สารบาญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ ค
บทคัดย่อภาษาไทย ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ฉ
สารบาญ ซ
สารบาญตาราง ฑ
สารบาญภาพ ฌ
อักษรย่อและสัญลักษณ์ ธ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.1.1 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ 1
1.1.2 การนำหัวเผาพลาสมามาใช้ประโยชน์ 2
1.2 สรุปสาระสำคัญจากเอกสารที่เกี่ยวข้อง 3
1.2.1 งานวิจัยในประเทศไทย 3
1.2.2 งานวิจัยในต่างประเทศ 5
1.3 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย 10
1.4 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย 10
1.5 ขอบเขตของการวิจัย 10

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี

2.1 การจัดการขยะอิเล็กทรอนิกส์ 11
2.1.1 การใช้ซ้ำ 11
2.1.2 การรีไซเคิลขยะอิเล็กทรอนิกส์ 12

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

2.1.3 การฝังกลบขยะอิเล็กทรอนิกส์ 12

2.1.4 การเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์ 12

2.2 พลาสมา 13

2.2.1 ที่มาของพลาสมา 13

2.2.2 การเกิดพลาสมา 14

2.2.3 การสร้างพลาสมา 15

2.2.3.1 การให้พลังงานความร้อนปริมาณสูง กับสสารสถานะก๊าซ 15

2.2.3.2 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสสาร ด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 16

2.2.3.3 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสสาร ด้วยสนามไฟฟ้าแรงสูง 17

2.2.3.4 การกระตุ้นการแตกตัวของโมเลกุลสสาร ด้วยการอาร์ค 18

2.3 ทฤษฎีไฟฟ้า 19

2.3.1 การอาร์คทางไฟฟ้า 19

2.3.2 สนามไฟฟ้าระหว่างขั้วอิเล็กโทรด 20

2.4 ทฤษฎีการแตกตัวของก๊าซ 21

2.4.1 พลังงานสลายพันธะ 22

2.4.2 พลังงานไอออไนเซชัน 22

2.5 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อน 23

2.5.1 สมการอนุรักษ์มวลหรือสมการความต่อเนื่อง 23

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2 สมการโมเมนตัม 24

2.5.3 สมการการอนุรักษ์พลังงาน 24

บทที่ 3 หลักการออกแบบหัวเผา

3.1 ส่วนประกอบสำคัญของหัวเผาพลาสมา 26

3.2 หลักการออกแบบ 28

3.2.1 การออกแบบขั้วอิเล็กโทรด 28

3.2.1.1 การออกแบบขั้วแคโทด 28

3.2.1.2 การออกแบบขั้วแอโนด 28

3.2.2 การออกแบบระบบระบายความร้อน 28

3.2.2.1 การระบายความร้อนขั้วแคโทด 28

3.2.2.2 การระบายความร้อนขั้วแอโนด 29

3.3 การคำนวณเพื่อการออกแบบ 29

3.3.1 การคำนวณสนามไฟฟ้าที่ได้จากขั้วอิเล็กโทรด 29

3.3.2 การคำนวณด้านพลศาสตร์ของไหล
ของอากาศที่ใช้เป็น Carrier Gas 29

3.3.3 การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการสร้างพลาสมา 32

3.4 หัวเผาพลาสมาต้นแบบ 37

3.4.1 แบบหัวเผาพลาสมา 37

3.4.2 หัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง 41

บทที่ 4 ชุดทดสอบ และ วิธีดำเนินการทดสอบ

4.1 ชุดทดสอบ 44

4.1.1 หัวเผาพลาสมาต้นแบบ 44

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

4.1.2 แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า 45
4.1.3 ห้องเผาจำลองขนาดห้องปฏิบัติการ 45
4.1.4 ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่าง 46
4.1.5 หัววัดอุณหภูมิ 46
4.1.6 เครื่องอ่านค่าอุณหภูมิ 47
4.2 วิธีดำเนินการทดสอบ 47
4.2.1 การวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา 47
4.2.1.1 การวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา ในแนวแกนกลาง (Axial Position) 48
4.2.1.2 การวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา ในแนวรัศมี (Radial Position) 48
4.2.2 การทดสอบการเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์ 49
4.3 การจำลองการถ่ายเทความร้อนหของเปลวพลาสมาด้วยโปรแกรม CFD 49
4.3.1 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมา สู่บรรยากาศโดยตรง 49
4.3.2 แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมา สู่ห้องเผาจำลอง 52

บทที่ 5 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผล

5.1 มิติของเปลวพลาสมา 56
5.2 ผลการทดสอบ 56

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

5.2.1 ผลการวัดอุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา 56

5.2.2 ผลการวัดอุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา 58

5.2.3 ผลทดสอบการเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่าง 59

5.3 ผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน 61

5.3.1 ผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยตรง 61

5.3.2 ผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนสู่ห้องเผาจำลอง 64

5.4 การเปรียบเทียบผลการทดลอง 64

5.4.1 อุณหภูมิพลาสมาของหัวเผาพลาสมาต้นแบบกับอุณหภูมิ Microwave Plasma ของ Bang, et al. (2006) 64

5.4.2 อุณหภูมิที่วัดจากจุดต่างๆ ในแนวแกน (Axial Position) ของเปลวพลาสมากับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD 66

5.4.3 อุณหภูมิที่วัดจากจุดต่างๆ ในแนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมาด้วยโปรแกรม CFD 70

5.4.4 อุณหภูมิที่วัดจากกลางห้องเผาจำลองเปรียบเทียบกับผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมาด้วยโปรแกรม CFD 74

5.5 วิเคราะห์ผล 74

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล 76

6.1.1 อุณหภูมิเปลวพลาสมา 76

6.1.2 การเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์ 77

6.2 ข้อเสนอแนะ 77

6.2.1 แนวทางการทำวิจัยต่อ 77

6.2.2 แนวทางการปรับปรุงอุปกรณ์ 77

6.2.3 ความปลอดภัย 78

บรรณานุกรม 79

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ค่าคงที่ในการคำนวณ 81

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ 83

ประวัติผู้เขียน 91

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงค่าพลังงานสลายพันธะของธาตุชนิดต่างๆ	22
2.2	แสดงค่าพลังงานไอออไนเซชันลำดับที่ 1 (IE_1) ของธาตุชนิดต่างๆ	23
4.1	รายละเอียดการกำหนดจุดเพื่อสร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยตรง	50
4.2	การกำหนดตำแหน่งเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ของแบบจำลอง สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศโดยตรง	52
4.3	รายละเอียดการกำหนดจุดเพื่อสร้างแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่ห้องเผาจำลอง	53
4.4	การกำหนดตำแหน่งเงื่อนไขขอบ(Boundary Condition) ของแบบจำลอง สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่ห้องเผาจำลอง	55
5.1	อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา	57
5.2	อุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา	58
5.3	อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) จากแบบจำลอง การถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมาสู่บรรยากาศโดยตรง	61
5.4	อุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Position) จากแบบจำลอง การถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมาสู่บรรยากาศโดยตรง	62
5.5	อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 30 A (DC)	66
5.6	อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 40 A (DC)	67

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญตาราง (ต่อ)

ตาราง **หน้า**

5.7 อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 50 A (DC) 68

5.8 อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Radial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 30 A (DC) 70

5.9 อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Radial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 40 A (DC) 71

5.10 อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Radial Position) ของเปลวพลาสมา ที่ได้จากการวัดและจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อน (CFD) เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขั้วอิเล็กโทรด 50 A (DC) 72

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	หัวเผาพลาสมาความร้อน	2
1.2	แบบโครงสร้างแหล่งกำเนิดพลาสมาแบบ ดีซี มัลติคัสพ์ (DC. Multicusp Plasma Ion Source) ประดุง สวนพุฒ (2540)	3
1.3	โครงสร้างอย่างง่ายของเครื่องกำเนิดพลาสมาโลหะชนิด MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc) เพ็ญศรี ประมุขกุล (2543)	4
1.4	แบบจำลองหัวเผาพลาสมาและพิกัดฉาก Moon et al. (2004)	6
1.5	ผลกระทบของมุมไหลเข้า(Inlet Flow Angles , β) ที่มีต่อการกระจายตัวของความเร็วก๊าซ(Velocity Distribution) ตามแนวเส้นกึ่งกลาง (centerline , $y = 0$) Moon et al. (2004)	6
1.6	ผลกระทบของมุมไหลเข้า (inlet flow angles , β) ที่มีต่อการกระจายตัวของความเร็วก๊าซ (Velocity Distribution) หน่วย m/s Moon et al. (2004)	7
1.7	Methane-Augmented Microwave Plasma Burner ของ Bang et al.(2006)	8
1.8	อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ ตามแนวแกนเปลวพลาสมาของ Bang et al. (2006)	8
1.9	อุณหภูมิที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีเปลวพลาสมาของ Bang et al. (2006)	9
1.10	Premixed Burner Configuration ของ Pilla et al. (2006)	9
2.1	ขยะอิเล็กทรอนิกส์	11
2.2	เถ้าขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านกระบวนการเผาทำลาย	13
2.3	การจับตัวของโมเลกุลในสถานะต่างๆของสสาร	14
2.4	พลาสมาที่เกิดจากก๊าซชนิดต่างๆ	14
2.5	การแตกตัวของอิเล็กตรอนจากอะตอมทำให้เกิดพลาสมา	15
2.6	การสร้างพลาสมาจากการให้พลังงานความร้อนปริมาณสูง	16
2.7	การสร้างพลาสมาจากคลื่นไมโครเวฟ	17
2.8	การสร้างพลาสมาจากสนามไฟฟ้าแรงสูง	18

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
2.9	การสร้างพลาสมาจากการอาร์ค	18
2.10	สนามไฟฟ้าที่เกิดการอาร์ค	20
3.1	หัวเผาพลาสมาต้นแบบและอุปกรณ์ต่อพ่วง	26
3.2	ส่วนประกอบสำคัญของหัวเผาพลาสมาต้นแบบ	27
3.3	ทิศทางการไหลของก๊าซภายในหัวเผา	27
3.4	แสดงสภาวะต่างๆของอากาศที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของอากาศเป็นที่ใช้ Carrier Gas	30
3.5	ส่วนประกอบที่ใช้เป็นแคโทดและหัวฉีด	37
3.6	ชุดแคโทด	38
3.7	ห้องอากาศหล่อเย็น	39
3.8	หัวเผาพลาสมาต้นแบบ	40
3.9 (ก)	หัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง	41
3.9 (ข)	หัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง	41
3.9 (ค)	หัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง	42
3.9 (ง)	หัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง	42
3.10	ส่วนประกอบของหัวเผาพลาสมาต้นแบบที่ทำการสร้าง	43
4.1	หัวเผาพลาสมาต้นแบบ	44
4.2	แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า	45
4.3	ห้องเผาจำลองที่ใช้ในการทดสอบการเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์	45
4.4	แผงวงจรคอมพิวเตอร์ที่ใช้เป็นขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างในการทดสอบประสิทธิภาพการเผาทำลายของหัวเผาพลาสมาต้นแบบ	46
4.5	เทอร์โมคอปเปิลชนิด เค (Thermocouple K- Type) ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมา	46

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
4.6	เครื่องอ่านอุณหภูมิระบบดิจิตอล ยี่ห้อ FLUKE 51 J/K ที่ใช้ในการอ่านค่าอุณหภูมิ	47
4.7	แสดงวิธีการวัดอุณหภูมิเปลวพลาสมาโดยใช้เทอร์โมคอปเปิล (Thermocouple)	47
4.8	แสดงการวัดค่าอุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมาที่ระยะต่างๆ	48
4.9	แสดงการวัดค่าอุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Position) ตั้งฉากกับแกนกลางเปลวพลาสมาที่ระยะต่างๆ	49
4.10	แบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนของเปลวพลาสมาสู่บรรยากาศโดยตรง	50
4.11	การสร้าง grid ในแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศโดยตรง	51
4.12	แบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่ห้องเผาจำลอง	53
4.13	การสร้าง grid ในแบบจำลองการไหลแบบ 2 มิติ ในพิกัด (x,y) สำหรับกรณีการถ่ายเทความร้อนสู่ห้องเผาจำลอง	54
5.1	ขนาดของเปลวพลาสมาในแนวแกน(Axial Position) และแนวรัศมี (Radial Position)	56
5.2	อุณหภูมิในแนวแกนกลาง (Axial Position) ของเปลวพลาสมา	57
5.3	อุณหภูมิในแนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา	59
5.4	ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างก่อนการเผาทำลาย	60
5.5	ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างที่มีการแปรสภาพหลังการเผาทำลาย 25 วินาที	60
5.6	ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างที่มีการแปรสภาพหลังการเผาทำลาย 1 นาที	60
5.7	ขยะอิเล็กทรอนิกส์ตัวอย่างที่มีการแปรสภาพหลังการเผาทำลาย 2 นาที	61

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป		หน้า
5.8	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 30 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	62
5.9	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 40 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	63
5.10	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 50 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	63
5.11	แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในห้องเผาจำลองด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 50 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	64
5.12	อุณหภูมิที่วัดได้ในแนวแกน (Axial Position) ของเปลวพลาสมาจากหัวเผาต้นแบบกับอุณหภูมิ Microwave Plasma ของ Bang et al. (2006)	65
5.13	อุณหภูมิที่วัดได้ในแนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมาจากหัวเผาต้นแบบกับอุณหภูมิ Microwave Plasma ของ Bang et al. (2006)	65
5.14	อุณหภูมิที่วัดได้ในแนวแกน (Axial Position) ของเปลวพลาสมากับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 30 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	67
5.15	อุณหภูมิที่วัดได้ในแนวแกน (Axial Position) ของเปลวพลาสมากับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 40 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	68
5.16	อุณหภูมิที่วัดได้ในแนวแกน (Axial Position) ของเปลวพลาสมากับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 50 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด	69

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สารบาญภาพ (ต่อ)

รูป **หน้า**

5.17 อุณหภูมิที่วัดได้แนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา กับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 30 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด 71

5.18 อุณหภูมิที่วัดได้แนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา กับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 40 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด 72

5.19 อุณหภูมิที่วัดได้แนวรัศมี (Radial Position) ของเปลวพลาสมา กับผลจากแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนด้วยโปรแกรม CFD เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้า 50 A (DC) ให้กับขั้วอิเล็กโทรด 73

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
A	พ.ท.หน้าตัด nozzle	m^2
A, B	ค่าคงที่ของก๊าซ	
AC	ไฟฟ้ากระแสสลับ	A
CFD	โปรแกรมวิเคราะห์ของไหล (Computational Fluid Dynamic)	
d	ระยะห่างระหว่างขั้วแคโทด	cm
D	เส้นผ่านศูนย์กลาง nozzle	m
DC	ไฟฟ้ากระแสตรง	A
E_{max}	สนามไฟฟ้าสูงสุด	V/m
E	พลังงานสลายพันธะ	J
g	คือ ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงของโลก	m/s^2
IE	พลังงานไอออไนเซชัน	J
K	ค่าการนำความร้อน	W/m-K
L	ระยะในการวัดอุณหภูมิ	m
p	ความดันก๊าซ	Torr
P	ความดันของอากาศ	Pa
$\dot{q}$	อัตราความร้อน	W/m^3
T	อุณหภูมิ	°C
V	ความเร็วของอากาศ	m/s
V_b	แรงดันไฟฟ้าเบรกดาวน์	V
V_{max}	แรงดันไฟฟ้าสูงสุด	V
Z	ความสูง	m
Γ	ค่าสัมประสิทธิ์ของแคโทดชนิดต่างๆ	

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

อักษรย่อและสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
η	ประสิทธิภาพของสนามไฟฟ้า	
ρ	ความหนาแน่นของของไหล	kg/m^3
μ	ค่าความหนืดของของไหล	kg/m.s

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved