

## บทที่ 5

## การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากบทที่ 3 และบทที่ 4 เราวัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายชนิดต่าง ๆ และสามารถคำนวณหาค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรทางดาร์วินไฟฟ้า และเวลาผ่อนคลายของโมเลกุลได้ ค่าทั้งสองนี้เป็นประโยชน์ในการนำไปศึกษาเรื่องอื่น ๆ ต่อไป ในที่นี้จะพิจารณาแบบจำลองของโมเลกุลของสารที่เราวัดแต่ละชนิด โดยนำค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้าและเวลาผ่อนคลายมาช่วยตรวจสอบแบบจำลองนี้ ในบท นี้จะกล่าวถึงแบบจำลองของโมเลกุลอย่างง่ายเพื่อความสะดวกที่จะใช้ศึกษาเรื่องโมเมนต์ของพันธะภายในโมเลกุลและขนาดของโมเลกุลเป็นต้น

5.1 ค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้าและโมเมนต์ของพันธะ

ค่าไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าที่เราวัดได้ จะมีค่าแตกต่างกันออกไปตามชนิดของโมเลกุล เนื่องจากค่านี้นับอยู่กับประจุไฟฟ้าที่ปรากฏบนอะตอม และระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางของประจุ ซึ่งได้มีหัวข้อแล้วเช่นเดียวกันโดยใช้วิธีการที่คล้ายคลึงกันและวัดที่ความถี่อื่น เมื่อนำค่าไดอิเล็กตริกไปคำนวณหาค่าไดโพลโมเมนต์พบว่าค่าที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งนำมาเปรียบเทียบกันดังตารางที่ 5.1

## ตารางที่ 5.1 ค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้าของโมเลกุลต่าง ๆ

โมเลกุล	ค่า $\mu$ จากการทดลอง (c-m)	ค่า $\mu$ จากที่เขยวัดได้ (c-m)
คลอโรเบนซีน ( $C_6H_5Cl$ )	$5.12 \times 10^{-30}$	$5.27 \times 10^{-30}$
ออร์โท-ไดคลอโรเบนซีน ( $C_6H_4Cl_2$ )	$6.74 \times 10^{-30}$	$7.50 \times 10^{-30}$
พารา-ไดคลอโรเบนซีน ( $C_6H_4Cl_2$ )	0	0
โบรโมเบนซีน ( $C_6H_5Br$ )	$4.68 \times 10^{-30}$	$5.13 \times 10^{-30}$
โบรโมอีเทน ( $C_2H_5Br$ )	$6.02 \times 10^{-30}$	$6.33 \times 10^{-30}$

จากตารางที่ 5.1 จะเห็นว่าค่า  $\mu$  ที่ได้จากการทดลองของเราต่างจากค่า  $\mu$  ที่เคยวัดมาโดยประมาณ 7% แสดงว่าการวัดค่า  $\mu$  โดยวิธีนี้เชื่อถือได้พอสมควร

ความคลาดเคลื่อนซึ่งเกิดจากการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 KHz แล้วนำมาคำนวณค่า  $\mu$  นั้นอาจเกิดจากความบริสุทธิ์ของสารที่นำมาใช้วัด เนื่องจากก่อนทำการวัดไม่ได้ทำให้สารบริสุทธิ์มากขึ้น ทำให้อาจมีสารอื่นเจือปนอยู่บ้าง เช่น น้ำในเบนซีน ซึ่งเชื่อว่ามามีปริมาณน้อยมาก นอกจากนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนในการวัดซึ่งเกิดจากเครื่องมือที่เราใช้ เช่น บริคซ์ และตัวเก็บประจุ เป็นต้น ซึ่งเรานำค่าที่วัดได้มาทำการเฉลี่ยทุกครั้ง แม้แต่การหาค่าความชันของกราฟระหว่างค่าไดอิเล็กตริกกับความเข้มข้นของสารก็เฉลี่ยด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด ซึ่งจะทำให้ค่าที่เชื่อถือได้มากที่สุดจากเครื่องมือ

ค่าไดโพลโมเมนต์จากตารางที่ 5.1 พิจารณาออร์โท-ไดคลอโรเบนซีนเปรียบเทียบกับคลอโรเบนซีน พบว่าออร์โท-ไดคลอโรเบนซีนมีค่ามากกว่า แม้ว่าลักษณะโมเลกุลจะคล้ายกัน แต่เนื่องจากออร์โทไดคลอโรเบนซีนมีไดโพลโมเมนต์ย่อยภายในโมเลกุล ซึ่งเราเรียกว่าโมเมนต์ของพันธะซึ่งเกิดจากอะตอมของคาร์บอนจับกับอะตอมของคลอรีนทำให้เกิดไดโพลโมเมนต์ขึ้น 2 คู่ ต่างจากคลอโรเบนซีนที่มีคู่เดียวเป็นไดโพลของโมเลกุล ไดโพลโมเมนต์ทั้งสองในโมเลกุลของออร์โท-ไดคลอโรเบนซีนจึงต้องนำมารวมกันเป็นไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ของโมเลกุล ไดโพลโมเมนต์ทางไฟฟ้าเป็นปริมาณเวกเตอร์ การรวมกันแบบเวกเตอร์จึงต้องพิจารณามุมระหว่างแนวแกนของโมเมนต์ของพันธะทั้งสอง เนื่องจากออร์โท-ไดคลอโรเบนซีนมีอะตอมของคลอรีนจับกับอะตอมคาร์บอนในตำแหน่งที่ชิดกัน ทำให้เราสามารถหามุมระหว่างแนวแกนของไดโพลทั้งสองนี้ได้ โดยสมมุติแบบจำลองของโมเลกุลของเบนซีนมีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอมจับกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยม และมีอะตอมของไฮโดรเจน 6 อะตอมอยู่รอบนอกของวงแหวนนี้จับกับอะตอมของคาร์บอน และสมมุติให้ระนาบของอะตอมคาร์บอนทั้ง 6 ตัวที่เป็นวงแหวนอยู่ในระนาบเดียวกัน เช่นเดียวกับกับอะตอมไฮโดรเจนทั้งหมดที่อยู่บนระนาบเดียวกันซึ่งเป็นระนาบเดียวกับระนาบของอะตอมคาร์บอน

จากแบบจำลองโมเลกุลดังกล่าวนี้ แกนทั้งสองของไดโพลโมเมนต์ย่อยในโมเลกุลออร์โท-ไดคลอโรเบนซีนจึงทำมุมกัน  $60^\circ$  บนระนาบเดียวกัน ค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ที่คำนวณจากไดโพลโมเมนต์ย่อยทั้งสองคู่นี้ค่าตามสมการ

$$\mu = (\mu_1^2 + \mu_2^2 + 2\mu_1\mu_2\cos\theta)^{1/2} \quad (5.1.1)$$

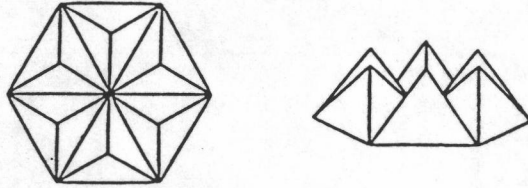
- โดย  $\mu$  เป็นค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ของโมเลกุล  
 $\mu_1$  เป็นค่าไดโพลโมเมนต์ย่อยของไดโพลคู่แรก  
 $\mu_2$  เป็นค่าไดโพลโมเมนต์ย่อยของไดโพลคู่ที่สอง  
 $\theta$  เป็นมุมระหว่างแกนของไดโพลโมเมนต์ย่อยทั้งสอง

จากตารางที่ 5.1 เรานำค่าไดโพลโมเมนต์ถาวรทางไฟฟ้าของกลอโรเบนซีน ซึ่งเกิดจากอะตอมของคลอรีนจับกับอะตอมของคาร์บอนซึ่งมีค่า  $5.09 \times 10^{-30}$  C-m ใช้แทนค่าไดโพลโมเมนต์ย่อยทั้งสองในโมเลกุลออร์โท-ไคคลอโรเบนซีน โดยประมาณว่า เท่ากัน เพื่อคำนวณหาค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ตามสมการ (5.1.1) จะได้ไดโพลโมเมนต์ ลัพธ์เป็น  $\mu = 8.82 \times 10^{-30}$  C-m เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองวัด  $\mu = 6.74 \times 10^{-30}$  C-m ซึ่งน้อยกว่าเนื่องมาจากการรบกวนของสนามไฟฟ้าข้างเคียง จากโมเลกุลอื่น หรือโมเลกุลของตัวทำละลายซึ่งเราเรียกว่าผลของตัวทำละลาย (solvent effect) สำหรับการหาค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ของโมเลกุล พารา-ไคคลอโรเบนซีน ก็ใช้วิธีเดียวกันกับโมเลกุลของออร์โท-ไคคลอโรเบนซีน จากแบบจำลองโมเลกุลของเบนซีน ที่เราสมมุติขึ้น ตำแหน่งของอะตอมคลอรีนในโมเลกุลของพารา-ไคคลอโรเบนซีนจะอยู่ตรงกันข้ามของวงแหวน ทำให้ไดโพลโมเมนต์ย่อยทั้งสองคู่ในโมเลกุลทำมุมกัน  $180^\circ$  ค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ของโมเลกุลคำนวณตามสมการ (5.1.1) จะมีค่าเป็นศูนย์

จากค่าไดโพลโมเมนต์ลัพธ์ของโมเลกุลไคคลอโรเบนซีนทั้งสองชนิดนี้ ทำให้เรา ยืนยันได้ว่าแบบจำลองโมเลกุลของเบนซีนที่สมมุติขึ้นนั้นถูกต้องตรงตามการทดลองที่ได้โดย เฉพาะระนาบอะตอมคาร์บอนและอะตอมไฮโดรเจนนั้นต้องเป็นระนาบเดียวกัน

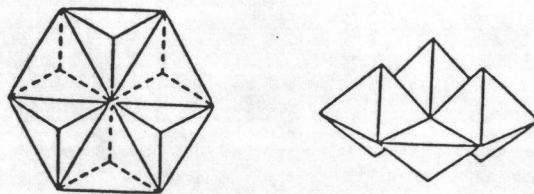
เคมีไคมีผู้กล่าวถึงแบบจำลองโมเลกุลของเบนซีนนี้ไว้โดยจักรนาบของอะตอม คาร์บอนและระนาบของอะตอมไฮโดรเจนอยู่ต่างระดับกัน เช่นแบบจำลองเบเยอร์ (Baeyer's model)<sup>10</sup> อธิบายว่าระนาบของอะตอมคาร์บอนอยู่คนละระนาบกับระนาบของอะตอม ไฮโดรเจนโดยระนาบของอะตอมคาร์บอนจะอยู่สูงกว่าระนาบของอะตอมไฮโดรเจน ซึ่ง สามารถเขียนรูปแทนด้วยรูปสามเหลี่ยมใหญ่ๆของสามเหลี่ยมเป็นตำแหน่งอะตอมของคาร์บอน

และฐานของสามเหลี่ยมเป็นตำแหน่งของอะตอมไฮโดรเจน แต่ยังมีลักษณะเป็นวงแหวน  
รูปหกเหลี่ยมอยู่เช่นเดิม ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แบบจำลองโมเลกุลเบนซีนของเบเยอร์

สำหรับแบบจำลองโมเลกุลเบนซีนอีกแบบหนึ่งซึ่งต่างจากที่กล่าวมาคือแบบจำลอง  
ของคอร์เนอร์ (Körner model)<sup>10</sup> อธิบายว่า ะนาบของอะตอมของคาร์บอนมี 2 ะนาบ  
ประกอด้วยระนาบบนมีคาร์บอนอยู่ 3 อะตอมและระนาบล่างจะมีอะตอมคาร์บอนอยู่ 3 อะตอม  
เช่นเดียวกัน อะตอมคาร์บอนทั้ง 6 นั้นจะสลักกันอยู่ระนาบบนและล่างที่ละอะตอม ส่วน  
อะตอมของไฮโดรเจนทั้งหมด 6 อะตอมจะอยู่ระนาบที่สามซึ่งอยู่กึ่งกลางระหว่างสองระนาบ  
แรกที่กล่าวมา และอะตอมของคาร์บอนก็จับกันเป็นวงแหวนรูปหกเหลี่ยมเช่นเดียวกัน เขียน  
รูปด้วยวิธีเคมจะได้อังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แบบจำลองโมเลกุลเบนซีนของคอร์เนอร์

จะเห็นว่าแบบจำลองโมเลกุลเบนซีนทั้งสองแบบที่กล่าวมานี้ไม่ตรงกับผลการทดลองวัดโคโพลโมเมนต์ลัพท์ของโมเลกุลไคคลอโรเบนซีนซึ่งใช้คลอรีนจับกับอะตอมคาร์บอนแทนอะตอมของไฮโดรเจนตามตารางที่ 5.1 ดังนั้นแบบจำลองโมเลกุลทั้งสองนี้จึงใช้ไม่ได้ตามการทดลองวัดจริง เนื่องจากไม่มีโคโพลโมเมนต์ลัพท์ระหว่างระนาบของอะตอมคลอรีนกับอะตอมไฮโดรเจน สำหรับโมเลกุลของโบรโมเบนซีนจะต่างจากโมเลกุลของคลอโรเบนซีนตรงอะตอมที่มาจับกับการบอนเปลี่ยนเป็นโบรมีน ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคลอรีนจากตารางธาตุ แต่ค่าโคโพลโมเมนต์ของโมเลกุลทั้งสองนี้ก็ไม่ได้ต่างกันมากนักจึงพอสรุปได้ว่าคล้ายคลึงกัน

สำหรับโมเลกุลของโบรโมอีเทนนั้นมีรูปร่างและลักษณะต่างจากโมเลกุลจำพวกวงแหวนอะโรมาติกที่กล่าวมา ค่าโคโพลโมเมนต์ดาวทางไฟฟ้าของโมเลกุลนี้เกิดจากอะตอมของโบรมีนจับกับอะตอมของคาร์บอนแทนอะตอมของไฮโดรเจนในโมเลกุลของอีเทน เป็นโคโพลโมเมนต์ดาวทางไฟฟ้าของโมเลกุล

## 5.2 ค่าเวลาผ่อนคลายและการคำนวณขนาดของโมเลกุล

การวัดเวลาผ่อนคลายของโมเลกุลอิสระนั้นได้จากการวัดค่าโคอิเลกตริกของสารละลายที่มีความถี่ไมโครเวฟ และที่ความถี่แสงจากบทที่ 4 ซึ่งค่าโคอิเลกตริกของสารละลายที่ความถี่ไมโครเวฟ เฉพาะค่า  $K''$  ยังมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงประมาณ 10 % เนื่องจากค่า  $K''$  นี้มีค่าน้อย ทำให้การคำนวณหาเวลาผ่อนคลายอาจมีการผิดพลาดได้ จึงนำค่าที่ได้จากการวัดแบบนี้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดโดยวิธีอื่น เช่น วิธีเทอร์มอล<sup>11</sup> (Thermal method) ซึ่งวัดเวลาผ่อนคลายของโมเลกุลคลอโรเบนซีนที่อุณหภูมิ  $23^{\circ}\text{C}$  มาเปรียบเทียบกับค่าการวัดของเราที่อุณหภูมิห้อง  $25^{\circ}\text{C}$  ได้ผลดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ค่าเวลาผ่อนคลายของโมเลกุลต่างๆ

โมเลกุล	ค่า $\tau$ จากการทดลอง(วินาที)	ค่า $\tau$ จากวิธีเทอร์มอล(วินาที)
คลอโรเบนซีน ( $C_6H_5Cl$ )	$7.41 \times 10^{-12}$	$10.1 \times 10^{-12}$
โบรโมเบนซีน ( $C_6H_5Br$ )	$1.23 \times 10^{-11}$	-
โบรโมอีเทน ( $C_2H_5Br$ )	$3.61 \times 10^{-12}$	-

ความผิดพลาดของค่า  $\tau$  นั้นเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าไดโพลโมเมนต์ที่ความถี่ไมโครเวฟคั้งที่กล่าวมาแล้ว ค่า  $k'$  นั้นจะมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าค่า  $k''$  เนื่องจาก  $k''$  มีค่ามากกว่า ส่วนค่า  $k''$  เป็นค่าที่แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของคลื่นในสารละลาย แต่เนื่องจากสารละลายที่เราผสมขึ้นใช้วัดค่าไดโพลโมเมนต์มีความเข้มข้นต่ำ จึงทำให้มีการสูญเสียพลังงานของคลื่นน้อย ทำให้ค่า  $k''$  ที่วัดได้มีค่าน้อย

สำหรับความผิดพลาดจากการอ่านค่าต่าง ๆ ของเครื่องมือนี้พบว่าเครื่องลคสัญญาณอ่านค่าได้ไม่แม่นยำเท่าที่ควร หล้นเจอรอ่านค่าไคละเอียกและแม่นยำพอสมควร แต่เมจิกที่อาจผสมคลื่นไม่เป็นไปตามหลักการก็มีความผิดพลาด จากสาเหตุเหล่านี้เป็นคววมผิดพลาดจากเครื่องมือที่ใช้

นอกจากนี้ในการคำนวณเวลาผ่อนคลายเราใช้กราฟระหว่าง  $a'$  กับ  $a''/f$  เพื่อจะให้ไดคาคความชันที่ถูกต้อง เราต้องพลอตกราฟหลายจุด ซึ่งต้องขึ้นกับการปรับความถี่ที่ใช้วัด โดยแต่ละความถี่ต่างกันพอสมควรแต่จากการทดลองนี้ยังใช้ความถี่ที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน จึงอาจทำให้กราฟที่ได้ผิดพลาดจากความจริงได้ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สามารถปรับปรุงวิธีการวัดให้ดีขึ้นได้เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวในตอนหลัง

ค่าเวลาผ่อนคลายตามตารางที่ 5.2 ที่ไคมานั้นมีความสัมพันธ์กับขนาดของโมเลกุลโดยเราจะคำนวณหาขนาดของโมเลกุลเมื่อสมมุติให้โมเลกุลที่วัดมีรูปร่างอย่างง่าย เช่น ทรงกลม ซึ่งจะหาค่าที่แสดงขนาดของทรงกลมได้โดยใช้คาร์ซีมีของทรงกลม ตามการสมมุตินี้เราจะเรียกคาร์ซีมีของทรงกลมดังกล่าวว่าคาร์ซีมีโมเลกุล คาร์ซีมีโมเลกุล  $a$  นี้มีความสัมพันธ์กับค่าเวลา

ผอนคลายของโมเลกุล  $\tau$  ตามสมการ<sup>11</sup>

$$\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{k_B T} \quad (5.2.1)$$

เมื่อ  $\eta$  เป็นค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด (viscosity) ของเบนซีนซึ่งจะมีค่าขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ในการทดลองวัดค่าไดอิเล็กตริกได้ทำที่อุณหภูมิห้อง  $25^\circ\text{C}$  ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด  $\eta$  ของเบนซีน<sup>12</sup> มีค่า  $0.00606 \text{ poise (dyne-cm}^{-2}\text{)}$  เราหาค่ารัศมีโมเลกุลตามสมการ (5.2.1) แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีเทอร์มอลซึ่งคำนวณแบบเดียวกัน จะได้ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 รัศมีโมเลกุลของโมเลกุลต่าง ๆ

โมเลกุล	รัศมีโมเลกุล (m)	รัศมีโมเลกุลจากวิธีเทอร์มอล
คลอโรเบนซีน ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$ )	$1.59 \times 10^{-10}$	$1.83 \times 10^{-10}$
โบรโมเบนซีน ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{Br}$ )	$1.88 \times 10^{-10}$	-
โบรโมอีเทน ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{Br}$ )	$1.25 \times 10^{-10}$	-

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นว่า รัศมีโมเลกุลของโบรโมอีเทนมีค่าน้อยที่สุด แสดงว่าโบรโมอีเทนมีโมเลกุลขนาดเล็ก เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบตามสูตรโมเลกุลแล้วสอดคล้องกัน ส่วนโบรโมเบนซีนนั้นจะมีรัศมีโมเลกุลมากกว่าคลอโรเบนซีนเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากอะตอมของโบรมีนนั้นมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของคลอรีน จึงทำให้ระยะระหว่างอะตอมของคาร์บอนถึงอะตอมของโบรมีนยาวกว่าระยะระหว่างอะตอมของคาร์บอนถึงอะตอมของคลอรีน



### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ 1 kHz มีความแม่นยำถูกต้องคือพอสมควร แต่เพื่อความแน่นอน เราอาจเปลี่ยนความถี่โดยใช้ความถี่อื่น ๆ ในช่วง 1 kHz ถึง 40 kHz วัดค่าไดอิเล็กตริกมาเปรียบเทียบกัน ในการวัดอาจเปลี่ยนปริคที่ใช่เป็นแบบอื่นซึ่งอาจมีความแม่นยำมากกว่านี้ถ้าสามารถหาได้จะทำให้ได้ผลการวัดที่ถูกต้องแม่นยำขึ้น

ส่วนการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้สามารถปรับความถี่ได้ต่ำสุด 8.000 GHz และสูงสุด 9.780 GHz เท่านั้นจึงอาจทำให้การคำนวณหาค่าเวลาผ่อนคลายผิดพลาด เพื่อให้ค่าที่ถูกต้องและแม่นยำกว่านี้ควรใช้เครื่องมือที่สามารถปรับความถี่ได้หลาย ๆ ค่าที่ห่างกันพอสมควร จะทำให้คำนวณเวลาผ่อนคลายได้ถูกต้องยิ่งขึ้น และเพื่อให้วัดค่าไดอิเล็กตริกของสารละลายได้หลายครั้ง เพื่อนำมาเปรียบเทียบกันจึงควรวัดโดยใช้สารละลายในหลอดแก้วที่มีความสูงต่าง ๆ กัน หลายค่า ซึ่งอาจต้องใช้หลอดแก้วที่บรรจุสารละลายยาวมาก จึงจะทำให้เราตรวจสอบความแม่นยำของค่าที่ได้ดีขึ้น การแก้ปัญหาอีกอย่างหนึ่งในขณะที่ทำการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟคือเราต้องทำให้ผิวของสารละลายเรียบเพื่อจะหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนได้ถูกต้อง แต่สารละลายที่ใช้มีความตึงผิวจึงทำให้บริเวณขอบโค้งเนื่องจากแรงตึงผิวระหว่างสารละลายกับผิวหลอดแก้ว วิธีแก้หนึ่งคือใช้แผ่นไมลาร์บาง ๆ ปิดลงบนผิวของสารละลายซึ่งต้องระวังไม่ให้มีฟองอากาศระหว่างแผ่นไมลาร์นี้กับสารละลายด้วย

สำหรับการวัดค่าไดอิเล็กตริกที่ความถี่ไมโครเวฟอีกแบบหนึ่งซึ่งไม่อาศัยหลักการแบบนี้คือ การใช้สล็อตเทคไลน์ (slotted line) ซึ่งเป็นการวัดคลื่นนิ่งภายในหลอดแก้วที่ตำแหน่งต่าง ๆ โดยใช้หัววัดที่เลื่อนได้สอดเข้าไปในช่องของหลอดแก้ว ซึ่งอาจแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนจากเมจิกที่ได้ อาจทำให้การวัดค่าที่ถูกต้องมากขึ้น และเนื่องจากสารละลายมีการดูดกลืนพลังงานน้อย เราอาจเปลี่ยนเป็นบรรจุลงในกล่องอภินา (Resonant cavity) เพื่อให้ค่าที่แสดงการดูดกลืนพลังงานที่ถูกต้องและแม่นยำขึ้น