

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 1. สเปกตรัมความถี่ไดโพลโทรโพเรซิสตามทฤษฎีแบบจำลอง SSM ( $\text{Re}[f(w)]$ )

คำนวณแอมพลิจูด  $\text{Re}[f(w)]$  จากสมการที่ 4 แล้วนำไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความถี่สนามไฟฟ้า พบว่าเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ (ยกเว้นรัศมีเซลล์) ตามงานวิจัยของ Kaler and Jones(1990) ,Fuhr and Kuzmin(1986) , Radu et al.,1996 และ Mahaworasilpa et al.,1994

ได้แก่ รัศมีโพโรโทพลาสติก  $R = 20 \mu\text{m}$  ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์  $\delta = 10 \text{nm}$

ค่าไดโพลทริกของสารละลายแขวนลอย  $\epsilon_s = 80\epsilon_0$

ค่าไดโพลทริกของไซโทพลาสซึม  $\epsilon_c = 60\epsilon_0$

ค่าไดโพลทริกของเยื่อหุ้มเซลล์  $\epsilon_m = 10\epsilon_0$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายแขวนลอย  $\sigma_s = 50 \text{mS} / \text{m}$

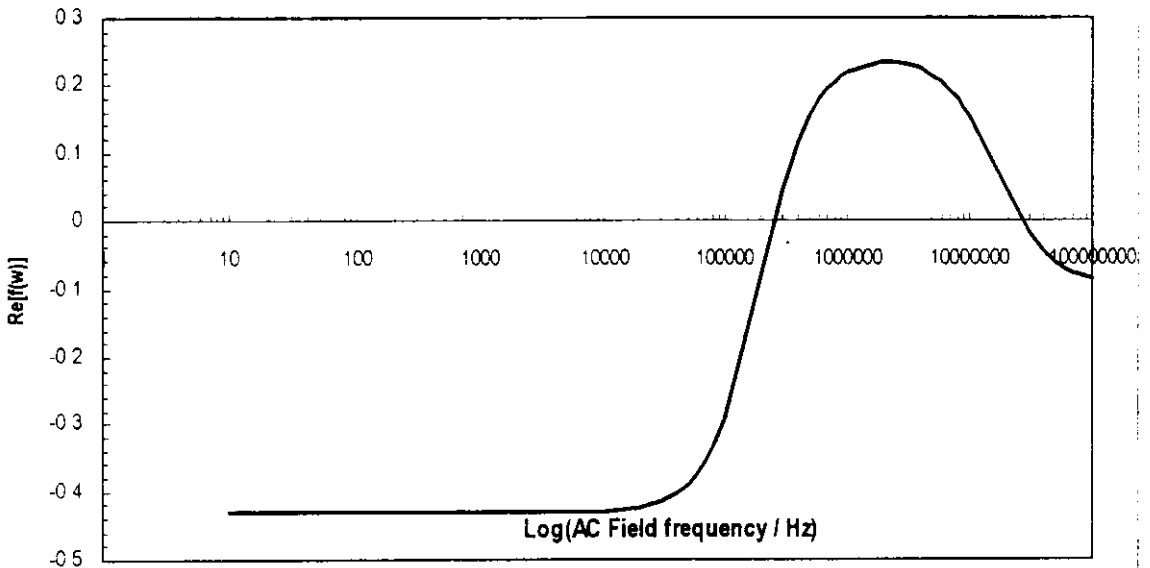
สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม  $\sigma_c = 0.1 \text{S} / \text{m}$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์  $\sigma_m = 10 \mu\text{S} / \text{m}$

แล้วพบว่า โพโรโทพลาสติกสับประรดจะเกิดไดโพลโทรโพเรซิสในช่วงความถี่ประมาณ 250 kHz

ถึง 25 MHz ให้ค่า  $\text{Re}[f(w)]$  สูงสุดประมาณ 2.5 ที่ความถี่ 2 MHz ตามกราฟที่ 2 แสดงให้เห็น

ว่าที่ความถี่ดังกล่าว โพโรโทพลาสติกน่าจะมีความเร็วไดโพลโทรโพเรติกสูงสุด

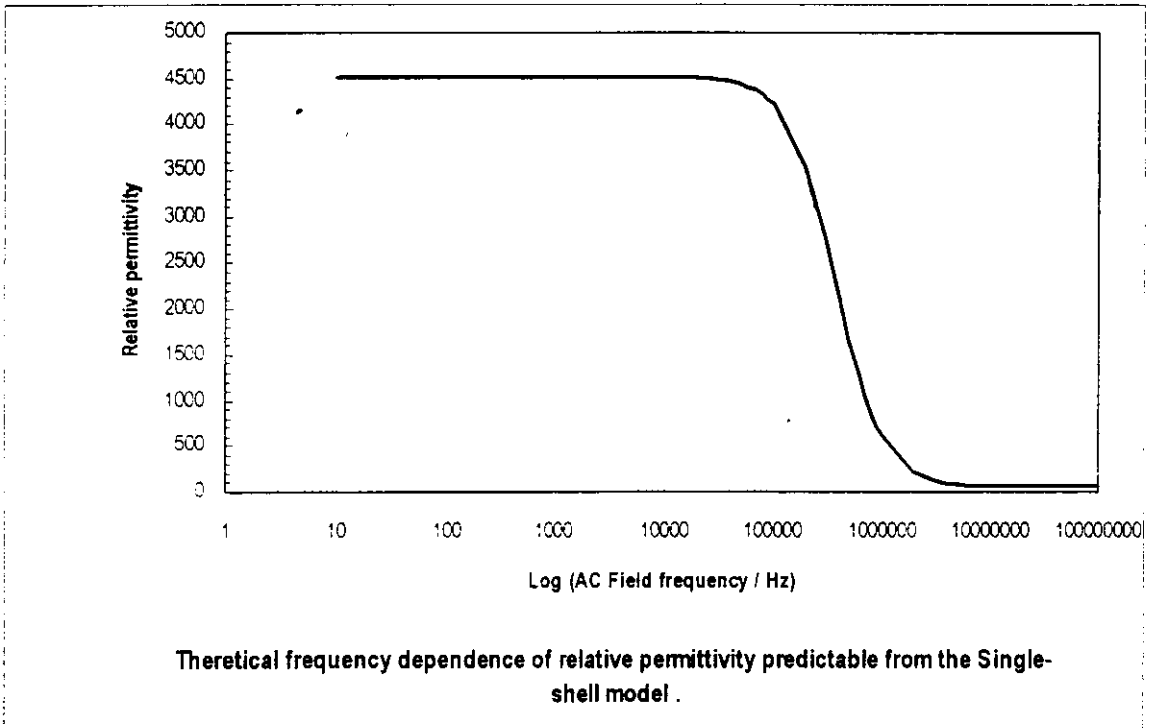


Theoretical plot of  $\text{Re}[f(w)]$  versus field frequency

กราฟที่ 2 แสดงสเปกตรัมของค่า  $\text{Re}[f(w)]$  ที่ความถี่ต่างๆ ตามแบบจำลองทางไฟฟ้า SSM ของงานวิจัยนี้ พลอตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

## 2. ไดอิเล็กทริกดิสเพอชันตามแบบจำลอง SSM

เมื่อพลอตกราฟสมการที่ 29 เทียบกับความถี่ของสนามไฟฟ้า พบว่า ค่าไดอิเล็กทริกของโพรโทพลาสต์จะมีการลดค่าลงตามทฤษฎีเบต้าดิสเพอชัน กล่าวคือ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ ค่าไดอิเล็กทริกของโพรโทพลาสต์ (ตามทฤษฎี) จะมีค่าสูงมากประมาณ 4500 เท่าของค่าไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ และจะเริ่มลดค่าลงที่ความถี่ 100kHz จนมีค่าประมาณ 60 เท่าของค่าไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ที่ความถี่ประมาณ 20MHz การลดค่าตามทฤษฎีเช่นนี้สื่อให้เห็นว่า สภาพความเป็นไดอิเล็กทริกโดยรวมของโพรโทพลาสต์จะลดลงเมื่อความถี่สนามไฟฟ้าสูงขึ้น เป็นที่สังเกตว่าการเปลี่ยนแปลงค่าไดอิเล็กทริกประมาณ 4440 เท่าของค่าไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ จะเกิดขึ้นภายในช่วงความถี่ไฟฟ้าช่วงกว้างย่านกลาง ภายในช่วงความถี่ประมาณ 19.9 MHz นอกจากนี้ในช่วงความถี่ที่เกิดการลดค่าไดอิเล็กทริกดังกล่าว ( 100 kHz – 20MHz) เป็นช่วงความถี่ช่วงเดียวกับช่วงการเกิดสเปคตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิส (กราฟที่ 2) ซึ่งน่าจะเป็นช่วงความถี่ที่โพรโทพลาสต์เกิดไดโพลโมเมนต์จำนวนมาก เหมาะสมแก่การศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิส



กราฟที่ 3 แสดงไดอิเล็กทริกดิสเพอชันของโพรโทพลาสต์สับปรดตามแบบจำลอง SSM ของงานวิจัยนี้ พลอตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

### 3 สเปกตรัมความถี่ไดโพลีโทรฟอเรซิสตามทฤษฎีแบบจำลอง DSM

คำนวณเทอม  $\text{Re}[f(\omega)]$  จากสมการที่ 39 แล้วนำไปพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์กับความถี่สนามไฟฟ้า พบว่าเมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ(ยกเว้นรัศมีเซลล์) ตามงานวิจัยของ Asami and Irimajiri(1984) ได้แก่

ค่าไดโพลีทริกของไซโทพลาสซึม  $\epsilon_{ic} = 60\epsilon_0$  และ  $\epsilon_{oc} = 60\epsilon_0$

ค่าไดโพลีทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ชั้นใน  $\epsilon_{im} = 8\epsilon_0$  และ  $\epsilon_{om} = 8\epsilon_0$

ค่าไดโพลีทริกของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์  $\epsilon_s = 80\epsilon_0$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม  $\sigma_{ic} = 0.1S/m$  และ  $\sigma_{oc} = 0.1S/m$

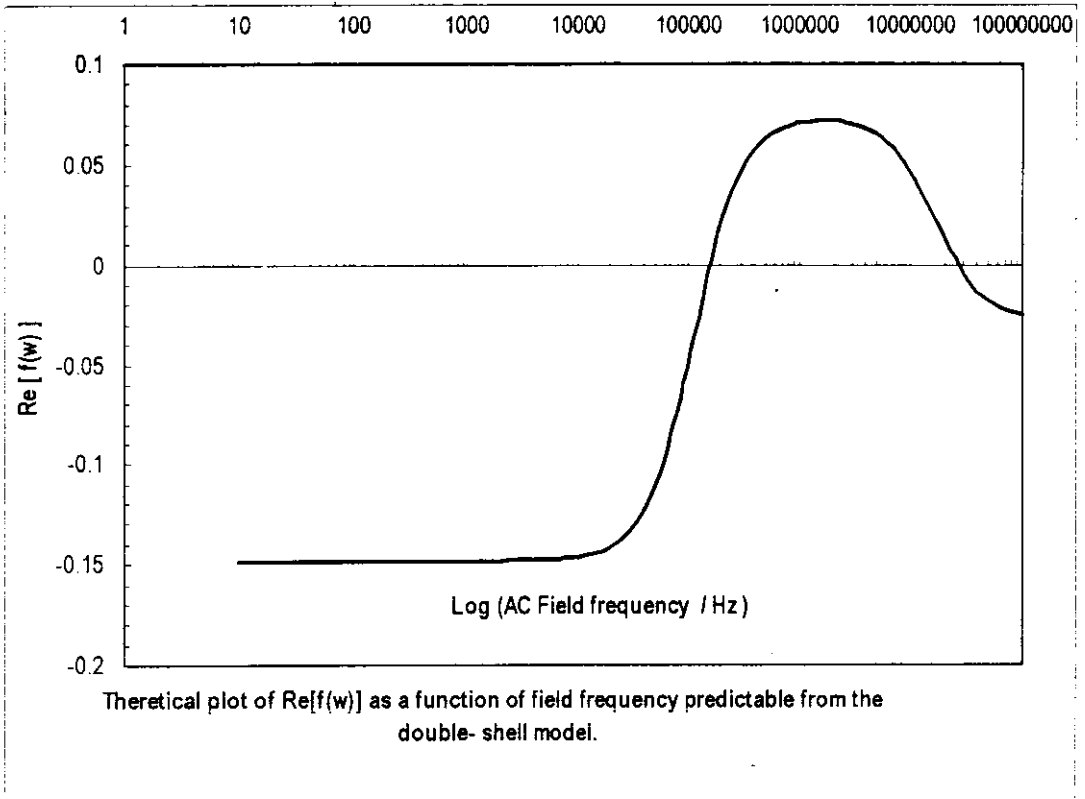
สภาพนำไฟฟ้าของผนังเซลล์  $\sigma_{im} = 0.1\mu S/m$  และ  $\sigma_{om} = 0.1\mu S/m$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายที่ใช้แขวนลอยเซลล์  $\sigma_s = 50mS/m$

รัศมีเซลล์  $R = 20\mu m$

ความหนาของเยื่อหุ้มเซลล์แต่ละชั้น  $d_{im} = 10nm, d_{oc} = 15nm, d_{om} = 10nm$

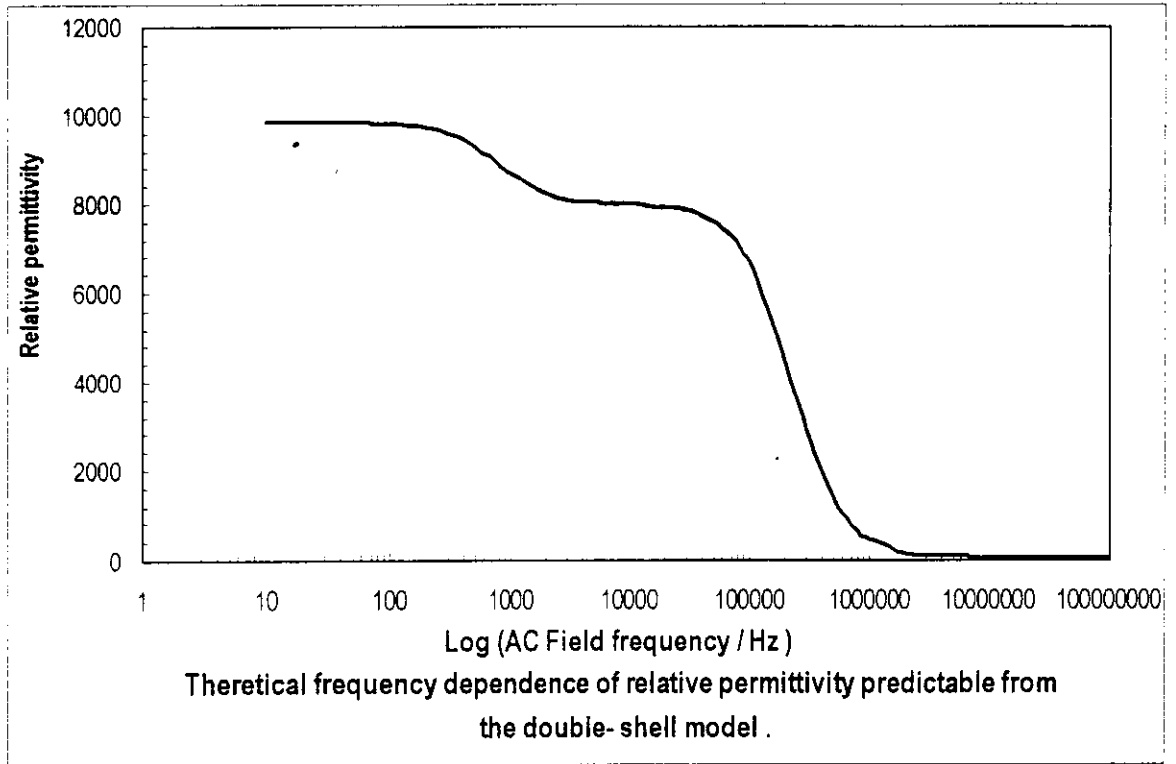
ได้กราฟในลักษณะคล้ายกับแบบจำลอง SSM แต่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า เกิดไดโพลีโทรฟอเรซิสในช่วงความถี่ประมาณ 100 kHz ถึง 25 MHz ให้ค่า  $\text{Re}[f(\omega)]$  สูงสุดประมาณ 0.08 ที่ความถี่ 2 MHz (ตามกราฟที่ 4) แสดงให้เห็นว่าที่ความถี่ดังกล่าว โพรโทพลาสต์น่าจะมีความเร็วไดโพลีโทรฟอเรติกสูงสุด



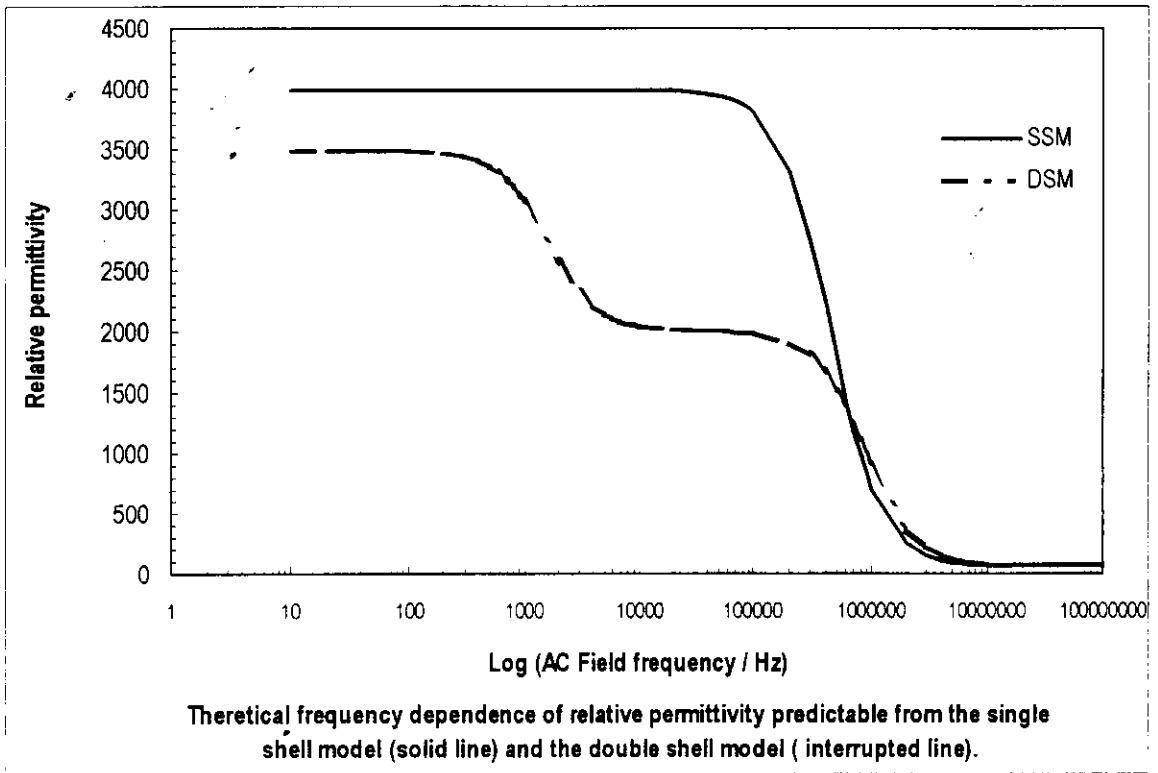
กราฟที่ 4 แสดงสเปกตรัมไดโพลีโทรฟอเรซิสตามแบบจำลอง DSM ของงานวิจัยนี้  
พลอตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

#### 4. ไดอิเล็กทริกดิสเพอชันตามแบบจำลอง DSM

เมื่อพลอตกราฟสมการที่ 31 เทียบกับความถี่ของสนามไฟฟ้า พบว่า ค่าไดอิเล็กทริกของโพรโทพลาสต์จะมีการลดค่าลงตามทฤษฎีเบต้าดิสเพอชัน กล่าวคือ ที่ความถี่สนามไฟฟ้าต่ำ ค่าไดอิเล็กทริกของโพรโทพลาสต์ (ตามทฤษฎีDSM) จะมีค่าสูงมากประมาณ 10000 เท่าของค่าไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ เริ่มลดค่าลงครั้งที่ 1 ที่ความถี่ 500Hz จนมีค่าประมาณ 8000 เท่าของไดอิเล็กทริกของสุญญากาศที่ความถี่ประมาณ 1kHz และลดค่าครั้งที่ 2 ที่ความถี่ 100 kHz จาก 8000 เท่าของไดอิเล็กทริกของสุญญากาศลดลงเหลือ 60 เท่าของไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ ที่ความถี่ 25 MHz การลดค่าตามทฤษฎีเช่นนี้สื่อให้เห็นว่าสภาพความเป็นไดอิเล็กทริกโดยรวมของโพรโทพลาสต์จะลดลงเมื่อความถี่สนามไฟฟ้าสูงขึ้นเช่นเดียวกับแบบจำลอง SSM เป็นที่สังเกตว่าในช่วงความถี่ 100 kHz ถึง 25 MHz ซึ่งเกิดการลดค่าไดอิเล็กทริกครั้งที่ 2 ตรงกับช่วงสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสตามกราฟที่ 4 ซึ่งน่าจะเป็นช่วงความถี่ที่โพรโทพลาสต์เกิดไดโพลโมเมนต์จำนวนมาก เหมาะสมแก่การศึกษาไดอิเล็กโทรฟอเรซิส



กราฟที่ 5 แสดงไดอิเล็กทริกดิสเพอชันตามแบบจำลอง DSM ของงานวิจัยนี้  
พลอตกราฟด้วยโปรแกรม Excel



กราฟที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบไดอิเล็กทริกดิสเพอชั่นระหว่างแบบจำลอง SSM กับ DSM ของงานวิจัยนี้  
 ผลิตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

## 5. ความเร็วไดอิเล็กทริกโฟเรติกจากการทดลอง

ผลการวัดความเร็วไดอิเล็กทริกโฟเรติกของสับปรตฎุเกิดคำนวณตามสมการที่ 6 , 44 และ 45 ใช้เงื่อนไขดังนี้ สารละลายแขวนลอยเข้มข้น 0.6 M สภาพนำไฟฟ้า 50 mS/m ความหนืด 1.22 mN.S.m<sup>-2</sup> ขั้วไฟฟ้า निकเกิลอัลลอยด์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 125 ไมครอน วางห่างกัน 250 ไมครอน ความต่างศักย์ไฟฟ้า 7 V<sub>p-p</sub>  $\vec{v}(\vec{E})^2 = 1.62 \times 10^{12} (v^2 \cdot m^{-3})$  รัศมีโพทโพลาสต์ประมาณ 20 ไมครอน ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง วัดความเร็วแล้วหาค่าเฉลี่ย

### ข้อมูลชุดที่ 1 สภาพนำไฟฟ้า 50 mS/m

ความถี่ (Hz)	ความเร็ว (เมตร/วินาที) (ข้อมูลดิบ)	ความเร็ว (ไมครอน/วินาที)	Re[f(w)] คำนวณจากสมการที่ 45 *
30MHz	0.0000066	6.6±0.2	0.05
20MHz	0.0000060	6.0±0.1	0.05
10MHz	0.0000147	14.7±0.6	0.12
9MHz	0.0000200	20.0±1.2	0.16
8MHz	0.0000170	17.0±0.3	0.14
7MHz	0.0000160	16.0±0.5	0.13
6MHz	0.0000200	20.0±0.8	0.16
5MHz	0.0000150	15.0±0.3	0.12
4MHz	0.0000207	20.7±0.7	0.17
3MHz	0.0000212	21.2±2.2	0.17
2MHz	0.0000175	17.5±1.5	0.14
1MHz	0.0000200	20.0±1.7	0.16
900kHz	0.0000194	19.4±0.9	0.16
800kHz	0.0000179	17.9±0.8	0.14
700k	0.0000172	17.2±1.4	0.14
600k	0.0000162	16.2±2.1	0.13
500k	0.0000112	11.2±0.6	0.09
400k	0.0000112	11.2±0.4	0.09
300k	0.0000068	6.8±0.5	0.05
280k	0.0000046	4.5±0.4	0.04
260k	0.0000039	3.9±0.7	0.03
240k	0.0000019	1.9±0.1	0.01
200k	0.0000016	1.6±0.3	0.01
100k	0	0	0

## ข้อมูลชุดที่ 2

ใช้เงื่อนไขการทดลองเหมือนชุดข้อมูลที่ 1 แต่เปลี่ยน สภาพนำไฟฟ้าเป็น 16 mS/m

ความถี่(Hz)	ความเร็ว(เมตร/นาที่)ข้อมูลดิบ	ความเร็ว (ไมครอน/วินาที)	Re[f(w)] คำนวณจากสมการที่ 45
30MHz			
20MHz			
10MHz	0.0000640	64.0±5.4	0.51
9MHz	0.0000513	51.3±4.3	0.41
8MHz	0.0000696	69.6±3.7	0.56
7MHz	0.0000556	55.6±2.5	0.44
6MHz	0.0000473	47.3±1.8	0.38
5MHz	0.0000610	61.0±2.1	0.49
4MHz	0.0000625	62.5±1.9	0.50
3MHz	0.0000640	64.0±3.1	0.51
2MHz			
1MHz	0.0000656	65.6±4.9	0.52
900kHz	0.0000690	69.0±3.4	0.55
800kHz	0.0000556	55.6±2.2	0.44
700k	0.0000567	56.7±2.8	0.45
600k	0.0000567	56.7±1.7	0.45
500k	0.0000640	64.0±2.8	0.51
400k	0.0000625	62.5±2.9	0.50
300k	0.0000457	45.7±1.5	0.37
180k	0.0000342	34.2±1.1	0.27
160k	0.0000548	54.8±2.3	0.44
140k	0.0000449	44.9±1.9	0.36
120k	0.0000442	44.2±2.5	0.35
100k	0.0000381	38.1±1.5	0.30
90k	0.0000290	29.0±1.3	0.23
80k	0.0000206	20.6±0.8	0.16
70k	0.0000200	20.0±0.5	0.16
60k	0.0000133	13.3±0.6	0.11
50k	0.0000081	8.1±0.2	0.06
40k	0	0	0

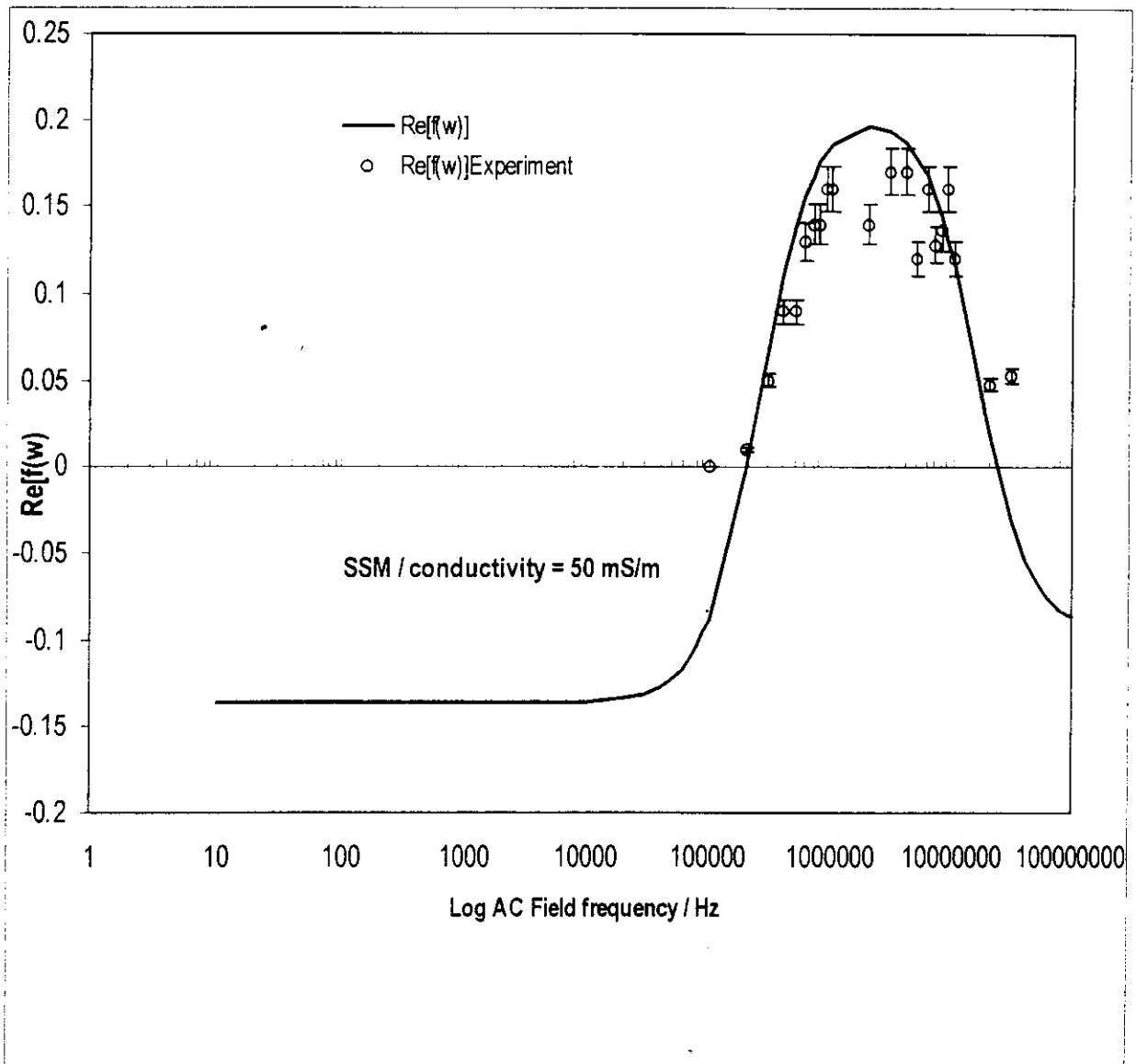
## ผลการทดลองหา $Re[f(\omega)]$

### 6. สเปกตรัมความถี่ไดโอดเล็กโทรฟอเรนซิสมตามการทดลองข้อมูลชุดที่ 1

เมื่อนำค่า  $Re[f(\omega)]$  ที่ได้จากการทดลองชุดที่ 1 พล็อตกราฟร่วมกับสเปกตรัมไดโอดเล็กโทรฟอเรนซิสมแบบจำลอง SSM เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 100 MHz พบว่า ให้ค่าที่สอดคล้องกันตามกราฟที่ 7 กล่าวคือ

ทฤษฎี ช่วงความถี่ไดโอดเล็กโทรฟอเรนซิสมทฤษฎีมีค่า 200 kHz ถึง 20 MHz ให้ค่า  $Re[f(\omega)]$  สูงสุด 0.2 ที่ความถี่ 2 MHz

การทดลอง ช่วงความถี่ไดโอดเล็กโทรฟอเรนซิสมการทดลองมีค่า 100 kHz ถึง 30 MHz ให้ค่า  $Re[f(\omega)]$  สูงสุด 0.17 ที่ความถี่ 3 MHz (ดูตารางข้อมูลการทดลองชุดที่ 1 ประกอบ)



กราฟที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมไดโอดเล็กโทรฟอเรนซิสมระหว่างทฤษฎีแบบจำลอง SSM กับผลการทดลองของงานวิจัยนี้ พล็อตกราฟด้วยโปรแกรม Excel



ค่าไดอิเล็กทริกและค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟที่ 6 ข้อมูลการทดลองชุดที่ 1

จากกราฟพบว่าเส้นสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสตามแบบจำลอง SSM ที่พลอตมีความสอดคล้องกับเส้นสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสจากการทดลอง แสดงว่าข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการพลอตกราฟเพื่อลากเส้นกราฟสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสตามแบบจำลองคือข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นของโพโรโทพลาสติกสับปะรดภูเก็ต ข้อมูลเหล่านี้มีดังนี้

### ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพโรโทพลาสติกสับปะรดภูเก็ต

รัศมีโพโรโทพลาสติก  $R = 20 \mu m$

ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์  $\delta = 10 nm$

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายแขวนลอย  $\epsilon_s = 80\epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม  $\epsilon_c = 60\epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์  $\epsilon_m = 14\epsilon_0$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายแขวนลอย  $\sigma_s = 50 mS / m$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม  $\sigma_c = 0.09 S / m$

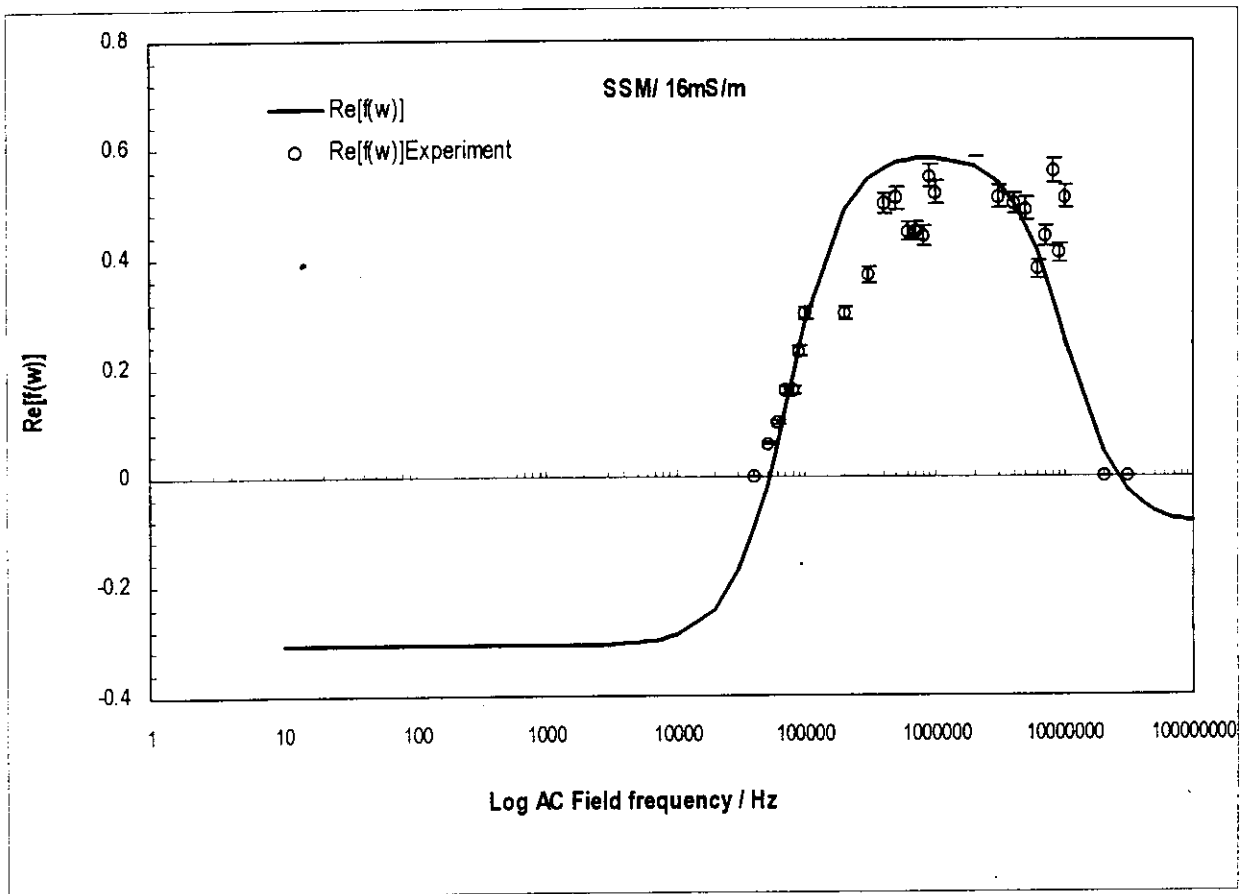
สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์  $\sigma_m = 0.1 mS / m$

## 7. สเปกตรัมความถี่ไดโพลีโทรโพเรซิสตามการทดลองข้อมูลชุดที่ 2

เมื่อนำค่า  $Re[f(w)]$  ที่ได้จากการทดลองชุดที่ 2 พล็อตกราฟร่วมกับสเปกตรัมไดโพลีโทรโพเรซิสตามแบบจำลอง SSM เทียบกับความถี่สนามไฟฟ้าตั้งแต่ 1 Hz จนถึง 100 MHz พบว่า ให้ค่าที่สอดคล้องกันตามกราฟที่ 8 กล่าวคือ

ทฤษฎี ช่วงความถี่ไดโพลีโทรโพเรซิสตามทฤษฎีมีค่า 200 kHz ถึง 20 MHz ให้ค่า  $Re[f(w)]$  สูงสุด 0.58 ที่ความถี่ 2 MHz

การทดลอง ช่วงความถี่ไดโพลีโทรโพเรซิสตามทฤษฎีมีค่า 40 kHz ถึง 10 MHz ให้ค่า  $Re[f(w)]$  สูงสุด 0.55 ที่ความถี่ 8 MHz และ 900kHz (ดูตารางข้อมูลการทดลองชุดที่ 2 ประกอบ)



กราฟที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบสเปกตรัมไดโพลีโทรโพเรซิสระหว่างทฤษฎีแบบจำลอง SSM กับผลการทดลองชุดข้อมูลชุดที่ 2 ของงานวิจัยนี้  
พลอตกราฟด้วยโปรแกรม Excel

ค่าไดอิเล็กทริกและค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ได้จากกราฟที่ 7 ข้อมูลการทดลองชุดที่ 2

จากกราฟที่ 7 พบว่าเส้นสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสตามแบบจำลอง SSM ที่พลอตมีความสอดคล้องกับเส้นสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสจากการทดลอง แสดงว่าข้อมูลต่างๆที่ใช้ในการพลอตกราฟเพื่อลากเส้นกราฟสเปกตรัมไดอิเล็กโทรพอเรซิสตามแบบจำลองคือข้อมูลที่ถูกต้องและเป็นของโพรโทพลาสต์สับปรระตฤกเกิด ข้อมูลเหล่านี้มีดังนี้

### ค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์สับปรระตฤกเกิด

รัศมีโพรโทพลาสต์  $R = 20 \mu m$

ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์  $\delta = 10 nm$

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายแขวนลอย  $\epsilon_s = 80\epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม  $\epsilon_c = 60\epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์  $\epsilon_m = 14\epsilon_0$

สภาพนำไฟฟ้าของสารละลายแขวนลอย  $\sigma_s = 16 mS / m$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม  $\sigma_c = 0.09 S / m$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์  $\sigma_m = 10^{-5} S / m$

## 8. สรุปค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์สับประรดภูเก็ต

เมื่อพิจารณาจากค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์สับประรดภูเก็ตจากชุดข้อมูลการทดลองที่ 1 และ 2 พบว่า มีค่าที่เหมือนกันทุกตัว แตกต่างกันเพียงค่าเดียวคือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งมีค่า  $0.1 \text{ mS/m}$  (ข้อมูลชุดที่ 1) และมีค่า  $10^{-5} \text{ S/m}$  (ข้อมูลชุดที่ 2) ในเบื้องต้นน่าจะสรุปได้ว่าค่าสภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์สับประรดภูเก็ตมีค่าอยู่ในช่วง  $\sigma_m = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ S/m}$  สรุปค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของโพรโทพลาสต์สับประรดภูเก็ตได้ว่า

$$\text{รัศมีโพรโทพลาสต์ } R = 20 \mu\text{m}$$

$$\text{ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์ } \delta = 10 \text{ nm}$$

$$\text{ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายแขวนลอย } \epsilon_s = 80\epsilon_0$$

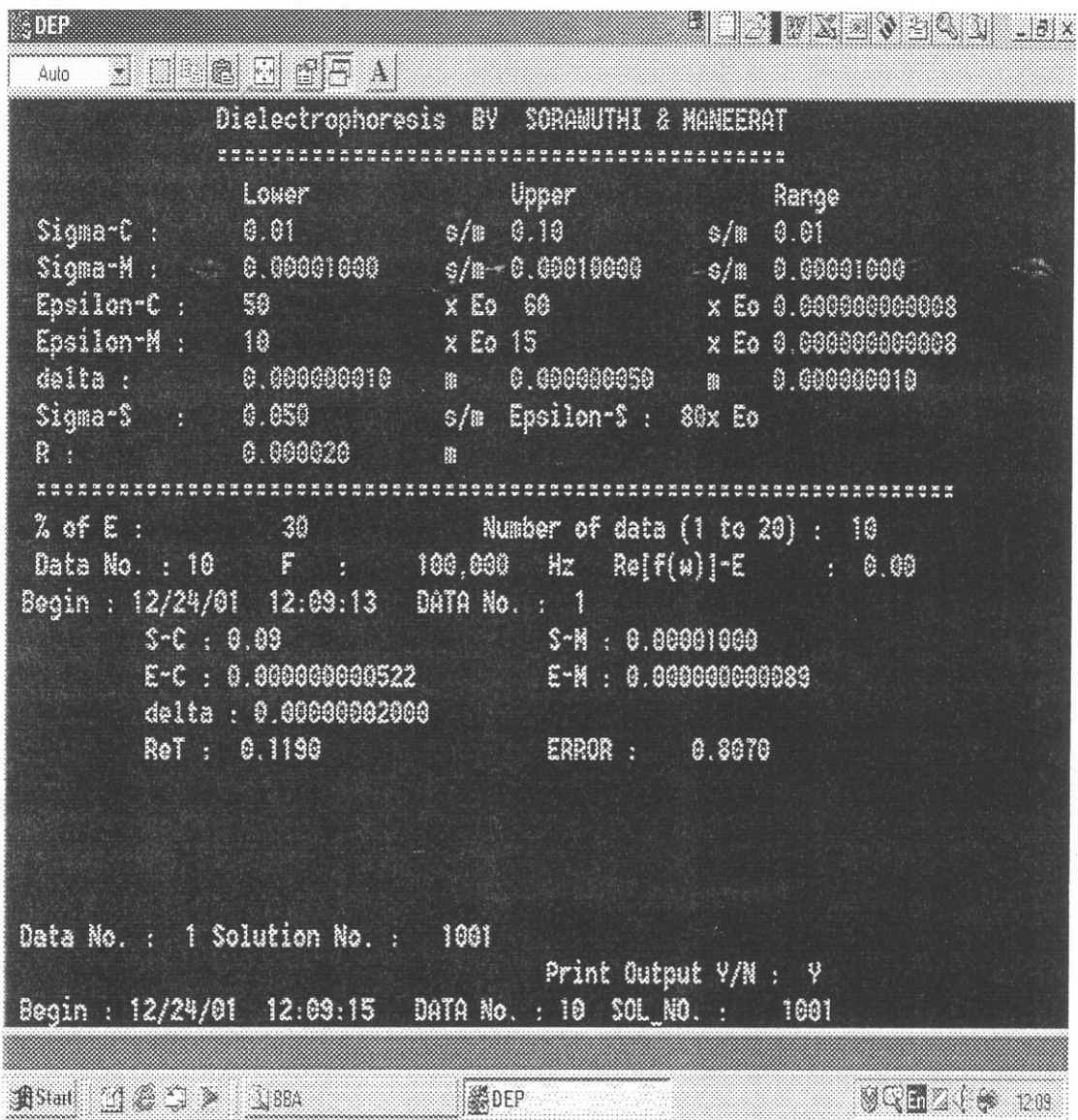
$$\text{ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม } \epsilon_c = 60\epsilon_0$$

$$\text{ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์ } \epsilon_m = 14\epsilon_0$$

$$\text{สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม } \sigma_c = 0.09 \text{ S/m}$$

$$\text{สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ } \sigma_m = 10^{-5} - 10^{-4} \text{ S/m}$$

ผลการทดลองใช้โปรแกรมคำนวณหาค่าไดอิเล็กทริกของสับปะรดภูเก็ต  
ข้อมูลการทดลองชุดที่ 1 และ 2



รูปประกอบที่ 10

ผลลัพธ์การคำนวณโดยโปรแกรม เวลาคำนวณทั้งหมด 2 วินาที

ดูบรรทัดที่เขียนว่า S-C =  $\sigma_c = 0.09 S / m$

S-M =  $\sigma_m = 10^{-5} S / m$

E-C =  $\epsilon_c = 522 \times 10^{-12} F / m = 58 \epsilon_0$

E-M =  $\epsilon_m = 86 \times 10^{-12} F / m = 10.05 \epsilon_0$

delta 20nm ReT ค่าRe[f(w)]ตามทฤษฎี และ ERROR= 8 %

ค่าพารามิเตอร์ทุกตัวที่คำนวณได้มีค่าตรงกับผลการคำนวณเมื่อตามผลการทดลองหัวข้อที่ 6 และ 7

## สรุปผลการทดลอง

### 1. การทดลองเพาะเลี้ยงต้นอ่อนสับประรดและเตรียมโพรโทพลาสต์

งานวิจัยนี้ได้ทำการเพาะเลี้ยงต้นอ่อนสับประรดในห้องทดลอง และได้ทดลองย่อยผนังเซลล์สับประรดด้วยเอนไซม์เพื่อให้ได้โพรโทพลาสต์สับประรด เกิดขึ้นที่สำเร็จ ต้นอ่อนสับประรดที่มีอายุประมาณ 7 เดือนจะมีใบสมบูรณ์แข็งแรง เมื่อทำการย่อยสกัดเซลล์จากใบเพื่อให้ได้โพรโทพลาสต์ จะได้โพรโทพลาสต์ลักษณะกลมใสแกมเขียวอ่อน รัศมีเซลล์ประมาณ 20 ไมครอน จำนวนมาก (ดูรูปประกอบที่ 4)

### 2. การทดลองไดอิเล็กโทรฟอเรซิสและวัดความเร็วไดอิเล็กโทรฟอเรติก

จากการทดลองพบว่า เงื่อนไขการทดลองที่ทำให้โพรโทพลาสต์สับประรดเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสในงานวิจัยนี้คือ ใช้สารละลายแขวนลอยเข้มข้น 0.6 M ที่มีสภาพนำไฟฟ้า 50 mS/m และ 16 mS/m ความหนืด 1.22 mN.S.m<sup>2</sup> ใช้ขั้วไฟฟ้านิกเกิลอัลลอยด์ เส้นผ่าศูนย์กลาง 125 ไมครอน วางห่างกัน 250 ไมครอน ความต่างศักย์ไฟฟ้า 7 Vp-p ได้ค่า  $\vec{V}(\vec{E})^2 = 1.62 \times 10^{12} (V^2 \cdot m^{-3})$  เมื่อโพรโทพลาสต์เกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสจะเคลื่อนที่เข้าเกาะขั้วไฟฟ้าขั้วใดขั้วหนึ่งที่มีน้อยกว่า (ดูรูปประกอบ 6.2) ด้วยความเร็วค่อนข้างคงที่ ด้วยเหตุเพราะเทอม  $\vec{V}(\vec{E})^2$  มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำเมื่อเทียบกับระยะทางระหว่างขั้วไฟฟ้า ทำให้แรงไดอิเล็กโทรฟอเรติกตามสมการที่ 40 มีค่าคงที่ ส่งผลให้ใช้สมการที่ 44 คำนวณความเร็วได้จากผลการทดลองพบว่า กรณีที่ใช้สารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 50 mS/m แขวนลอย โพรโทพลาสต์จะเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสในช่วงความถี่ 100 kHz – 30 MHz ความเร็วต่ำสุดที่วัดได้มีค่า 1.6 ไมครอนวินาที ที่ความถี่ 200 kHz และความเร็วสูงสุดที่วัดได้มีค่า 21.2 ไมครอนวินาที ที่ความถี่ 3 MHz สำหรับกรณีที่ใช้สารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้า 16 mS/m แขวนลอย โพรโทพลาสต์จะเกิดไดอิเล็กโทรฟอเรซิสในช่วงความถี่ 40 kHz – 10 MHz ความเร็วต่ำสุดที่วัดได้มีค่า 13.3 ไมครอนวินาที ที่ความถี่ 50 kHz และความเร็วสูงสุดที่วัดได้มีค่า 69.6 ไมครอนวินาที ที่ความถี่ 8 MHz และ 900 kHz จากข้อมูลตั้งข้อสังเกตได้ว่า ความเร็วไดอิเล็กโทรฟอเรติกโดยเฉลี่ยของโพรโทพลาสต์ที่แขวนลอยในสารละลายที่มีสภาพนำไฟฟ้าที่ต่ำกว่าจะมีค่าสูงกว่า สอดคล้องตามงานวิจัยที่ Mahaworasilpa et al.1996 ได้รายงานไว้ ส่งผลให้แอมพลิจูดของสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสของข้อมูลชุดการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่าชุดที่ 1 นอกจากนี้แล้วยังพบว่าขอบเขตช่วงความถี่ไดอิเล็กโทรฟอเรซิสของข้อมูลการทดลองทั้ง 2 ชุดมีค่าไม่เท่ากัน กล่าวคือ ถ้าสภาพนำไฟฟ้าของสารละลายมีค่าสูงขึ้นจะมีแนวโน้มทำให้ขอบเขตช่วงความถี่ขยายไปที่ความถี่สูงขึ้น สอดคล้องตามงานวิจัยที่ Mahaworasilpa et al.1996 ได้รายงานไว้ เช่นกัน

### 3.แบบจำลองทางไฟฟ้า SSM และ DSM

จากการวิเคราะห์คณิตศาสตร์ของแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือก 1 ชั้น (SSM) กับแบบจำลองทางไฟฟ้าของเซลล์เดี่ยวทรงกลมเปลือก 2 ชั้น (DSM) พบว่ามีความคล้ายคลึงกัน กล่าวคือ ใช้หลักการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าที่แต่ละชั้นผิวสัมผัสของแต่ละองค์ประกอบที่เป็นไดอิเล็กทริกของเซลล์ด้วยสมการลาปลาซพิกัดทรงกลม ความซับซ้อนและจำนวนตัวแปรของแบบจำลองขึ้นกับจำนวนชั้นไดอิเล็กทริก ดังนั้น แบบจำลอง DSM จึงมีตัวแปรมากกว่าแบบจำลอง SSM ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาเทอม  $Re\{f(w)\}$  เป็นไปตามสมการที่ 4 มีจำนวนตัวแปรถึง 8 ตัว (ดูขั้นตอนที่ 4 บทที่ 2) และสำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์หาเทอม  $Re\{f(w)\}$  ตามสมการที่ 39 มีจำนวนตัวแปรถึง 14 ตัว (ดูหัวข้อ 4.2 บทที่ 1) ผลจากการทดลองพบว่าแบบจำลอง SSM ให้ค่าที่สอดคล้องกับชุดข้อมูลการทดลองที่ 1 และ 2 จึงไม่จำเป็นต้องใช้แบบจำลอง DSM วิเคราะห์ อีกทั้งตั้งข้อสังเกตว่า แอมพลิจูดของสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสตามแบบจำลอง SSM มีค่ามากกว่า DSM ประมาณ 3 เท่า ตามกราฟที่ 2 และกราฟที่ 4 สันนิษฐานว่าน่าจะเกี่ยวข้องกับจำนวนชั้นไดอิเล็กทริก ตามแบบจำลอง DSM มี 3 ชั้น (ไม่รวมไซโทพลาสซึม ดูรูปที่ 3 ประกอบ) แต่แบบจำลอง SSM มี 1 ชั้น สรุปเป็นข้อสมมติฐานเบื้องต้นได้ว่า จำนวนชั้นไดอิเล็กทริกที่มากขึ้น สนามไฟฟ้าภายนอกเซลล์จะเหนี่ยวนำให้เซลล์เกิดไดโพลโมเมนต์น้อยลงทำให้มีค่า  $Re\{f(w)\}$  น้อยลงด้วย

### 4.โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประมวลค่าไดอิเล็กทริกของงานวิจัยนี้

ด้วยเหตุที่แบบจำลอง SSM มีจำนวนตัวแปรมากถึง 8 ตัว เขียนอยู่ในรูปสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นตามสมการที่ 4 และสมการที่ 9 เมื่อคำนวณหาค่าเทอม  $Re\{f(w)\}$  พบว่าใช้เวลานาน เกิดข้อผิดพลาดสูง อีกทั้งพบว่าหากใช้โปรแกรมสำเร็จรูป microsoft excel ช่วยคำนวณและปรับค่าสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิสระหว่างทฤษฎีกับผลการทดลอง (ดูกราฟที่ 6 และ 7 ประกอบ) กลับยิ่งใช้เวลาเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ขึ้นกับความรู้และความชำนาญของผู้วิเคราะห์ งานวิจัยนี้ได้แก้ปัญหานี้สำเร็จโดยวิธีการเขียนโปรแกรมคำนวณขึ้นมาเองด้วยโปรแกรม Clipper ลงบนไมโครคอมพิวเตอร์ เขียนโปรแกรมโดยอาศัยหลักการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่า  $Re\{f(w)\}$  ที่ได้จากทฤษฎีและการทดลองได้สูงสุด 20 ค่า ค่าเหล่านี้จะถูกรวบรวมเป็นสเปกตรัมไดอิเล็กโทรฟอเรซิส 1 เส้น แล้วเริ่มต้นกระบวนการทำซ้ำ จนค่าที่เปรียบเทียบได้มีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่กำหนด (เราเป็นผู้กำหนด) ผลลัพธ์ที่โปรแกรมคำนวณได้ จะแสดงค่าปรากฏเมื่อกระบวนการทำซ้ำสิ้นสุดลง โปรแกรมที่เขียนเสร็จมีลักษณะตามรูปประกอบที่ 8 และ 10 จากการทดลองใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า เวลาคำนวณของโปรแกรมใช้เวลาน้อยมาก ประมาณ 2 – 180 วินาที ทั้งนี้ขึ้นกับการกำหนดค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมทั้งการกำหนดค่าไดอิเล็ก

ทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้น กล่าวคือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดที่มีค่าน้อย ต้องใช้เวลาคำนวณนาน รวมทั้งการกำหนดค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของเซลล์เริ่มต้นที่มีค่าห่างจากความเป็นจริงมาก จะใช้เวลาคำนวณนานเช่นกัน

## 5.สรุปค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าโพรโทพลาสต์สับประรดภูเก็ต

จากการใช้วิธีคำนวณมือ และใช้โปรแกรมคำนวณ พบว่าค่าไดอิเล็กทริกและสภาพนำไฟฟ้าของสับประรดภูเก็ตมีค่าตรงกัน แต่วิธีหลังมีความสะดวกรวดเร็วกว่า สรุปข้อมูลได้ดังนี้

รัศมีโพรโทพลาสต์  $R \approx 20 \mu m$

ความหนาของชั้นเยื่อหุ้มเซลล์  $\delta = 10 nm$

ค่าไดอิเล็กทริกของสารละลายแขวนลอย  $\epsilon_s = 80 \epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของไซโทพลาสซึม  $\epsilon_c = 58 - 60 \epsilon_0$

ค่าไดอิเล็กทริกของเยื่อหุ้มเซลล์  $\epsilon_m = 10 - 14 \epsilon_0$

สภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึม  $\sigma_c = 0.09 S / m$

สภาพนำไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์  $\sigma_m = 10^{-5} - 10^{-4} S / m$

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆเหล่านี้มีค่าสอดคล้องและใกล้เคียงกับเซลล์ชนิดอื่นๆ ตามงานวิจัยของ Kaler and Jones(1990) ,Fuhr and Kuzmin(1986) , Radu et al.,1996 และ Mahaworasilpa et al.,1994 ยกเว้นค่าสภาพนำไฟฟ้าของไซโทพลาสซึมซึ่งมีค่าแตกต่างอย่างเด่นชัด กล่าวคือ มีค่าน้อยกว่าปกติ เมื่อเทียบกับข้อมูลงานวิจัยกลุ่มดังกล่าว ซึ่งปกติควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.1 ถึง 5 S/m อาจเป็นไปได้ว่า องค์ประกอบของของเหลวภายในเซลล์สับประรดมีปริมาณไอออน อาทิ โซเดียมและคลอไรด์ไอออนในปริมาณที่ต่ำ อย่างไรก็ดี ค่าดังกล่าวอาจแสดงถึงเอกลักษณ์เฉพาะของโพรโทพลาสต์สับประรดภูเก็ต