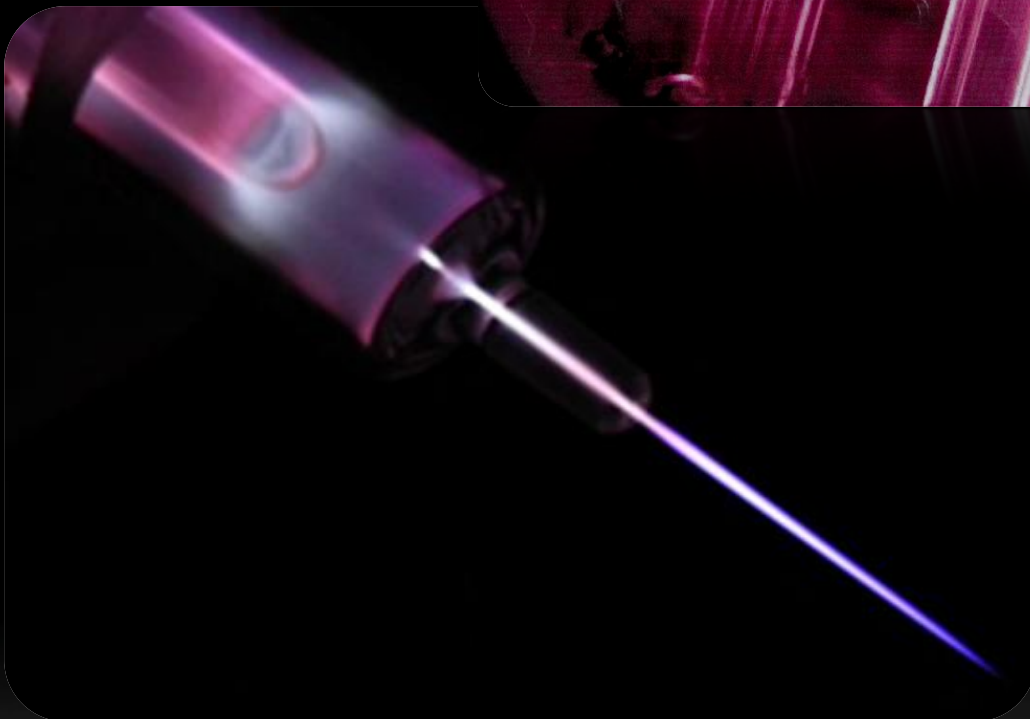


ฟิลิกส์ของพลาสติกมา



ธีรพรรณ บุญญวรรณ

ภาพปก:

พลาสมาในหัวจ่ายไอออนความเข้มสูง (CMU intense plasma source)
และเข็มพลาสมาความดันบรรยากาศ (PBP's plasma needle)

ธีรวรรณ บุญวรรณ

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ISBN : 974-672-036-8

พิมพ์ครั้งที่ 1 พศ. 2558 จำนวน 200 เล่ม

พิมพ์ครั้งที่ 2 พศ. 2561 จำนวน 200 เล่ม

พิมพ์ครั้งที่ 3 พศ. 2563 (ฉบับปรับปรุง)

จัดพิมพ์โดย Science CMU Printing Service

ISBN 9746720368



9789746720366



รูปภาพประกอบทำซ้ำภายใต้ Public Domain Rights (reproduce under the CC BY 3.0/4.0 license) นอกจากที่ระบุว่าได้รับอนุญาตทำซ้ำไว้แล้ว

แต่ ธาริณี และ ธีรุตต์

Physical Constants

Magnitude of charge on electron $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

Mass of electron $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Mass of hydrogen ion $m_i = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

Boltzmann's constant $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$

Velocity of light in vacuum $c = 3.00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Permittivity of vacuum $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

Permeability of vacuum $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$

$1 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$

"... the investigation of the fourth state of matter plasma will be one of the most challenging and exciting fields of human endeavor"

: Sir William Crookes

คำนำ

ฟิสิกส์ของพลาสมาเป็นแขนงวิชาหนึ่งของฟิสิกส์ ที่มีบทบาทสำคัญในการประยุกต์ใช้งานอย่างหลากหลายและกว้างขวาง ผู้เขียนเองเริ่มทำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องทางพลาสมาได้ระยะหนึ่ง เห็นว่าศาสตร์แขนงนี้ในประเทศไทยมีการบุกเบิกกันมายาวนานพอสมควร ทว่ามีตำราและบทความจากการประยุกต์ใช้งานในวงค่อนข้างจำกัด จึงมุ่งมั่นที่จะรวบรวมเขียนขึ้นเพื่อเป็นฐานความรู้สำหรับนักศึกษาระดับชั้นปีที่ 3-4 ขึ้นไปถึงระดับบัณฑิตศึกษาหรือบุคคลทั่วไปที่มีพื้นฐานความรู้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าระดับสูง ทั้งนี้เพื่อที่จะสามารถนำไปประยุกต์ในงานวิจัย หรือเพื่อใช้เป็นแนวทางในการค้นคว้าเพิ่มเติมในระดับที่สูงกว่านี้ต่อไป

อย่างหนึ่งที่ทำให้ศาสตร์แขนงนี้เป็นที่จับตามองในแวดวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีของโลกปัจจุบันคือ การร่วมมือกันพัฒนาแหล่งพลังงานจากปฏิกิริยาหลอมตัวของนานาชาติ เป็นความร่วมมือที่ต้องใช้ความรู้ทางฟิสิกส์ของพลาสมาอย่างลึกซึ้งและถ่องแท้ และนั่นยังทำให้มีความจำเป็นในการเพิ่มพูนความรู้ความเข้าใจ เพื่อนำไปสู่การพัฒนาบุคลากรทางด้านนี้ของประเทศไทยต่อไป

ธีรวรรณ บุญญวรรณ

สารบัญ

หน้าที่

ภาคที่ 1

บทที่ 1 บทนำและสมบัติมูลฐาน

1.1 สมบัติมูลฐานของพลาสมา	4
1.2 การสร้างสถานะพลาสมา	7
1.3 กระบวนการชนกันในพลาสมา	12
1.4 ระยะเฉลี่ยของการชน (mean free path)	16
1.5 การชนกันระหว่างประจุ	18
1.6 ความต้านทานไฟฟ้าของพลาสมา	19
คำถามท้ายบทที่ 1	23
บรรณานุกรม	24

บทที่ 2 การเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้าแม่เหล็ก

2.1 กรณีสนามไฟฟ้าคงที่ สม่่าเสมอ	25
2.2 กรณีสนามแม่เหล็กคงที่ สม่่าเสมอ	26
2.3 การดริฟท์ของอนุภาคมีประจุ	28
2.3.1 กรณีสนามไขว้ ($\vec{E} \times \vec{B}$ drift)	
2.3.2 กรณีสนามแม่เหล็กแปรค่าและโค้ง (curvature drift)	
2.3.3 กรณีสนามแม่เหล็กแนวแกนแปรค่า (gradient drift)	
2.4 Adiabatic invariant	36
คำถามท้ายบทที่ 2	38
บรรณานุกรม	40

บทที่ 3 พฤติกรรมเชิงของไหล

3.1. กลศาสตร์ของไหล	41
3.2. พลาสมาประหนึ่งของไหล	44
3.3. การดริฟท์ของพลาสมา	46
3.4. พลาสมาในรูปของไหลเดี่ยว	48
3.5. กฎของโอห์มกับพลาสมา	48
3.6. การกักพลาสมา	50

3.6.1	ปรากฏการณ์พินช์ (Pinch effect)	
3.6.2	Tokamaks และ stellarators	
	คำถามท้ายบทที่ 3	54
	บรรณานุกรม	55
บทที่ 4	ผลของผนัง : ซีทและการแพร่	
4.1	ความยาวหรือระยะเดอบาย	57
4.2	ชนิดของซีท	60
4.2.1	ซีทระนาบ ไม่มีการชน	
4.2.2	ศักย์ในซีทกรณีผนังลอย	
4.2.3	ซีทของศักย์ไฟสูง	
4.3	การแพร่และการเคลื่อนอนุภาคในพลาสมา	68
4.3.1	การแพร่	
4.3.2	สภาพเคลื่อนได้	
	คำถามท้ายบทที่ 4	75
	บรรณานุกรม	76
บทที่ 5	คลื่นในพลาสมา	
5.1	การสั่นของพลาสมา	77
5.2	สมการคลื่นในพลาสมา	78
5.2.1	คลื่นในพลาสมา (กรณีไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก)	
5.2.2	คลื่นในพลาสมา (กรณีมีการชนกัน)	
5.2.3	คลื่นในพลาสมา (กรณีมีสนามแม่เหล็กภายนอก)	
5.2.4	ผลของรูปทรงและขอบเขต	
5.2.5	คลื่น Magnetohydrodynamics (MHD)	
5.2.6	คลื่นอัลฟเวน (Alfvén wave)	
	คำถามท้ายบทที่ 5	94
	บรรณานุกรม	95
บทที่ 6	การจำลองและการวิเคราะห์พลาสมา	
6.1.	การจำลองจากทฤษฎีจลน์	97
6.2.	การจำลองจากพฤติกรรมของไหลหรือ MHD	98
6.3.	การให้น้ำหนัก	100

6.4. โมเดลอนุภาคในกล่อง (PIC)	101
6.5. โพรบไฟฟ้าหรือโพรบแสงมัวร์	108
6.6. โพรบแม่เหล็ก	111
6.7. อินเตอร์เฟอโรแบบไมโครเวฟ	114
6.8. การกระเจิงเลเซอร์แบบทอมสัน	116
6.9. สเปกโตรสโกปีจากพลาสมา	118
6.10. การวิเคราะห์พลาสมาความดันบรรยากาศ	122
คำถามท้ายบทที่ 6	134
บรรณานุกรม	135
บทที่ 7 การประยุกต์พลาสมา	
7.1 การประยุกต์ใช้งาน	137
7.2 ระบบพลาสมาสำหรับการประยุกต์	140
7.3 พลาสมาหลอมตัว	151
บรรณานุกรม	155
ภาคที่ 2	
บทที่ 8 พลาสมากับการประยุกต์ทางชีววิทยาศาสตร์	
8.1 ระบบพลาสมาความดันต่ำ	159
8.1.1 การประยุกต์ทางวัสดุงานเพาะเลี้ยงเซลล์	161
8.1.2 การประยุกต์ทางฟิล์มบรรจุภัณฑ์พอลิเมอร์ย่อยสลาย	179
8.1.3 การประยุกต์ทางกระดาษบรรจุภัณฑ์ (duplex board)	185
8.1.4 การประยุกต์วัสดุทันตกรรม	189
8.2 ระบบพลาสมาความดันบรรยากาศ	195
8.2.1 การประยุกต์ทางสิ่งทอ/เส้นใย	212
8.2.2 การประยุกต์ทางการแพทย์	221
8.2.3 การประยุกต์ทางทันตกรรม -1	237
8.2.4 การประยุกต์ทางทันตกรรม -2	250
8.2.5 การประยุกต์ทางทันตกรรม -3	262
8.2.6 พลาสมาสารละลาย (solution plasma)	267
ดัชนี	281
ประวัติผู้เขียน	287

สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 1.1 เปลวไฟถูกนิยามเป็นพลาสมาได้เฉพาะบางบริเวณ	1
รูปที่ 1.2 ลำดับสถานะและกระบวนการของสสารก่อนเป็นพลาสมา	2
รูปที่ 1.3 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นกับอุณหภูมิของพลาสมา	3
รูปที่ 1.4 แสดงการแจกแจงความเร็วอนุภาคกับอุณหภูมิของก๊าซ	4
รูปที่ 1.5 เปอร์เซ็นต์การเป็นไอออนของก๊าซไฮโดรเจนจากสมการซาฮา เมื่ออุณหภูมิพลาสมาสูงขึ้น	6
รูปที่ 1.6 ลำดับการแบ่งสถานะพลาสมาตามกลุ่มการใช้งาน	7
รูปที่ 1.7 หลอดบรรจุก๊าซ มีขั้วอิเล็กโทรดสองขั้วเพื่อดิสชาร์จ	8
รูปที่ 1.8 ลักษณะกระแสและแรงดัน ขณะเกิดการดิสชาร์จของก๊าซ	8
รูปที่ 1.9 ภาวะแตกตัวชนิดพังทลาย (avalanche effect) เป็นผลจากสนามไฟฟ้า	9
รูปที่ 1.10 ไอออนพุงชนผิวคาโทดทำให้เกิดอิเล็กตรอนด้วยสัมประสิทธิ์ γ	9
รูปที่ 1.11 การกระจายค่าต่าง ๆ ในหลอดดิสชาร์จช่วงเพิ่มกระแสไฟฟ้า	10
รูปที่ 1.12 การชนกันในพลาสมาระหว่างอิเล็กตรอนกับอนุภาคเกิดภาวะแตกตัวหรือกระตุ้นอะตอม	12
รูปที่ 1.13 อิเล็กตรอนในระดับพื้นได้รับพลังงาน ทำให้อะตอมเป็นไอออนหรืออะตอมถูกกระตุ้น	12
รูปที่ 1.14 ค่าภาคตัดขวางของการแตกตัวหรือกระตุ้นอะตอมด้วยอิเล็กตรอน	14
รูปที่ 1.15 อิเล็กตรอนพุ่งผ่านอนุภาคในพลาสมาพื้นที่ A ความหนา dx	17
รูปที่ 1.15 การชนกันของประจุเป็นชนิดแรงระยะไกล	18
รูปที่ 1.16 ระยะของการชนกันระหว่างประจุตรงข้าม	18
รูปที่ 1.17 ลักษณะการจัดวงจรเพื่อพิจารณาความต้านทานไฟฟ้าของพลาสมา	19
รูปที่ 2.1 สนามแม่เหล็กคงที่สม่ำเสมอในแนวแกน z จากขดโซลินอยด์ยาวมีกระแส I	26
รูปที่ 2.2 ประจุในสนาม B คงที่และสม่ำเสมอเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยรัศมีลามอร์	27
รูปที่ 2.3 ประจุเคลื่อนที่แบบหมุนเป็นเกลียวตามเส้นสนามแม่เหล็ก	28
รูปที่ 2.4 ประจุบวก/ลบเคลื่อนที่ตามทิศลูกศรเป็นผลจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าไขว้กัน	29
รูปที่ 2.5 อนุภาคมีประจุในพลาสมาทรงกระบอกเกิดการหมุนเป็นผลจากการดริฟท์สนามไขว้	29
รูปที่ 2.6 กรณีที่สนามแม่เหล็กแปรค่าและโค้ง	30
รูปที่ 2.7 กรณีที่สนามแม่เหล็กแปรค่าตามระยะทางในแนวแกน	32
รูปที่ 2.8 ประจุเคลื่อนที่ในสนามต้านบนรัศมีลามอร์มีวงเล็ก และวงใหญ่ขึ้นในสนามด้านล่าง	33
รูปที่ 2.9 การดริฟท์ของอนุภาคมีประจุต่างชนิดในสนามจากทั้งสองกรณี	33
รูปที่ 2.10 การดริฟท์ของประจุต่างชนิดในสนามทอรรอยด์ซึ่งมีทั้งเกรเดียนต์และความโค้ง	34

รูปที่ 2.11 แม่เหล็กสะท้อนใช้ในการกักพลาสมาในปฏิกิริยาทดลอง	35
รูปที่ 2.12 สนามแม่เหล็กโลกกักประจุอากาศไว้ ทำให้เกิดสภาพแวนรึงส์แวนอัลแลน	36
รูปที่ 2.13 ลักษณะ second adiabatic invariant จากสภาพสนามแม่เหล็กโลกบิดเบี้ยว	37
รูปที่ 3.1 มวลของไหลเข้าในปริมาตรจำกัดหนึ่ง ๆ พิจารณาในพิกัดคาร์ทีเซียน	41
รูปที่ 3.2 ปัญหาลักษณะมวลของไหลเข้า-ออก ในปริมาตรหนึ่ง ๆ ย่อมคงตัว	42
รูปที่ 3.3 ปัญหาลักษณะมวลของไหลปฏิบัติตามกฎอนุรักษ์พลังงาน	43
รูปที่ 3.4 ลักษณะการดริฟท์ของพลาสมาเนื่องจากสนามแม่เหล็กและเกรเดียนต์ความหนาแน่น	47
รูปที่ 3.6 ลักษณะการกระจายความหนาแน่นมีผลต่อสนามแม่เหล็กในพลาสมา	50
รูปที่ 3.7 พลาสมาทรงกระบอกรัศมี R กระแส I	51
รูปที่ 3.8 ปรากฏการณ์พินซ์ทำให้เกิดภาวะไม่เสถียรของพลาสมาขึ้นกับลักษณะสนามแม่เหล็ก ก) ideal ข) sausage instability ค) kink instability	52
รูปที่ 3.9 กระแสพลาสมาใน Tokamak ยังผลให้สนามแม่เหล็กลัพท์บิดเป็นรูปเกลียว	53
รูปที่ 3.10 Stellarator เพิ่มขดลวดเป็นเกลียว (helical field) เพื่อคุมการบิดเกลียวของพลาสมา	53
รูปที่ 4.1 พลาสมาบรรจุในภาชนะ	60
รูปที่ 4.2 ศักย์ไฟฟ้าของพลาสมาบริเวณผนัง	61
รูปที่ 4.3 ศักย์พลาสมาบริเวณใกล้ผนังหรือขอบเขตลดค่าลงเป็นชั้น ๆ ในซีท	63
รูปที่ 4.4 ซีทของเมทริกซ์คงไว้แต่ไอออนจึงมีลักษณะศักย์สนามและความหนาแน่นไอออนดังรูป	65
รูปที่ 4.5 ซีทของChildคงไว้แต่ไอออนจึงมีลักษณะศักย์สนามและความหนาแน่นไอออนดังรูป	67
รูปที่ 4.6 แถบเทาแสดงซีทบริเวณผิวโค้ง ก่อน (ซ้าย) และหลังประยุกต์ศักย์ไฟสูง (ขวา)	68
รูปที่ 4.7 การแพร่ชนิดชั่วคราวของพลาสมาอ่อน ไม่มีสนามแม่เหล็ก	71
รูปที่ 4.8 เมื่อมีสนามแม่เหล็ก การแพร่ของไอออนและอิเล็กตรอนมีทั้งในแนวฉากและแนวขนาน	73
รูปที่ 5.1 พิจารณาขึ้นพลาสมาบาง ๆ ขยับจากสมดุลจากผลของแรงภายนอก	77
รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฟสกับความถี่ของคลื่น	81
รูปที่ 5.3 ความเร็วเฟสของคลื่นที่เคลื่อนที่ตามสนามแม่เหล็ก	84
รูปที่ 5.4 แผนภูมิ CMA ของคลื่น LHCP และคลื่น RHCP กรณีคลื่นเคลื่อนที่ตามสนามแม่เหล็ก	85
รูปที่ 5.5 คลื่นเคลื่อนที่ที่ตักสนามแม่เหล็กเกิดคลื่น O และคลื่น X	86
รูปที่ 5.6 แผนภูมิ CMA ของคลื่น O และคลื่น X	86
รูปที่ 5.7 ความเร็วเฟสและแผนภูมิ CMA ของไอออนกรณีคลื่นขนาน	88
รูปที่ 5.8 สนามแม่เหล็กของคลื่นในกระบอกตามฟังก์ชันเบสเซลที่ m ค่าต่างๆ	90
รูปที่ 5.9 คลื่นอัลฟเวนมีสมบัติจากการรวมกันระหว่างสนามแม่เหล็กทั้งสอง	92
รูปที่ 5.10 ผลลัพธ์ของการรวมกันของสนาม B^0 และ B^1	92
รูปที่ 5.11 ความเร็วเฟสของคลื่นอัลฟเวนที่มุมคลื่นต่าง ๆ กรณี $V_A > U$	93

รูปที่ 6.1 แผนภูมิการจำลองพลาสมาอาศัยสองแนวทาง	97
รูปที่ 6.2 การจำลองพลาสมาของอนุภาคแต่ละชนิดโดยทฤษฎีจลน์	98
รูปที่ 6.3 การจำลองพลาสมาโมเดลของไหลโดยการแบ่งเป็นกริดย่อยๆ	99
รูปที่ 6.4 วงจรการคำนวณแบบฉบับของโค้ดผสม	99
รูปที่ 6.5 ลักษณะการให้น้ำหนัก zero-order หรือ nearest-grid point (NGP)	100
รูปที่ 6.6 แสดงการใช้วิธี finite difference เพื่อช่วยคำนวณโมเดล	101
รูปที่ 6.7 แสดงวิธี finite difference พิจารณา n อนุภาคพร้อมสมการคำนวณการจำลอง	102
รูปที่ 6.8 แสดงขั้นตอนการคำนวณเป็นลูป ไปทีละอนุภาคเพื่อจำลองพลาสมา	103
รูปที่ 6.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแฮมเบอร์ เพื่อการจำลองพลาสมาอาร์กอนอาร์เอฟเหนี่ยวนำ	107
รูปที่ 6.10 แสดงความหนาแน่นและการกระจายอิเล็กตรอนที่เวลาผ่านไป 373 นาโนวินาที	107
รูปที่ 6.11 แสดงอุณหภูมิอิเล็กตรอนที่เวลาผ่านไป 373 นาโนวินาที	108
รูปที่ 6.12 ลักษณะและการจัดไบอัสของโพรบเดี่ยว	109
รูปที่ 6.13 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสของโพรบเดี่ยว	109
รูปที่ 6.14 ลักษณะและการจัดไบอัสของโพรบคู่	110
รูปที่ 6.15 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน-กระแสของโพรบคู่	111
รูปที่ 6.16 ลักษณะและการจัดวางโพรบขดลวดแม่เหล็ก	112
รูปที่ 6.17 ลักษณะการจัดวางห่วง/ขดลวดฟลักซ์แม่เหล็กเพื่อตรวจตำแหน่งของพลาสมา	112
รูปที่ 6.18 ลักษณะการจัดวางห่วงวัดศักย์เหนี่ยวนำเพื่อวัดศักย์เหนี่ยวนำในห่วงพลาสมา	113
รูปที่ 6.19 ลักษณะการขดของขดลวดโรกอฟสกี เพื่อวัดศักย์เหนี่ยวนำ	114
รูปที่ 6.20 เทคนิคการวัดพลาสมาด้วยอินเตอร์เฟอโรแบบไมโครเวฟ	114
รูปที่ 6.21 เทคนิคการวิเคราะห์พลาสมาด้วยการกระเจิงแบบทอมสัน	116
รูปที่ 6.22 การจัดวางระบบวัดความหนาแน่นพลาสมาด้วยเทคนิคการกระเจิงเลเซอร์ทอมสัน	117
รูปที่ 6.23 สเปกตรัมเลเซอร์ที่วัดได้จากสองกรณีคือ $\alpha = 0$ และ $\alpha = 2$	118
รูปที่ 6.24 สเปกตรัมของอาร์กอนพลาสมาและตารางการทรานสิชันเพื่อใช้คำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอน	119
รูปที่ 6.25 พล็อตข้อมูลจากตารางข้างต้น สามารถคำนวณหาอุณหภูมิอิเล็กตรอนจากความชัน	120
รูปที่ 6.26 การถ่างออกของสเปกตรัมจากปรากฏการณ์สตาร์กเมื่อไอออนมีความหนาแน่นสูง	121
รูปที่ 6.27 ระดับชั้นพลังงานในโมเลกุล เมื่อถูกถ่ายทอดพลังงานโดยอิเล็กตรอนจะเกิดทรานสิชันในลักษณะหมุนหรือสั่น	123
รูปที่ 6.28 สเปกตรัมของระบบไนโตรเจนบวกที่สองแบนด์ที่ 0-2 ที่อุณหภูมิการหมุนต่างกัน	124
รูปที่ 6.29 สเปกตรัมของระบบไนโตรเจนบวกที่สอง ($C^3\Pi_u$) $\rightarrow$ ($B^3\Pi_g$) ที่อุณหภูมิการสั่นแตกต่างกัน	125

รูปที่ 6.30 ตัวอย่างพล็อตจากสเปกตรัมของพลาสมาอาร์กอนผสมไนโตรเจน (0.1%)	125
รูปที่ 6.31 กราฟค่าดัชนีหักเหของไอโซน ที่ความยาวคลื่น 240 - 790 นาโนเมตร จะเห็นได้ว่า มีค่าสูงสุดที่ 255 นาโนเมตร ในบริเวณ Hartley band	128
รูปที่ 6.32 แผนภาพระบบ Two-beam UV-LED absorption	129
รูปที่ 6.33 Current and temperature control unit สำหรับ UV-LED	129
รูปที่ 6.34 เส้นทางเดินแสงภายในสเปกโตรมิเตอร์ที่ใช้เป็นแบบ Czerny-Turner มีความยาวโฟกัส 500 มม.	130
รูปที่ 6.35 ตัวอย่างภาพถ่ายจาก CCD ของลำ UV-LED ทั้งสองของระบบสเปกโตรสโกปี	130
รูปที่ 6.36 ภาพถ่ายการวัดและทดสอบปริมาณการดูดกลืนยูวีของไอโซนเบื้องต้น โดยแหล่งกำเนิด พลาสมาที่ใช้คือ Plasma Skin Care [®]	131
รูปที่ 6.37 กราฟแสดงการดูดกลืนของลำ UV-LED โดยไอโซน ที่ความยาวคลื่นช่วง 255- 265 นาโนเมตร โดยที่ I ₀ และ I _T คือความเข้มแสง UV-LED ก่อนผ่านและหลังผ่านพลาสมา ตามลำดับ	131
รูปที่ 6.38 ไดอะแกรมระบบตรวจวัดฟลูออเรสเซนซ์โดยกระตุ้นด้วยเลเซอร์	132
รูปที่ 6.39 แสดงตัวอย่างระดับพลังงานของอนุโมเลไฮดรอกซิล เพื่อการตรวจวัดฟลูออเรสเซนซ์	133
รูปที่ 6.40 สเปกตรัมฟลูออเรสเซนซ์ช่วง 309 และ 315 นาโนเมตร ของ OH(A-X, 0-0) และ OH(A-X, 1-1)	133
รูปที่ 7.1 กระบวนการประยุกต์พลาสมาต่อวัสดุตัวอย่างในระบบสุญญากาศเริ่มต้นด้วยเทอม“Power”	138
รูปที่ 7.2 การตัดแปรรีเวิร์ดด้วยเทคนิคจุ่มในพลาสมา โดยเฉพาะพอลิเมอร์	140
รูปที่ 7.3 โครงสร้างระบบพลาสมาทั่วไปเพื่อการประยุกต์บนตัวอย่างหรือฐานรอง	140
รูปที่ 7.4 การแจกแจงพลังงานของไอออนขณะเข้าไปในซีทาโทด	141
รูปที่ 7.5 โครงสร้างระบบดิสชาร์จแบบอาร์เอฟความจุ	142
รูปที่ 7.6 การแจกแจงพลังงานของไอออนขณะเข้าไปในซีทอาร์เอฟ	143
รูปที่ 7.7 โครงสร้างระบบดิสชาร์จแบบอาร์เอฟเหนี่ยวนำ	144
รูปที่ 7.8 ระบบการดิสชาร์จแบบก้ำทอนความถี่ไฮโคลตรอน	146
รูปที่ 7.9 ระบบการดิสชาร์จแบบคลื่นเฮลิคอน	146
รูปที่ 7.10 ตัวอย่างการดิสชาร์จแบบเฮลิคอนที่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ กำลัง 200 วัตต์	147
รูปที่ 7.11 การแจกแจงพลังงานของไอออนขณะเข้าไปในซีทของดิสชาร์จร้อน	147
รูปที่ 7.12 ระบบการดิสชาร์จแบบอาร์กสุญญากาศ ณ ศูนย์วิจัย PBP มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	148
รูปที่ 7.13 ระบบ PI ³ โดยไอออนจากพลาสมามีพลังงานจลน์สามารถพุ่งเข้าฝังในวัสดุเป้า	148
รูปที่ 7.14 ระบบเคลือบฝังไอออนแบบจุ่มพลาสมา (บน) ภาพขณะที่ไอออนพุ่งชนเป้าในระบบฝัง ไอออนแบบจุ่มพลาสมา (ล่าง)	149

รูปที่ 7.15 โครงสร้างระบบแมกนีตรอนระนาบแบบดีซี ใช้สนามแม่เหล็กกักพลาสมาไว้เหนือคาโทด	150
รูปที่ 7.16 การสร้างพลาสมาให้เกิดปฏิกิริยาหลอมตัวสามรูปแบบ	151
รูปที่ 7.17 พล็อตข้อแม้ของลอว์สันที่อุณหภูมิพลาสมาต่าง ๆ ของปฏิกิริยา D-T และ D-D	152
รูปที่ 7.18 โครงสร้างระบบปฏิกรณ์แบบ Tokamak	153
รูปที่ 7.19 ระบบปฏิกรณ์แบบ ITER Tokamak	153
รูปที่ 7.20 สองแนวทางของระบบปฏิกรณ์หลอมตัวแบบกักเฉื่อย	154
รูปที่ 8.1 แผนภูมิชี้ชัดว่าครึ่งหนึ่งของเทคโนโลยีพลาสมาปัจจุบันเป็นด้านชีววิทยาศาสตร์	157
รูปที่ 8.2 ระบบ Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) แบบอาร์เอฟเหนี่ยวนำ	159
รูปที่ 8.3 ระบบ Plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD) แบบอาร์เอฟประจุและพลาสมาอาร์กอนในระบบพลาสมา PECVD ก่อนผสมไอเคมีเพื่อดัดแปรผิวพอลิเมอร์	160
รูปที่ 8.4 จานเพาะเลี้ยงเซลล์พอลิเมอร์สามารถดัดแปรด้วยเทคนิคพลาสมาให้มีความเข้ากันได้ชีวภาพ	161
รูปที่ 8.5 สเปกตรัม FT-IR ของจานพอลิสไตรีน PS control, พลาสมา N_2+He และพลาสมา NH_3+He	162
รูปที่ 8.6 สเปกตรัม XPS ของจานพอลิสไตรีน (ประ)PS control (จุด)พลาสมา N_2+He และ (ทึบ)พลาสมา NH_3+He	163
รูปที่ 8.7 รายละเอียดของพีค C1s และ N1s: a) C1s ของ PS control, b) C1s ของ N_2+He c) C1s ของ NH_3+He , d) N1s ของ N_2+He และ e) N1s ของ NH_3+He	165
รูปที่ 8.8 ร้อยละจำนวนเซลล์ที่ลงเกาะบนพื้นผิวจานพอลิสไตรีนใน 24 ชั่วโมง โดย a, b, c, d และ e แสดงความมีนัยสำคัญที่ร้อยละ 95, $p \leq 0.05$	166
รูปที่ 8.9 การลงเกาะและการเพิ่มจำนวนของเซลล์ BCP-K1 เมื่อเพาะเลี้ยงบนจานพอลิสไตรีนต่างชนิดกัน เป็นเวลา 1, 3, 5 และ 7 วัน	167
รูปที่ 8.10 ลักษณะการลงเกาะของเซลล์ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน a) b) และ c) PS control, d) และ e) N_2+He , f) และ g) NH_3+He	168
รูปที่ 8.11ก) กราฟแสดงร้อยละจำนวนเซลล์ที่ลงเกาะบนจานพอลิสไตรีนตามกำลังและชนิดของพลาสมาไนโตรเจนต่าง ๆ กัน และ ข) เมื่อทำการเพาะเลี้ยงเซลล์เป็นเวลา 1,3,5 และ 7 วัน เฉพาะพลาสมาผสมฮีเลียม	170
รูปที่ 8.12 เทคนิคพลาสมาสร้างชั้นเชื่อมคาร์บอนอสัณฐานบนผิวจานเพื่อการปลูกโปรตีนใหม่	171
รูปที่ 8.13 รูปแบบการเจริญของเซลล์ต้นกำเนิดจากไขกระดูก (hBM-MSCs) ใน 7 วัน	172
รูปที่ 8.14 ลักษณะการลงเกาะของเซลล์ในสภาวะปราศจากซีรัมด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	173
รูปที่ 8.15 ประสิทธิภาพการเกาะของเซลล์ที่ 24 ชม. ของจานทั้ง 3 กลุ่ม	174

รูปที่ 8.16 เปรียบเทียบปริมาณโปรตีนเซรีซินที่ละลายออกมาของงานทั้งสองกลุ่ม	175
รูปที่ 8.17 แสดงการทดสอบการติดเชื้อ 3 ชนิดของงานพอลิไสไตรีนดัดแปร ขวามือเป็นชุดควบคุม	176
รูปที่ 8.18 แสดงผลการทดสอบการปลดเชื้อ 3 ชนิดของงานพอลิไสไตรีนดัดแปร	177
รูปที่ 8.19 โครงสร้างพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอซิด ย่อยสลายได้ผ่านการไฮโดรไลซิส	179
รูปที่ 8.20 โครงสร้างฟิล์มคาร์บอนที่มีสัดส่วนไฮโดรเจนต่างกัน ซึ่ง C-H polymer สามารถสร้างด้วยกระบวนการพลาสมาพอลิเมอร์	179
รูปที่ 8.21 แสดงผลจุลทรรศน์แรงอะตอมของชั้นเคลือบ (a) พีแอลเอ ควบคุม, (b) DLC, (c) 10% F-DLC และ (d) 50% F-DLC (ร้อยละปริมาตรก๊าซ)	180
รูปที่ 8.22 สเปกโตรสโกปีโฟโตอิเล็กตรอนของฟิสิกส์คาร์บอนแกน (C-C/C-H) ปรากฏพันธะ CF, CF ₂ และ CF ₃ ใน (c) 50% F-DLC (ร้อยละปริมาตรก๊าซ)	181
รูปที่ 8.23 รูปถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนเมื่อ <i>E. coli</i> เจริญบนฟิล์ม พีแอลเอ ควบคุม (a) แต่กลับไม่พบบนชั้นเคลือบ (b,c,d) เลย	182
รูปที่ 8.24 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนของฟิล์มจากการตกสะสมพลาสมาเฮกซะเมธิลไดไซล๊อกเซนผสมอาร์กอน (ซ้าย) และผสมออกซิเจน (ขวา)	183
รูปที่ 8.25 ค่าความสามารถกันก๊าซของฟิล์มพีแอลเอเคลือบเฮกซะเมธิลไดไซล๊อกเซน	184
รูปที่ 8.26 เส้นใยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักของกระดาษ แสดงโครงสร้างเคมีเพียงหนึ่งเซน	185
รูปที่ 8.27 เทคนิคพลาสมาตกสะสมสามารถดัดแปรผิวเส้นใยเซลลูโลสเป็นโครงสร้าง C-F โดยการแทนที่	185
รูปที่ 8.28 ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำของกระดาษบรรจุภัณฑ์ดัดแปรด้วยพลาสมาฟลูออรีนด้วยเวลาต่างๆ ด้านหน้า (ซ้าย) และด้านหลัง (ขวา)	186
รูปที่ 8.29 ค่ามุมสัมผัสหยดน้ำตามเวลาของกระดาษด้านหน้า (a) และด้านหลัง (b)	187
รูปที่ 8.30 ผลจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของเส้นใยกระดาษด้านหลังที่เวลาดัดแปรพลาสมาฟลูออรีนต่างกัน	188
รูปที่ 8.31 ระบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ (บน) เป้าไททาเนียมร่วมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ล่าง)	189
รูปที่ 8.32 สเปกตรัมของพลาสมาที่ระยะห่าง 8 ซม.จากเป้าไททาเนียมและไฮดรอกซีอะพาไทต์เมื่อแปรอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน กำลังอาร์เอฟ 200 วัตต์	190
รูปที่ 8.33 ระบบรีแอคทีฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์(ซ้าย) เป้าไททาเนียมร่วมกับไฮดรอกซีอะพาไทต์ (ขวา)	191
รูปที่ 8.34 จุลทรรศน์อิเล็กตรอนของพื้นผิวและภาคตัดขวางของฟิล์มคอมโพสิตไททาเนียมไนไตรด์/ไฮดรอกซีอะพาไทต์ที่กำลังอาร์เอฟ (a) 100 (b) 150 และ (c) 200 วัตต์	192
รูปที่ 8.35 สเปกตรัมพลังงานและสัดส่วนองค์ประกอบธาตุของฟิล์มคอมโพสิตไททาเนียมไนไตรด์/	193

ไฮดรอกซีอะพาไทต์

รูปที่ 8.37 แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จโคโรนา	196
รูปที่ 8.38 แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน	196
รูปที่ 8.39 แสดงการเกิดพลาสมาแบบ surface discharge	197
รูปที่ 8.40 แสดงการเกิดพลาสมาแบบดิสชาร์จร่วมระนาบ	197
รูปที่ 8.41 กราฟความสัมพันธ์ Pd และ V เพื่อหาแรงดันไฟฟ้าที่ต้องใช้ในการผลิตพลาสมา	198
รูปที่ 8.42 ระบบเจ็ทพลาสมาและตัวอย่างภาพการประยุกต์เจ็ทพลาสมาอาร์กอนบนเดือยฟัน	199
รูปที่ 8.43 ไดอะแกรมและวงจรเทียบเท่าของระบบไดอิเล็กทริกแบรีเออร์ดิสชาร์จแบบเจ็ทพลาสมา	200
รูปที่ 8.44 ผลการทดลองวัดความยาวของเจ็ทพลาสมาที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ณ 235	200
กิโลเฮิร์ตซ์	
รูปที่ 8.45 ผลการทดลองวัดความยาวของเจ็ทพลาสมาที่อัตราการไหลของก๊าซต่างๆ ณ 415	201
กิโลเฮิร์ตซ์	
รูปที่ 8.46 อุณหภูมิของลำเจ็ทพลาสมาก๊าซอาร์กอนโดยการวัดจากหัวอิเล็กโตรดกราวด์	202
รูปที่ 8.47 a) วงจรวัด V-Q Lissajous เพื่อหาพลังงานในหนึ่งไซเคิล/พัลส์ ใช้คำนวณกำลังพลาสมา	203
จริงได้ และ b) ค่าความจุต่างๆ ในระบบเจ็ทพลาสมา	
รูปที่ 8.48 พล็อต V-Q Lissajous โดยความชัน C1 C2 และ C3 เป็นผลรวมของค่าความจุในเจ็ท	204
พลาสมา	
รูปที่ 8.49 พล็อต V-Q Lissajous ของเจ็ทพลาสมาอาร์กอน ณ ศูนย์วิจัยPBPมหาวิทยาลัยเชียงใหม่	204
รูปที่ 8.50 ตัวอย่างผลการวัดสมบัติของระบบเจ็ทพลาสมาฮีเลียม มีขนาดลำ 2 มม.	205
รูปที่ 8.51 ตัวอย่างปฏิกิริยาเคมีโมเลกุลอากาศในพลาสมาฮีเลียมความดันบรรยากาศ a) กลุ่ม	206
ออกซิเจน b) กลุ่มไนโตรเจน	
รูปที่ 8.52 การกระจายความหนาแน่นของอนุพลไฮดรอกซิลในลำพลาสมา	207
รูปที่ 8.53 การกระจายความหนาแน่นของอะตอมออกซิเจนพบปริมาณสูงสุดเหนือผิววัสดุ	208
รูปที่ 8.54 ตัวอย่างสเปกตรัม OES (บน) และปริมาณอนุพลต่างๆ (ล่าง) ของพลาสมาความดัน	209
บรรยากาศมีอาร์กอนเป็นก๊าซพา	
รูปที่ 8.55 สเปกตรัม OES พลาสมาอาร์กอนย่านยูวี A B และ C ช่วง 200-400 นาโนเมตร	210
รูปที่ 8.56 ขณะทำการวัด OES ของพลาสมาดิสชาร์จข้ามฉนวนประยุกต์บนผิวหนังสัตว์	211
รูปที่ 8.57 โครงสร้าง (ซ้าย) และตัวอย่าง (ขวา) ของระบบพลาสมาดิสชาร์จเหนือผิว	212
รูปที่ 8.58 KS-123 CXP ที่ผ่านพลาสมา 20 40 และ 60 วินาที ทดสอบการซึมผ่านของน้ำที่เวลา	214
ต่างๆกัน A เริ่มต้นหยดน้ำ (0 วินาที) B ผ่านไป 30 วินาที และ C ผ่านไป 60 วินาที	
รูปที่ 8.59 ผลการตรวจสอบคุณสมบัติของผ้า KS-123 CXP ด้วยสเปกโตรสโกปี XPS	214
รูปที่ 8.60 แสดงค่ามุมสัมผัสพื้นผิวของผ้าชนิด Polyester ที่ไม่ได้ผ่านพลาสมา	215

รูปที่ 8.62 KS-178 BLR ที่ผ่านพลาสมา 20 40 และ 60 วินาที ทดสอบการซึมผ่านหยดน้ำที่เวลาต่างกัน A เริ่มต้นหยดน้ำ (0 วินาที) B ผ่านไป 30 วินาที และ C ผ่านไป 60 วินาที	217
รูปที่ 8.63 ผลจุลทรรศน์ศาสตร์อิเล็กตรอนของตัวอย่าง KS-123 CXP KS-179 AIE และ KS-178 BLR โดย (A) จุ่มเคลือบโดยไม่ผ่านพลาสมาและ (B) จุ่มเคลือบโดยผ่านพลาสมา	218
รูปที่ 8.64 แสดงพื้นที่การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของผ้าผ่านพลาสมา-จุ่มเคลือบซิงก์ออกไซด์	219
รูปที่ 8.65 การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบด้วยผ้า cotton, polyester และ Nylon ที่ผ่านพลาสมา-ชุบเคลือบซิงก์ออกไซด์ 1 %	219
รูปที่ 8.66 การตายของเชื้อแบคทีเรียเมื่อสัมผัสผ้าในเวลาที่แตกต่างกันคือ 15 30 และ 45 นาที	220
รูปที่ 8.67 การตายของเชื้อแบคทีเรียเมื่อสัมผัสผ้าในเวลาที่ยาวขึ้นเป็น 1 และ 2 ชั่วโมง	220
รูปที่ 8.68 ข้อเสนอโครงการของ Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics	221
รูปที่ 8.69 ช่วงพลังงานพลาสมาต่อพื้นที่หรือโดส (dose) ที่มีผลต่อเซลล์เนื้อเยื่อมนุษย์	222
รูปที่ 8.70 รูปถ่ายแสดงพลาสมาแบบสัมผัส ขณะดิสชาร์จบนผิวหนังอาสาสมัคร	223
รูปที่ 8.71 การตรวจวัดปริมาณ <i>P. Acne</i> (จุด)บนผิวหนัง พบว่าลดลงถึง 75% เมื่อบำบัดด้วยพลาสมา	224
รูปที่ 8.72 สภาพผิวหนังที่ไม่พึงประสงค์ ซ้ำย (ล้าง-ก่อนทำ บน-หลังทำ) สัปดาห์ละครั้ง 10 สัปดาห์ ขวา (ซ้าย-ก่อนทำ ขวา-หลังทำ) สัปดาห์ละครั้ง 4 สัปดาห์	224
รูปที่ 8.73 ภาพถ่ายพลาสมาแบบไฮบริดขณะดิสชาร์จบนแผล เพื่อการบำบัดแผลติดเชื้อ	225
รูปที่ 8.74 A) สภาพแผลติดเชื้อ B) ระหว่างการบำบัดด้วยพลาสมาเป็นเวลา 2 นาที/วัน C) สภาพแผลหลังการบำบัด 4 วัน	225
รูปที่ 8.75 (ซ้าย) สภาพแผลกดทับก่อนบำบัด (ขวา) สภาพแผลหลังการบำบัด 7 วันด้วยพลาสมา	225
รูปที่ 8.76 ผล Bacteria culture จากแผลติดเชื้อของอาสาสมัคร	226
รูปที่ 8.78 ไข่แมลงวัน <i>L. cuprina</i> ถูกประยุกต์พลาสมาไฮบริด a) b) และ c) เทียบกับการเป่าลมร้อน d)	227
รูปที่ 8.79 ภาพของไข่แมลงวันควบคุม (ซ้าย) และประยุกต์พลาสมาไฮบริด 2 นาที (ขวา)	227
รูปที่ 8.80 อัตรารอดของไข่แมลงวันในเวลาประยุกต์พลาสมาไฮบริดต่างๆกัน เทียบกับกลุ่มเป่าลมร้อน	228
รูปที่ 8.81 แผนภาพแสดง (a) การจัดอุปกรณ์ตรวจวัดเจ็ทพัลส์พลาสมาอากาศ อาทิ กำลังพลาสมา สเปกโทรสโกปีแบบเปล่งแสง (OES) และปริมาณของอนุมูลไนตริกออกไซด์ (NO) และโอโซน (O ₃) (b) ภาพถ่ายจากเจ็ทพัลส์พลาสมาอากาศ	229
รูปที่ 8.82 แสดงพัลส์แรงดัน-กระแส กว้าง 3 ไมโครวินาที หนึ่งพัลส์ 3 ไมโครวินาที ความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	230
รูปที่ 8.83 สเปกตรัม OES ของเจ็ทพัลส์พลาสมาอากาศ แสดงชนิดและปริมาณอนุมูลในอากาศ	230

รูปที่ 8.84 แสดงความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์และโอโซน ตามจำนวนพัลส์ ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 35 41 50 และ 78% ความถี่ขับ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ เวลาหนึ่งพัลส์ 10 ไมโครวินาที อัตราไหล่อากาศ 5 slm	231
รูปที่ 8.85 แสดงความเข้มข้นของไนตริกออกไซด์และโอโซนตามอัตราไหล่อากาศช่วง 2 – 6.5 slm 6 พัลส์/คาบ เวลาหนึ่งพัลส์ 10 ไมโครวินาที ความถี่ขับ 3 กิโลเฮิร์ตซ์ ความชื้นสัมพัทธ์ 60%	231
รูปที่ 8.86 เครื่องเจ็ทพัลส์พลาสมาอากาศ พัฒนาโดยศูนย์วิจัย PBP, ม.เชียงใหม่	232
รูปที่ 8.87 แสดงผลการยับยั้งเชื้อสแตปฟีโลคอคคัสออเรียสในจานเลี้ยงเชื้อ เข้มข้น 10^4 CFU/ml	233
รูปที่ 8.88 แสดงเปรียบเทียบเจ็ทพัลส์พลาสมาอากาศ ไม่พบความเป็นพิษต่อเซลล์มนุษย์	234
รูปที่ 8.89 เจ็ทพลาสมาฮีเลียมความดันบรรยากาศ(He-APPJ)ใช้ศึกษาการฆ่าเชื้อชิ้นงานทันตกรรม	237
รูปที่ 8.90 ผลการวัดสเปกตรัม OES ของพลาสมาฮีเลียมผสมออกซิเจนที่สัดส่วน 0%, 0.7%, 1.0%, 1.2%, 1.6% ที่ กำลัง 30 วัตต์	238
รูปที่ 8.91 แสดงจำนวนเชื้อ MRSA ที่เหลือเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มควบคุม กลุ่มคลอเฮกซิดีน กลุ่มลมร้อน พลาสมาฮีเลียม และพลาสมาฮีเลียมผสมออกซิเจน 0.7% ที่ระยะเวลาแช่ 30 และ 120 วินาที	239
รูปที่ 8.92 กลไกพลาสมา (ซ้าย) และโครงสร้างฟอสโฟไลปิดของเยื่อหุ้มเซลล์แบคทีเรีย (ขวา)	239
รูปที่ 8.93 แสดงผลตรวจวัดหมู่ฟังก์ชัน a) เชื้อสแตปฟีโลคอคคัสออเรียส b) เชื้อพ่นพลาสมาฮีเลียม และ c) เชื้อพ่นพลาสมาออกซิเจน	240
รูปที่ 8.94 ภาพขยายแผ่นชีวภาพอายุ 1 3 6 และ 7 วันของเชื้อแคนดิดาบนชิ้นงานอะคริลิกเรซิน	242
รูปที่ 8.95 ภาพขยายแผ่นชีวภาพอายุ 7 วันของเชื้อเอนเทอโรคอคคัสบนแผ่นเนื้อฟัน	243
รูปที่ 8.96 ภาพขยายแผ่นชีวภาพของเชื้อแคนดิดาที่ถูกพ่นพลาสมา	243
รูปที่ 8.97 ภาพขยายแผ่นชีวภาพของเชื้อเอนเทอโรคอคคัส ที่ถูกพ่นพลาสมา 5 และ 10 นาที	244
รูปที่ 8.98 แสดงแผ่นชีวภาพของเชื้อแคนดิดาอายุ 2 วันที่ถูกพ่นด้วยพลาสมา ย้อมด้วย LIVE/DEAD stain	245
รูปที่ 8.99 แสดงแผ่นชีวภาพของเชื้อแคนดิดาอายุ 7 วันที่ถูกพ่นด้วยพลาสมา ย้อมด้วย LIVE/DEAD stain	245
รูปที่ 8.100 แผ่นชีวภาพของเอนเทอโรคอคคัสอายุ 7 วัน ที่ถูกพ่นด้วยพลาสมาแล้วย้อมด้วย LIVE/DEAD stain	245
รูปที่ 8.101 กราฟปริมาณเชื้อแคนดิดา และค่า OD ที่ได้จากการทดสอบ XTT assay	247
รูปที่ 8.102 กราฟปริมาณเชื้อเอนเทอโรคอคคัส และค่า OD ที่ได้จากการทดสอบ XTT assay	247
รูปที่ 8.103 ค่าการดูดกลืนแสงของเชื้อแคนดิดา ในแผ่นชีวภาพเมื่อวัดด้วย XTT assay หลังจากการพ่นพลาสมาด้วยเวลา 5 และ 10 นาที เทียบกับกลุ่มควบคุม	248

รูปที่ 8.104 ค่าการดูดกลืนแสงของเชื้อเอนเทอโรคอกคัส ในแผ่นชีวภาพเมื่อวัดด้วย XTT assay หลังจากการพ่นพลาสมาด้วยเวลา 5 และ 10 นาที เทียบกับกลุ่มควบคุม	248
รูปที่ 8.105 ภาพวาดแสดงพื้นที่บ่มด้วยเดือยฟันและแกนฟัน (ซ้าย) และพื้นที่บ่มด้วยเดือย คอมโพสิตเสริมเส้นใยยึดกับผิวรากฟันและคอมโพสิตแกนฟันอย่างแนบแน่น (ขวา) แล้ว บ่มด้วยครอบฟัน	250
รูปที่ 8.106 ไดอะแกรมการประยุกต์เจ็ทพลาสมากับเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย (FRCP)	252
รูปที่ 8.107 ภาพถ่ายการประยุกต์ส่วนปลายบนสุดของเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยด้วยเจ็ทพลาสมา สเปกโตรสโกปี OES ถูกวางตั้งฉากห่างจากเจ็ทพลาสมาประมาณ 2 ซม.	253
รูปที่ 8.108 ไดอะแกรมการยึดเดือยกับเรซินอะคริลิกกับคอมโพสิตแกนฟันชนิดเหลว ปลายด้าน สอบของเดือยจุ่มยึดเรซินอะคริลิก และภาพถ่ายชิ้นงานพร้อมทดสอบ	253
รูปที่ 8.109 กราฟแสดงค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือน (เมกะปาสคาล) ของเดือยกลุ่มต่างๆ (control = กลุ่ม ควบคุม, con_thermo = กลุ่มควบคุมร่วมกับเทอร์โมไซคลิง, Ar+N = กลุ่มประยุกต์ด้วย เจ็ทอาร์กอนผสมไนโตรเจน, Ar+N_thermo = กลุ่มประยุกต์ด้วยเจ็ทอาร์กอนผสม ไนโตรเจนร่วมกับเทอร์โมไซคลิง)	255
รูปที่ 8.110 ภาพถ่ายจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 200 เท่า ของผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใย ควบคุม (ซ้าย) และ ประยุกต์เจ็ทพลาสมาอาร์กอนผสมไนโตรเจน (ขวา)	255
รูปที่ 8.111 ค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือน (เมกะปาสคาล) ของเดือยกลุ่มต่างๆ (control = กลุ่มควบคุม, silane = กลุ่มทาด้วยไซเลน, Ar = กลุ่มเจ็ทอาร์กอน, He+air = กลุ่มเจ็ทฮีเลียมผสม อากาศ และ Ar+air = กลุ่มเจ็ทอาร์กอนผสมอากาศ)	257
รูปที่ 8.112 ผลจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 400 เท่า ของผิวเดือยคอมโพสิตเสริมเส้นใยหลัง ดึงคอมโพสิตแกนฟัน (a) ควบคุม (b) ทาด้วยไซเลน (c) เจ็ทพลาสมาอาร์กอน (d) เจ็ท พลาสมาฮีเลียมผสมอากาศ (e) เจ็ทพลาสมาอาร์กอนผสมอากาศ	259
รูปที่ 8.113 แสดงสเปกตรัม FTIR ของเดือย ช่วงเลขคลื่นระหว่าง $550\text{--}3800\text{ cm}^{-1}$	260
รูปที่ 8.114 เจ็ทพลาสมาฮีเลียมผสมออกซิเจน ใช้ในการบ่มฟันได้โดยการทำลายเชื้อแบคทีเรีย แล้วทำการเติมคอมโพสิตชนิดเซลล์แอตตีฟิเคชันซีเมนต์ได้ทันที	262
รูปที่ 8.115 แผนภูมิแท่งแสดงค่าเฉลี่ยแรงยึดเหนี่ยวของแต่ละกลุ่ม (Ctrl) ควบคุม (He) ฮีเลียม (HeO) ฮีเลียมผสมออกซิเจน (He+R) ฮีเลียมเปียกชื้น และ (HeO+R) ฮีเลียมผสม ออกซิเจนเปียกชื้น	263
รูปที่ 8.116 แผนภูมิแท่งแสดงร้อยละของรูปแบบความล้มเหลวของตัวอย่างในแต่ละกลุ่มการ ทดลอง	264
รูปที่ 8.117 รูปถ่ายผิวเนื้อฟันตัวอย่างแสดงรูปแบบความล้มเหลว	264
รูปที่ 8.118 ผลจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1000 เท่าของผิวเนื้อฟันแต่ละกลุ่ม (Ctrl) ควบคุม	265

(He) ฮีเลียม (HeO) ฮีเลียมผสมออกซิเจน (He+R) ฮีเลียมเปียกชื้น และ (HeO+R) ฮีเลียมผสมออกซิเจนเปียกชื้น	
รูปที่ 8.119 ผลจุลทรรศน์อิเล็กตรอนกำลังขยาย 1000 เท่าของรอยต่อระหว่างเนื้อฟันและเรซินซีเมนต์แต่ละกลุ่ม (Ctrl) ควบคุม (He) ฮีเลียม (HeO) ฮีเลียมผสมออกซิเจน (He+R) ฮีเลียมเปียกชื้น และ (HeO+R) ฮีเลียมผสมออกซิเจนเปียกชื้น	266
รูปที่ 8.120 แนวคิดอุตสาหกรรมอาหารปลอดภัยและยั่งยืน สร้างชุมชนเกษตรก้าวหน้า ด้วยเทคโนโลยีพลาสมา	267
รูปที่ 8.121 วิธีดิสซาร์จเหนือผิวของเหลว อนุมูลพลาสมา อาทิ $\bullet\text{OH}$ O_3 NO_x แพร่ซึมผ่านผิวของเหลว	268
รูปที่ 8.122 วิธีดิสซาร์จในของเหลว อนุมูลในฟองก๊าซเกิดการละลายและแพร่ซึมไปทั่วของเหลว	269
รูปที่ 8.123 วิธีดิสซาร์จไอของเหลวด้วยพลาสมาไกลดิงอาร์ก	269
รูปที่ 8.124 สเปกตรัม OES จากพลาสมาไกลดิงอาร์กที่อัตราไหลอาร์กอนค่าต่างๆ	270
รูปที่ 8.125 เจ็ทพลาสมาอาร์กอนพ่นลงในของเหลวที่มีกรดทาเรฟทาลิก (TA) จะเรืองแสงสีน้ำเงิน บ่งบอกปริมาณอนุมูลไฮดรอกซิลที่ละลายอยู่	271
รูปที่ 8.126 โครงสร้างเคมีของคลอไพริฟอส (ซ้าย) และ คาร์เบนดาซิม (ขวา)	274
รูปที่ 8.127 ระบบพลาสมาไกลดิงอาร์ก ณ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	275
รูปที่ 8.128 ปริมาณอนุมูลไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ผลิตด้วยพลาสมาเทียบกับวิธีไมโครบับเบิล	277
รูปที่ 8.129 ภาพถ่ายผลสัมผัสน้ำผึ้ง วันที่ 5 (ซ้าย) และวันที่ 7 (ขวา) โดยพลาสมาสารละลายสัมผัสเชื้อราเป็นเวลา 15 30 45 และ 60 นาที สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราดีกว่ากลุ่มควบคุม	278

สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 1.1 ตารางสรุปการจัดแบ่งกลุ่มของพลาสมา ตามอุณหภูมิและความหนาแน่น	21
ตารางที่ 6.1 ตัวอย่างโมเลกุลอะตอมคู่ พบในพลาสมาความดันบรรยากาศทั่วไป	124
ตารางที่ 6.2 แสดง production (P) และ loss (L) reaction ของ RONS ในพลาสมา	127
ตารางที่ 7.1 เปรียบเทียบระบบแมกนีตรอนทั่วไป โดยต่างวิธีดิสชาร์จเป็นแบบดีซีและแบบอาร์เอฟ	151
ตารางที่ 8.1สรุปการประยุกต์พลาสมาแก๊วสตุพอลิเมอร์ทางชีวภาพ	158
ตารางที่ 8.2 แสดงตัวอย่างสภาวะของระบบพลาสมา PECVD	161
ตารางที่ 8.3 แสดงเปอร์เซ็นต์ของพันธะคาร์บอน เมื่อผิวงานพอลิस्टรีนดัดแปรด้วยไอเคมีต่างกัน	164
ตารางที่ 8.4 ผลวิเคราะห์ผิวงานดัดแปรด้วยสเปกโตรสโกปีเอ็กซ์เรย์ (XPS) เมื่อทำการขจัดเซรีซินตกค้างแล้ว	171
ตารางที่ 8.5 สรุปประสิทธิภาพงานพอลิस्टรีนดัดแปรผิวด้วยเทคนิคพลาสมาทั้งสองวิธี	178
ตารางที่ 8.6 เงื่อนไขของการเคลือบเมื่อแปรค่ากำลังอาร์เอฟต่างๆกัน	190
ตารางที่ 8.7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตอยู่บนฟิล์มคอมโพสิต	194
ตารางที่ 8.8 คุณสมบัติของพลาสมาโดยการดิสชาร์จที่ความดันบรรยากาศ	195
ตารางที่ 8.9 อนุมูลจากโมเลกุลในอากาศ เกิดจากการแพร่เข้าสู่ปริมาตรของพลาสมา	210
ตารางที่ 8.10 แสดงปริมาณกำลังยูวี A B และ C จากพลาสมาดิสชาร์จข้ามฉนวนบนผิวหนังสัตว์ 1 นาที	211
ตารางที่ 8.12 แสดงรายละเอียดสมบัติของสิ่งทอที่ใช้ในการทดสอบ	213
ตารางที่ 8.13 ผลการทดสอบการส่งผลของพลาสมาต่อผ้าชนิด Nylon	216
ตารางที่ 8.14 ผลการวิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (EDS) ของ ZnO บนผ้าเมื่อทำการชักล้าง	218
ตารางที่ 8.15 ค่าแรงดึงเฉือนและค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือน (เมกะปาสคาล) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (ในวงเล็บ) ของเตื่อยแต่ละกลุ่ม	254
ตารางที่ 8.16 ค่าแรงดึงเฉือนและค่าเฉลี่ยแรงดึงเฉือน (เมกะปาสคาล) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ของเตื่อยแต่ละกลุ่ม	256
ตารางที่ 8.17 ค่าเฉลี่ยแรงยึดเฉือนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มทดลอง	263
ตารางที่ 8.18 เปรียบเทียบวิธีการใช้สารละลายลดสารพิษตกค้างในผักและผลไม้กับพลาสมาสารละลาย	273
	274

ตารางที่ 8.19 ปริมาณสารพิษตกค้างในมะม่วงทั้งสองลดลงระหว่างร้อยละ 70-85 เมื่อแช่

พลาสติกสารละลาย

276

ตารางที่ 8.20 ผลเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงสีเปลือกกล้วยหอมควบคุมและจุ่มแช่พลาสติก

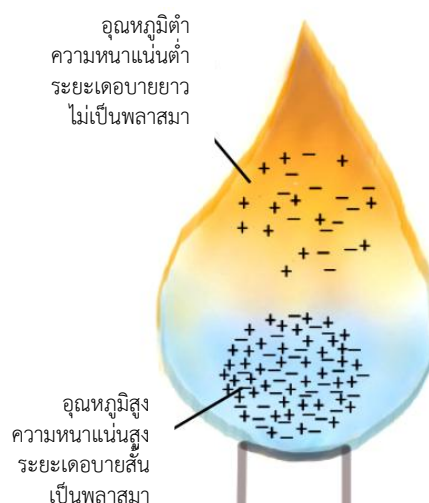
สารละลาย

ภาค 1

บทที่ 1

บทนำและสมบัติมูลฐาน

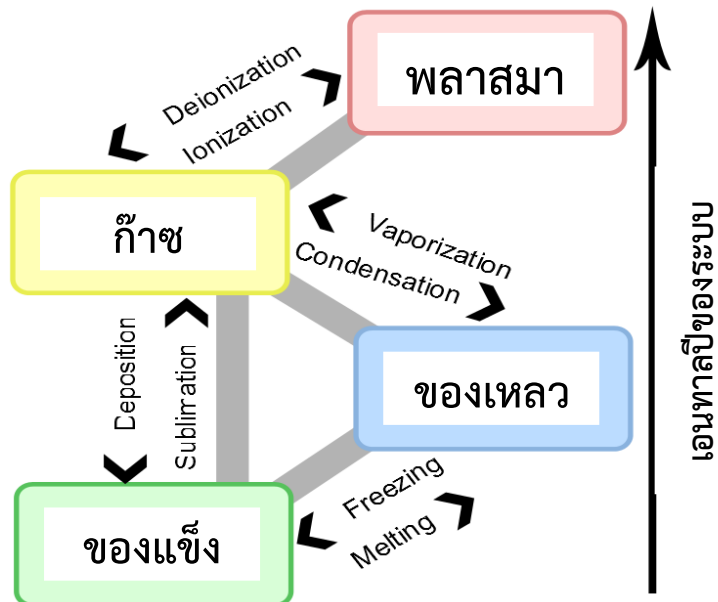
อาจกล่าวได้ว่ากว่า ร้อยละ 99 ของจักรวาลอยู่ในสถานะพลาสมา พลาสมาในธรรมชาติ เช่น พลาสมา ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ชั้นบรรยากาศแมกนีโตสเฟียร์ แสงออโรรา แลปรัสซี แวนอัลเลน ลมสุริยะ โคโรนาของดวงอาทิตย์ แกนในดวงดาว สารระหว่างดาว และพลาสมาในห้องปฏิบัติการ เช่น การดิสชาร์จแบบรู้งแสง แบบอาร์ก พลาสมาในหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดนีออน ประกายไฟฟ้า การทดลองนิวเคลียร์หลอมตัว ตัวอย่างพลาสมาที่ใกล้ตัว อาทิ เพลวไฟ



รูปที่ 1.1 เพลวไฟถูกนิยามเป็นพลาสมาได้เฉพาะบางบริเวณ (<http://www.plasmacoalition.org>)

พลาสมาคือ สภาวะที่อะตอมหรือโมเลกุลก๊าซเกิดการเป็นไอออน (ionization) ประกอบด้วย อิเล็กตรอน ไอออน อนุภาคมีประจุ และอนุภาคของก๊าซ ทำให้โดยรวมแล้วพลาสมา ยังคงสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า คำว่า “พลาสมา” นี้ถูกบัญญัติโดย แลงมัวร์ (Irving Langmuir) นักเคมีรางวัลโนเบลปี 1932 ใช้เพื่อบรรยายสภาพก๊าซที่ถูกทำให้เป็นไอออนโดยการดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า (electric discharges)

อย่างไรก็ดีพลาสมาถูกผลิตได้จากกระบวนการต่อไปนี้คือ การทำให้ร้อน (heating), การดิสชาร์จด้วยไฟฟ้า, การเป็นไอออนด้วยรังสี (ionizing radiation) และ การเป็นไอออนจากการชน (collisional ionization)



รูปที่ 1.2 ลำดับสถานะและกระบวนการของสสารก่อนเป็นพลาสมา (<http://en.wikipedia.org>)

ถือว่าพลาสมาเป็นสถานะที่ 4 ของสสาร นิยามโดยนักเคมีฟิสิกส์ Sir William Crooke (1879) หากพิจารณาช่วงเปลี่ยนสถานะ ของแข็ง-ของเหลว-ก๊าซ (solid-liquid-gas) ถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิ หรือคือการให้พลังงานจลน์แก่อนุภาคของก๊าซ ให้แก่อากาศต่อไปเรื่อย ๆ เช่น ถึง 20,000 เคลวิน (K) เราจะได้พลาสมาของก๊าซนั้นๆ ในทางปฏิบัติอุณหภูมิอาจต่ำกว่านี้ได้แล้วแต่กลไกการทำให้เป็นไอออนของก๊าซ อย่างไรก็ตามพลาสมาโดยรวมกลับมีสถานะเป็นกลางทางไฟฟ้า (quasineutral gas) โดยมีลักษณะเฉพาะสำคัญ เพราะว่าแรงไฟฟ้าระหว่างอนุภาคซึ่งเป็นแรงชนิดไกล (long range force) และอนุภาคของพลาสมาทุกตัวกระทำต่ออนุภาคข้างเคียงกันและกัน พลาสมาจึงตอบสนองต่อสนามไฟฟ้าแม่เหล็กภายนอกด้วยพฤติกรรมร่วมกัน (collective behavior) นอกจากนี้ยังสามารถนับได้ว่าพลาสมาเป็นของไหลไฟฟ้า (conducting fluid) เพราะก๊าซถูกนิยามให้เป็นของไหลนั่นเอง

ดังที่ได้กล่าวในรูปที่ 1.1 ว่าเปลวไฟเป็นพลาสมาได้เฉพาะในบริเวณที่จำนวนอนุภาคมีประจุ มีจำนวนมากพอที่จะแสดงพฤติกรรมร่วมกัน ที่สำคัญอันหนึ่งคือการสร้างสถานะกำบังตัว (shield) ต่อสนามไฟฟ้าภายนอก ขนาดหรือระยะทางนี้เรียกว่า ระยะเดอบาย (Debye length) ตัวอย่างหนึ่ง