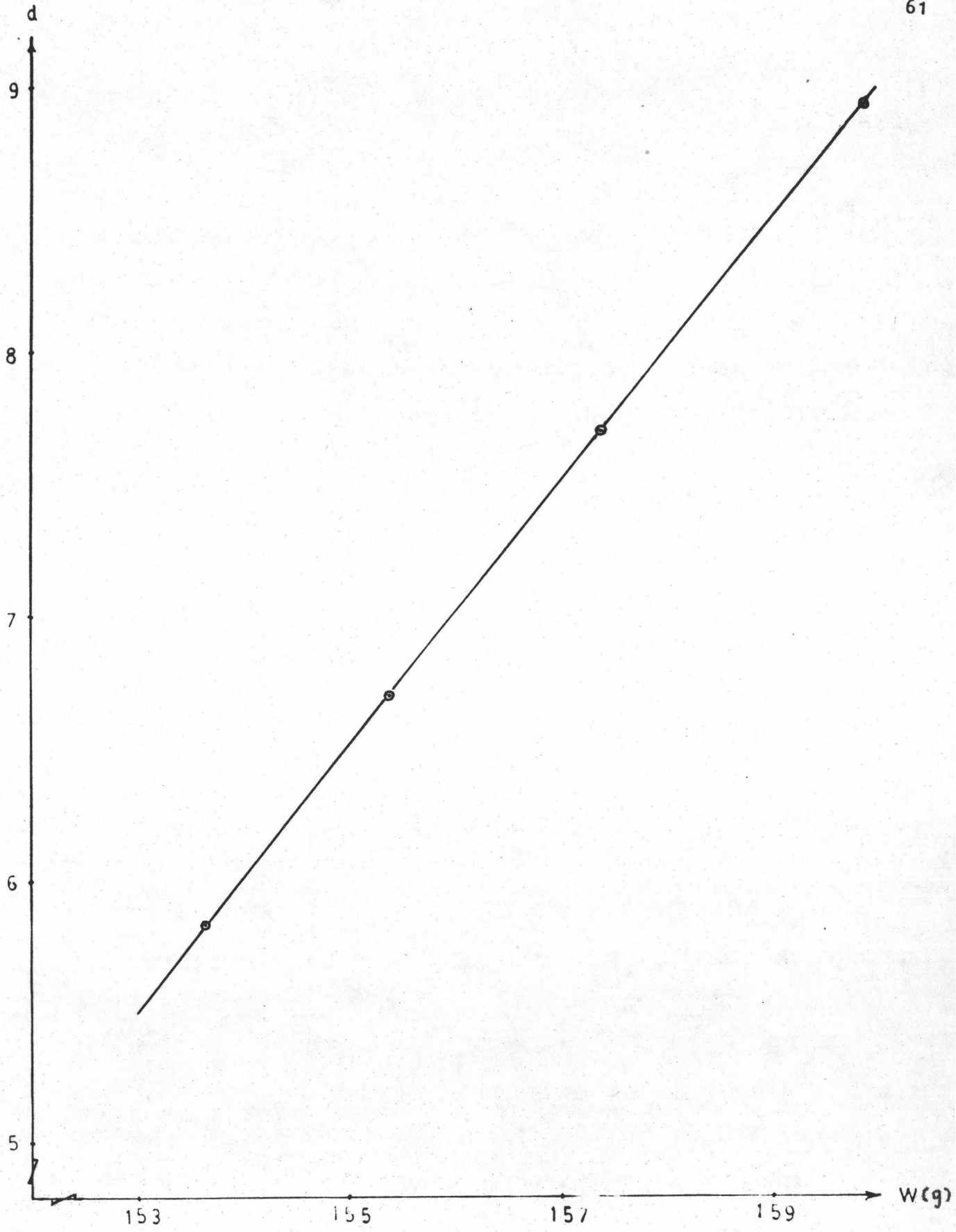
จากกราฟในรูปที่ 4.1 เราสามารถเขียนสมการโดยอาศัยวิธีกำลังสองน้อยสุดเพื่อหาความสูงของเบนซินในท่อน้ำกลั่นได้เป็น

$$d = (0.5013)w - 71.2064$$

ในการทดลองต่อมา ถ้าเราทราบน้ำหนักของสารละลายและท่อ w เราก็จะคำนวณความสูงของสารได้จากสมการข้างบน

4.2 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของเบนซินที่ความถี่ไมโครเวฟ

เนื่องจากโมเลกุลของเบนซินไม่มีไดโพลถาวร จึงไม่ดูดกลืนพลังงานของคลื่นไมโครเวฟ ค่าไดอิเล็กตริกที่แสดงการดูดกลืนสัญญาณคือ κ'' จึงมีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้นค่าไดอิเล็กตริกของเบนซินที่ความถี่ไมโครเวฟจึงเป็นจำนวนจริงมีค่า κ' ในการคำนวณหา κ' นั้นเราต้องหา β_2' ก่อนตามสมการ (2.2.16) ซึ่งเมื่อ $\kappa'' = 0$ แล้ว β_2'' จึงมีค่าในศูนย์ด้วย สมการ (2.2.16) จะเปลี่ยนเป็น



รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างความสูงและน้ำหนักของเบนซินในท่อน้ำกลั่น

$$\tan \theta = \frac{2\beta_1\beta_2' \sin 2\beta_2'd}{(\beta_1^2 - \beta_2'^2) - (\beta_1^2 + \beta_2'^2)\cos 2\beta_2'd} \quad (4.2.1)$$

สมการนี้ เมื่อเราทราบค่า $\tan\theta$ แล้วจากการทดลองที่กล่าวในบทที่ 2 เราสามารถนำค่า $\tan\theta$ แทนลงในสมการและคำนวณหาค่า β_2' ออกมาได้ ค่า β_2' ที่สอดคล้องตามสมการนี้ จะมีได้หลายค่า (multivalued) และห่างกันมาก ทำให้เราต้องหาวิธีการเลือกค่าที่ถูกต้อง

เนื่องจากเราได้วัดค่าโคอิเลกทริกของเบนซินที่ความถี่ 1 KHz มาแล้วได้ค่าโคอิเลกทริก k มีค่า 2.299 ± 0.006 ทำให้เราพอจะคาดเดาได้ว่าที่ความถี่ไมโครเวฟ เบนซินจะต้องมีค่า k ใกล้เคียงกันกับค่านี้นี้ และเรากำหนดค่า β_2' จากค่า k นี้ได้ตามสมการ

$$\beta_2' = \left\{ k\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.2.2)$$

ค่า β_2' ที่คำนวณได้โดยใช้ k ของเบนซินที่ความถี่ 1 KHz นี้เราจะเรียกว่า β_{20}' ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่า β_2' ที่หาได้จากสมการ (4.2.1) ค่าหนึ่งในหลายค่าที่กล่าวมา เนื่องจากค่า $\tan\theta$ นั้นมีค่าขึ้นอยู่กับ β_2' ถ้าพิจารณาให้ β_1, a คงที่ ดังนั้นการที่เราหาค่า β_{20}' ได้ใกล้เคียงกับ β_2' จึงทำให้เราสามารถหาค่า β_2' ได้ตามสมการ

$$\beta_2' = \beta_{20}' + \delta \quad (4.2.3)$$

โดย δ เป็นค่าน้อย ๆ ที่นำมาบวกกับ β_{20}' แล้วจะได้เป็น β_2' ที่เราต้องการ จากนั้นเราจะพบว่าค่า $\tan\theta$ ที่ได้จาก β_{20}' นั้นเป็น $\tan\theta_0$ และค่า $\tan\theta$ ที่ได้จากการทดลองสามารถกระจายออกได้เป็น

$$\tan\theta = \tan\theta_0 + \delta \left(\frac{\partial \tan\theta}{\partial \beta_2'} \right)_0 + \dots \quad (4.2.4)$$

สมการนี้เราสามารถหาค่า δ ออกมาได้ เมื่อนำค่า δ ที่ได้นี้ไปแทนลงในสมการ (4.2.3) ก็จะได้ β_2' ออกมา เรานำค่า β_2' นี้กลับเข้าไปแทนค่าลงในสมการ (4.2.1) อีกครั้งหนึ่ง เพื่อสังเกตว่าจะได้ค่า $\tan\theta$ ตรงกับ $\tan\theta$ จากผลการทดลองหรือไม่ ถ้าค่าทั้งสองยังไม่เท่ากัน

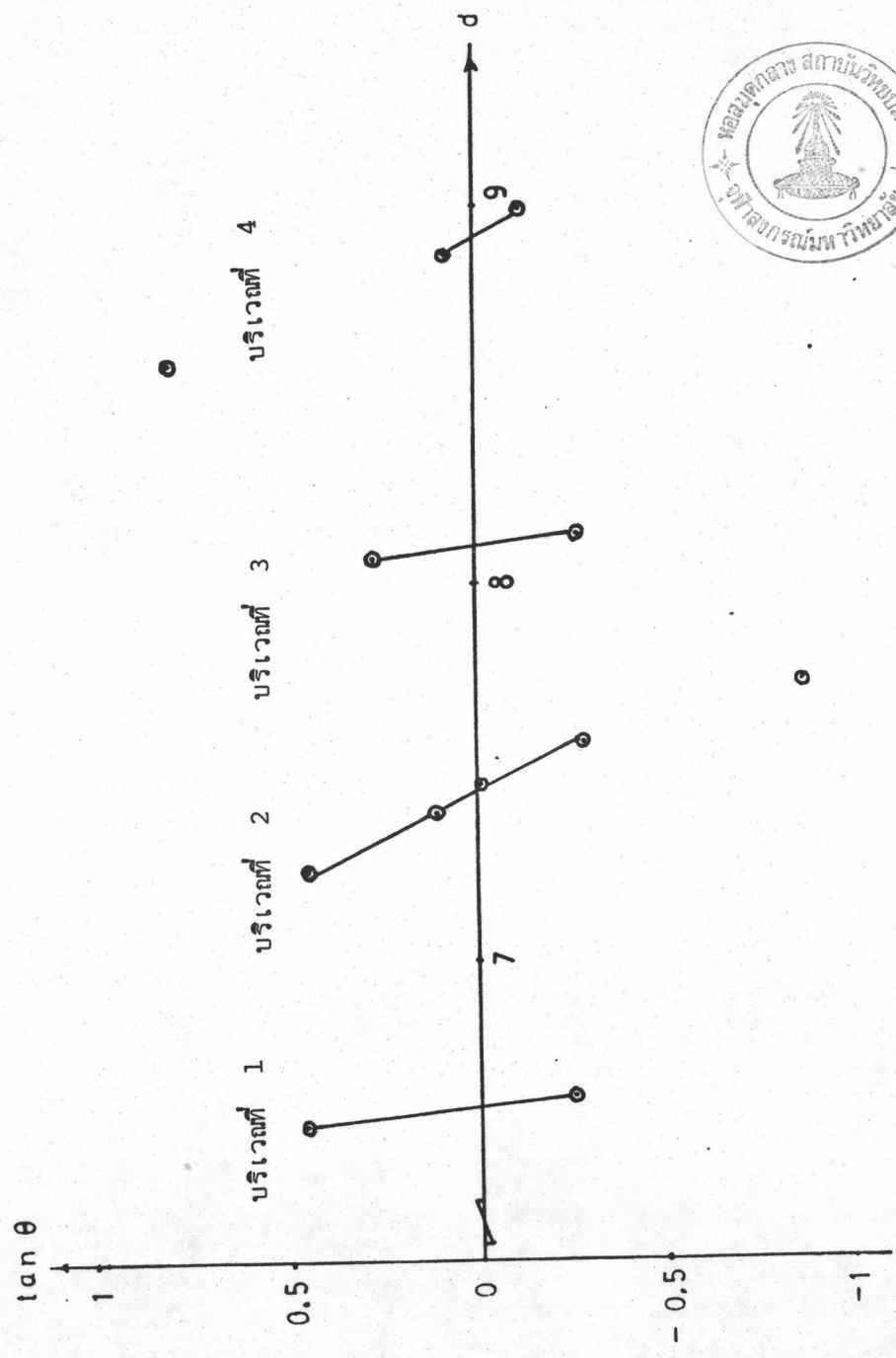
เราอาจจะทำเช่นเดียวกันนี้อีก โดยเปลี่ยน β_2 เป็น β_{20} และหาค่า δ ออกมาอีก และแทนค่าเช่นนี้หลายครั้ง จนค่า $\tan \theta$ ที่ได้จาก β_2 ทั่วสุดท้ายที่ได้มีค่าเท่ากับ $\tan \theta$ จากการทดลอง ซึ่งในการนี้เราสามารถใช้อุปกรณ์คำนวณแบบโปรแกรมช่วยในการคำนวณเพื่อความสะดวกรวดเร็วโดยใช้โปรแกรมอย่างง่าย เมื่อได้ค่า β_2 แล้วจึงหาค่า $\tan \theta$ ตรงกับที่ต้องการแล้ว เราจะหาค่าไดอิเล็กตริกของเบนซินที่ความถี่ไมโครเวฟออกมาได้ตามสมการ

$$K = \left\{ \beta_2'^2 + \left(\frac{\pi}{a} \right)^2 \right\} \left(\frac{c}{\omega} \right)^2 \quad (4.2.5)$$

ตัวอย่างการวัดเบนซินที่ความถี่ 8.000 GHz ตามวิธีการดังกล่าวได้ค่าดังตารางที่ 4.2 และแสดงกราฟระหว่าง $\tan \theta$ กับ d ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การวัดค่าไดอิเล็กตริกของเบนซินที่ความถี่ 8.000GHz

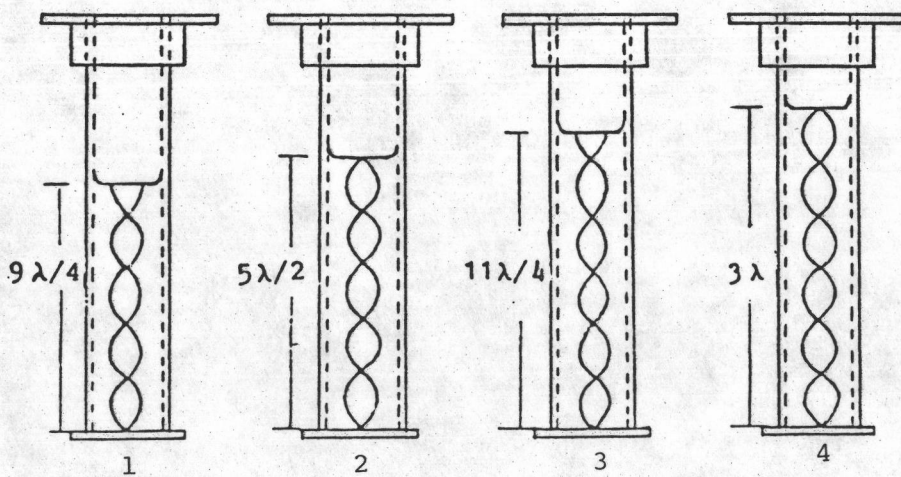
บริเวณที่	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม)	P(cm)	d	$\tan \theta$	β_2'	K	\bar{K}
1	155.118	2.993	6.5543	0.46647	2.14182	2.307	2.306
	155.269	3.266	6.6300	-0.23624	2.14015	2.304	
2	156.455	0.687	7.2246	0.45938	2.11207	2.262	2.263
	156.753	0.690	7.3740	0.13939	2.10964	2.258	
	156.924	0.680	7.4597	-0.00666	2.10669	2.254	
	157.148	0.709	7.5720	-0.28487	2.11394	2.265	
	157.453	0.783	7.7249	-0.86383	2.12264	2.278	
3	158.114	1.575	8.0562	0.28284	2.13705	2.300	2.300
	158.230	1.795	8.1143	-0.26373	2.13655	2.299	
4	159.143	2.485	8.5721	0.81573	2.12112	2.275	2.270
	159.725	2.508	8.8638	0.06068	2.11656	2.268	
	159.934	2.505	8.9688	-0.11508	2.11577	2.267	



รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างค่า $\tan \theta$ กับ d ของเบนซ์ที่ความถี่ 8.000 GHz

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าโคอีเลกทริกของเบนซินแต่ละบริเวณจะแตกต่างกัน แต่พอจะสังเกตได้ว่าบริเวณ 1 และบริเวณ 3 มีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับบริเวณ 2 และบริเวณ 4

บริเวณ 1 และ บริเวณ 3 นั้นมีค่าโคอีเลกทริกของเบนซินประมาณ 2.3 ซึ่งพบว่าค่านี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าโคอีเลกทริกของเบนซินที่ความถี่ 1 KHz แต่จากทฤษฎีเราพบว่าค่าโคอีเลกทริกของสารต้องลดลงเมื่อความถี่ของสนามไฟฟ้าสลับภายนอกสูงขึ้น ดังนั้นบริเวณ 1 และบริเวณ 3 นี้จึงให้ค่าโคอีเลกทริกของเบนซินไม่ถูกต้อง ส่วนบริเวณ 2 และบริเวณ 4 นั้นวัดค่าโคอีเลกทริกประมาณ 2.27 จึงน่าจะถือได้มากกว่า สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะว่าคลื่นไมโครเวฟที่แผ่ในเบนซินจะรวมกับคลื่นที่สะท้อนจากปลายปิคของท่อนำคลื่น มีลักษณะเป็นคลื่นนิ่ง และคลื่นที่แผ่ในเบนซินนี้จะมีคามยาวคลื่นเป็น λ'_g ตลอดความสูงของเบนซินในท่อนำคลื่น d สำหรับค่า d ที่จะทำให้ค่า $\tan \theta$ ที่คำนวณจากสมการ (4.2.1) เป็นศูนย์จะมีค่าสอดคล้องกับ $\sin 2\beta'_2 d = 0$ และ $2\beta'_2 d = n\pi$ โดย n เป็นเลขจำนวนเต็ม จากความสัมพันธ์ $\beta'_2 = \frac{2\pi}{\lambda'_g}$ จะทำให้เราหาค่า d ได้เป็น $d = \frac{n\lambda'_g}{4}$ แสดงว่าค่า d ที่ทำให้ $\tan \theta$ มีค่าเป็นศูนย์นั้นมีหลายบริเวณ จากตารางที่ 4.2 พบว่า β'_2 เฉลี่ย = 2.12 และค่า $\lambda'_g = 2.96$ cm รูปร่างของคลื่นนิ่งที่บริเวณ 1, 2, 3, 4 แสดงไว้ตามรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 คลื่นนิ่งในท่อนำคลื่นปลายปิคที่บริเวณต่าง ๆ

ค่า d ที่ทำให้ $\tan \theta$ มีค่าเป็นศูนย์จะเป็นตำแหน่งบัพ (Node) และปฏิบัพ (Antinode) ของคลื่นนิ่งสลบกันไป

พิจารณาตำแหน่งปฏิบัพของคลื่นนิ่งจะเห็นว่าบริเวณนั้นคลื่นมีแอมพลิจูดสูงมากและบริเวณขอบของเบนซินในท่อน้ำคลื่น ผิวของเบนซินจะไม่เรียบเนื่องจากแรงตึงผิวทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณนั้นเปลี่ยนแปลงไปมาก และสัมประสิทธิ์การสะท้อนก็จะเปลี่ยนไปเนื่องจากสนามไฟฟ้าที่ผ่านจากตำแหน่งนี้เป็นสนามที่เราจะนำไปวัดเฟสที่เลื่อนไป θ และอัตราการสูญเสียพลังงาน ρ จึงทำให้ค่าที่วัดได้มีความผิดพลาด

ส่วนบริเวณที่เป็นบัพของคลื่นนิ่งนั้นมีสนามไฟฟ้าแอมพลิจูดต่ำความผิดพลาดดังกล่าวนี้จึงมีผลต่อการวัดน้อย และจากการทดลองวัดเบนซินในตารางที่ 4.2 พบว่าบริเวณ 1 และ บริเวณ 3 ซึ่งเป็นปฏิบัพของคลื่นก็วัดค่าโคอีเลกทริกของเบนซินได้ผิดพลาดด้วย ดังนั้นเราจึงควรเลือกใช้ค่า d ซึ่งใกล้เคียงกับตำแหน่งของบัพของคลื่นนิ่งมากที่สุด ในการวัดค่าโคอีเลกทริกของสารละลายโดยเฉพาะสารที่เราต้องการวัดอัตราการสูญเสียพลังงานซึ่งเราจะทำการวัดต่อไป

ดังนั้นก่อนทำการวัดเราจึงต้องคำนวณหาค่าความสูงของสารในท่อน้ำคลื่นโดยให้เป็นตำแหน่งบัพต่าง ๆ จากความสัมพันธ์ $d = \frac{n\lambda}{4}$ เมื่อ d เป็นตำแหน่งบัพ ถ้า n จึงมีค่าเป็น 2, 4, 6...

เพื่อให้ได้ค่าโคอีเลกทริกที่ถูกต้องของเบนซิน เราจึงทำการวัดใหม่อีกครั้งโดยเลือกความสูงครมที่กล่าวมา ทำการวัดที่ความถี่ 8.000 GHz และ 9.780 GHz ซึ่งจะใช้วัดสารอื่นต่อไปด้วย ผลการวัดค่าโคอีเลกทริกของเบนซินโดยเลือกความสูง d ที่เป็นตำแหน่งบัพของคลื่นนิ่งในท่อน้ำคลื่น และจัดให้ $\tan \theta$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ที่ความถี่ 8.000 GHz และ 9.780 GHz แสดงในตารางที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ค่าโคอีเลกทริกของเบนซีนที่ความถี่ 8.000 GHz
($\beta_1 = 0.9585$, $DT = 1.581$)

น้ำหนักเฉลี่ย(กรัม)	$P_{เฉลี่ย}$	d	$\tan \theta$	β_2'	K
153.418	2.221	5.7021	0.43282	2.12820	2.286
153.667	2.220	5.8270	0.17280	2.12435	2.280
153.915	2.216	5.9513	-0.05962	2.12260	2.278
156.493	0.679	7.2436	0.43397	2.10935	2.258
156.648	0.679	7.3213	0.26655	2.10721	2.254
156.891	0.678	7.4432	0.02889	2.10613	2.253
157.078	0.691	7.5369	-0.17757	2.10955	2.258
159.608	2.506	8.8052	0.19936	2.11636	2.268
159.921	2.506	8.9621	-0.10439	2.1160	2.268

ค่าโคอีเลกทริกเฉลี่ย $\bar{K} = 2.267 \pm 0.007$

ตารางที่ 4.4 ค่าไดอิเล็กตริกของเบนซีนที่ความถี่ 9.780 GHz

$$(\beta_2 = 1.5189, \quad DT = 1.541)$$

น้ำหนักเฉลี่ย(กรัม)	Pค่าเฉลี่ย	d	tan θ	β_2'	K
153.193	2.055	5.5894	0.31936	2.76096	2.267
153.338	2.040	5.6620	0.13468	2.75290	2.256
153.693	2.076	5.8400	-0.56737	2.76645	2.274
155.480	0.910	6.7358	0.23144	2.75804	2.263
155.676	0.914	6.8341	-0.00598	2.75897	2.264
155.868	0.926	6.9303	-0.34781	2.76290	2.270
157.813	1.831	7.9054	0.24188	2.75486	2.259
157.966	1.855	7.9821	-0.06868	2.76288	2.270
158.012	1.841	8.0051	-0.09639	2.7580	2.263

$$\text{ค่าไดอิเล็กตริกเฉลี่ย } \bar{K} = 2.265 \pm 0.004$$

4.3 ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายคลอโรเบนซีนที่ความถี่ไมโครเวฟ

การวัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายคลอโรเบนซีน เราจะใช้วิธีการเกี่ยวกับการวัดค่าไดอิเล็กตริกของเบนซีน และเลือกความสูงของสารละลายในหลอดแก้วแบบเดียวกัน แต่เนื่องจากสารละลายคลอโรเบนซีนมีไดโพลถาวรซึ่งทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของคลื่น จึงทำให้เราวัดค่าจากการทดลองได้ 2 ค่าคือ $\tan\theta$ กับ ρ ค่าทั้งสองนี้เมื่อให้ β_1 และ d คงที่ จะขึ้นอยู่กับ β_2' และ β_2''

ในการคำนวณค่า β_2' และ β_2'' จากค่า $\tan\theta$ และ ρ ที่วัดได้ในตอนแรก เราจะใช้วิธีการแยกเกี่ยวกับการหา β_2' ของเบนซินโดยให้ β_2' มีค่าเป็น

$$\beta_2' = \beta_{20}' + \delta' \quad (4.3.1)$$

โดย β_{20}' เป็นค่าที่ได้จากค่าโคอิเลกทริกของเบนซินที่ความถี่ 1 kHz ตามสมการ (4.2.5) และ $\delta' \ll \beta_{20}'$

และในทำนองเดียวกัน β_2'' เราเขียนเป็น

$$\beta_2'' = \beta_{20}'' + \delta'' \quad (4.3.2)$$

โดย $\delta'' \ll \beta_{20}''$ เนื่องจากสารละลายที่ใช้มีความเข้มข้นต่ำมาก ค่า β_{20}'' จึงมีค่าน้อย เราอาจสมมติให้ $\beta_{20}'' = 0.01$ จากนั้นเราอาจกระจายค่า $\tan\theta$ และ ρ ได้ตามสมการ (4.3.3) และ (4.3.4)

$$\tan\theta = \tan\theta_0 + \delta' \left(\frac{\partial \tan\theta}{\partial \beta_2'} \right)_0 + \delta'' \left(\frac{\partial \tan\theta}{\partial \beta_2''} \right)_0 + \dots \quad (4.3.3)$$

$$\rho = \rho_0 + \delta' \left(\frac{\partial \rho}{\partial \beta_2'} \right)_0 + \delta'' \left(\frac{\partial \rho}{\partial \beta_2''} \right)_0 + \dots \quad (4.3.4)$$

โดยให้เทอมที่มี subscript 0 หมายถึง แทนค่าตัวแปร β_2' และ β_2'' ด้วย β_{20}' และ β_{20}'' ในเทอมนี้ สมการทั้งสองนี้เราสามารถเขียนได้ในรูป

$$\tan\theta - \tan\theta_0 = \delta'A + \delta''B \quad (4.3.5)$$

$$\rho - \rho_0 = \delta'C + \delta''D \quad (4.3.6)$$

เราจะแกสมการทั้งสองนี้เพื่อหาค่า δ' และ δ'' จากนั้นนำค่าไปแทนลงในสมการ (4.3.1) และ (4.3.2) จะได้อค่า β_2' และ β_2'' ซึ่งอาจนำไปแทนค่าตามสมการ (2.2.15) และ (2.2.16) แล้วยังไม่ได้อค่า $\tan\theta$ และ ρ ที่มีค่าเท่ากับค่าที่ได้จากการทดลอง เราจึงต้องทำซ้ำเช่นเดียวกับที่คำนวณหาค่าโคอีเลกทริกของเบนซิน จนได้อค่าที่เราต้องการ ผลการวัดค่าโคอีเลกทริกของสารละลายกลอโรเบนซินตามวิธีดังกล่าว โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย $C_2 = 0.029322$ ที่ความถี่ 8.000 GHz พร้อมทั้งคำนวณค่าต่าง ๆ จะได้อผลตามตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ค่าโคอีเลกทริกของสารละลายกลอโรเบนซินที่ความถี่ 8.000 GHz

$$(C_2 = 0.029322)$$

น้ำหนักเจือย (กรัม)	P เจือย	DB	d	$\tan\theta$	ρ	β_2'	β_2''	K'	K''
153.294	2.370	0.29	5.6400	0.24685	0.93541	2.17998	0.01244	2.3655	0.0193
153.730	2.375	0.325	5.8585	-0.18876	0.92790	2.18088	0.01428	2.3669	0.0222
154.081	2.372	0.44	6.0345	-0.57007	0.90365	2.17263	0.01550	2.3541	0.0240
156.333	0.854	0.545	7.1634	0.23175	0.88206	2.15697	0.01850	2.3299	0.0284
156.485	0.861	0.55	7.2396	0.06834	0.88105	2.15877	0.01964	2.3326	0.0302
156.564	0.857	0.525	7.2792	0.0	0.88614	2.15775	0.01879	2.3311	0.0289
156.886	0.878	0.675	7.4407	-0.36470	0.85605	2.16297	0.02154	2.3391	0.0332
159.190	2.729	0.695	8.5956	0.17267	0.85212	2.16987	0.02040	2.3497	0.0315
159.511	2.720	0.615	8.7566	-0.12083	0.86796	2.16824	0.01828	2.3473	0.0282
159.879	2.731	0.815	8.9410	-0.53979	0.82890	2.16761	0.01952	2.3463	0.0301

$$\bar{K}' \text{ เจือย} = 2.346 \pm 0.008$$

$$\bar{K}'' \text{ เจือย} = 0.028 \pm 0.002$$

สำหรับค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายกลอโรเบนซีนที่ความเข้มข้นอื่น ๆ ก็ใช้วิธีการวัด และคำนวณแบบเดียวกันนี้ โดยทำการวัดที่ความถี่ 8.000 GHz และ 9.780 GHz จะคำนวณค่า K' เฉลี่ย และ K'' เฉลี่ยดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายกลอโรเบนซีนที่ความถี่ไมโครเวฟ

ความถี่ 8.000 GHz			ความถี่ 9.780 GHz		
C_2	\bar{K}'	\bar{K}''	C_2	\bar{K}'	\bar{K}''
0	2.267 ± 0.007	0	0	2.265 ± 0.004	0
0.014622	2.317 ± 0.007	0.013 ± 0.003	0.010225	2.283 ± 0.003	0.010 ± 0.003
0.024205	2.336 ± 0.001	0.020 ± 0.003	0.020464	2.301 ± 0.006	0.016 ± 0.003
0.029322	2.346 ± 0.008	0.028 ± 0.002	0.030374	2.316 ± 0.006	0.027 ± 0.007

จากตารางที่ 4.6 เรานำค่าไดอิเล็กตริก K' และ K'' ไปเขียนกราฟเทียบกับเศษส่วนโมล C_2 จะได้อกราฟดังรูปที่ 4.4 และ 4.5

สมการของกราฟในรูปที่ 4.4 โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือ

$$K'' = (0.9148)C_2 \quad (4.3.7)$$

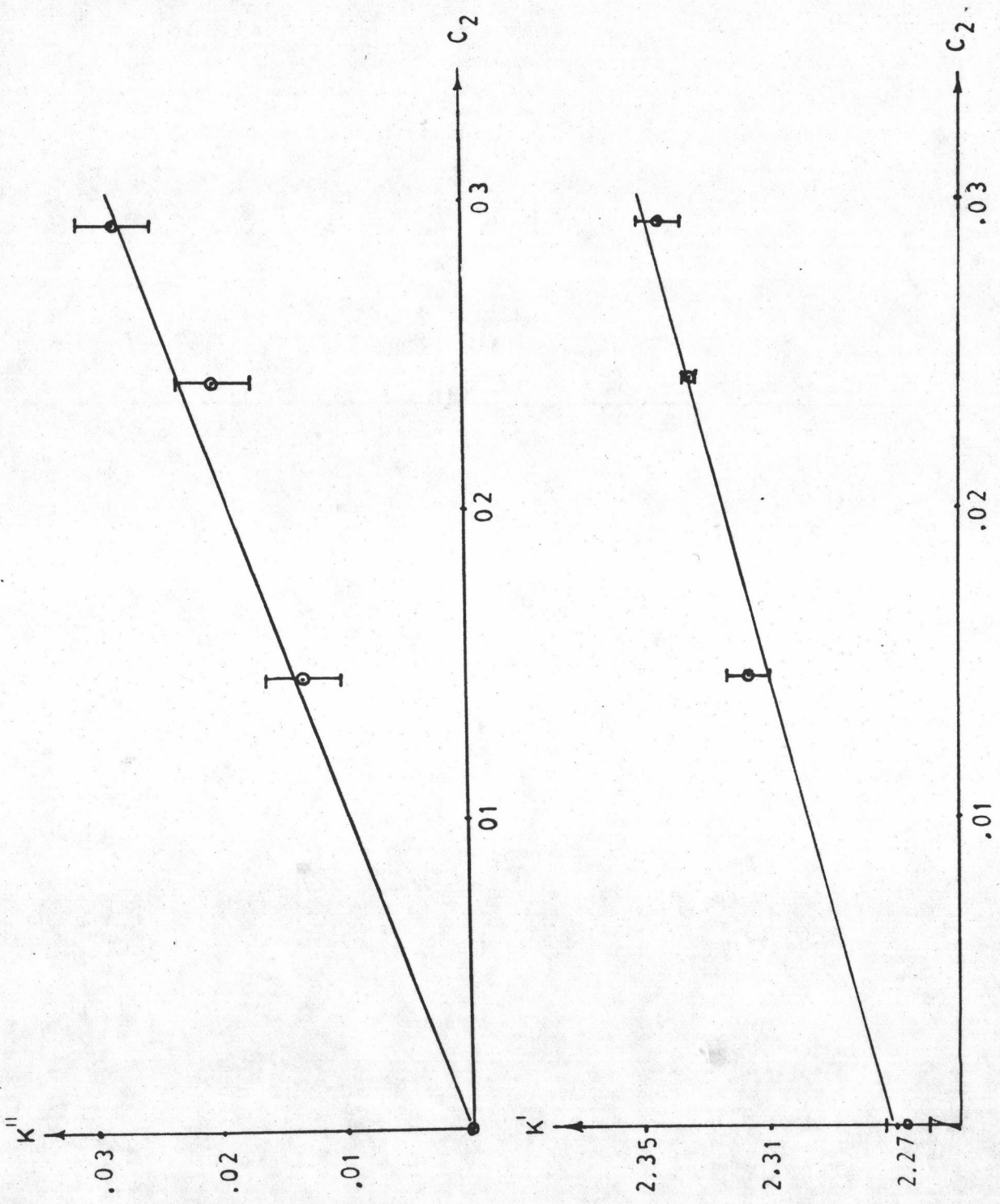
$$K' = (2.6972)C_2 + 2.271 \quad (4.3.8)$$

สมการของกราฟในรูปที่ 4.5 โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุดคือ

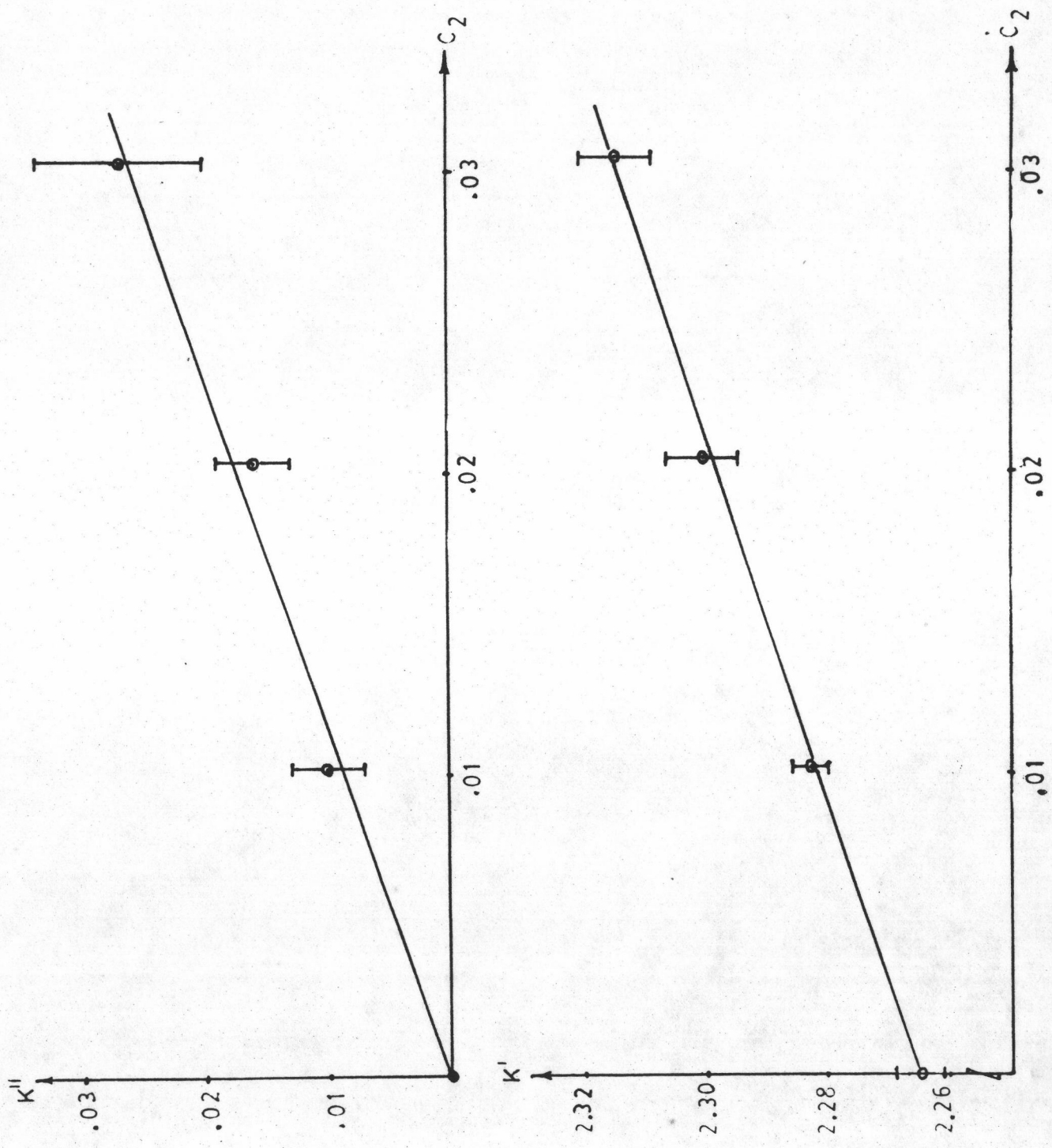
$$K'' = (0.8578)C_2 \quad (4.3.9)$$

$$K' = (1.6875)C_2 + 2.265 \quad (4.3.10)$$

จากสมการ (4.3.7), (4.3.8), (4.3.9), (4.3.10) และ (3.3.1) เรานำไปหา



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายกลอโรเบนซีนกับความเข้มข้นที่ความถี่ 8.000 GHz



รูปที่ 4.5 กราฟระหว่างค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายกลอโรเบนซีนกับความเข้มข้นที่ความถี่ 9.780 GHz

ค่าความชันของกราฟเป็น a' , a'' ที่ความถี่ 8.000 GHz 9.780 GHz และที่ความถี่แสง ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 : ค่าความชันของกราฟระหว่างค่าโคอีเลกตริกกับเศษส่วนโมลที่ความถี่ต่าง ๆ

ความถี่ (f)	a'	a''	a''/f
8.000×10^9	2.6972	0.9148	0.1144×10^{-9}
9.780×10^9	1.6875	0.8578	0.088×10^{-9}
ความถี่แสง	0.1052	-	-

จากตารางที่ 4.7 เราเขียนกราฟระหว่าง a' กับ a''/f ได้ดังรูปที่ 4.6 กราฟในรูปที่ 4.6 เขียนสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้เป็น

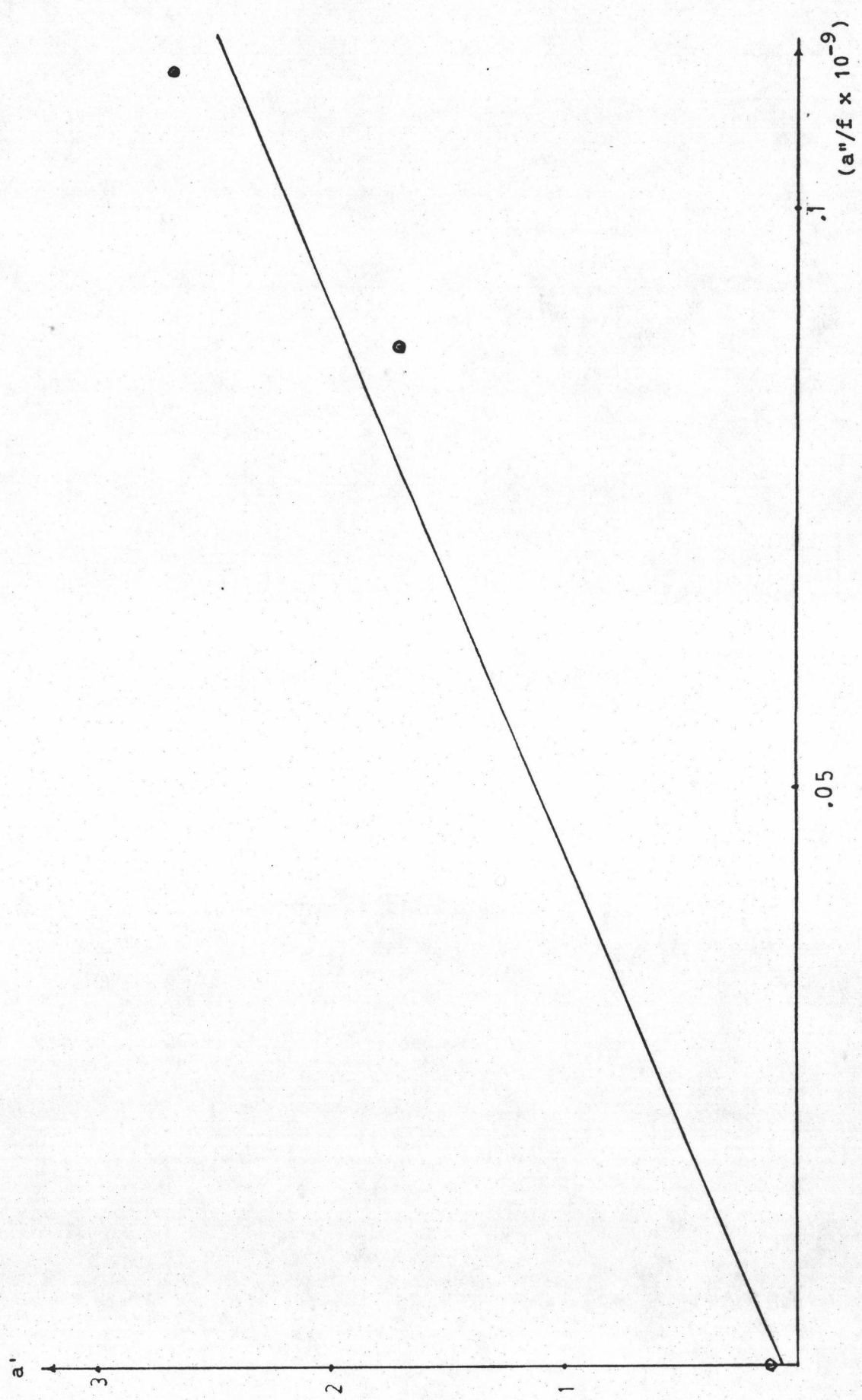
$$a' = (21.4798 \times 10^{-9}) \frac{a''}{f} + 0.0475 \quad (4.3.11)$$

จากสมการ (1.7.17) เราสามารถเขียนได้เป็น

$$a' = \frac{a''}{\omega\tau} + a_\infty = \frac{a''}{f(2\pi\tau)} + a_\infty \quad (4.3.12)$$

ทำให้เราสามารถหาค่า τ ได้ตามสมการ (4.3.11) และ (4.3.12) เป็น

$$\tau = \frac{1}{2\pi(21.4798 \times 10^{-9})} = 7.41 \times 10^{-12} \text{ วินาที}$$



รูปที่ 4.6 กราฟระหว่าง a' กับ a''/f ของสารละลายกลอโรเบนซีน

4.4 ผลการวัดค่าไคอิเล็กทริกของสารละลายโบรโมเบนซีนที่ความถี่ไมโครเวฟ

ตารางที่ 4.8 ค่าไคอิเล็กทริกของสารละลายโบรโมเบนซีนที่ความถี่ไมโครเวฟ

ความถี่ 8.000 GHz			ความถี่ 9.780 GHz		
C_2	\bar{K}'	\bar{K}''	C_2	\bar{K}'	\bar{K}''
0	2.267 ± 0.007	0	0	2.265 ± 0.004	0
0.010043	2.291 ± 0.007	0.009 ± 0.002	0.010092	2.285 ± 0.004	0.013 ± 0.004
0.020929	2.311 ± 0.005	0.021 ± 0.002	0.020393	2.301 ± 0.004	0.022 ± 0.006
0.031073	2.334 ± 0.011	0.028 ± 0.005	0.030160	2.319 ± 0.012	0.035 ± 0.007

จากตารางที่ 4.8 นำไปเขียนกราฟระหว่าง a' กับ a''/f โค้งดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

กราฟในรูปที่ 4.7 เขียนสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้เป็น

$$K'' = (0.9230)C_2 \quad (4.4.1)$$

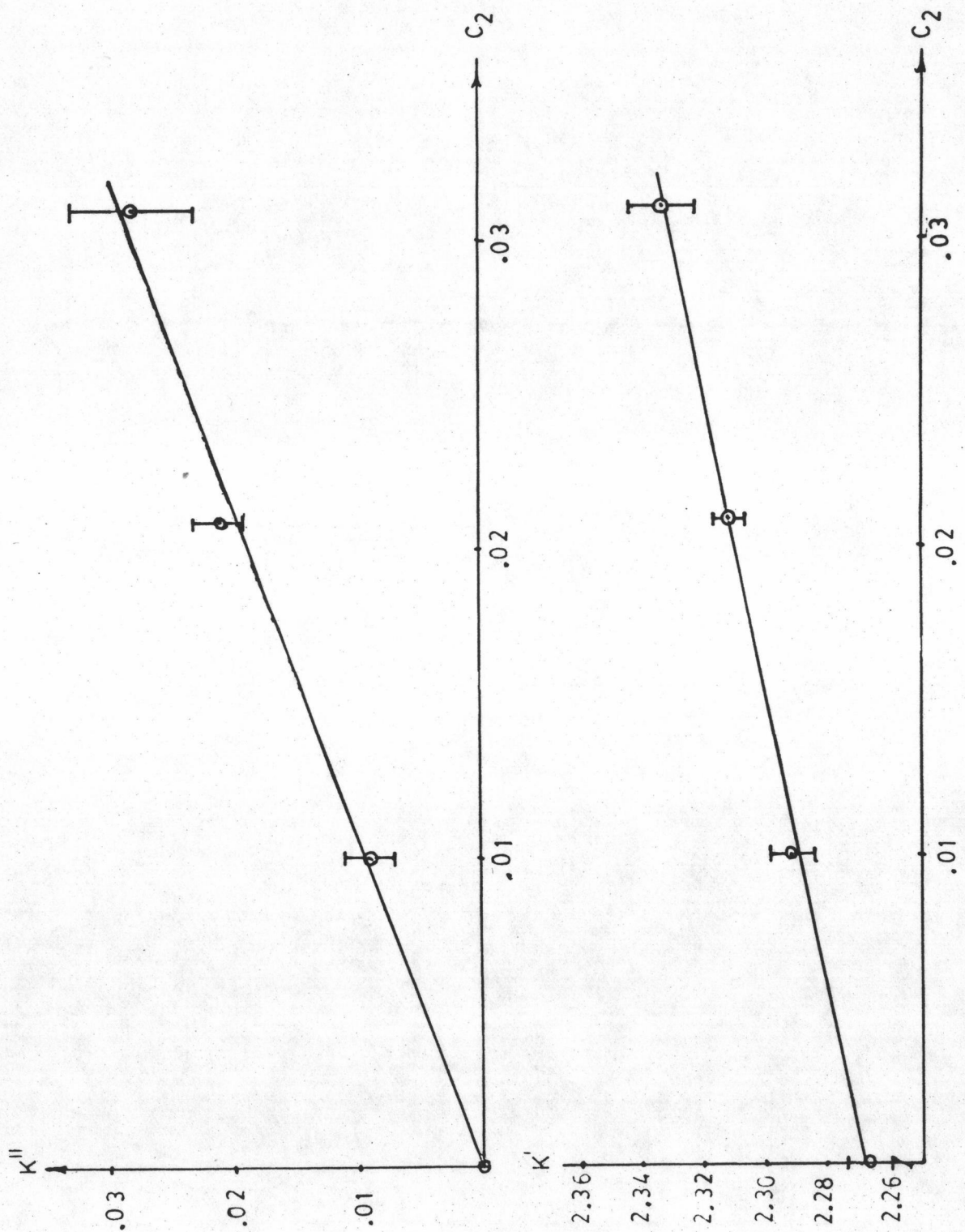
$$K' = (2.1213)C_2 + 2.268 \quad (4.4.2)$$

สมการของกราฟในรูปที่ 4.8 โดยใช้วิธีกำลังสองน้อยสุดคือ

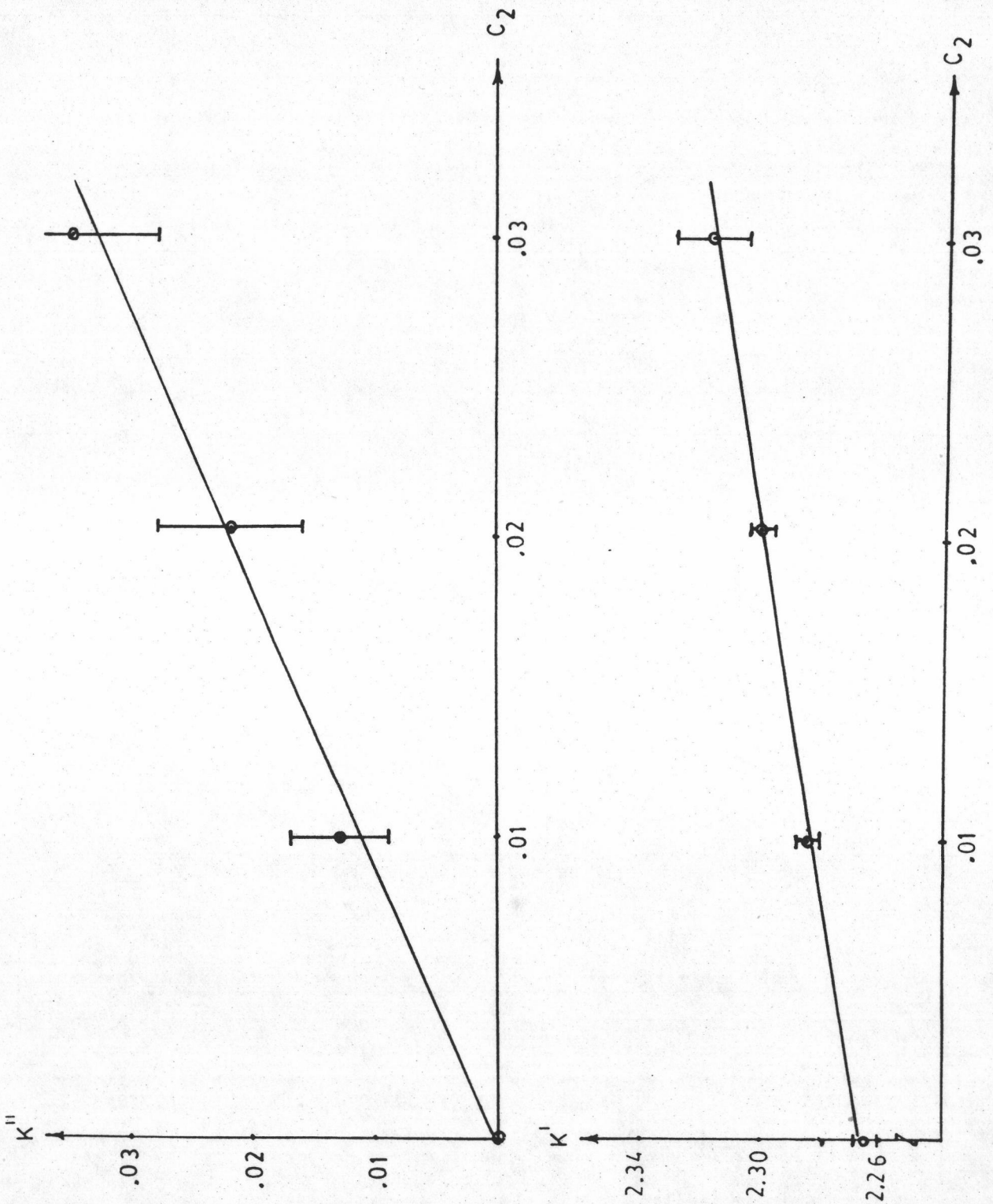
$$K'' = (1.1305)C_2 \quad (4.4.3)$$

$$K' = (1.7659)C_2 + 2.266 \quad (4.4.4)$$

จากสมการ (4.4.1), (4.4.2), (4.4.3) (4.4.4) และ (3.7.1) เรานำไปหาค่าความชันของกราฟเป็น a' , a'' ที่ความถี่ 8.00 GHz, 9.780 GHz และที่ความถี่แสง



รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายโบรมเบนซ์กับความเข้มข้นที่ความถี่ 8,000 GHz



รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่าโคอีเลกทริกของสารละลายโบรมีนกับความเข้มข้นที่ความถี่ 9.780 GHz

ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ค่าความชันของกราฟระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับเศษส่วนโมลที่ความถี่ต่าง ๆ

ความถี่ (f)	a'	a''	a''/f
8.000×10^9	2.1213	0.9230	0.1154×10^{-9}
9.780×10^9	1.7659	1.1305	0.1156×10^{-9}
ความถี่แสง	0.4480	-	-

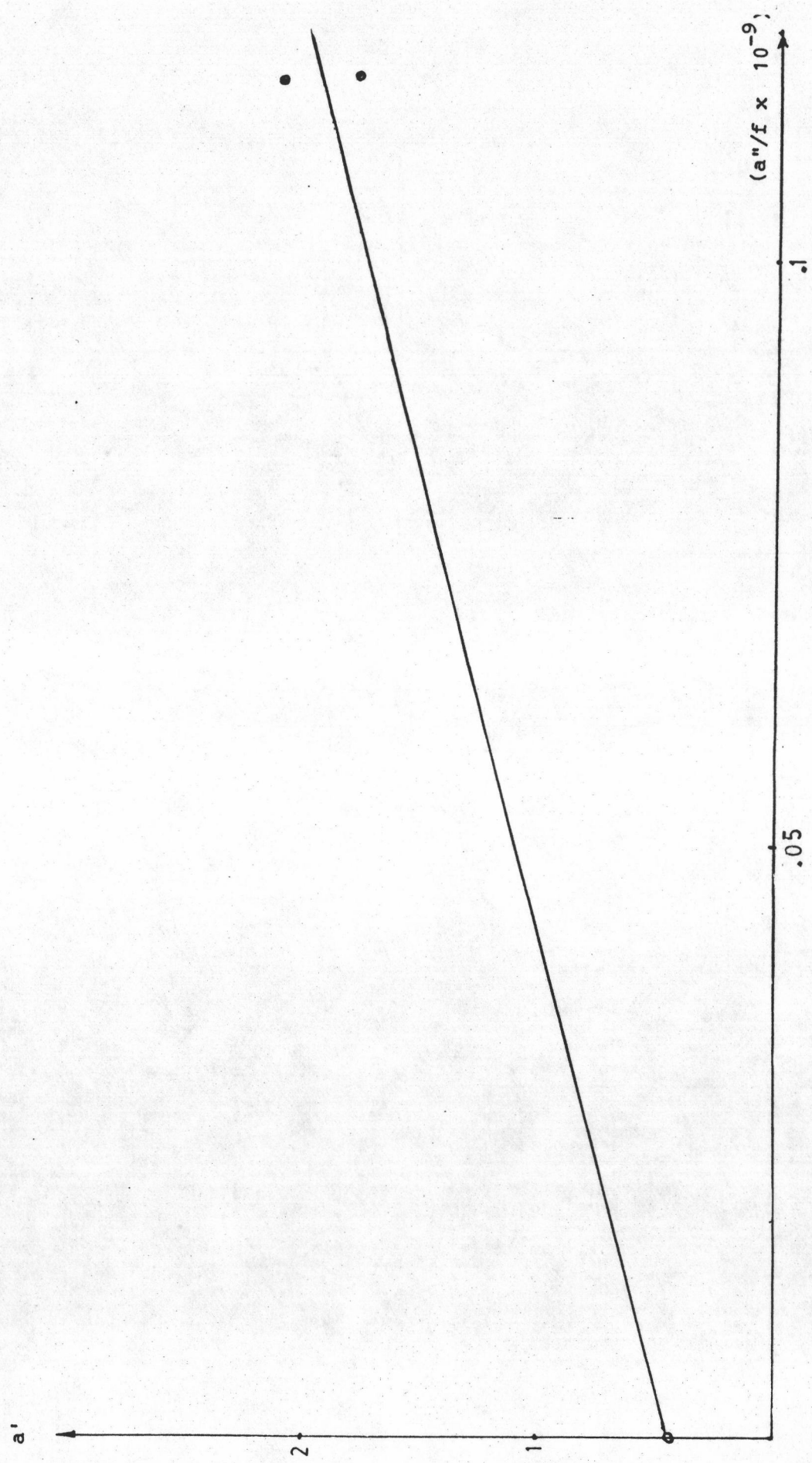
จากตารางที่ 4.9 เรานำไปเขียนกราฟระหว่าง a' กับ a''/f ได้ดังรูปที่ 4.9
กราฟในรูปที่ 4.9 เขียนสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดเป็น

$$a' = (12.9449 \times 10^{-9}) a''/f + 0.4483 \quad (4.4.5)$$

คำนวณหา τ ตามสมการ (4.3.12) ได้เป็น

$$\tau = \frac{1}{2 \times (12.9449 \times 10^{-9})} = 1.23 \times 10^{-11} \text{ วินาที}$$

4.5 ผลการวัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายโบรโมเอเทนที่ความถี่ไมโครเวฟ



รูปที่ 4.9 กราฟระหว่าง a' กับ a''/f ของสารละลายโบรมีน

ตารางที่ 4.10 ค่าโคอิเลกทริกของสารละลายโบรโมอีเทนที่ความถี่ไมโครเวฟ

ความถี่ 8.000 GHz			ความถี่ 9.780 GHz		
C_2	\bar{K}'	\bar{K}''	C_2	\bar{K}'	\bar{K}''
0	2.267 ± 0.007	0	0	2.265 ± 0.004	0
0.020215	2.335 ± 0.006	0.013 ± 0.002	0.009677	2.297 ± 0.005	0.0074 ± 0.0025
0.029441	2.367 ± 0.004	0.019 ± 0.001	0.020036	2.332 ± 0.005	0.0165 ± 0.0040
0.039473	2.410 ± 0.002	0.027 ± 0.005	0.030919	2.380 ± 0.003	0.0235 ± 0.0022

จากตารางที่ 4.10 นำไปเขียนกราฟระหว่าง a' กับ a''/f โค้งรูปที่ 4.10 และ 4.11
กราฟในรูปที่ 4.10 เขียนสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้เป็น

$$K'' = (0.6764)C_2 \quad (4.5.1)$$

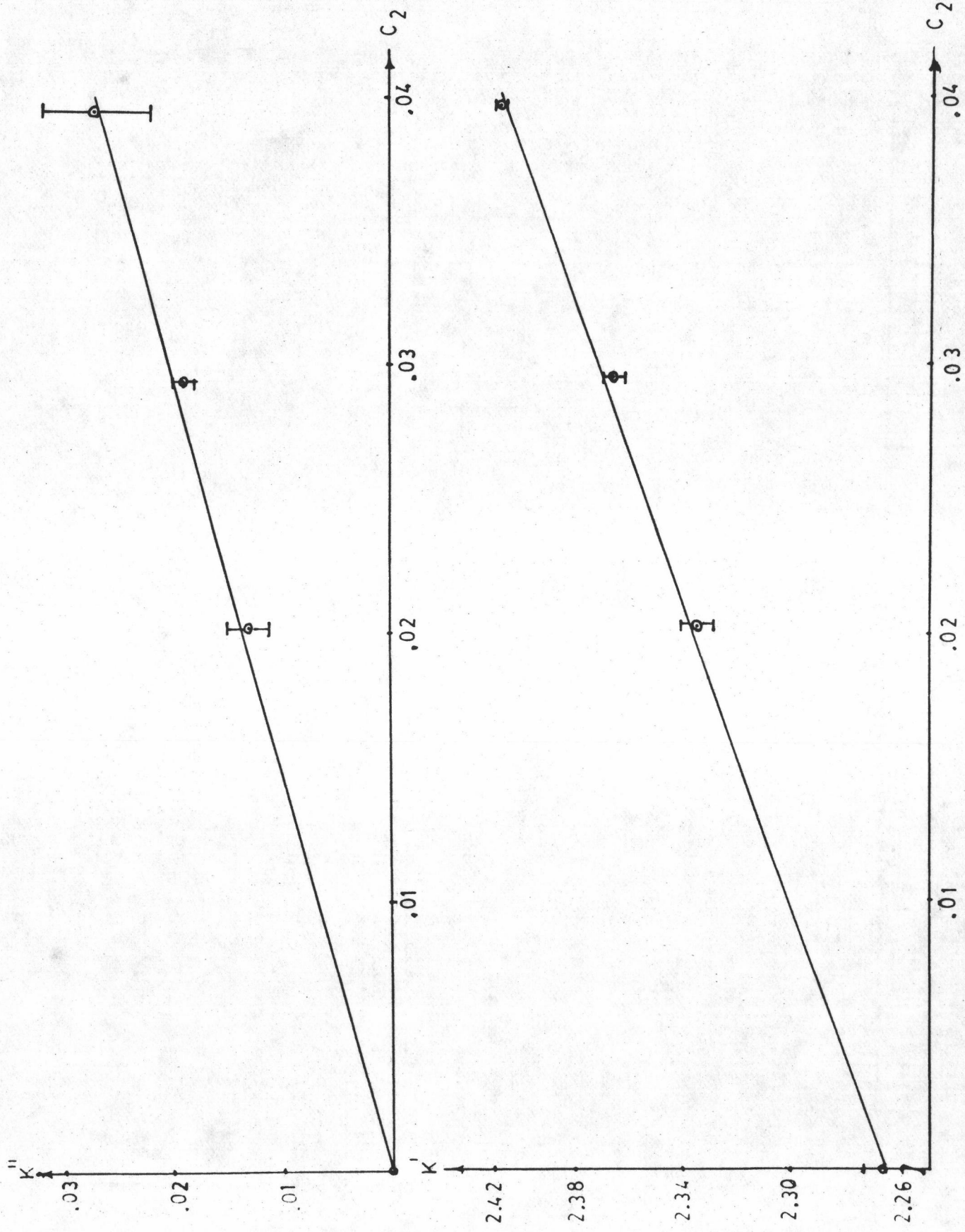
$$K' = (3.5793)C_2 + 2.265 \quad (4.5.2)$$

กราฟในรูปที่ 4.11 เขียนสมการด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดได้เป็น

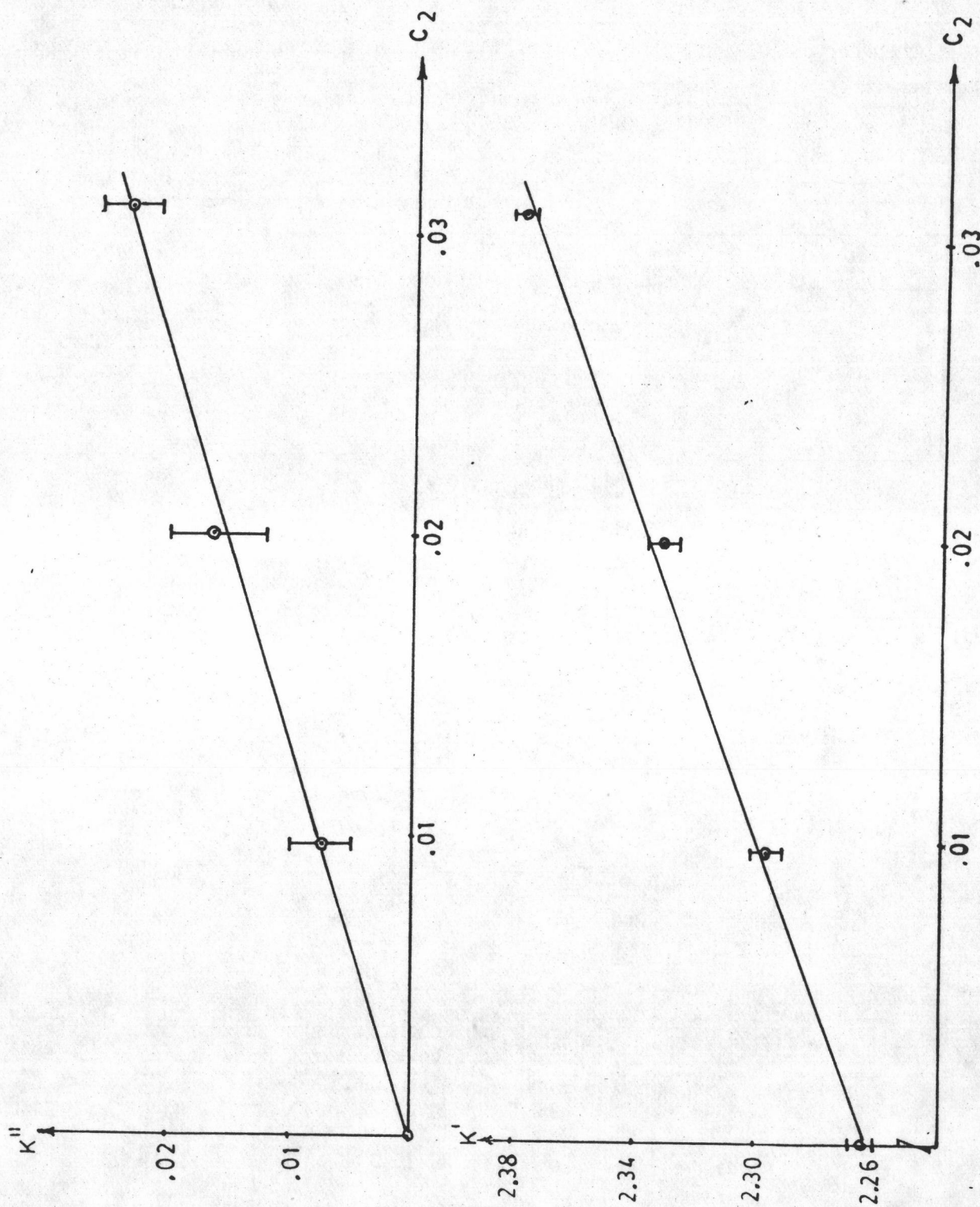
$$K'' = (0.7712)C_2 \quad (4.5.3)$$

$$K' = (3.6916)C_2 + 2.263 \quad (4.5.4)$$

จากสมการ (4.5.1), (4.5.2), (4.5.3), (4.5.4) และ (3.5.1) นำไปหาค่าความชัน
ของกราฟเป็น a' , a'' ที่ความถี่ 8.000 GHz, 9.780 GHz และที่ความถี่แสงตามลำดับ
คังแสดงในตารางที่ 4.11



รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างค่าไคอิเล็กทริกของสารละลายโบรโมเอีนกับความเข้มข้นความถี่ 8.000 GHz



รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายโบรโมเอีนกับความเข้มข้นความถี่ 9.780 GHz

ตารางที่ 4.11 ค่าความชันของกราฟระหว่างค่าโคอีเลกทริกกับเศษส่วนโมลที่ความถี่ต่าง ๆ

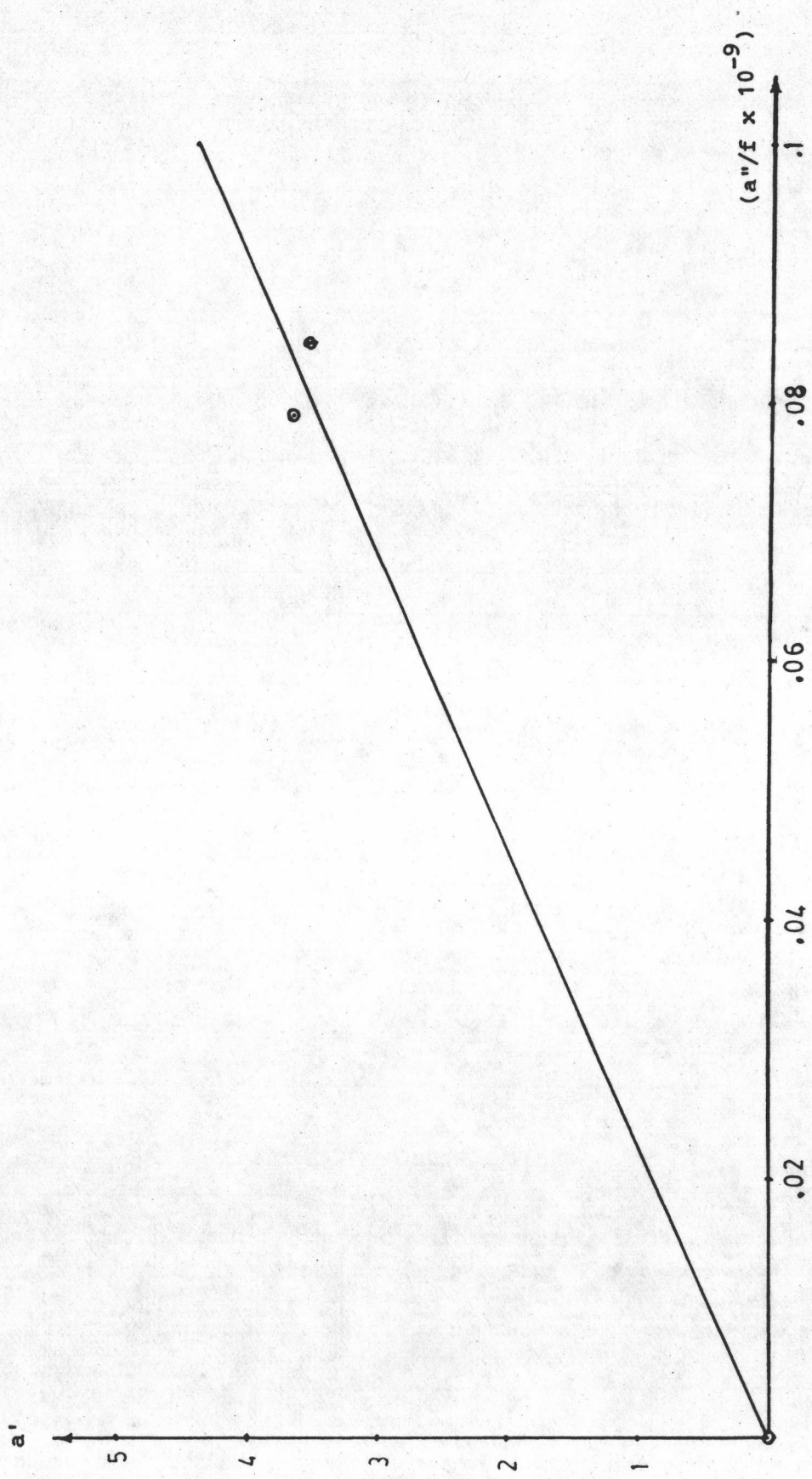
ความถี่ (f)	a'	a''	a''/f
8.000×10^9	3.5793	0.6764	0.0845×10^{-9}
9.780×10^9	3.6916	0.7712	0.0789×10^{-9}
ความถี่แสง	0.0192	-	-

จากตารางที่ 4.11 นำไปเขียนกราฟระหว่าง a' กับ a''/f ได้ดังรูปที่ 4.12 สมการกราฟในรูปที่ 4.12 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุดเป็น

$$a' = (44.0367 \times 10^{-9})a''/f + 0.0315$$

คำนวณหา τ ตามสมการ (4.3.12) ได้เป็น

$$\tau = \frac{1}{2\pi(44.0367 \times 10^{-9})} = 3.61 \times 10^{-12} \text{ วินาที}$$



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่าง a' กับ a''/f ของสารละลายโบรโมอีเทน